

Tamara Bimesmeier, Karin Gruhler, Clemens Deilmann
Jan Reichenbach, Sonja Steinmetzer

Sekundärstoffe aus dem Hochbau

Energie- und Materialflüsse entlang der Herstellung
und des Einsatzortes von Sekundärstoffen aus dem
Hochbau für den Baubereich

F 3184

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0482-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

SEROBAU – Energie- und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärstoffen aus dem Hochbau für den Baubereich

**Endbericht
Stand 26. Juni 2019**

Forschungsprogramm
Zukunft Bau

Projektlaufzeit
01. September 2017 bis 30. April 2019

Aktenzeichen
10.08.18.7-17.45

Autoren:

Tamara Bimesmeier, Karin Gruhler, Prof. Clemens Deilmann, (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden)

Jan Reichenbach, Sonja Steinmetzer (INTECUS GmbH – Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Dresden)

Das Projekt wurde zu 60 % aus Mitteln des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen einer Forschungszuwendung gefördert. Inhaltliche Projektbegleitung: Claus Asam (BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) und Forschungsprojektkoordination: Fabian Brodbeck (Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau). Der Eigenanteil des Auftragnehmers betrug 30 % zuzüglich 10 % Industrieverbandsbeteiligung. Die inhaltliche Verantwortung des Projekts liegt bei den Autoren.



Leibniz-Institut
für ökologische
Raumentwicklung



Abstract

In Germany, the German Resource Efficiency Programme "ProgRess I" and "ProgRess II" formulated the goals of decoupling resource consumption from economic growth, doubling raw material productivity by 2020, reducing the environmental impacts associated with the use of natural resources as far as possible and further developing and expanding the circular economy (BMUB 2016). In order to enable almost circular economic activity in the construction sector, the corresponding demolition materials must be recyclable and be available with a certain consistency in specific quantities. Resource conservation potentials using secondary materials expressed in tonnes are known for some selected construction product groups (Deilmann et al. 2014 and 2017). However, an assessment of the resource conservation potentials only on the basis of these figures in tonnes is too one-sided, as energy aspects are not taken into account. The aim of the present study was therefore to extend the quantity-oriented studies on resource conservation potentials to include energy considerations and to develop a synoptic approach by which important building products can be presented and compared in a synoptic way with regard to their energy expenditure during recycling.

Methodologically, a consistent balancing framework has been developed which allows an equivalent analysis of all ten construction product groups - concrete, bricks, sand-lime bricks, gypsum, flat glass, mineral insulation materials, plastic profiles, other plastics, petroleum-based insulation materials and construction timber. For each group, instructive examples were analysed in the form of characteristic "continuous" process chains from the deconstruction material to the application alternative and then elaborated in three steps: (1) From deconstruction material to secondary material, (2) From secondary material to substitute and (3) Comparison of substitute and primary material.

The investigations have shown that recycling is generally associated with lower energy costs than the provision of primary materials. There are clear differences between mineral materials and plastics. In the case of plastics, the energy aspect plays a more decisive role. In the case of mineral materials, recycling makes sense above all with regard to the mass aspect, as recycling reduces the degradation of raw materials and protects the natural environment and landscape. In addition, it has been shown that the recycling process chains have to be considered until the functional equivalence of the substitute is reached or until the point of use is reached. Only by considering the differences (recipe, processing steps and transports) between the standard production process and the production of building products with recycled content statements about the energetic advantages or disadvantages of recycling can be made.

The exploratory study successfully revealed gaps in knowledge and identified fields of problems. For example, the assumption that transports make a significant and not negligible contribution to the energy consumption of recycling and primary material production has been confirmed. Since the information and data situation here is still very precarious, it is recommended to carry out further research.

In principle, the studies showed once again that recycling must be further promoted against the background of resource conservation goals and that the necessary prerequisites should be further improved.

Kurzzusammenfassung

In Deutschland wurden mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm „ProgRess I“ und „ProgRess II“ die Ziele formuliert, den Ressourcenverbrauch vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln, die Rohstoffproduktivität bis 2020 zu verdoppeln, die mit der Nutzung natürlicher Ressourcen verbundenen Umweltbelastungen weitestgehend zu reduzieren, sowie die Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln und auszubauen (BMUB 2016). Um im Baubereich ein annähernd kreislaufwirtschaftliches Wirtschaften zu ermöglichen, müssen die entsprechenden Abbruchmaterialien recyclingfähig sein und mit einer gewissen Konstanz in bestimmten Mengen anfallen. Ressourcenschonungspotenziale durch Sekundärstoffe als Massenangaben in Tonnen sind für ausgewählte Bauproduktgruppen bekannt (Deilmann et al. 2014 und 2017). Eine Beurteilung der Ressourcenschonungspotenziale nur auf Basis dieser Angaben in Tonnen ist jedoch zu einseitig, da energetische Aspekte unberücksichtigt bleiben. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die mengenorientierten Untersuchungen zu Ressourcenschonungspotenzialen um energetische Betrachtungen zu erweitern und dafür einen Untersuchungsansatz zu entwickeln, mit dem sich wichtige Bauprodukte bezüglich ihres energetischen Aufwandes beim Recycling synoptisch darstellen und vergleichen lassen.

Methodisch wurde ein einheitlicher Bilanzrahmen entwickelt, der eine gleichwertige Bearbeitung aller zehn Bauproduktgruppen – Beton, Ziegel, Kalksandstein, Gips, Flachglas, mineralische Dämmstoffe, Kunststoffprofile, sonstige Kunststoffe, erdölbasierte Dämmstoffe und Bauholz – ermöglicht. Für jede Gruppe wurden instruktive Beispiele in Form charakteristischer „durchgängiger“ Prozessketten vom Rückbaumaterial bis zur Einsatzvariante analysiert und in drei Schritten bearbeitet: (1) Vom Rückbaumaterial zum Sekundärstoff, (2) Vom Sekundärstoff zum Substitut und (3) Gegenüberstellung von Substitut und Primärstoff.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Recycling i. d. R. mit einem niedrigeren energetischen Aufwand verbunden ist als die Bereitstellung von Primärstoffen. Dabei zeigen sich zwischen den mineralischen Materialien und den Kunststoffen deutliche Unterschiede. Bei den Kunststoffen spielt der energetische Aspekt eine entscheidendere Rolle. Bei den mineralischen Materialien ist ein Recycling vor allem hinsichtlich des Masseaspekts sinnvoll, da dadurch der Rohstoffabbau reduziert und Natur- bzw. Landschaftsraum geschont werden. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Recyclingprozessketten bis zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz des Substituts bzw. bis zum Einsatzort gedacht werden müssen. Erst unter Berücksichtigung der Unterschiede (Rezeptur, Verfahrensschritte, Transporte) zwischen dem Standardherstellungsprozess und der Herstellung von Bauprodukten mit RC-Anteilen können Aussagen über die energetischen Vor- oder Nachteile von Recycling getroffen werden.

Durch die Sondierungsstudie konnten erfolgreich Wissenslücken und Problemfelder aufgedeckt werden. So hat sich beispielsweise die Vermutung verfestigt, dass Transporte einen wesentlichen und nicht vernachlässigbaren Beitrag zum Energieaufwand von Recycling und Primärstoffgewinnung leisten. Da hier die Informations- und Datenlage noch sehr prekär ist, wird empfohlen, weitere Forschungen anzustellen.

Grundsätzlich haben die Untersuchungen erneut verdeutlicht, dass das Recycling vor dem Hintergrund von Ressourcenschonungszielen weiter gefördert werden muss und die notwendigen Grundvoraussetzungen weiter verbessert werden sollten.

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	2
KURZZUSAMMENFASSUNG	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	10
1. EINFÜHRUNG	12
2. BETRACHTUNGSRAHMEN UND METHODISCHES VORGEHEN	14
2.1 RESSOURCENSCHONUNGSPOTENZIALE DURCH RECYCLING	14
2.2 GRUNDANNAHMEN UND BILANZRAHMEN	15
2.3 METHODISCHES VORGEHEN	20
2.3.1 <i>Struktur der Analyse</i>	20
2.3.2 <i>Erläuterung der Analyseschritte</i>	21
2.3.3 <i>Einheitliche Dokumentation der ausgewählten Bauproduktgruppen</i>	28
3. SEKUNDÄRSTOFFGEWINNUNG DER ZEHN BAUPRODUKTGRUPPEN VOM RÜCKBAUMATERIAL BIS ZUM SUBSTITUT	29
3.1 BETON	29
3.1.1 <i>Allgemeines zur Baustoffgruppe Beton</i>	29
3.1.2 <i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	30
3.1.3 <i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	32
3.1.4 <i>Fazit</i>	43
3.2 ZIEGEL	45
3.2.1 <i>Allgemeines zur Baustoffgruppe Ziegel</i>	45
3.2.2 <i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	45
3.2.3 <i>Energetische Bewertung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	51
3.2.4 <i>Fazit</i>	64
3.3 KALKSANDSTEIN	65
3.3.1 <i>Allgemeines zur Baustoffgruppe Kalksandstein</i>	65
3.3.2 <i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	65
3.3.3 <i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	69
3.3.4 <i>Fazit</i>	78
3.4 GIPS	80
3.4.1 <i>Allgemeines zur Baustoffgruppe Gips</i>	80
3.4.2 <i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	80
3.4.3 <i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	84
3.4.4 <i>Fazit</i>	91
3.5 FLACHGLAS	93
3.5.1 <i>Allgemeines zur Baustoffgruppe Flachglas</i>	93
3.5.2 <i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	93
3.5.3 <i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	97
3.5.4 <i>Fazit</i>	103
3.6 MINERALISCHE DÄMMSTOFFE	104
3.6.1 <i>Allgemeines zur Baustoffgruppe Mineralische Dämmstoffe</i>	104
3.6.2 <i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	105
3.6.3 <i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	106
3.6.4 <i>Fazit</i>	114

3.7	PVC-PROFILE	115
3.7.1	<i>Allgemeines zum PVC Recycling</i>	115
3.7.2	<i>Allgemeines zur Baustoffgruppe PVC-Profile</i>	115
3.7.3	<i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	116
3.7.4	<i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	118
3.7.5	<i>Fazit</i>	124
3.8	PVC-BODENBELÄGE	125
3.8.1	<i>Allgemeines zur Baustoffgruppe PVC-Bodenbeläge</i>	125
3.8.2	<i>Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	125
3.8.3	<i>Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz</i>	127
3.8.4	<i>Fazit</i>	133
3.9	ERDÖLBASIERENDE DÄMMSTOFFE	134
3.10	BAUHOLZ.....	136
3.11	ZUSAMMENSCHAU DER ANALYSEERGEBNISSE DER BETRACHTETEN BAUPRODUKTGRUPPEN	139
4.	STOFFLICHER UND ENERGETISCHER AUFWAND VON RECYCLING – HOCHRECHNUNGEN FÜR DEUTSCHLAND	143
5.	DISKUSSION UND AUSBLICK	151
6.	LITERATUR	154
7.	ANHANG	161
7.1	FLUSSBILDER ZU DEN UNTERSUCHTEN PROZESSKETTEN	1
7.2	BERECHNUNGSGRUNDLAGEN DER ENERGIEKENNWERTE ZUR HERSTELLUNG VON PRIMÄRSTOFFEN	71
7.2.1	<i>Beton</i>	71
7.2.2	<i>Ziegel</i>	78
7.2.3	<i>Kalksandstein</i>	84
7.2.4	<i>Flachglas</i>	85
7.2.5	<i>Gips</i>	86
7.2.6	<i>PVC</i>	90
7.2.7	<i>Steinwolle</i>	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Phasen des Lebenszyklus' von Bauwerken und die relevanten Module für den in dieser Studie vorgenommenen energetischen Vergleich auf Materialebene, in Anlehnung an die DIN EN 15804.	17
Abbildung 2-2: Bestimmung instruktiver Prozessketten.	18
Abbildung 2-3: Bilanzrahmen der Studie in Anlehnung an die DIN EN 15804.	19
Abbildung 2-4: Methodisches Vorgehen - drei Hauptschritte.	21
Abbildung 2-5: Methodisches Vorgehen Schritt 1 – Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton).	22
Abbildung 2-6: Berechnung des mittleren Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs unter Berücksichtigung von Bandbreiten und Energieallokationen durch Materialausschleusungen (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton).	24
Abbildung 2-7: Methodisches Vorgehen Schritt 2 – Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton).	25
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Transportwege (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort) von Standard- und RC-Produkt.	26
Abbildung 2-9: Methodisches Vorgehen Schritt 3 – Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton).	27
Abbildung 2-10: Einheitliche Dokumentation der ausgewählten Bauproduktgruppen – Bauprodukt-„Steckbrief“.	28
Abbildung 3-1: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Beton.	30
Abbildung 3-2: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).	33
Abbildung 3-3: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).	34
Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).	36
Abbildung 3-5: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton).	37
Abbildung 3-6: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton).	38
Abbildung 3-7: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton).	39
Abbildung 3-8: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton).	40
Abbildung 3-9: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton).	41
Abbildung 3-10: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton).	42
Abbildung 3-11: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Beton.	43
Abbildung 3-12: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Ziegel.	46
Abbildung 3-13: Schichtenfolge von Tennenflächen (Abbildung aus DIN EN 18035-5:2007-08).	48
Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau und Unterschiede von Intensiv und Extensivbegrünungen auf Dächern (Zinco 2018).	50
Abbildung 3-15: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel).	52
Abbildung 3-16: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel).	53

Abbildung 3-17: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel).	54
Abbildung 3-18: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel)	55
Abbildung 3-19: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel).	56
Abbildung 3-20: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel).	57
Abbildung 3-21: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel).	58
Abbildung 3-22: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel).	59
Abbildung 3-23: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel).	60
Abbildung 3-24: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel).	61
Abbildung 3-25: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel).	62
Abbildung 3-26: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel).	63
Abbildung 3-27: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Ziegel.	64
Abbildung 3-28: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Kalksandstein.	66
Abbildung 3-29: Vereinfachtes Schema der Herstellung von Kalksandsteinen (Abbildung aus Müller, 2018).	67
Abbildung 3-30: Stoffwechsel von Methan durch aerobe methanotrophe BakterienEnzyme (1: Methan-Monooxygenase (MMO); 2: Methanol-Dehydrogenase; 3: Formaldehyd-Dehydrogenase; 4: Formiat-Dehydrogenase). (© Eden, 2010)	69
Abbildung 3-31: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	70
Abbildung 3-32: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	71
Abbildung 3-33: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	72
Abbildung 3-34: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	73
Abbildung 3-35: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	74
Abbildung 3-36: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung.	75
Abbildung 3-37: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S3-E3, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	76
Abbildung 3-38: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S3-E3, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	77
Abbildung 3-39: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Kalksandstein.	78
Abbildung 3-40: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Gips.	81
Abbildung 3-41: Verfahrensschema der Aufbereitung von Gipsplattenabfällen (Abbildung aus Zingk, 2009).	82
Abbildung 3-42: Schematische Darstellung einer Produktionsanlage für Gipskartonplatten (Abbildung aus Bundesverband der Gipsindustrie e.V., 2013).	83

Abbildung 3-43: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Gips).	85
Abbildung 3-44: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Gips).	86
Abbildung 3-45: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Gips).	87
Abbildung 3-46: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S1-E2, Bauproduktgruppe Gips).	88
Abbildung 3-47: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S1-E2, Bauproduktgruppe Gips).	89
Abbildung 3-48: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung.	90
Abbildung 3-49: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Gips.	91
Abbildung 3-50: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Flachglas.	94
Abbildung 3-51: Energieverbrauch von Behälterglasöfen in Abhängigkeit vom Glasscherbenanteil in der Charge (Abbildung aus Beerens et al., 2001).	95
Abbildung 3-52: Schematische Darstellung des Produktionsprozesses von Schaumglas (Abbildung aus Pittsburgh Corning Europe NV, 2015).	97
Abbildung 3-53: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Bauproduktgruppe Flachglas).	98
Abbildung 3-54: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Flachglas).	99
Abbildung 3-55: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Flachglas).	100
Abbildung 3-56: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E2, Bauproduktgruppe Flachglas).	101
Abbildung 3-57: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E2, Bauproduktgruppe Flachglas).	102
Abbildung 3-58: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Flachglas.	103
Abbildung 3-59: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe.	105
Abbildung 3-60: Herstellungsprozess von Steinwolle (© ROCKWOOL).	106
Abbildung 3-61: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe).	107
Abbildung 3-62: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe).	108
Abbildung 3-63: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe).	110
Abbildung 3-64: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe)	111
Abbildung 3-65: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe).	112
Abbildung 3-66: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe).	113
Abbildung 3-67: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe mineralische Dämmstoffe.	114
Abbildung 3-68: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).	116
Abbildung 3-69: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von PVC-Produkten (Abbildung aus Baitz et al., 2004).	117

Abbildung 3-70: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).	119
Abbildung 3-71: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).	120
Abbildung 3-72: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).	121
Abbildung 3-73: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile.	122
Abbildung 3-74: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile.	123
Abbildung 3-75: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).	124
Abbildung 3-76: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	126
Abbildung 3-77: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	128
Abbildung 3-78: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	129
Abbildung 3-79: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	130
Abbildung 3-80: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	131
Abbildung 3-81: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	132
Abbildung 3-82: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	133
Abbildung 3-83: CreaSolv ® - Lösungsmittelbasiertes Recycling von EPS-Bauabfällen.	136
Abbildung 3-84: Energiebedarfe in MJ/kg – Prozessketten der Bauproduktgruppen im Vergleich.	142
Abbildung 4-1: Material-Output und -Input sowie Recycling-Beimengungen mit Korrekturen – Deutschland.	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bestandteile und Anteile von rezyklierten Gesteinskörnungen zum Einsatz als Zuschlagstoff in RC-Beton nach DIN EN 12620:2008-07 in Verbindung mit DIN 4226-101 und DIN 4226-102 (Tabelle aus WECOBIS, 2018).	30
Tabelle 3-2: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).	34
Tabelle 3-4: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton).	38
Tabelle 3-5: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton).	41
Tabelle 3-6: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von Recycling-Baustoffen im Anteil > 4 mm gemäß Technischer Regelwerke im Straßenbau der FGSV und deren länderspezifischen Ergänzungen.	47
Tabelle 3-7: Einbauklassen und Zuordnungswerte nach LAGA 20 (2003).	47
Tabelle 3-9: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel).	53
Tabelle 3-10: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel).	56
Tabelle 3-11: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel).	59
Tabelle 3-12: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel).	62
Tabelle 3-14: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe Kalksandstein.	71
Tabelle 3-15: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	74
Tabelle 3-16: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S3-E3, Bauproduktgruppe Kalksandstein).	77
Tabelle 3-17: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe Gips.	85
Tabelle 3-18: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S1-E2, Bauproduktgruppe Gips).	88
Tabelle 3-20: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe Flachglas.	99
Tabelle 3-21: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe min. Dämmstoffe.	108

Tabelle 3-23: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe min. Dämmstoffe.	111
Tabelle 3-24: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).	120
Tabelle 3-25: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.	129
Tabelle 3-27: Instruktive Prozessketten der Bauproduktgruppen und ihre Energieaufwendungen für entsprechende Sekundärstoffe, Substitute und funktional äquivalente Primärstoffe.	139

1. Einführung

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis einer Sondierungsstudie, die sich insbesondere dem Aspekt der energetischen Aufwendungen im Zuge der Kreislaufführung im Bausektor widmet. Dabei werden die Herstellung und unterschiedlichen Verwendungen von baustämmigen Sekundärstoffen unter Betrachtung der jeweilig vollzogenen Schritte zur Aufbereitung und der dabei konsumierten Energie analysiert. Dies erfordert u. a. eine Auseinandersetzung mit folgenden Fragen:

- Auf welcher Basis lassen sich die möglichen Pfade vom Rückbaumaterial bis zum neuen Einsatzort im Bausektor vergleichend nebeneinanderstellen?
- Was sind beispielhafte Einsatzvarianten für Sekundärstoffe aus Abbruchmaterial, und mit welchen Anforderungen sind diese verbunden?
- Wo kommt es im Zuge der Realisierung dieser Anforderungen zu welchem energetischen Aufwand, und welche Möglichkeiten sowie Grenzen, diesen zu ermitteln und darzustellen, bestehen?
- Wie lassen sich Ansätze der Kreislaufführung unter Berücksichtigung des Verwendungsfalles bewerten (Verknüpfungen zwischen Stoff- und Energieflüssen erzeugen)?

Entlang von zehn, in einem Vorläuferprojekt bereits aus einer Materialflussperspektive betrachteten Bauproduktgruppen wird den vorgenannten Aspekten nachgegangen.

Für die ausgewählten Bauproduktgruppen wurden mögliche Prozessketten, vom Rückbaumaterial über das Ersatz- bzw. Sekundärmaterial bis hin zum erneuten Einsatz nachgezeichnet und aus energetischer Perspektive betrachtet. Experten aus den jeweiligen Fachverbänden, Forschung, Unternehmen und Politik waren in diesen Prozess eingebunden. Mit diesen wurden in zwei Workshops gängige Recyclingwege und Einsatzorte (instruktive Prozessketten) aus der Praxis diskutiert und qualifiziert. Darüber hinaus arbeiteten die Experten in bilateraler Abstimmung aktiv an der Beschreibung und Ausdifferenzierung der sie betreffenden instruktiven Prozessketten mittels Hinweisen und Empfehlungen zu Kennwerten, kontrollierten Prozessschritten sowie Definitionen, Annahmen und Festlegungen mit. Für diese konstruktive und aufgeschlossene Zusammenarbeit möchte sich das Projektteam herzlich bedanken. Sie hat maßgeblich zu den Ergebnissen der hier vorgestellten Sondierungsstudie beigetragen. Unser Dank gilt speziell (in alphabetischer Reihenfolge):

- Claus Asam (BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung),
- Norbert Buddendick (Fachvereinigung Extruderschaumstoff e. V.),
- Dr. Jörg Demmich (Knauf Gips KG, Bundesverband Gipsindustrie),
- Dr. Wolfgang Eden (Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V.),
- Diana Fischer (Ingenieurbüro Fischer, Deutsche Rockwool GmbH Co. KG),
- Susanne Funk (MIRO Bundesverband Mineralische Rohstoffe),
- Jochen Grönegräs (Bundesverband Flachglas e. V.),
- Thomas Hülsmann (Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e. V. (AGPU)),
- Dr. Hans-Jörg Kersten (Bundesverband Gipsindustrie),
- Markus Klein (Deutsche Rockwool GmbH Co. KG),

- Peter Meinschmidt (Fraunhofer-Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)),
- Dieter Rosen (Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie e. V.),
- Dr. Berthold Schäfer (BBS Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V.),
- Dr. Karin Weimann (BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung),
- Dr. Jochen Zimmermann (AgPR Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling).

Die hier vorgestellte Sondierungsstudie ist in fünf Kapitel unterteilt. Nach der Einführung wird im zweiten Kapitel hauptsächlich das methodische Vorgehen beschrieben. Nach einer generellen Einordnung des Themas Ressourcenschonungspotenziale durch Recycling sowie der Benennung der im Fokus stehenden Bauproduktgruppen wird die dreistufige Herangehensweise dargelegt. Gleichfalls werden notwendige Definitionen und der Bilanzrahmen sowie die erforderlichen Abgrenzungen (insbesondere auch mit Blick auf die DIN EN 15804) diskutiert. Das dritte Kapitel, der Hauptteil der Sondierungsstudie, widmet sich der Analyse der zehn ausgewählten Bauproduktgruppen. Ihre Pfadabhängigkeiten werden in Form von instruktiven Prozessketten vom Abbruchmaterial über das Substitut bis hin zur Einsatzvariante vorgestellt und quantitativ sowie qualitativ beschrieben. Im Ergebnis werden energetische Aufwendungen in MJ/kg für alle Bauproduktgruppen und instruktiven Prozessketten in einer Zusammenschau dargestellt. Das vierte Kapitel widmet sich in Anlehnung an Deilmann et al. 2014 Hochrechnungen für Deutschland. In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen, die stofflichen Ressourcenschonungspotenziale der Sekundärstoffbereitstellung aus dem Vorgängerprojekt den entsprechenden energetischen Aufwendungen gegenüberzustellen. Im fünften Kapitel werden Problemfelder und weitere Forschungsbedarfe diskutiert sowie die Ergebnisse zusammengefasst.

2. Betrachtungsrahmen und Methodisches Vorgehen

2.1 Ressourcenschonungspotenziale durch Recycling

In Deutschland wurde mit dem Anfang 2012 beschlossenen Deutschen Ressourceneffizienzprogramm „ProgRess“ ein wichtiges Ziel formuliert, den Ressourcenverbrauch vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln und die Rohstoffproduktivität bis 2020 zu verdoppeln. Das Ressourceneffizienzprogramm soll die Nutzung natürlicher Ressourcen nachhaltig gestalten und die damit verbundenen Umweltbelastungen weitestgehend reduzieren. 2016 hat die Bundesregierung eine Weiterentwicklung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) beschlossen. Gemäß einer der vier Leitlinien von ProgRess II sollen Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger gemacht sowie die Kreislaufwirtschaft weiterentwickelt und ausgebaut werden (BMUB 2016). Im Baubereich bedeutet dies, dass Abbruchmaterialien gezielt wiederverwendet und verwertet werden sollen. Hier ist zu prüfen, wie das erfolgen kann.

Ordnungspolitisch ist es möglich, durch Bestimmungen über eine spezielle Vorgehensweise der Erfassung von Abfallprodukten und Prioritäten zum weiteren Umgang für die längere bzw. die mehrfache Nutzung von verarbeiteten Rohstoffen und deren erneute Verwendung zu sorgen. Stichwortgebend hierfür sind die Pflichten der Getrennthaltung und die getrennte Sammlung von unterschiedlichen Materialfraktionen sowie Vorgänge von Wiederverwendung, Recycling und Verwertung, welche die Prioritätenreihenfolge der Abfallhierarchie spiegeln. Als wichtige Hebel sieht dafür das Kreislaufwirtschaftsrecht (u. a. konkretisiert durch Kreislaufwirtschaftsgesetz, Gewerbeabfallverordnung, Altholzverordnung) beispielsweise die Getrennterfassung bestimmter Abfälle, Vermischungsverbote, Vorsortierungsgebote und Recyclingmindestquoten vor. Zunehmend rückt auch das nachhaltige Design oder Design-for-Recycling von Produkten in den Blickpunkt. Die Vorgabe genauer Verwertungswege wurde bisher vermieden, da hier Marktbelange notwendigerweise zu berücksichtigen sind und hinsichtlich des ökobilanziellen Nutzens keine Eindeutigkeit bestand. Schlussendlich würde es der Idee des Ressourcenschutzes zuwiderlaufen, den Recyclingerfolg mit unvertretbarem Aufwand und entgegen aller Marktvernunft zu erzwingen. Die Priorität, welche dem Ansatz, Rohstoffe möglichst lange und oft werkstofflich wieder bzw. weiter zu nutzen, zugemessen wird, ist inzwischen allerdings auch in der Praxis im Wachsen und vielfach ökobilanziell belegt. Innerhalb dieses Ansatzes setzt sich allerdings die Auseinandersetzung darüber fort, inwieweit auch noch eine Einstufung nach Wertigkeit des Rohstoffwiedereinsatzes erfolgen sollte und es gerechtfertigt ist, zwischen einem Up- und Downcycling zu unterscheiden.

Um im Baubereich ein annähernd kreisläufiges Wirtschaften zu ermöglichen, müssen die entsprechenden Abbruchmaterialien recyclingfähig sein und mit einer gewissen Konstanz in bestimmten Mengen anfallen. Des Weiteren sind Schritte notwendig, sie qualitativ so aufzubereiten, dass Weiternutzung oder Wiedereinsatz sicher erfolgen können. Beim Aufbereiten entstehen Materialverluste in unterschiedlicher Größenordnung. Über all dies existiert inzwischen ein relativ guter Überblick und Wissens- und Erkenntnisstand (siehe z. B. Schiller et al. 2010). Demgegenüber wurde der Energieaufwand, der für die Herstellung von Sekundärstoffen für unterschiedliche Einsatzvarianten aufzubringen ist, bisher noch nicht in der Breite dargelegt sowie hinterfragt. Zwar gibt es Einzelstudien, die sich, fokussiert auf spezielle einzelne Bauprodukte, dem Energieaufwand beim Recycling widmen (UBA 2017). Ein umfassender Überblick über alle wichtigen Bauprodukte liegt jedoch nicht vor. Es fehlt ein Untersuchungsansatz, mit dem sich wichtige Bauprodukte bezüglich ihres energetischen Aufwandes beim Recycling synoptisch darstellen und vergleichen lassen. An dieser Problematik setzt die Sondierungsstudie an.

Ressourcenschonungspotenziale durch Sekundärstoffe als Massenangaben in Tonnen sind für ausgewählte Bauproduktgruppen bekannt (Deilmann et al. 2014 und 2017). Eine Beurteilung der Ressourcenschonungspotenziale nur auf Basis dieser Angaben in Tonnen ist zu einseitig, da energetische Aspekte unberücksichtigt bleiben. Ziel der Untersuchungen ist es daher, die mengenorientierten Untersuchungen zu Ressourcenschonungspotenzialen um energetische Betrachtungen zu erweitern und dafür einen synoptischen Untersuchungsansatz zu entwickeln. Betrachtet werden zehn Bauproduktgruppen: (1) Beton, (2) Ziegel, (3) Kalksandstein, (4) Gipskarton, (5) Bauholz, (6) Flachglas, (7) mineralische Dämmstoffe, (8) erdölbasierte Dämmstoffe, (9) Kunststoffprofile, (10) sonstige Kunststoffe. Für diese Bauprodukte werden die Herstellung von Sekundärstoffen aus Rückbaumaterialien aus dem Hochbau sowie deren Weiterverarbeitung bis zur neuen Einsatzvariante im Hoch-, Tief-, Ingenieur-, Straßenbau untersucht. Berücksichtigt werden dabei die Güte des Abbruchmaterials sowie die bei der zukünftigen Einsatzvariante geforderten Qualitätsanforderungen.

2.2 Grundannahmen und Bilanzrahmen

Um die zehn Bauproduktgruppen bezüglich ihres energetischen Aufwandes beim Recycling synoptisch darstellen und vergleichen zu können, ist in erster Linie die Festlegung eines einheitlichen Betrachtungsrahmens notwendig. Dazu müssen Begriffe geklärt sowie erforderliche Abgrenzungen, Annahmen und Festlegungen getroffen werden. Beides erfolgte in Diskussion und Abstimmung mit den Fachexperten.

Beschreibung des Bilanzrahmens

In Hinblick auf das Ziel, den Energieaufwand zur Herstellung eines Substituts mit jenem zur Primärstoffherstellung zu vergleichen, müssen für die Berechnung der jeweiligen Energiekennwerte klar umrissene Bilanzrahmen geschaffen werden. Vergleiche sind erstens nur auf Materialebene sinnvoll, müssen aber zweitens Unterschiede in der Weiterverarbeitung bis zum Bauprodukt bzw. der Einsatzvariante integrieren. Da Energieaufwandswerte für die Primärstoffherstellung auf dem Phasenmodell der DIN EN 15804 beruhen, wurde diese Quelle auch für die Definition des Betrachtungsrahmens zur Berechnung des Energieaufwands für die Substitutherstellung herangezogen.

In EPDs auf Materialebene ist nur die Herstellungsphase (A1-3) von der Wiege bis zum Werkstor auszuweisen. Die Errichtungsphase (Modul A4-5), die Nutzungsphase (B1-7), sowie die Entsorgungsphase (C1-4) können nur auf Bauwerks- oder Bauproduktebene quantifiziert werden. Analog wird dies für Sekundärstoffe in dieser Studie gehandhabt.

Für die Ermittlung des Energieaufwandswertes für die Primärstoffherstellung erfolgen keine Neuberechnungen oder Ökobilanzierungen. Es sollte die DIN EN 15804 konforme Sekundärquelle Ökobaudat herangezogen und die darin gelisteten Indikatoren „Total erneuerbare Primärenergie“ (PERT) und „Total nicht erneuerbare Primärenergie“ (PENRT) für das Modul A addiert werden (Summe aus A1: Rohstoffbereitstellung, A2: werksinterne Transporte und A3: Herstellung). Indirekte Energieaufwände bzw. graue Energie (z. B. Herstellung von Anlagen) werden darin nicht bilanziert. Transporte zu weiterverarbeitenden Unternehmen (z. B. vom Kieswerk zum Betonwerk) werden Modul A4 zugerechnet und nicht in den Modulen A1-3 berücksichtigt. In Fällen, in denen in der Ökobaudat keine, zu undifferenzierte oder angezweifelte Energiekennwerte zu finden waren, wurde auf Vergleichswerte aus anderen DIN EN 15804 konformen Sekundärquellen (EPDs, GaBi, ecoinvent) zurückgegriffen.

Die Untersuchungen der Sondierungsstudie zur Berechnung des energetischen Herstellungsaufwands von Sekundärstoffen und weiter von Substituten¹ beginnen mit der Bereitstellung des Abbruchmaterials beim Recycling-Unternehmen. Der gewählte Bilanzrahmen setzt mit Blick auf die DIN EN 15804 am Schritt Abfallbehandlung (C3) des voranstehenden Produktsystems „Bauwerk“ an. In Abs. 6.3.4.5 Anmerkung 3 wird erläutert, dass „im Fall von Stoffen, die das System [Bauwerk] als Sekundärstoffe oder -brennstoffe verlassen, [...] Prozesse wie Sammlung und Transport vor dem Erreichen „des Endes der Abfalleigenschaft“ in der Regel Teil der Abfallbehandlung des untersuchten Produktsystems [„Bauwerk“ sind]. Es kann jedoch sein, dass nach Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft weitere Prozesse erforderlich sind, damit Primärstoffe oder -brennstoffe in einem anderen Produktsystem ersetzt werden können. Solche Prozesse werden dann als außerhalb der Systemgrenzen [des voranstehenden Systems „Bauwerk“] liegend angesehen“ (DIN EN 15804:2014-07 Abs. 6.3.4.5 Anmerkung 3).

Alle notwendigen Aufbereitungsschritte für die Herstellung eines Sekundärstoffs und weitere für die Qualifizierung zu einem Substitut erfolgen innerhalb des Bilanzrahmens und werden energetisch der Substitut-Herstellung zugerechnet.

Eine Übersicht über die Phasen des Lebenszyklus¹ von Bauwerken und die relevanten Module für den in dieser Studie vorgenommenen energetischen Vergleich auf Materialebene in Anlehnung an die DIN EN 15804 sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

In der vorliegenden Studie werden ausschließlich Rückbaumaterialien aus dem Hochbau betrachtet, Baustellenabfälle sind nicht Gegenstand der Studie. Als Rückbaumaterialien werden Abbruchmengen verstanden, die nach dem Abbruch vorliegen und dem Recycling-Unternehmen als Ausgangsmaterial mit bestimmten Qualitätseigenschaften vorliegen (z. B. Kalksandstein mit groben Anhaftungen oder Kalksandstein sortenrein und ohne grobe Anhaftungen). Die Abbruchtechnik selbst, das heißt, mit welcher Technik und Technologie die Abbruchtätigkeiten vollzogen werden, liegt außerhalb des Betrachtungsrahmens. Es wird von einer Abbruchpraxis ausgegangen, die in Demontagestufen auf eine selektive Gewinnung verschiedener Abbruchmaterialien (Dachziegelbruch, Bauholz, Mauerwerksbruch, Betonbruch etc.) abzielt. Die Betrachtung der Sondierungsstudie beginnt mit der Aufbereitung der Abbruchmengen beim Recycling-Unternehmen.

¹ Siehe Abschnitt „Sekundärstoff und Substitut“ und in Abbildung 2-3.

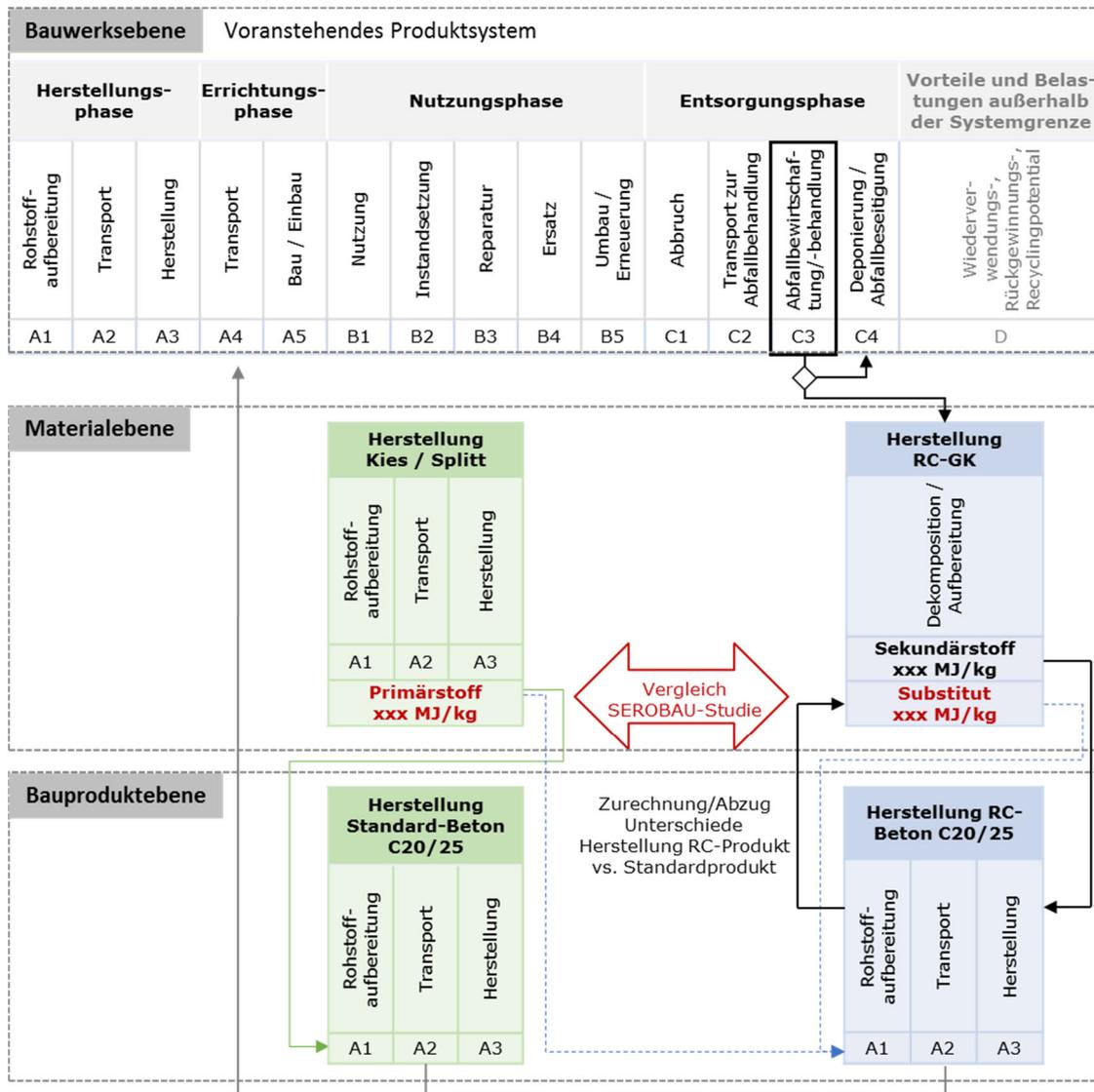


Abbildung 2-1: Phasen des Lebenszyklus' von Bauwerken und die relevanten Module für den in dieser Studie vorgenommenen energetischen Vergleich auf Materialebene, in Anlehnung an die DIN EN 15804 (Quelle: eigene Darstellung).

Aus Rückbaumaterialien werden durch bestimmte bauproduktsspezifische Aufbereitungsschritte (Zerkleinerung, Materialauftrennung etc.) Sekundärstoffe hergestellt, welche die Ausgangsbasis für unterschiedlichste Wiederverwendungen darstellen. Die Untersuchungen fokussieren zwar auf Materialflüsse innerhalb des Bauwesens (vom Hochbau in den Hoch-, Tief-, Ingenieur-, Straßenbau), dennoch ergibt sich eine große Bandbreite möglicher Prozessketten. Grund dafür sind die Vielfalt möglicher Ausgangsqualitäten, Aufbereitungsformen, Anwendungen und Einsatzorte sowie deren Abhängigkeiten. Auch die Dynamik der technologischen Entwicklungen und die individuellen Unterschiede von Unternehmen zu Unternehmen oder von Bauwerk zu Bauwerk führen dazu, dass aus der Fülle an Möglichkeiten eine Auswahl an Prozessketten getroffen werden musste. Im Rahmen dieser Vorstudie wurden jeweils zwei bis drei Qualitäten von Rückbaumaterialien sowie zwei bis drei typische Einsatzvarianten ausgewählt und unter Berücksichtigung der Schnittstellen „Herstellung eines Sekundärstoffs“ und „Qualifizierung zum Substitut“ zu instruktiven Prozessketten kombiniert (Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2: Bestimmung instruktiver Prozessketten (Quelle: eigene Darstellung).

Herstellung Sekundärstoff

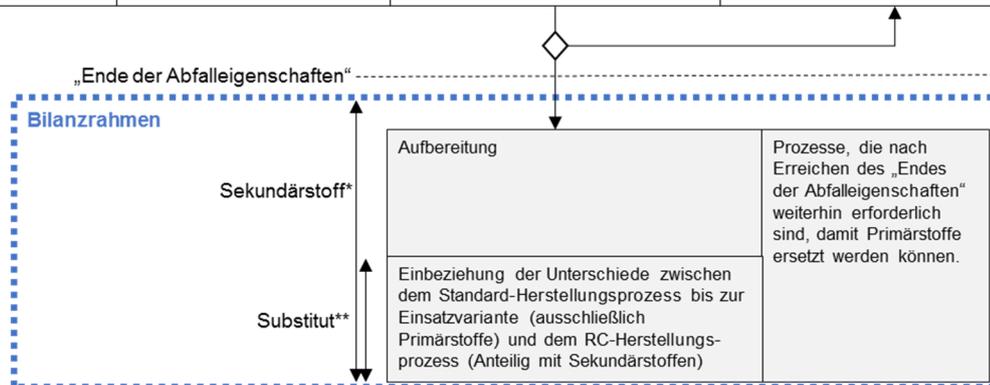
Im Lebenszyklus eines Gebäudes fallen Rückbaumaterialien in dessen Entsorgungsphase an. Gemäß DIN EN 15804, die sich insbesondere mit der Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden, Umweltdeklarationen (EPD) sowie mit Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte beschäftigt, sind Sekundärstoffe „Stoffe, die aus einer früheren Nutzung oder aus Abfällen aus einem Produktsystem rückgewonnen wurden und als Eingabe in ein anderes Produktsystem verwendet werden“ (DIN EN 15804:2014-07, Abs. 3.29). Abbildung 2-3 veranschaulicht die Module der Entsorgungsphase eines Bauwerks (Abbruch C1, Transport C2, Abfallbewirtschaftung C3, Deponierung C4) sowie das „Herauslösen“ des Rückbaumaterials aus dem voranstehenden Produktsystem. In der vorliegenden Studie wird die Aufbereitung im Recycling-Unternehmen bis zum Sekundärstoff energetisch untersucht und quantifiziert. Es werden nur die Hauptprozesse der Sekundärstoffherstellung erfasst und modular berechnet.

Sekundärstoff und Substitut

In Absatz 6.3.4.5 der DIN EN 15804 wird eine Grenze zwischen Sekundärstoff und Substitut gezogen, indem erläutert wird, dass „Sekundärstoffe, [...] als Substitut für die Primärstoffproduktion in Modul D² deklariert werden [können], wenn sie eine funktionale Äquivalenz zum ersetzten Primärstoff aufweisen“. Bei genauerer Betrachtung wird ein Sekundärstoff kaum eine vollständige funktionale Äquivalenz zu einem Primärstoff aufweisen. Dies zeigt sich deutlich wenn Bauprodukte aus mehreren Primärstoffen bestehen (z. B. Beton) und der Sekundärstoff nur eine von mehreren Materialzutaten darstellt. Der Sekundärstoff macht in manchen Fällen gegenüber einem „äquivalenten“ Primärstoff veränderte Rezepturen erforderlich, oder er kann z. B. helfen, Prozessenergie einzusparen. Wenn diese „Nebeneffekte“ rechnerisch dem Sekundärstoff aufwandsseitig zugerechnet wurden, dann hat er Substitut-Status, ohne dass sich seine physikalischen Eigenschaften geändert haben. Da sich ein Sekundärstoff für mehrere Anwendungen – Substituierungen – eignet, macht ihn erst der konkrete Anwendungsfall unter Einrechnung der jeweiligen Prozessbesonderheiten zum konkreten Substitut, welches dann mit einem Primärstoff verglichen werden kann.

² Das informative Modul D soll der Beurteilung von Substitutionseffekten dienen. Gemäß DIN EN 15804:2014-07 Abs. 6.4.3.3 werden „im informativen Modul D potenzielle Lasten und Gutschriften von Sekundärstoffen [...], die das Produktsystem verlassen, deklariert. Mit Modul D wird das Konzept des „Design für Wiederverwertung, Recycling, und Rückgewinnung“ für Gebäude gewürdigt, indem die potenziellen Gutschriften für den zukünftig vermiedenen Einsatz von Primärstoffen [...] dargestellt werden, bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Lasten, die mit den Recycling- und Rückgewinnungsprozessen jenseits der Systemgrenze einhergehen.“

Entsorgungsphase des voranstehenden Produktsystems „Bauwerk“ nach DIN EN 15804:2014-07			
C1 Demontage einschließlich Rückbau oder Abbruch des Produkts aus dem Gebäude, einschließlich einer ersten Sortierung auf der Baustelle.	C2 Transport des ausrangierten Produkts als Teil der Abfallbehandlung, z. B. in einen Recyclinghof sowie der Transport des Abfalls, z. B. zur endgültigen Beseitigung.	C3 Abfallbehandlung***, z. B. Sammlung von Abfallfraktionen aus dem Abriss und Abfallbehandlung von Stoffströmen, die für eine Wiederverwendung, Recycling und Energierückgewinnung vorgesehen sind.	C4 Abfallbeseitigung einschließlich der physikalischen Vorbehandlung und des Deponiebetriebs.***



* Ein Sekundärstoff ist jede Form von Stoff, der aus einer früheren Nutzung oder aus Abfall rückgewonnen wird und einen Primärstoff ersetzt. Dabei sind folgende Anmerkungen zur Spezifizierung dieser Definition zu beachten (DIN EN 15804:2014-07, Abs. 3.29):

- Sekundärstoffe werden an dem Punkt erfasst, an dem der Sekundärstoff aus einem anderen System in das System eintritt.
- Stoffe, die aus einer früheren Nutzung oder aus Abfällen aus einem Produktsystem rückgewonnen wurden und als Eingabe in ein anderes Produktsystem verwendet werden, sind Sekundärstoffe.
- Beispiele für Sekundärstoffe (die an der Systemgrenze zu erfassen sind) sind recyceltes Altmetall, Betonbruch, Glasbruch, recycelte Holzabfälle, recycelte Kunststoffe.

** Sekundärstoffe, die das System verlassen haben, können als Substitut für die Primärstoffproduktion in Modul D deklariert werden, wenn sie eine funktionale Äquivalenz zum ersetzten Primärstoff aufweisen (DIN EN 15804:2014-07 Abs. 6.3.4.5 Anmerkung 3).

*** Im Fall von Stoffen, die das System als Sekundärstoffe oder –brennstoffe verlassen, sind Prozesse wie Sammlung und Transport vor dem Erreichen „des Endes der Abfalleigenschaft“ in der Regel Teil der Abfallbehandlung des untersuchten Produktsystems [Bauwerk]. Es kann jedoch sein, dass nach Erreichen „des Endes der Abfalleigenschaft“ weitere Prozesse erforderlich sind, damit Primärstoffe oder –brennstoffe in einem anderen Produktsystem ersetzt werden können. Solche Prozesse werden dann als außerhalb der Systemgrenzen liegend angesehen. (DIN EN 15804:2014-07 Abs. 6.3.4.5 Anmerkung 3).

Abbildung 2-3: Bilanzrahmen der Studie in Anlehnung an die DIN EN 15804 (Quelle: eigene Darstellung).

Das Erreichen der funktionalen Äquivalenz ist exakt (bauprodukt- und prozesskettenspezifisch) zu definieren und rechnerisch einzubeziehen. Eine funktionale Äquivalenz ist dann erreicht, wenn die Prozesskette nicht nur die Aufbereitung des Sekundärstoffs berücksichtigt, sondern auch die Unterschiede zwischen dem „Standard-Herstellungsprozess“ (ausschließlich Primärstoffe) bis zur Einsatzvariante und dem „RC-Herstellungsprozess“ (anteilig mit Sekundärstoffen) betrachtet werden. Abhängig von der Datenverfügbarkeit wurden die energetischen Unterschiede in den Herstellungsprozessen errechnet oder teilweise mithilfe von Expertenbefragungen abgeschätzt und in Form von Energieaufschlägen oder Energieabzügen dem Energiekennwert für die Aufbereitung des Sekundärstoffs angerechnet. Diese Unterschiede ergeben sich in erster Linie aus veränderten Verfahrensschritten, die zur Beimengung in das Bauprodukt gegenüber einem Primärstoffprodukt zusätzlich notwendig sind oder gegebenenfalls gespart oder verkürzt werden können, wie z. B. verkürzte Trocknungszeiten oder geringere Schmelztemperaturen (veränderte Verfahrensschritte). Darüber hinaus sind teilweise Rezepturanpassungen zu beachten, z. B. die Zugabe von Additiven oder andere Mischungsverhältnisse (veränderte Rezepturen). Aber auch Unterschiede in den Transportwegen, d. h. die Distanz vom Recycling-Unternehmen zum Herstellungswerk, verglichen mit der Distanz von der Primärstoffquelle zum Herstellungswerk, sind von Bedeutung (veränderte Transporte). Das Substitut, das somit nicht nur die Aufbereitungs-, sondern auch darüber hinaus die Unterschiede zwischen dem „Standard-Herstellungsprozess“ und dem „RC-

Herstellungsprozess“ bis zur Einsatzvariante integriert, bildet die Basis für Vergleiche mit dem funktional äquivalenten Primärstoff. Auf Transportaufwände wird in dieser Studie hingewiesen, sie werden aber nicht quantifiziert.

Co-Produkte/Allokation

Sekundärstoffe lassen sich innerhalb des Aufbereitungsprozesses in Zielprodukt (angestrebter Sekundärstoff) und noch verwertbare Nebenprodukte (Co-Produkte)³ aufteilen. Ein endgültig aus dem Nutzungskreislauf ausgeschleustes Material ohne Verwertungsmöglichkeiten und ohne Absatzmarkt ist weder Sekundärstoff noch Co-Produkt, sondern Abfall (Deponie).

Auf dieser Basis wird in der vorliegenden Studie der Energiebedarf für den Gesamtaufbereitungsprozess auf das Zielprodukt (Sekundärstoff) und die im Prozess darüber hinaus anfallenden Co- und Nebenprodukte durch Allokationen verteilt. Gemäß DIN EN 15804, Abs 6.4.3 muss „die Allokation [...] auf physikalischen Eigenschaften beruhen (Masse, Volumen)“. Die Aufteilung der energetischen Aufbereitungsaufwände auf verwertbare Fraktionen – auf den Sekundärstoff und die Co-Produkte – nach Gewichtsanteilen wurde von den Experten in den Workshops bestätigt. Abbruchmaterialien mit organischen Anteilen bzw. ausgeschleuste Reststoffe, die nicht einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, aber einen verwertbaren Heizwert haben, erhalten einen entsprechenden Vermerk im Bauprodukt-„Steckbrief“.

2.3 Methodisches Vorgehen

2.3.1 Struktur der Analyse

Für die methodische Entwicklung eines Untersuchungsansatzes, der zum einen auf die Berechnung des Energieaufwands für die Herstellung von Substituten und zum anderen auf deren Vergleich mit den energetischen Herstellungsaufwänden für Primärstoffe abzielt, sind zunächst die Aufbereitungsschritte zur Herstellung von Sekundärstoffen von Bedeutung. Wie in Abbildung 2-4 dargestellt, wird entsprechend in „Schritt 1“ der Energieaufwand (in MJ/kg) dieser Schritte für alle instruktiv entwickelten Prozessketten je Bauproduktgruppe quantitativ erhoben. Zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz des Sekundärstoffs zum entsprechenden Primärstoff sind – wie in Kapitel 2.2 ausführlich erläutert – die Unterschiede zwischen dem „Standard-Herstellungsprozess“ und dem „RC-Herstellungsprozess“ von Bedeutung. Eine Bewertung und Quantifizierung dieser Unterschiede wird in „Schritt 2“ in Form von Energieaufschlägen oder Energieabzügen vorgenommen. Anschließend können in „Schritt 3“ die Energieaufwendungen für die Herstellung und Weiterverarbeitung des Sekundärstoffs bzw. Substituts (in MJ/kg) mit denen des äquivalenten Primärstoffs verglichen werden.

Methodisch gliedern sich die Analysen dementsprechend in drei Hauptschritte (siehe Abbildung 2-4):

- (1) Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff – Modulare Berechnung des Energieaufwands der Sekundärstoffaufbereitung.
- (2) Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) auf Grundlage von Unterschieden zwischen Primär- und Sekundärstoffverwendung bis zur Einsatzvariante.
- (3) Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung.

³ Gemäß DIN EN 15804:2014-07, Abs 3.7 ist ein Co-Produkt „eines von zwei oder mehr handelbaren Materialien, Produkten oder Brennstoffen aus demselben Prozess, das jedoch nicht Gegenstand der Betrachtung ist“.

Energieaufwand für die Herstellung eines funktional äquivalenten Substituts
<p>Schritt 1: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff Physikalische Vorbehandlungen bis zum „Ende der Abfalleigenschaften“ sowie Prozesse, die nach Erreichen des „Endes der Abfalleigenschaften“ weiterhin erforderlich sind, damit Primärstoffe ersetzt werden können.</p>
<p>Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) Einbeziehung der Unterschiede zwischen dem Standard-Herstellungsprozess bis zur Einsatzvariante (ausschließlich Primärstoffe) und dem RC-Herstellungsprozess (Anteilig mit Sekundärstoffen).</p>



Energieaufwand für die Herstellungsphase (A1-3) eines Primärstoffs nach DIN EN 15804:2014-07		
<p>A1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Extraktion und Aufbereitung von Rohstoffen (z. B. Bergbauprozesse) und Biomasseproduktion und -aufbereitung (z. B. land- der forstwirtschaftliche Aktivitäten); • Wiederverwendung von Produkten oder Materialien aus einem vorausgehenden System; • Verarbeitung von Sekundärstoffen, die als Input für die Produktherstellung dienen, jedoch ohne die Prozesse, die Teil der Abfallbehandlung im vorausgehenden System sind; • Erzeugung von Strom, Dampf und Wärme aus primären Energiequellen, einschließlich deren Extraktion, Raffinieren und Transporte; • Energierückgewinnung bzw. andere Arten von Rückgewinnung aus Sekundärbrennstoffen, jedoch ohne die Prozesse, die Teil der Abfallbehandlung des vorausgehenden Systems sind; 	<p>A2</p> <p>Transport bis zum Werkort und interne Transporte</p>	<p>A3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Herstellung von „Hilfs- und Betriebsstoffen“ oder Vor-Produkten; • Herstellung von Produkten oder Co-Produkten; • Herstellung der Verpackung

Abbildung 2-4: Methodisches Vorgehen - drei Hauptschritte (Quelle: eigene Darstellung).

2.3.2 Erläuterung der Analyseschritte

Im Folgenden wird das Vorgehen anhand der Produktgruppen Beton und Steinwolle erläutert. Der aus rückgebautem „Betonbruch ohne grobe Anhaftungen“ hergestellte Sekundärstoff „Recycling Gesteinskörnung (2/16) Typ 1“ soll in der Einsatzvariante „Betonfundament C20/25“ einen Primärstoff ersetzen. Der funktional äquivalente Primärstoff ist hier eine Gesteinskörnungsmischung aus 80 % Kies und 20 % Splitt/Schotter (Becke et al., 2014). Diese Mischung stellt Expertenangaben zufolge die in Deutschland regionalunabhängig durchschnittlich verwendete Gesteinskörnung dar. Die Ökobaudat gibt Auskunft über den Energieaufwand der Herstellungsphase (A1-3) für Kies (0,04884 MJ/kg) sowie für Splitt/Schotter (0,28766 MJ/kg). Der Energieaufwand für das oben genannte Mischungsverhältnis beträgt 0,097 MJ/kg. Es liegen Hinweise vor, dass der Energiekennwert für Splitt/Schotter in der Ökobaudat zu hoch eingeschätzt wurde. Ecoinvent sowie Erhebungen des Bundesverbands für Mineralische Rohstoffe zufolge ist dieser Wert deutlich geringer, weshalb in Fall von gebrochene Gesteinskörnungen ein zweiter Vergleichswert aus der DIN EN 15804 konformen Datenbank ecoinvent herangezogen wurde (0,057 MJ/kg aus 80 % GK rund (4/x) [0,05396 MJ/kg] und 20 % GK gebrochen (4/x) [0,06722 MJ/kg]).

Die Berechnung des Energieaufwands zur Herstellung des Sekundärstoffs „Recycling Gesteinskörnung (2/16) Typ 1“ erfolgt modular. Nebenprozesse und interne Transporte werden in diesem ersten Schritt vernachlässigt. In einem zweiten Schritt werden Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standard-Betonfundaments und eines RC-Betonfundaments identifiziert. Unter Einbeziehung der daraus

resultierenden Energieaufschläge oder -abzüge wird dann in Schritt 3 ein Vergleich zwischen Substitut und äquivalentem Primärstoff angestellt.

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

Die einzelnen Prozessketten wurden so konzipiert, dass sie sowohl in der Praxis gängige Standardpraktiken umfassen, aber auch Varianten, die sich für die Kreislaufführung als vielversprechend zeigen bzw. bereits erfolgreich in der Erprobung waren. Diskussionen mit den Fachexperten ergaben, dass innovative Verfahren häufig mit großen Hürden verbunden sind und nicht immer reale Chancen in der Praxis haben. Daher wurden in erster Linie durchgängig praxistaugliche Prozessketten ausgewählt. Die instruktiven durchgängigen Prozessketten sind modular aufgebaut. Zunächst werden alle für die jeweilige Bauproduktgruppe typischen Aufbereitungs- bzw. Prozessschritte zur Herstellung des Sekundärstoffs ermittelt und entsprechend Abbildung 2-5 präsentiert.

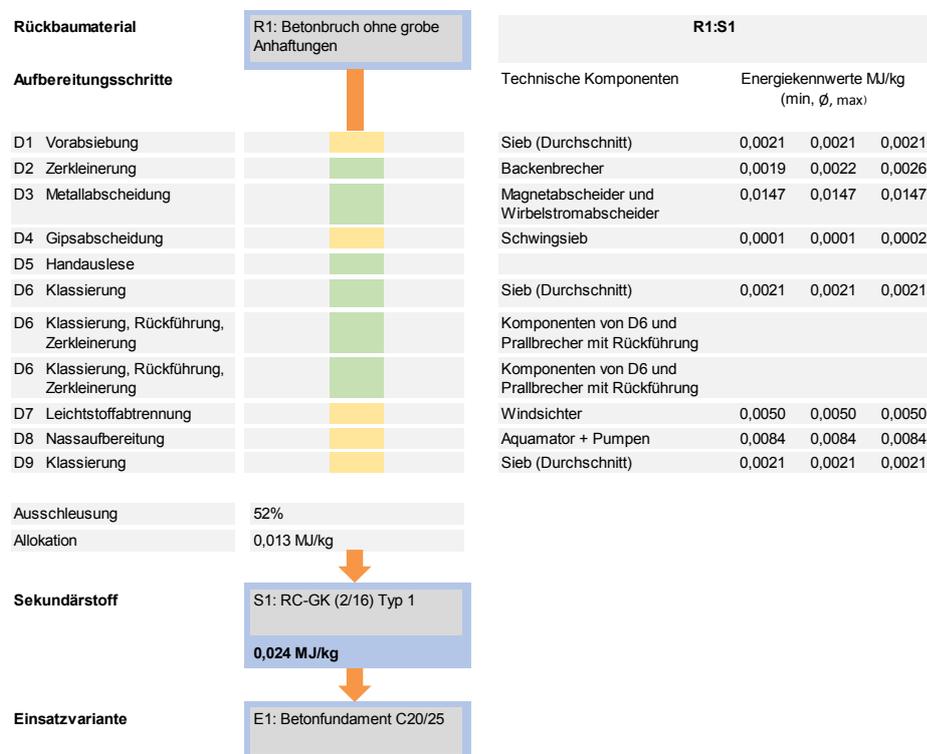


Abbildung 2-5: Methodisches Vorgehen Schritt 1 – Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Im Anschluss wird für ausgewählte Sekundärstoffqualitäten die Prozesskette konkretisiert, durch

- die Prüfung, ob der jeweilige Aufbereitungsschritt in der Praxis erforderlich (grün), optional (gelb) oder entbehrlich (rot) ist,
- die Zuordnung einer technischen Komponente (Maschine, Anlage, Aggregat), welche mit einem Energiekennwert hinterlegt ist und
- die Analyse von ausgeschleusten Co- bzw. Nebenprodukten und damit einhergehend die Festlegung von entsprechenden Energieallokationen auf noch verwertbare Co- bzw. Nebenprodukte.

Durch die Berücksichtigung von optionalen Prozessschritten (a) ergibt sich eine Bandbreite an Energiekennwerten je Aufbereitungsschritt (Wert mit optional, Wert ohne optional, Mittelwert).

Die Energiekennwerte der entsprechenden technischen Komponenten (b) mussten in einem Kompromiss aus anlagentechnischen Daten und tatsächlichen Verbrauchswerten ermittelt werden. Die Befragung von Recycling-Unternehmen zum Energieverbrauch ihrer Anlagen und Maschinen führte meist zu wenig konkreten Energiekennzahlen, zumal es sich häufig um wettbewerbsrelevante Informationen handelt und Daten über Betriebsmitteleinsatz, Energieverbräuche und Energiekosten zu den sensiblen Informationen der wirtschaftenden Unternehmen gehören. Da es sich hierbei um Parameter handelt, die wesentlichen Einfluss auf das Betriebsergebnis haben (teilweise liegt der Anteil der Energieaufwendungen an den Produktionskosten bei über 50 %) und somit auch für die Erzeugnisse im erheblichen Maße preisbestimmend sind, agieren die Unternehmen bei der Offenlegung solcher Informationen aus wettbewerblichen Gründen mit größter Zurückhaltung. Darüber hinaus besteht eine gewisse Skepsis hinsichtlich des sachgemäßen Umganges mit den Daten, da die Werte von den spezifischen Umständen der Produktion abhängen und die Vielfalt an verfügbaren technischen Aggregaten, Verfahrensvariationen oder auch Energieeinsparmöglichkeiten zunimmt. Dies lässt sich mit Erfahrungen belegen, die im Prozess der Erarbeitung bzw. der industriellen Positionierung zu den europäischen Merkblättern über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT-Merkblättern) in verschiedenen Wirtschaftsbereichen gesammelt wurden. In der Studie zur Ermittlung des Standes der Technik in Deutschland bei der Herstellung von Platten auf Holzbasis schreibt die ÖKOPOOL GmbH dazu Folgendes: „Die Erarbeitung möglicher Informationsbeiträge zum BVT-Merkblatt wurde anhand der Präsentation eines beispielhaften Energiesystems diskutiert“ (Ökopool GmbH, 2014). Und weiter: „Bei der konkreten Diskussion der Energiethemen, [...], zeigten sich die Hersteller diesbezüglich jedoch sehr reserviert hinsichtlich der Informationsbereitstellung, so dass weder vertiefende Diskussionen noch weitere Recherchen möglich waren.“ Auch hinsichtlich der bereits angesprochenen sachgemäßen Verwendung und Nutzbarkeit der Daten für vergleichende Betrachtungen gibt die Studie Positionierungen der Industrie wie folgt wieder: „Insgesamt wird eine Schwierigkeit darin gesehen, dass die Prozessvarianten sehr unterschiedlich seien und 1:1 übertragbare, allgemeine Konzepte kaum anwendbar wären.“

Als Folge der beschriebenen Sachlage war es im Rahmen der Sondierungsstudie schlussendlich erforderlich, auf gewisse Kompromisse auszuweichen und Einschränkungen hinzunehmen. Im Konsens mit dem Fachexperten wurde so auf Energiebedarfskennwerte von Standardprozessen bzw. technischen Komponenten orientiert, die sich in Bandbreiten (Minimalwert, Mittelwert, Maximalwert) abbilden lassen. Die Energiebedarfswerte wurden technischen Datenblättern der jeweiligen Aggregate oder Anlagenkomponenten entnommen und sind damit theoretischer Natur. Es erfolgt keine Normierung oder Wertebildung beispielsweise über globale oder mittlere Jahresverbrauchswerte. Es wird zudem nicht mit Ordnungs- oder Gewichtungungsverfahren gearbeitet. Auch wird durch die genutzten Werte keine Abdeckung des gesamten Produktionsspektrums für die jeweiligen Anlagenbestandteile bzw. Prozessaggregate erreicht. Ein Teil der Energieverbrauchswerte basiert darüber hinaus auf veröffentlichten Falluntersuchungen, Studien bzw. Hinweisen aus der Praxis.

Abwärme wird als gegebener Bestandteil eines jeden Prozesses angesehen und pauschalierend davon ausgegangen, dass sich die Nutzung bzw. die Verluste an Energie aus Abwärme jeweils auf optimiertem Niveau befinden und somit bei keinem Prozess spezielle Zu- oder Abschläge auf den Energieeinsatz vorgenommen werden müssen.

Welche zusätzlichen Aspekte im Detail eine Rolle spielen – mit den letztlich angesetzten Werten jedoch kaum reflektiert werden können – soll am Beispiel von Brechvorgängen und dabei zum Einsatz kommenden Aggregaten noch etwas näher erläutert werden. So gelangt, wie nahezu bei allen Arbeitsmaschinen, je nach Kraftübertragung nur ein Teil der in Anspruch genommenen Energie zum Werkzeug, im genannten

Beispiel zum Brecher. Bei einem Wirkungsgrad von 70 % benötigen hydraulisch und elektrisch betriebene Anlagen 42 % größere Antriebsmotoren. Sobald der Backenbrecher effektiv zudrückt, fordert die Zerkleinerungsarbeit hohe Antriebsleistung ab. Dabei entstehen verbrauchsintensive Bedarfsspitzen für den Motor. Öffnet der Brecher und entlässt das Mineral auf das Abzugsband, ist die Antriebsleistung hingegen vergleichsweise niedrig. Mit intelligenten Steuerungen lassen sich konstante Leistungen mit geringem Verbrauch erzielen. Solche Steuerungen regeln beispielsweise bei Brechanlagen sukzessive den Anstellwinkel der Aufgaberinne. Außerdem kann mit großzügig dimensionierten Schwungmassen die Lastaufnahme nivelliert und für ausreichend Energiereserven gesorgt werden. Durch intelligente Kupplungen (z. B. HFO-Kupplungen) gelingt es, fast 100 % der Motorleistung an den Brecher zu übertragen.

Allein daran wird deutlich, dass durch verschiedene Arbeitsweisen, Gerätekonfigurationen und Zusatzkomponenten die energetischen Daten und Aufwendungen erheblichen Einflüssen unterliegen und entsprechende Varianzen zulassen. Die Praxis berichtet beispielsweise auch von Kraftstoffverbräuchen, die um bis zu 40 % variieren - allein aufgrund der durch den jeweiligen Maschinenführer eingebrachten Erfahrungen und Fahrweise.

Beim „Durchlaufen“ der einzelnen Aufbereitungsschritte sind sich ergebende Massen- bzw. Materialverluste zu beachten (Flussbilder im Anhang 7.1). Durch das Ausschleusen von stofflich oder thermisch weiter verwertbaren Co- bzw. Nebenprodukten (c) sowie nicht mehr verwertbaren Stoffen geht auf dem Weg vom Rückbaumaterial zum Sekundärstoff zu unterschiedlichen Anteilen Schritt für Schritt Material „verloren“. Diese Masseaufspaltung findet bei den energetischen Berechnungen durch Allokationen Beachtung. Jedes stofflich oder thermisch verwertbare Material⁴, erhält seinem Masseanteil entsprechend den Energieaufwand der bis dahin notwendigen Aufbereitungsschritte zugeschrieben. Der Energiewert des Zielsekundärstoffs reduziert sich entsprechend. Die Ausschleusung stofflich nicht verwertbarer Materialien wird in der Massebilanz berücksichtigt, jedoch wird keine Energieallokation vorgenommen (stofflich oder thermisch nicht verwertbare Materialien erhalten keinen „Energie-Rucksack“).

Am Ende der modularen Betrachtungen und Berechnungen ergibt sich der Energieaufwand für die Herstellung des Sekundärstoffs in Bandbreiten (Bandbreite 1: minimaler, maximaler, durchschnittlicher Energieaufwand Anlage/Aggregat/Maschine; Bandbreite 2: Wert mit optionalen Schritten, Wert ohne optionale Schritte, Mittelwert). Im Rahmen der konkreten Energieberechnungen wurde mit dem Mittelwert abzüglich der Energieallokation auf stofflich verwertbare Co- bzw. Nebenprodukte gearbeitet (Abbildung 2-6).

		Bandbreite 2				
		MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation
Bandbreite 1	Energieaufwand min.	0,0427	0,0242	0,0335	0,0110	0,0225
	Energieaufwand Ø	0,0448	0,0262	0,0355	0,0116	0,0239
	Energieaufwand max.	0,0482	0,0296	0,0389	0,0127	0,0262

Abbildung 2-6: Berechnung des mittleren Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs unter Berücksichtigung von Bandbreiten und Energieallokationen durch Materialausschleusungen (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

⁴ Als stofflich verwertbar werden Materialien gewertet, wenn sie einen Marktwert besitzen und durch eine weitere stoffliche Verwertung den Nutzungskreislauf nicht verlassen. Als stofflich nicht verwertbar gelten Materialien, für die es keine Abnehmer gibt und die somit deponiert werden müssen.

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

Bei der Beschreibung der Weiterverarbeitung des Sekundärstoffs bis hin zur Einsatzvariante wird ähnlich dem Prozedere in Schritt 1 vorgegangen. Die Weiterverarbeitung umfasst alle Prozessschritte vom Sekundärstoff (auf Materialebene) bis hin zur Einsatzvariante (auf Bauproduktebene). Unterschiede in den Prozessschritten zur Herstellung von RC-Produkten gegenüber jenen zur Herstellung von Standardbauprodukten können Energiemehraufwände oder Energieminderaufwände verursachen. Im Wesentlichen können sich die Unterschiede in der Weiterverarbeitung, wie in Abbildung 2-7 dargestellt, ergeben

- aus veränderten Rezepturen,
- aus zusätzlichen oder nicht notwendigen Verfahrensschritten, sowie
- aus zusätzlichen oder geringeren Transportaufwänden (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort).

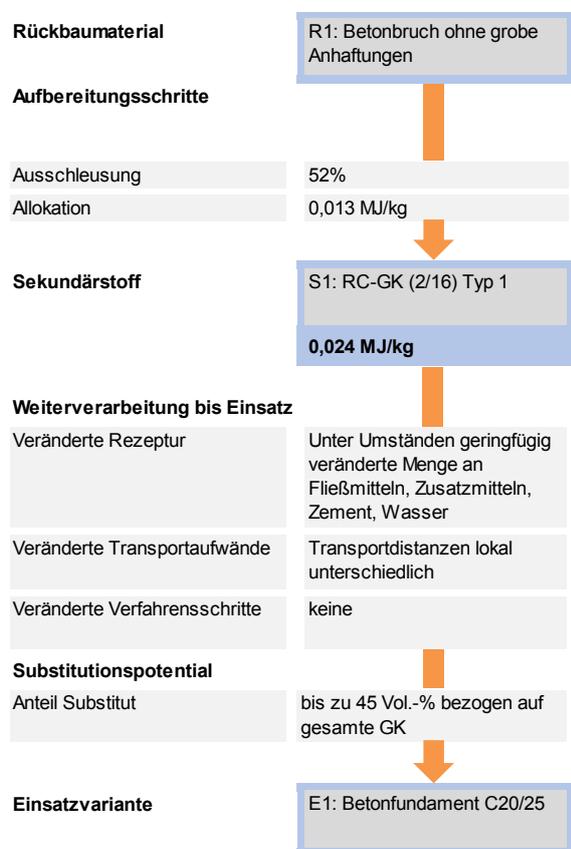


Abbildung 2-7: Methodisches Vorgehen Schritt 2 – Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

So werden andere Mischungsverhältnisse oder zusätzliche Beimengungen an Primärstoffen als veränderte Rezeptur verstanden. Als Beispiel sei hier die Herstellung von Steinwolle mit RC-Wolle angeführt, für die, verglichen mit der Herstellung einer Standard-Steinwolle, eine veränderte Rezeptur bei der Herstellung von Betonformsteinen angewendet werden muss (mehr Zement, weniger Sand).

Gleichfalls können sich im Rahmen der Weiterverarbeitung des Sekundärstoffs zusätzliche oder verkürzte Verfahrensschritte ergeben, die ebenfalls energetische Auswirkungen auf den Herstellungsprozess haben können. So kann z. B. bei der Herstellung von Flachglas aus Recycling-Glasscherben eine Reduzierung

des Energieverbrauchs im Schmelzofen erzielt werden, da Glasscherben einen niedrigeren Schmelzpunkt haben als der äquivalente Primärstoff Quarzsand.

Des Weiteren sind Unterschiede in den Transportdistanzen (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort) und die damit verbundenen Aufwendungen von großer Bedeutung. In Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorte können die Transportdistanzen sehr unterschiedlich ausfallen (Abbildung 2-8). Häufig stellen die aus Transporten resultierenden Energieaufwände einen erheblichen Anteil des Gesamtenergieaufwands bis zur neuen Einsatzvariante dar. Da die Netze von Recyclingstandorten jedoch regional und produktspezifisch stark variieren, sind meist keine pauschalen Annahmen möglich. So konnten im Rahmen dieser Sondierungsstudie keine konkreten Zahlen im Sinne von Mehr- und Minderaufwendungen gegenüber dem Standard ermittelt werden. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf. Distanzstudien zwischen Abbruchort, Sammelstellen und RC-Aufbereitung bzw. Deponie / Verbrennung oder Recycling-Unternehmen und Bauprodukthersteller im Vergleich zu Rohstoffquelle und Bauprodukthersteller sind notwendig, um die Transportaufwendungen (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort) konkret zu ermitteln. Erste Vorarbeiten in diese Richtung sind z. B. Deponiestandorte (Destatis 2016), Standortkarten (STV 2019) und Studien des Umweltbundesamtes (UBA 2017). Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Transportdistanzen von Massenrecyclingbaustoffen mit maximal ca. 30 km sinnvoll/wirtschaftlich sind, ist darüber hinaus die Passfähigkeit von Angebot und Nachfrage für diese Baustoffe regional zu untersuchen, da es – je nach Region und der dortigen Bauaktivität (Verhältnis zwischen Neubau und Abbruch) – zu Überangeboten oder aber auch zu einem Mangel an Recyclingbaustoffen kommen kann.

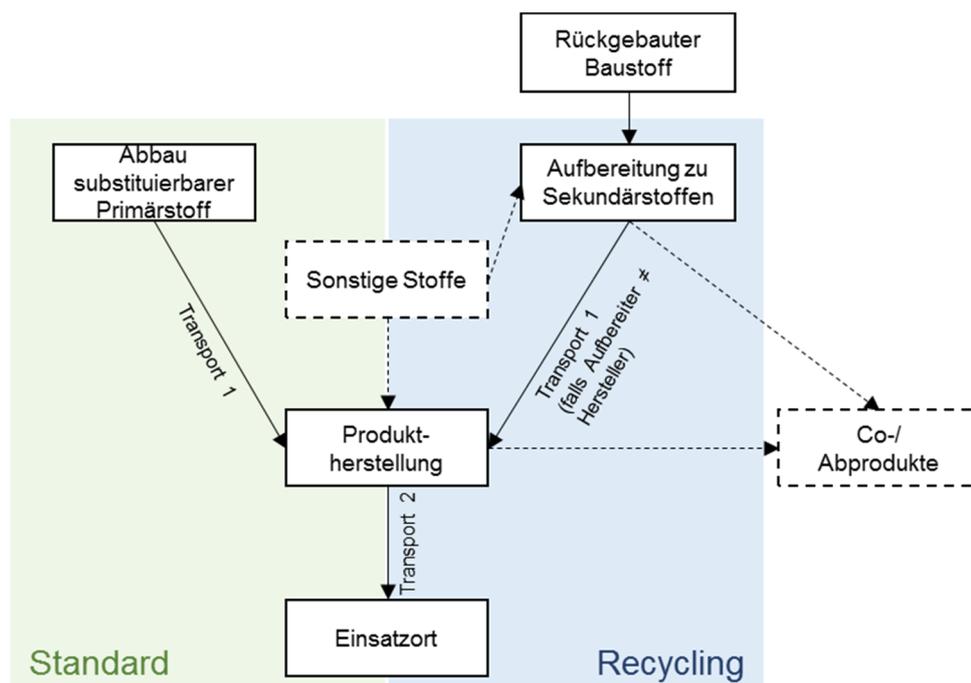


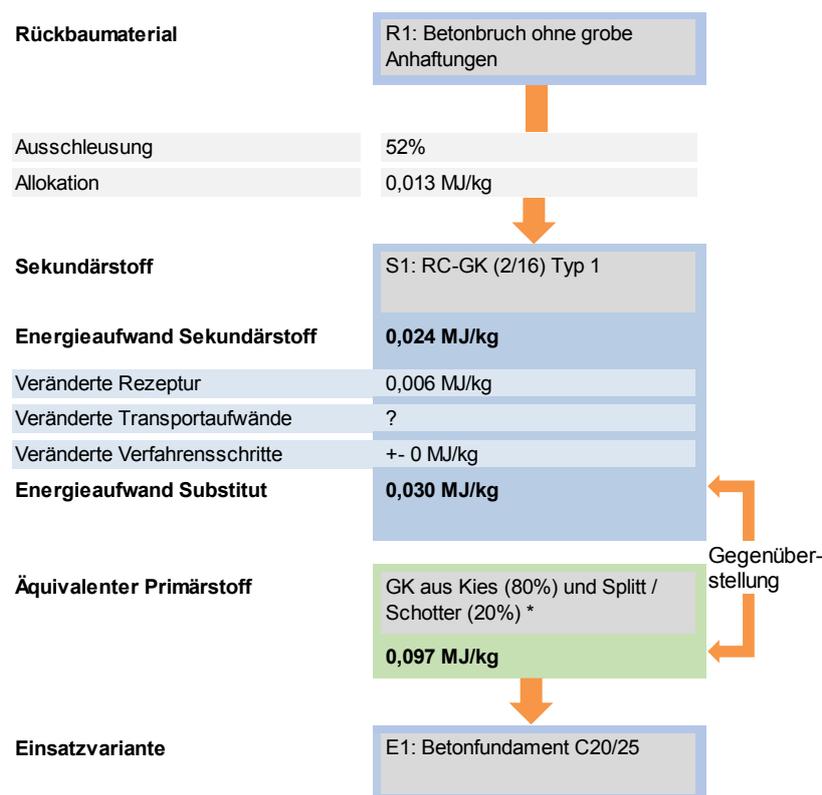
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Transportwege (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort) von Standard- und RC-Produkt (Quelle: eigene Darstellung).

Unbenommen von diesen regionalspezifischen Betrachtungen (Zuordnungen, Grenzsetzungen) gilt, dass die Wertschöpfungsaktivitäten der Recyclingwirtschaft ihren eigenen Bilanzrahmen haben, bei der die wirtschaftliche Auskömmlichkeit bestimmter Recycling-Bemühungen im Fokus steht. Art und Länge der Wegenetze (z. B. stark verästelte Wege mit vielen Sammelstellen versus direkter Weg zum Recycling-Unternehmen) spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Die Untersuchungen „vom Sekundärstoff zum Substitut“ beinhalten vorrangig qualitative Beschreibungen und Expertenschätzungen, da keine quantitative Datenbasis vorhanden ist. So wurde zunächst beschrieben, dass sich z. B. bei der Weiterverarbeitung der RC-Gesteinskörnung 2/16 (vgl. Abbildung 2-7) in der Rezeptur veränderte Mengen an Fließ- und Zusatzmitteln, Zement und Wasser ergeben können. Darauf basierend wurden in Rücksprache mit den Fachexperten energetische Einschätzungen erarbeitet. Durch Aussagen, wie viel Mehr- oder Minderaufwand sich gegenüber dem Standardverfahren (Primärstoff-Weiterverarbeitung) prozentual ergeben, lassen sich energetische Einschätzungen ableiten. Dies ist bei veränderter Rezeptur (z. B. +0,280 bzw. 0,0281 MJ/kg Energieaufschlag bei Steinwolle mit RC-Wolle, vgl. Kap. 3.6) sowie bei veränderten Verfahrensschritten (z. B. bis zu -11,8 % Energieabschlag bei RC-Schaumglasplatten, vgl. Kap. 3.5) möglich. Bei veränderten Transportaufwendungen (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort) sind, wie bereits erwähnt, keine konkreten Zahlen ableitbar; hier steht ein Fragezeichen (Forschungsbedarf). Schlussendlich machen es diese prozentualen Mehr- oder Minderaufwendungen möglich, auf Unterschiede zwischen der Primärstoff-Weiterverarbeitung gegenüber der Sekundärstoff-Weiterverarbeitung zu verweisen.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung

Unter Beachtung der Energieaufschläge und Energieabschläge kann der Energieaufwand, der der Herstellung des Substituts anzurechnen ist, nun dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs vergleichend gegenübergestellt werden (Abbildung 2-9).



* bestehend aus 80% Kies 2/32 nicht getrocknet (0.04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und 20% Splitt 2/15 (0.28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02); durchschnittliches Mischungsverhältnis gem. InformationsZentrum Beton GmbH: "Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton", 2014, S. 10.

Abbildung 2-9: Methodisches Vorgehen Schritt 3 – Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Beispiel Prozesskette R1-S1-E1 Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Die Qualitätsanforderungen, die sowohl der äquivalente Primärstoff als auch der Sekundärstoff bzw. das Substitut zu erfüllen haben, sind meist in Werksnormen definiert. Qualitätsanforderungen an das Bauprodukt bzw. die spezifische Einsatzvariante werden in Normen und Standards geregelt. Die Energiekennwerte der vergleichbaren Primärstoffe stammen größtenteils aus der Ökobaudat (Ökobaudat 2018). Sofern in der Ökobaudat keine, zu undifferenzierte oder unter Kritik stehende Werte zu finden waren, wurden alternative DIN EN 15804-konforme Datenquellen, wie EPDs (Environmental Product Declarations; IBU 2018), ecoinvent, GaBi herangezogen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat, EPDs, GaBi oder ecoinvent (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme, sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen) können für jeden zum Vergleich herangezogenen Primärstoff Anhang 7.2 entnommen werden.

Die Vergleiche geben Auskunft darüber, ob die Aufbereitung und Weiterverarbeitung des Substituts (Substitutherstellung mit den geforderten Qualitätseigenschaften einschließlich veränderter Rezepturen, Verfahrensschritte, Transportaufwendungen vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort) mit mehr oder weniger Energie verbunden ist als die Bereitstellung des äquivalenten Primärstoffs. Die Differenz zwischen beiden Energiekennwerten spiegelt die energetischen Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärproduktion wider.

Diesem methodischen Vorgehen entsprechend wurden alle ausgewählten Bauproduktgruppen analysiert. Die Ergebnisse der Analysen sind in einer einheitlichen Struktur (Bauprodukt-„Steckbrief“) dokumentiert.

2.3.3 Einheitliche Dokumentation der ausgewählten Bauproduktgruppen

Für die Ergebnisdarstellung wurde eine einheitliche Dokumentationsform gemäß Abbildung 2-10 entwickelt.

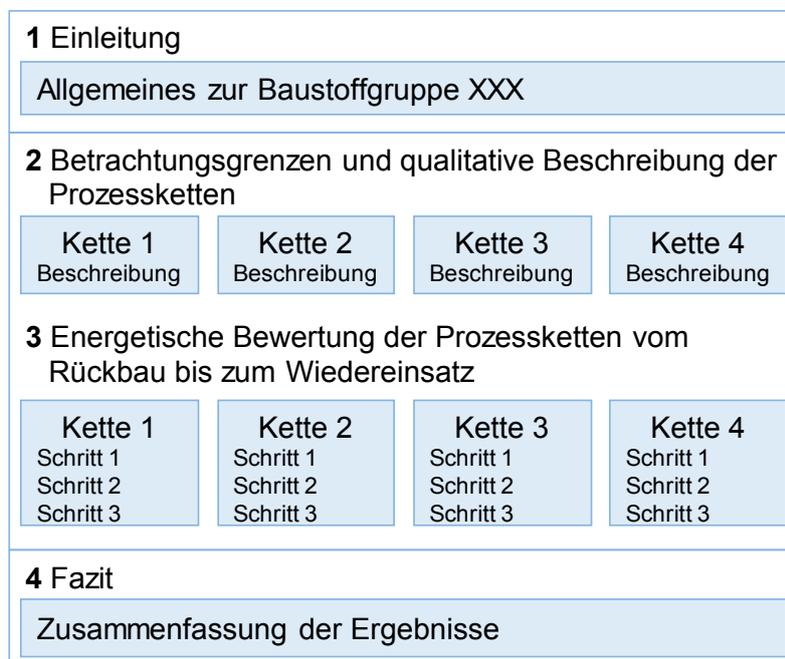


Abbildung 2-10: Einheitliche Dokumentation der ausgewählten Bauproduktgruppen – Bauprodukt-„Steckbrief“ (Quelle: eigene Darstellung).

3. Sekundärstoffgewinnung der zehn Bauproduktgruppen vom Rückbaumaterial bis zum Substitut

3.1 Beton

3.1.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe Beton

Beton ist ein solider und bewährter Baustoff, der insbesondere im Hochbau vielseitig eingesetzt wird. Die Entwicklungen der Betoneigenschaften sind seit jeher auf die Art seiner Bewehrung, seiner Verarbeitbarkeit und seiner Festigkeit gerichtet. Neben anderen Mauerwerksbaustoffen zählt Beton zu den Massenbaustoffen, weshalb beim Abbruch von Hochbauprojekten große Mengen Beton- und Mauerwerksbruch sowie Baustoffgemische der beiden Fraktionen anfallen. Aufgrund moderner Verbundtechniken und Mischbauweisen können die beiden Fraktionen auf der Baustelle nur selten vollständig sortenrein erfasst werden. Nach Müller (2018) betrug die jährlich rückgebaute Menge an Beton 1950 noch ca. 9 Mio. Tonnen, während heute jährlich etwa 30 Mio. Tonnen abgebrochen werden. Durch anhaltende Neubautätigkeiten steigt die kumulierte Menge an Beton im Bauwerksbestand zunehmend.

Für den Einsatz im Hochbau wird Betonbruch üblicherweise zu einer Recycling-Gesteinkörnung (RC-GK) verarbeitet und findet dann in Abhängigkeit der Anteile an Klinker, nicht porosiertem Ziegel, Kalksandstein, anderen mineralische Bestandteilen (z. B. Putz, Mörtel, Porenbeton, Bimsstein), Asphalt und Fremdbestandteilen (Gips, Glas, Gummi, Holz, Keramik, Kunststoff, Metall, Papier, Pflanzen u. a.) seine Anwendung in RC-Betonen unterschiedlicher Expositionsklassen im Hoch- und Tiefbau. Der Einsatz von RC-GK im Beton etabliert sich allmählich. Dennoch ist anzumerken, dass Branchenkenner zufolge im Baualltag zunehmend die Anwendung von hochfesten Betonen, gefügedichten Leichtbetonen, kunststoffmodifizierten, faser- und textilbewehrten Betonen oder auch sogenannten selbstverdichtenden Betonen steigt, für die der Einsatz von Rezyklatmaterial als Zuschlagstoff gemeinhin ausscheidet und dementsprechend auch in den bislang bestehenden Zulassungsregelungen (insbesondere DAfStB-Richtlinie) schon ausgeschlossen war.

Im Tief- und Straßenbau wird die aus Betonbruch gewonnene RC-GK üblicherweise als Schüttgut in Tragschichten sowie in Frostschutzschichten eingesetzt. Auch hier spielt der Anteil an Fremdbestandteilen eine wesentliche und zugleich limitierende Rolle.

Seit einigen Jahren werden RC-GK aus stationären Anlagen zur Herstellung von Beton verwendet. Je nach Anteil der Bestandteile (Beton, Ziegelmauerwerk, Kalksandstein usw.) werden vier Typen von RC-GK unterschieden. Durch Bestimmung der Bestandteile und Ermittlung ihrer Massenanteile erfolgt eine Einteilung in die vier Typen entsprechend Tabelle 3-1 nach DIN EN 12620:2008-07 in Verbindung mit DIN 4226-101 und DIN 4226-102 (WECOBIS, 2018). Die Qualität der RC-GK bestimmt wesentlich die Güte und die Eigenschaften des RC-Betons. Wichtig sind die Freiheit von Verunreinigungen durch bspw. Holzstückchen, bestimmte chemische Eigenschaften sowie eine exakte Körnungsabstufung bzw. Sieblinie. In der DIN 1045-2 werden Eigenschaften, Herstellung und Konformität von Beton geregelt. Dabei ist zu beachten, dass RC-GK Typ 3 und 4 nur für Beton außerhalb der DIN 1045-2 verwendet werden darf.

Neben der Herstellung von RC-GK aus rückgebautem Beton ist auch ein Rückbau und die Wiederverwendung ganzer Betonbauteile, insbesondere Betonplatten, technisch möglich. Aktuell stellt jedoch die Herstellung von RC-GK die geläufigere Aufbereitungsvariante dar (DBU, 2016).

Tabelle 3-1: Bestandteile und Anteile von rezyklierten Gesteinskörnungen zum Einsatz als Zuschlagstoff in RC-Beton nach DIN EN 12620:2008-07 in Verbindung mit DIN 4226-101 und DIN 4226-102 (Tabelle aus WECOBIS, 2018).

Bestandteile	Anteile in M.-%			
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Beton, Gesteinskörnungen	≥ 90	≥ 70	≤ 20	
Klinker, nicht porosierter Ziegel			≥ 80	≥ 80
Kalksandstein	≤ 10	≤ 30	≤ 5	
andere mineralische Bestandteile (z. B. Putz, Mörtel, Porenbeton, Bimsstein)	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile (Gips, Glas, Gummi, Holz, Keramik, Kunststoff, Metall, Papier, Pflanzen u. a.)	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1
	bis C 30/37	bis C 25/30		bis C 8/10

3.1.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Sondierungsstudie konnten für die Bauproduktgruppe Beton drei typische Prozessketten identifiziert werden, die in Abbildung 3-1 dargestellt sind. Die drei untersuchten Prozessketten wurden instruktiv entwickelt, indem typische Rückbauqualitäten, Einsatzvarianten und Aufbereitungsverfahren ermittelt und zu durchgehenden Prozessketten zusammengeführt wurden.

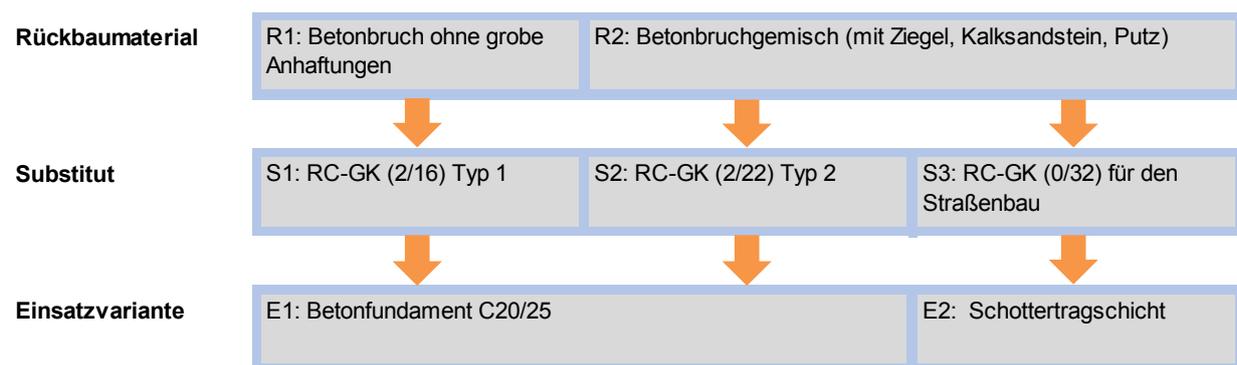


Abbildung 3-1: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Beton (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Betonbruch ohne grobe Anhaftungen

Substitut: RC-GK (2/16) Typ 1

Einsatzvariante: Betonfundament C20/25, XC3, F3, GK16 mm nach DAfStb- Richtlinie, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

Die Erfahrungen aus verschiedenen Pilotprojekten mit aus sortenreinem Altbeton hergestellten Gesteinskörnungen (Typ 1) zeigen, dass sich RC-Betone von konventionellen Betonen nicht oder nur unwesentlich unterscheiden. Für die Verwendung der Gesteinskörnungen von Typ 2 gibt es bisher nur geringe Erfahrungswerte. Erste Ergebnisse aus einem Pilotprojekt in Baden-Württemberg zeigen, dass auch die Anwendung ziegelreicher Gesteinskörnungen nach Typ 2 ohne Abstriche an die Betoneigenschaften möglich ist (UM BW, 2013).

Die bau- und umwelttechnischen Anforderung für die Herstellung rezyklierter Gesteinskörnungen im Betonbau ergeben sich maßgeblich aus der DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten GK nach DIN EN 12620" in Verbindung mit DIN 4226-101 und DIN 4226-102.

Auf dieser Grundlage müssen RC-GK Typ 1 über einen Betonanteil von über 90 M.-% und RC-GK Typ 2 von über 70 M.-% verfügen. Gleichzeitig liegt der Maximalanteil von Klinker-, Ziegel-, und Kalksandsteinmaterial für RC-GK Typ 1 bei 10 M.-% und für RC-GK Typ 2 bei 30 M.-%. Für die Herstellung von Spannbeton und Leichtbeton sind rezyklierte Gesteinskörnungen nicht zugelassen. Zudem sind die Anforderungen der Alkalirichtlinie zu beachten. Der Körnungsanteil < 2mm muss grundsätzlich aus Primärmaterial bereitgestellt werden (DAfStb-Alkalirichtlinie, 2013).

Für Betonfundamente C20/25 (E1) können in Abhängigkeit der Expositionsklasse RC-GK (2/16) Typ 1 (S1) sowie RC-GK Typ 2 (S2) eingesetzt werden. In der Praxis wird eine RC-GK (2/16) Typ 1 in erster Linie aus Betonbruch ohne grobe Anhaftungen (R1) gewonnen. Nach der Richtlinie des DAfStb darf Typ 1 je nach Expositionsklasse bis zu 45 Vol.-% im Zuschlag enthalten sein, Typ 2 bis zu 35 Vol.-% (DIN EN 12620 in Verbindung mit DIN 4226-101 und DIN 4226-102).

Durch den Einsatz von RC-GK in Beton werden in erster Linie die Primärstoffe Kies, Splitt und Schotter ersetzt. In der vorliegenden Studie sollte in erster Linie auf Werte aus der Ökobaudat zurückgegriffen werden. In Expertengesprächen stellte sich heraus, dass die Energiekennwerte zur Herstellung von Splitt und Schotter deutlich von anderen Datenbanken und Erfahrungswerten abweichen. Aus diesem Grund werden in der Gegenüberstellung (Schritt 3) zusätzlich Werte aus der DIN EN konformen Datenbankecoinvent herangezogen.

Für die Bewertung der Unterschiede der Weiterverarbeitung von RC-GK und deren äquivalenten Primärstoff wurde eine repräsentative Standardrezeptur für Beton herangezogen. Den Erläuterungen zu den EPDs von Beton zufolge setzt sich standardmäßig das Kies-Splitt-Gemisch für Beton durchschnittlich aus 80 % Kies und 20 % Splitt zusammen (Becke et al., 2014). RC-Sande können in der Herstellung von Beton den Primärstoff Sand nicht ersetzen, finden jedoch Anwendung im Tief- und Straßenbau (Mettke & Heyn, 2010).

Prozesskette R2-S2-E1

Rückbaumaterial: Betonbruchgemisch (Ziegel, Kalksandstein, Putz)

Substitut: RC-GK (2/22) Typ 2

Einsatzvariante: Betonfundament C20/25, XC3, F3, GK16 mm nach DAfStb- Richtlinie, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

RC-GK Typ 2 (S2) setzt nach DAfStb-Richtlinie, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 einen geringeren Minimalanteil an Beton als RC-GK Typ 1 voraus. Ausgangsmaterial ist demnach meist ein Betonbruchgemisch mit höheren Anteilen an Ziegel, Kalksandstein und Putz (R2). Der maximale Anteil an RC-GK, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung in Beton, liegt bei der Verwendung einer RC-GK Typ 2 bei bis zu 35 Vol.-%, während der Anteil an RC-GK Typ 1 bis zu 45 Vol.-% betragen darf.

Weitere Informationen zur Einsatzvariante E1 sowie zu den Regelungen zum Einsatz von RC-GK für RC-Beton ist den voranstehenden Erläuterungen zu Prozesskette R1-S1-E1 zu entnehmen.

Prozesskette R2-S3-E2

Rückbaumaterial: Betonbruchgemisch (Ziegel, Kalksandstein, Putz)

Substitut: RC-GK (0/32)

Einsatzvariante: Schottertragschicht nach TL Gestein-StB 04 (sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09)

Für den Einsatz von RC-GK als Schottertragschicht kommt üblicherweise ebenfalls ein aufbereitetes Betonbruchgemisch (R2) zum Einsatz. Die Höchstwerte an Ziegel, Kalksandstein und anderer Fremddanteilen werden in den Regelwerken TL Gestein-StB 04 sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09 festgelegt.

RC-GK der Korngröße 0/32 ist die im Straßenbau am häufigsten zum Einsatz kommende RC-GK. Für die Herstellung von (Schotter-) Tragschichten ohne Bindemittel werden Kiese, Sande, Schotter und Splitte und die daraus möglichen Gemische verwendet. Da in erster Linie Kies und Schotter substituiert werden, wurde in der vorliegenden Studie der durchschnittliche energetische Herstellungsaufwand für dieses Primärstoffgemisch als Vergleichsgrundlage gewählt (gem. Ökobaudat, 2016).

Maßgeblich sind die „Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau TL Gestein-StB 04“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswegebau (FGSV). Hier finden sich Angaben über die umweltrelevanten Merkmale für eine Reihe von unterschiedlichen, industriell hergestellten Gesteinskörnungen sowie für Recycling-Baustoffe. Dabei werden Richtwerte für die Schadstoffe im Feststoff und für das gelöste Material - dem Eluat - unterschieden. Allerdings ist anzumerken, dass die angegebenen Richt- und Grenzwerte vorbehaltlich der Regelungen der zuständigen Landesbehörden gelten.

Für RC-Baustoffe sind weiterhin, bezogen auf die bereits genannte Verwendung, die für Primärbaustoffe geltenden bautechnischen Regelwerke heranzuziehen. So müssen zum Beispiel für einen Einsatz von RC-Baustoffen als Frostschutz- oder Tragschicht im Straßenbau die Regelungen der TL SoB-StB 04 eingehalten werden und bei einem Einsatz in Lärmschutzwällen die TL BuB E-StB 09.

3.1.3 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen betrachtet. Für die Herstellung von RC-GK aus Betonbruch ohne grobe Anhaftungen (R1) und Betonbruchgemischen (R2) sind dies die Prozesse Brechen, Vorabsiebung, Zerkleinerung, Metallabscheidung, Gipsabscheidung, Handauslese, Klassierung, Leichtstoffabtrennung, Nassaufbereitung. Die Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf Durchschnitten zu technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoffs wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert (Übergang vom Sekundärstoff zum funktional äquivalenten Substitut) und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.1.3.1 Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff



Abbildung 3-2: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Betonbruch ohne grobe Anhaftungen (R1) zu RC-Gesteinskörnungen (2/16) des Typs 1 (S1) zur Weiterverarbeitung zu RC-Beton C20/25 (E1) sind die Prozessschritte D1, D4 und D7-D9 (Vorabsiebung, Gipsabscheidung, Leichtstoffabtrennung, Nassaufbereitung, Klassierung) zwar üblich, jedoch nicht immer erforderlich, sodass diese Prozessschritte als optional betrachtet werden können. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 52 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge.

Etwa 28 M.-% ist Betonbruch der Korngrößen 16/22, 22/32 und 32/56, welcher weiter auf die Zielgröße zerkleinert oder für andere Einsatzzwecke verwendet werden kann. Dementsprechend wird dieses Material in den Berechnungen als weiter verwertbar betrachtet und mit einer Energieallokation versehen. Auf Deponien zu entsorgende Stör- und Fremdstoffe fallen nur in geringen Mengen an. Sande finden teilweise als Verfüllung weiter Verwendung. Eine stoffliche Verwertung kommt auch für Metall (ca. 1,5 M.-%) infrage, sodass auch hier eine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-2 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-2: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0.0427	0.0242	0.0335	0.0110	0.0225
Energieaufwand Ø	0.0448	0.0262	0.0355	0.0116	0.0239
Energieaufwand max.	0.0482	0.0296	0.0389	0.0127	0.0262

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

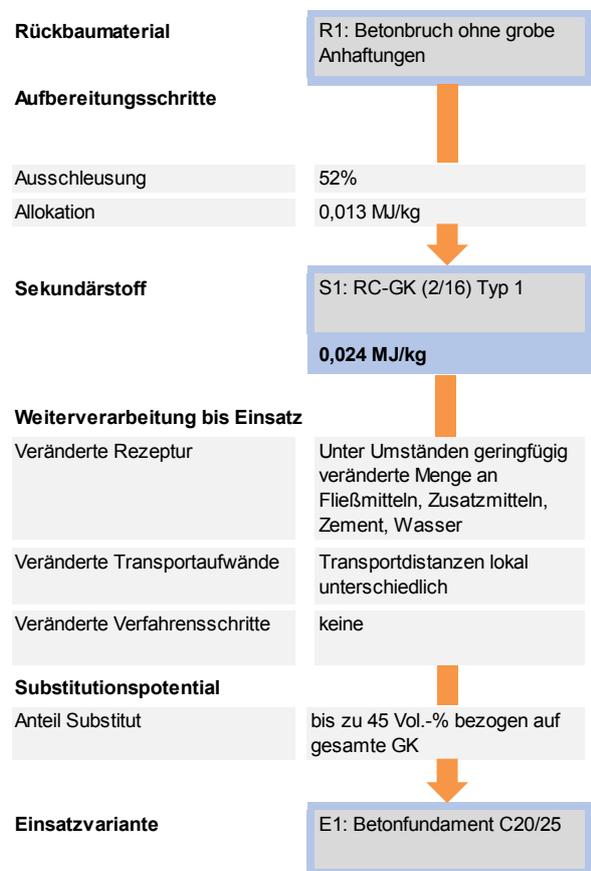


Abbildung 3-3: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).

Rezepturänderungen

Durch die Substitution von Primärstoffen (Kies, Schotter und Splitt) durch RC-GK müssen bei der Herstellung von Beton (E1) unter Umständen die Anteile an Fließmitteln, Zement, Wasser und ggf. weiteren Zusatzmitteln angepasst werden. Insbesondere eine Erhöhung des Zementanteils kann große Auswirkungen auf die Energiebilanz des einsatzfähigen Betonprodukts haben. Pilotvorhaben haben jedoch gezeigt, dass die Zementmenge beim Einsatz von RC-GK prinzipiell nicht erhöht werden muss (Mettke & Heyn, 2010). Für die Berechnung von Energieaufschlägen bzw. -abzügen in Schritt 3 wurden die in Tabelle 3.3 dargestellten Standardrezepturen berücksichtigt und quantifiziert.

Tabelle 3-3: Rezepturen und Masseanteile von Standard- und RC-Beton (mit 45% Substitutanteil) und deren Auswirkungen auf den Primärenergieinhalt (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton).

	MJ/kg	Standardbeton			RC-Beton		
		M.-%***	M.% GK	MJ/kg	M.-%***	M.% GK	MJ/kg
Zement *	2,410	14%		0,333	15%		0,350
Wasser	0,000	8%		0,000	8%		0,000
nat. GK		79%	100%		48%	55%	
<i>nat. Sand 0/2</i>	0,049	27%	34%	0,013	24%	28%	0,012
<i>Kies und Schotter 16/22** (1)</i>	0,097	20%	26%	0,020	24%	28%	0,023
nat. GK rund (4/x) und GK gebrochen (4/x) ** (2)	0,057	20%	26%	0,012	24%	28%	0,014
<i>Kies und Splitt 2/8**</i>	äqu. Primärstoff	11%	14%		0%	0%	
<i>Kies und Splitt 8/16**</i>	äqu. Primärstoff	20%	26%		0%	0%	
RC-GK	Substitut		0%		38%	45%	
Summe (1)				0,365			0,385
Summe (2)				0,357			0,376
Unterschied RC- zu Standardbeton (1)						+	0,020 MJ/kg Beton
						+	0,052 MJ/kg RC-GK
Unterschied RC- zu Standardbeton (2)						+	0,018 MJ/kg Beton
						+	0,048 MJ/kg RC-GK

* gem. Ökobaudat 1.1.01: Zement

** (1) 80% Kies (ökobaudat), 20% Schotter/Splitt (ökobaudat)⁵

** (2) 80% nat. GK rund (4/x) (ecoinvent 3.4), 20% GK gebrochen (4/x) (ecoinvent 3.4)

*** https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden_R-Beton.pdf, S. 9

Veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort)

In einer Fallstudie der BTU Cottbus wurde der Energieaufwand für den Antransport von RC-GK, Sand, Kies und Splitt berechnet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die Materialien hinsichtlich ihrer Schüttdichte nicht gravierend unterscheiden, sodass für alle Materialien ein Wert von 0,0013 MJ/kg*km angenommen wurde (Mettke & Heyn, 2010). Die Transportentfernungen von RC-Materialien und Primärstoffen hingegen fallen laut Mettke & Heyn in Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorten meist sehr unterschiedlich aus. Aufgrund regionaler Unterschiede können demnach für die Transportdistanzen von RC- und Primärmaterialien keine pauschalen Annahmen getroffen werden. Bei geringeren oder ähnlichen Transportdistanzen im Vergleich zu Primärmaterial ergibt sich ein

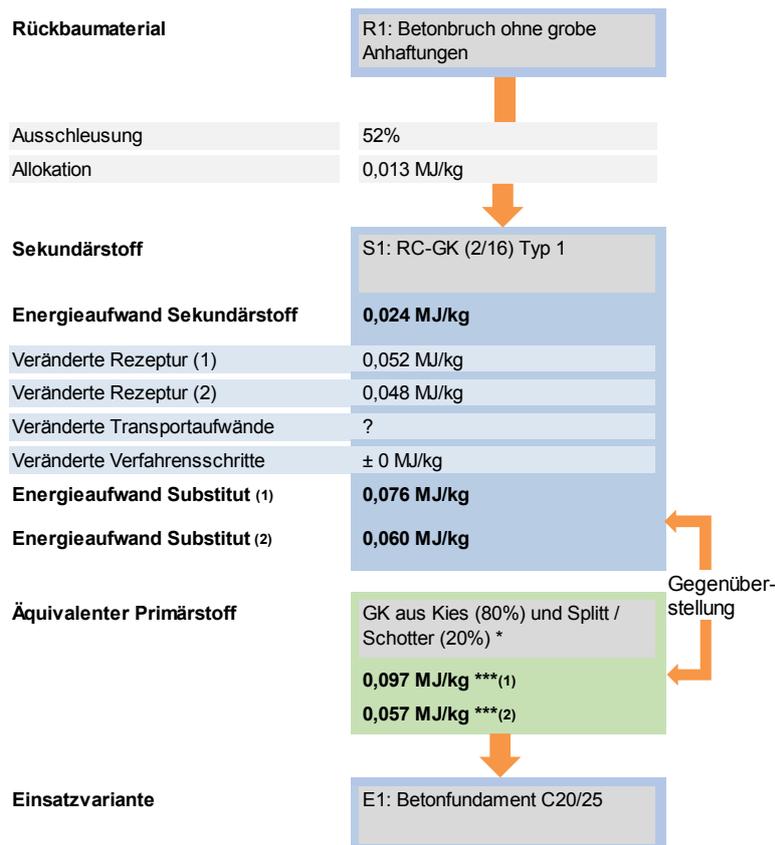
⁵ Es liegen Hinweise vor, dass der Energiekennwert für Splitt/Schotter in der Ökobaudat zu hoch eingeschätzt wurde. Demnach wird ein zweiter Vergleichswert aus der DIN EN 15804-konformen Datenbank ecoinvent herangezogen.

deutlicher energetischer Vorteil für die RC-GK. Eine Steigerung des energetischen Vorteils für RC-GK kann durch einen weiteren Ausbau des Recyclingnetzes und damit der Verringerung von Transportdistanzen zwischen produzierenden Unternehmen und Recyclingwerken erreicht werden.

Veränderte Verfahrensschritte

Durch den Einsatz von RC-GK anstelle von Primärgesteinskörnungen kommt es weder bei der Herstellung von Beton (E1) noch von (Schotter-)Tragschichten im Straßenbau (E2) zu verfahrenstechnischen Unterschieden.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* aktuell durchschnittliches Mischungsverhältnis gem. InformationsZentrum Beton GmbH: "Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton", 2014, S. 10.

*** (1) Kies 2/32 nicht getrocknet (0,04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und Splitt 2/15 (0,28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02)

*** (2) nat. GK rund (4/x) (0,05396 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4) und GK gebrochen (4/x) (0,06722 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4)

Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-4 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts in Abhängigkeit des Vergleichswerts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs.

Dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe (MIRO) zufolge liegt der in der Ökobaudat bereitgestellte Energiewert für die Herstellung von Splitt/Schotter weit über dem tatsächlichen Wert. Einer von MIRO durchgeführten Erhebung über 120 Unternehmen zufolge ist für die Herstellung (A1-3) von natürlichen und gebrochenen Gesteinskörnungen ein durchschnittlicher Energieaufwand von 29 bis 35 MJ/kg vonnöten.

Objektiv kann keine eindeutige Aussage darüber gemacht werden, ob die in der Ökobaudat angegebenen Werte zu Splitt/Schotter zu hoch eingeschätzt wurden, weshalb in dieser Studie Werte aus beiden Datenbanken (Ökobaudat, ecoinvent) als Vergleichswerte herangezogen wurden. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen von ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

3.1.3.2 Prozesskette R2-S2-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff



Abbildung 3-5: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Betonbruchgemisch mit Ziegel-, Kalksandstein-, Putzanteilen (R1) zu RC-Gesteinskörnungen (2/22) des Typs 2 (S2) zur Weiterverarbeitung zu RC-Beton C20/25 (E1) sind die Prozessschritte D1 und D7 (Vorabsiebung, Leichtstoffabtrennung) zwar üblich, jedoch nicht immer erforderlich, sodass diese Prozessschritte als optional betrachtet werden können. Eine Nassaufbereitung kommt hier in der Regel nicht infrage. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 39 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Etwa 22 M.-% ist Betonbruch der Korngröße 22/32 und 32/56, welcher weiter auf die Zielgröße zerkleinert oder für andere Einsatzzwecke verwendet werden kann. Dement-

sprechend wird dieses Material in den Berechnungen als weiter verwertbar betrachtet und mit einer Energieallokation versehen. Auf Deponien zu entsorgende Stör- und Fremdstoffe fallen nur in geringen Mengen an. Sande finden teilweise als Verfüllung weiter Verwendung. Eine stoffliche Verwertung kommt auch für Metall (ca. 1,5 M.-%) infrage, sodass auch hier eine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3.5 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-4: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0353	0,0239	0,0296	0,0085	0,0212
Energieaufwand Ø	0,0374	0,0250	0,0312	0,0090	0,0222
Energieaufwand max.	0,0409	0,0268	0,0338	0,0099	0,0239

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

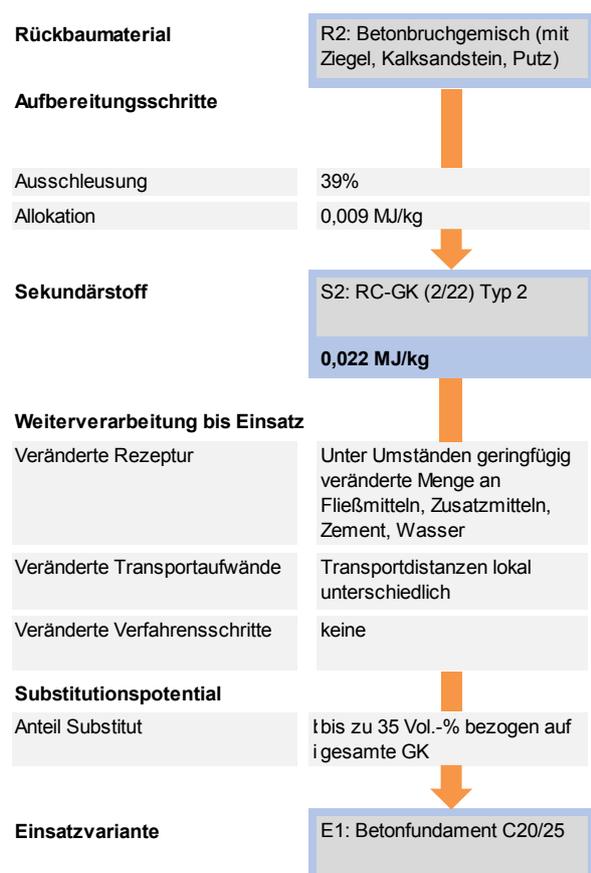
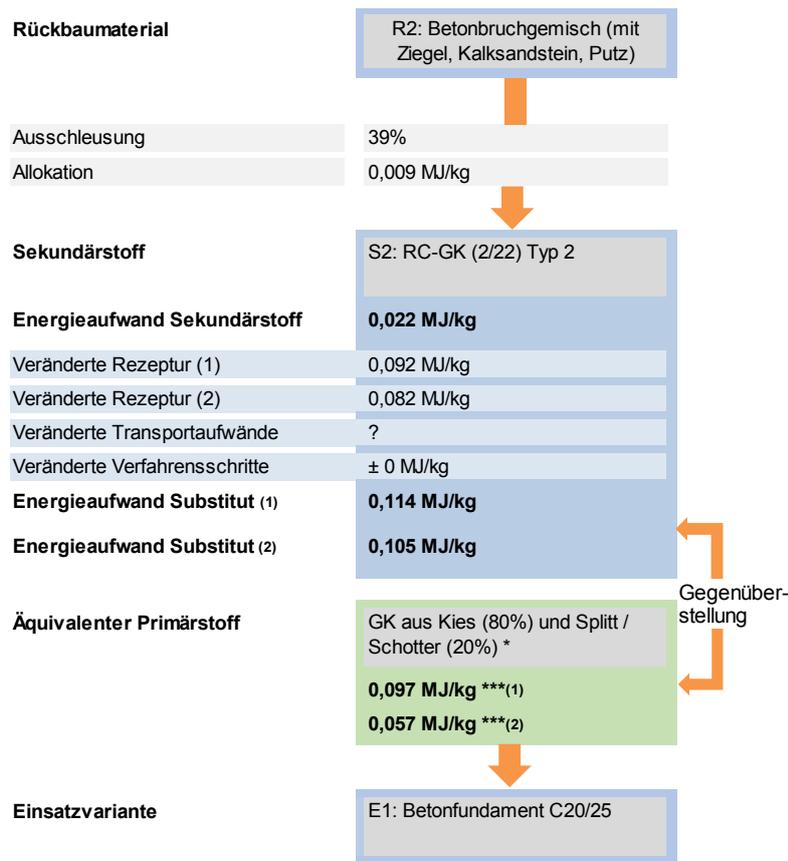


Abbildung 3-6: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.1.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* aktuell durchschnittliches Mischungsverhältnis gem. InformationsZentrum Beton GmbH:

"Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton", 2014, S. 10.

*** (1) Kies 2/32 nicht getrocknet (0,04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und Splitt 2/15 (0,28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02)

*** (2) nat. GK rund (4/x) (0,05396 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4) und GK gebrochen (4/x) (0,06722 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4)

Abbildung 3-7: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-7 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit RC-Anteilen (Mehraufwand Zement) etwas über dem Energieaufwand für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs liegt. Wird ausschließlich der Energieaufwand bis zum Sekundärstoff betrachtet, liegt dieser deutlich unter dem Energieaufwand für die Herstellung des Primärstoffs.

Wie im vorstehenden Kapitel erläutert, wurden aufgrund von Unsicherheiten zum Vergleich Werte aus der Ökobaudat sowie aus ecoinvent herangezogen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen von ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

3.1.3.3 Prozesskette R2-S3-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff



Abbildung 3-8: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Betonbruchgemisch mit Ziegel-, Kalksandstein-, Putzanteilen (R1) zu RC-Gesteinskörnungen (0/32) (S3) zum Einsatz in Schottertragschichten (E2) sind die Prozessschritte D1 und D7 (Vorabsiebung, Leichtstoffabtrennung) zwar üblich, jedoch nicht immer erforderlich, sodass diese Prozessschritte als optional betrachtet werden können. Die Schritte D6, D8 und D9 (Klassierung mit Rückführung und Zerkleinerung, Nassaufbereitung, Klassierung) kommen hier in der Regel nicht infrage. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 18 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Etwa 8 M.-% ist Betonbruch der Korngröße 32/56, welcher weiter auf die Zielgröße zerkleinert oder für andere Einsatzzwecke verwendet werden kann. Dementsprechend wird dieses Material in den Berechnungen als weiter verwertbar betrachtet und mit einer Energieallokation versehen. Auf Deponien zu entsorgende Stör- und Fremdstoffe fallen nur in geringen Mengen an. Sande finden teilweise als Verfüllung weiter Verwendung. Eine stoffliche Verwertung kommt auch für Metall (ca. 1,5 M.-%) infrage, sodass auch hier eine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-5 zeigt die Bandbreite des

errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-5: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0297	0,0184	0,0241	0,0020	0,0221
Energieaufwand Ø	0,0310	0,0188	0,0249	0,0021	0,0228
Energieaufwand max.	0,0330	0,0192	0,0261	0,0022	0,0239

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

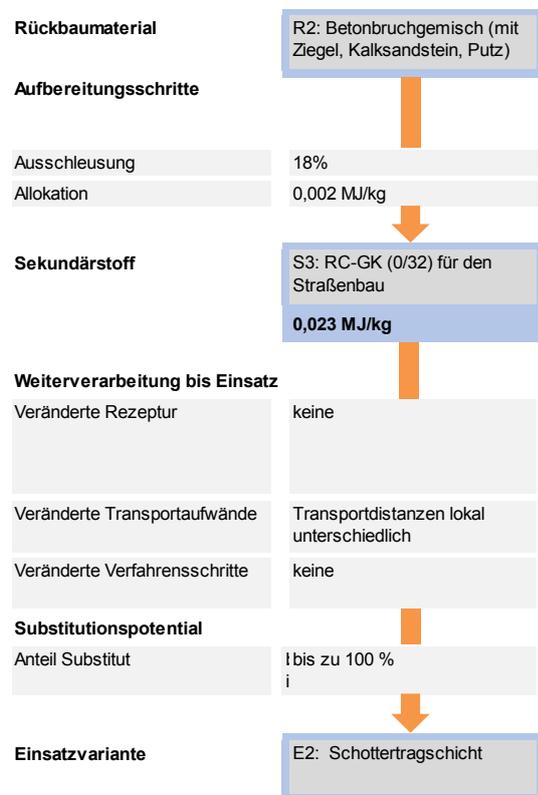
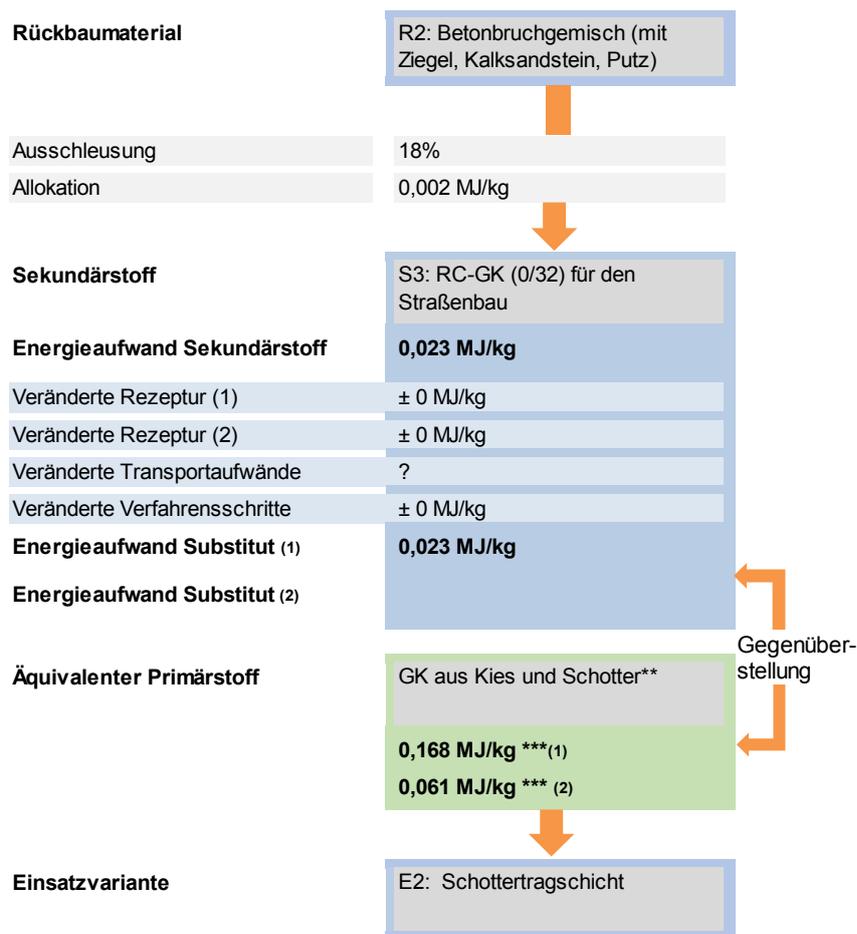


Abbildung 3-9: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Herstellung von (Schotter-)Tragschichten im Straßenbau ergeben sich durch die Substitution der Primärstoffe Schotter und Kies keine Rezepturveränderungen.

Veränderungen hinsichtlich der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.1.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



** nat. GK (50%) und gebrochene GK (50%)

*** (1) Kies 2/32 nicht getrocknet (0,04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und Splitt 2/15 (0,28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02)

*** (2) nat. GK rund (4/x) (0,05396 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4) und GK gebrochen (4/x) (0,06722 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4)

Abbildung 3-10: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S3-E2, Bauproduktgruppe Beton) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-10 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts deutlich geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit RC-Anteilen.

Wie in den vorstehenden Kapiteln erläutert, wurden aufgrund von Unsicherheiten zum Vergleich Werte aus der Ökobaudat sowie aus ecoinvent herangezogen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen von ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

3.1.4 Fazit

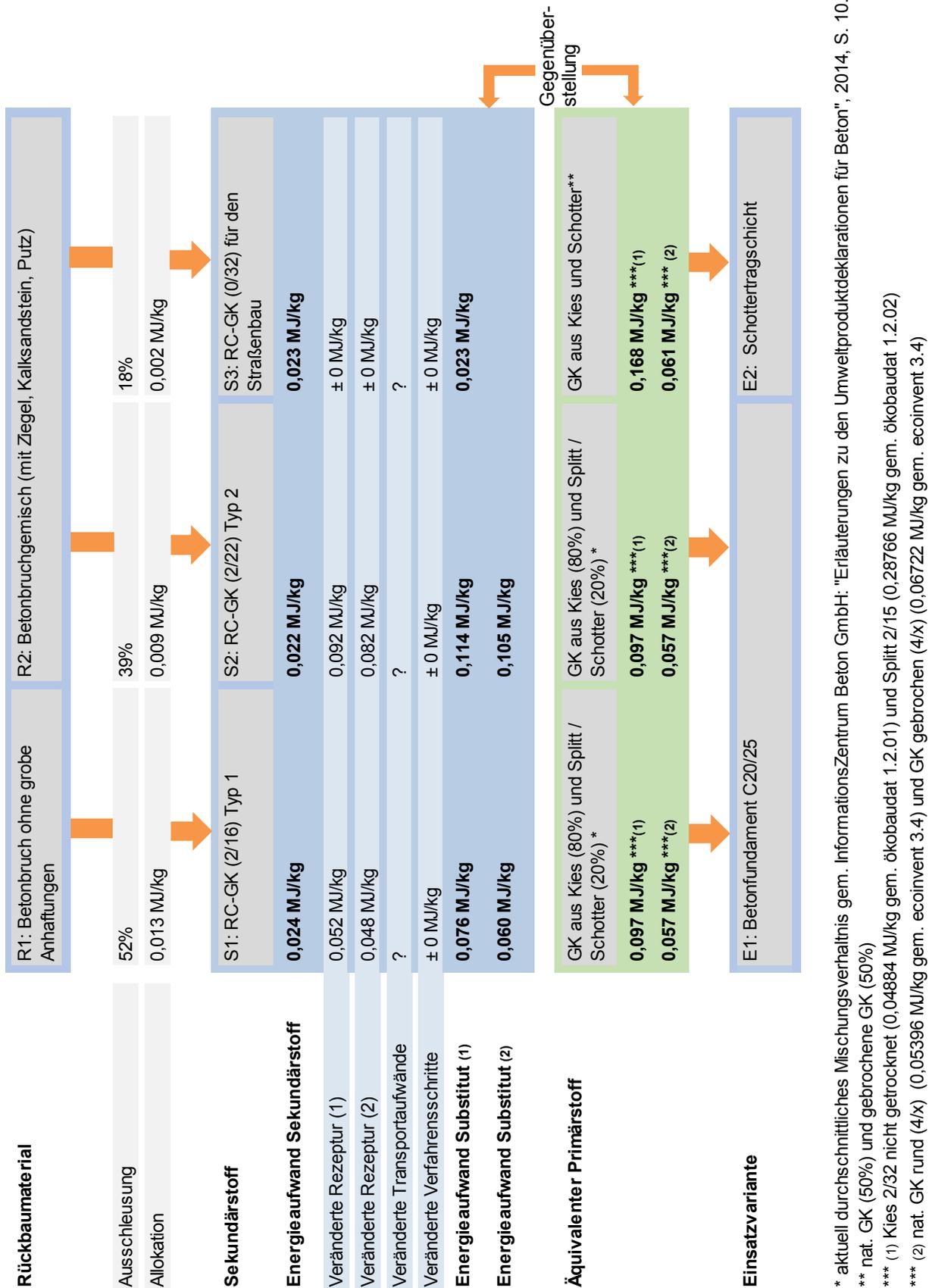


Abbildung 3-11: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Beton (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Beton-Recycling

Energieverbrauch	Die Herstellung des Substituts benötigt weniger Energie als die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Energieeinsparungen durch Recycling sind demnach möglich.
Besonderheiten	<p>Das energetische Substitutionspotenzial hängt stark von der Beschaffenheit des substituierten Primärmaterials ab. Je mehr gebrochene Gesteinskörnung substituiert wird, desto höher das Energieeinsparpotenzial, da der energetische Aufwand für die Herstellung von gebrochener GK verglichen mit natürlicher runder GK relativ hoch ist⁶. Wird Kies substituiert, fällt das energetische Einsparpotenzial relativ gering aus. Die Art des Primärstoffs hängt stark von der Region ab. In der vorliegenden Studie wurde eine nach Expertenangaben durchschnittliche Standardmischung von gebrochener und natürlicher GK gewählt.</p> <p>Es ist zu beachten, dass die Einbeziehung von Transportaufwandsunterschieden außerhalb der Bilanzgrenzen zu veränderten Ergebnisse führen kann.</p>
Ausschleusung & Allokationen	Je nach Ausgangsmaterial werden während des Recyclingprozesses ca. 18 - 52 M.-% des Materialinputs ausgeschleust. Große Teile des ausgeschleusten Materials bestehen aus gemischtem Betonbruch, welcher entweder für andere Einsatzzwecke verwendet oder weiter zerkleinert werden kann. Für dieses Material sowie für in geringen Mengen ausgeschleustes Metall wurde eine Energieallokation vorgenommen.
Primärstoffeinsparungen	Substituierbare Primärstoffe (Sand, Kies, Schotter) sind derzeit in Deutschland noch ausreichend verfügbar.
Flächennutzungskonflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von konkurrierenden Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar. Flächen für Deponien können eingespart werden.

⁶ Es liegen Hinweise vor, dass der Energiekennwert für Splitt/Schotter in der ÖkobaDat zu hoch eingeschätzt wurde. Ecoinvent sowie Erhebungen des Bundesverbands für Mineralische Rohstoffe zufolge ist dieser Wert deutlich geringer.

3.2 Ziegel

3.2.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe Ziegel

Ziegel sind ein seit Jahrtausenden bewährter Baustoff. Heute gibt es viele unterschiedliche Formen und Ausführungen von Ziegeln, wobei grundsätzlich zwischen Mauer- und Dachziegeln unterschieden wird. Die Grundstoffe für Ziegel sind Lehm und Ton. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften wird zwischen getrockneten, weichgebrannten und hartgebrannten Ziegeln unterschieden, die unterschiedliche Druckfestigkeiten und Rohdichten haben.

Bei der gegenwärtigen Mauerziegelherstellung geht die Tendenz aus Gründen des Wärmeschutzes weg von schweren Vollziegeln zu immer leichteren Steinen mit geringeren Festigkeiten. Derartige Leichtziegel (oder auch Hochlochziegel) haben heute einen Lochanteil von bis zu rund 60 %. Als weitere Verbesserung des Wärmeschutzes werden der Ziegelrohmasse bis zu 40 Vol.-% Materialien (Sägemehl, Polystyrol) zugesetzt, die beim anschließenden Brand verglühen und so vorwiegend kugelförmige Lufträume im Ziegel erzeugen. Zur weiteren Verbesserung der Wärmedämmleistung können die Kammern mit wärmedämmendem Material, z. B. Perliten oder mineral. Dämmstoffen, gefüllt werden (Kolb, 2004).

Ein weiterer Trend ist die Herstellung von großformatigen Planziegeln, welche mit größerer Genauigkeit gefertigt werden und beim Verbinden weniger Mörtel benötigen als herkömmliche Ziegel. Andere Mauerwerksbaustoffe (mineralisch gebunden) sind Leichtbeton, Porenbeton und Kalksandstein. Auf Grundlage von Zeitreihen kann die Zusammensetzung von Mauerwerk einerseits und die Ermittlung der im Gebäudebestand kumulierten Menge an Mauerwerkbaustoffen andererseits abgeschätzt werden, was eine Aufteilung in 39,7 M.-% Ziegel, 35,4 M.-% Kalksandstein, 2,9 M.-% Porenbeton, 12,9 M.-% Leichtbeton und 9,1 M.-% Mörtel ergibt (Müller, 2018).

3.2.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden für die Produktgruppe Ziegel die üblichen Rückbauqualitäten „Ziegelreiche Abbruchabfälle“ (R1), „Dachziegel mit Anhaftungen“ (R2), „Hintermauerziegel mit Anhaftungen und mit Dämmstoff gefüllt“ (R3) sowie „Mauerziegel, Vormauerziegel und Klinker mit Anhaftungen“ (R4) untersucht (vgl. Abbildung 3-12). Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die Hauptprozesse in der Aufbereitungsanlage für die Berechnung mit einbezogen. Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (Modul C1 und C2).

Die für bestimmte Einsatzzwecke hergestellten Substitute werden in der Regel noch weiter konfektioniert und bis zum Einsatzort transportiert. Die Unterschiede zwischen der Herstellung von Bauprodukten mit und ohne RC-Anteil werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialeben mitberücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

Aus den Rückbaumaterialien Dachziegel mit Anhaftungen (R2) und Mauerziegel, Vormauerziegel und Klinker mit Anhaftungen (R4) können weitere Substitute für andere Einsatzzwecke gewonnen werden, die

sich stofflich nur wenig vom untersuchten Sekundärmaterial unterscheiden, jedoch andere Korngrößen (KG) und Reinheit voraussetzen. Die alternativen Einsatzvarianten finden in den Berechnungen dieser Studie keine Beachtung, sind jedoch in Abbildung 3-12 mit aufgeführt.

Sortenreiner Ziegelbruch kann neben den untersuchten Rückbauqualitäten des Weiteren bei Dachumdeckungen anfallen oder durch produktionsinterne Ziegelabfälle gewonnen werden.

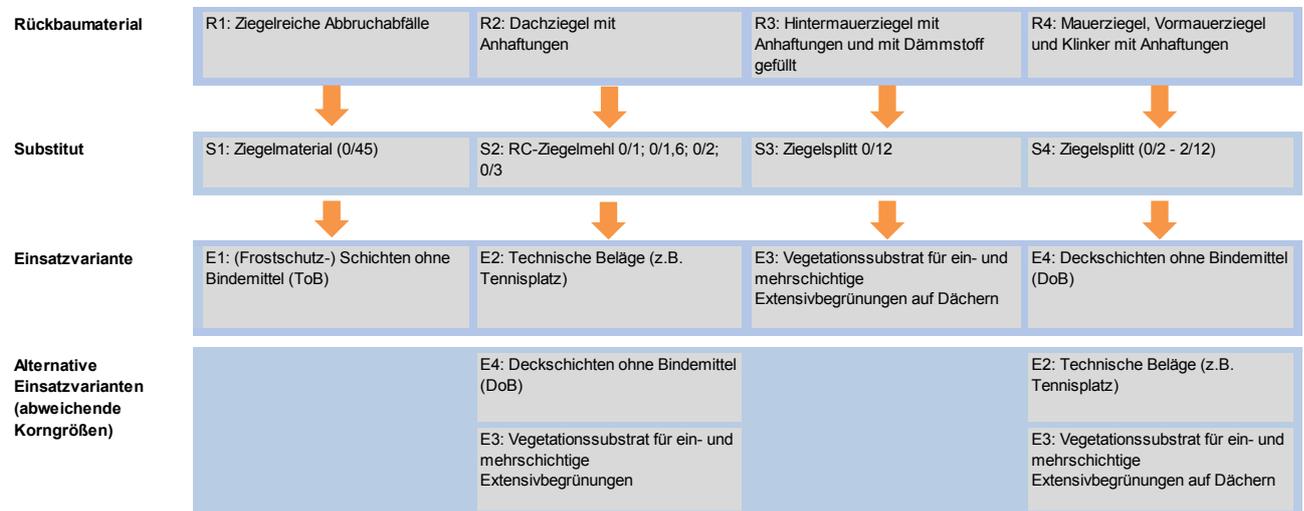


Abbildung 3-12: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Ziegel (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Ziegelreiche Abbruchabfälle

Substitut: Ziegelmaterial (0/45)

Einsatzvariante: (Frostschutz-)Schichten ohne Bindemittel (ToB) nach TL Gestein-StB 04 (sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09)

Ziegelreiche Abbruchabfälle (R1) entstehen beim Abbruch von Ziegelmauerwerk mit Mörtel und Putz als Nebenbestandteile. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität und zum Schutz vor Witterungseinflüssen werden auf Mauerwerk in der Regel Putze (außen meist Zement- oder Kalk-Zement-Putz, innen Gipsputz) aufgetragen. Des Weiteren wird Mauerwerk häufig mit weiteren Wärmedämmmaterialien verbunden. Der reine Ziegelgehalt von Ziegelmauerwerk hängt vom jeweiligen Mörtel- und Putzeinsatz ab. Der maximale Ziegelgehalt liegt bei ca. 95 M.-%, der durchschnittliche Gehalt bei ca. 80 M.-% (Müller, 2018). Die derzeit gängigste Einsatzvariante der gewonnenen Sekundärmaterialien stellt der Straßenbau dar, wo RC-GK Bestandteil von Schichten aus frostunempfindlichen Material und Frostschutzschicht ohne Bindemittel (ToB) nach TL Gestein-StB 04 (sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09) werden.

Beim Einsatz von RC-Baustoffen im Straßen- und Erdbau sind vor allem Baustoffe gefragt, die eine hohe Druck-, Schlag- und Witterungsbeständigkeit besitzen. Da sich insbesondere die stoffliche Zusammensetzung auf diese Eigenschaften auswirkt, sind die Anteile „weicher und unbeständiger“ Stoffe stark reglementiert. Das Substitutionspotenzial der Primärmaterialien Kies und Schotter beschränkt sich für RC-Ziegelmaterial aufgrund der in TL SoB-StB 04 geregelten Maximalanteile auf 30 M.-% (vgl. Tabelle 3-6).

RC-Baustoffe werden des Weiteren im Einsatz als Schüttmaterialien für Bodenaustausch- und Bodenverbesserungsmaßnahmen, für Bauwerkshinterfüllungen und -überschüttungen usw. als gängige Substitute von natürlichen Baustoffen gesehen. Sie werden in mobilen oder semimobilen Anlagen direkt auf Baustellen oder Abbruchorten oder in stationären Anlagen hergestellt (Schmidmeyer, 2014).

Tabelle 3-6: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von Recycling-Baustoffen im Anteil > 4 mm gemäß Technischer Regelwerke im Straßenbau der FGSV und deren länderspezifischen Ergänzungen.

Bestandteile	Gem. TL SoB-StB M.-%
Asphaltgranulat	≤ 30
Klinker, Ziegel und Steinzeug	≤ 30
Kalksandstein, Mörtel und ähnliche Stoffe	≤ 5
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, wie Poren- und Bimsbeton	≤ 1
Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien	≤ 0,2

Die technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04) sind für den Straßenbau verpflichtend einzusetzen, bei dem der Bund die Straßenbaulast trägt oder falls die Länder die TL SoB-StB 04 verpflichtend eingeführt haben. In der Praxis orientiert man sich auch außerhalb des Straßenbaus sowie im Erdbau meist an diesen Vorgaben.

Beim Einsatz von RC-Baustoffen ist neben der bautechnischen auch die umwelttechnische Qualität zu prüfen und sicherzustellen, dass keine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit ausgehen kann (gem. Wasserhaushaltsgesetz (WHG) § 48 Besorgnisgrundsatz i.V.m. § 8 Abs. 1 und § 9 Abs. 2). Dafür werden unterschiedliche Einbauklassen und Zuordnungswerte gemäß der durch die LAGA M20 eingeführten Systematik zugewiesen (vgl. Tabelle 3-7).

In der Praxis wird meist nur die Einbauklasse 1/2 1.1 nachgefragt, da bereits mit der Einbauklasse 1/2 1.2 ein höherer Aufwand verbunden ist und die Beachtung von Beschränkungen zu kompliziert ist. Materialien der Einbauklasse 2/2 2 finden oftmals keinen Absatzweg und müssen auf Deponien beseitigt werden (Schmidmeyer, 2014).

Tabelle 3-7: Einbauklassen und Zuordnungswerte nach LAGA 20 (2003).

		Einbaubereich
Einbauklasse 0 – nur Bodenmaterial Gilt nur für die Verwertung in bodenähnlichen Anwendungen (Verfüllung von Abgrabungen und Abfallverwertung im Landschaftsbau außerhalb von Bauwerken)	Z 0	Uneingeschränkter Einbau
Einbauklasse 1 Für die Verwertung in technischen Bauwerken	Z 1.1 Z 1.2	Eingeschränkter Einbau
Einbauklasse 2 Für die Verwertung in technischen Bauwerken	Z 2	Einbau mit definierten technischen Sicherheitsmaßnahmen

Prozesskette R2-S2-E2

Rückbaumaterial: Dachziegel mit Anhaftungen

Substitut: RC-Ziegelmehl 0/1; 0/1,6; 0/2; 0/3

Einsatzvariante: Technische Beläge (z. B. Tennisplatz) nach DIN EN 18035-5 2007-08

Dachziegel gehören ebenso wie (Vor-)Mauerziegel und Klinker zu den hartgebrannten Ziegeln. Ihre Rohdichte sowie ihre Belastbarkeit sind höher als von weichgebrannten Ziegeln (z. B. Hintermauerziegel für den Innenbereich). Aus diesem Grund ergeben sich für weich- und hartgebrannte Ziegelmaterialien Substitute mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Dachziegel (R2) werden aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und gleichzeitig meist geringen Verunreinigung zu Ziegelmehl gebrochen und sind besonders gut für Technische Beläge geeignet, z. B. für Tennisplätze nach DIN EN 18035-5:2007-08:

Sportplätze – Teil 5: Tennenflächen. Ebenso gängig, jedoch in abweichenden Korngrößen (KG), ist der Einsatz in Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) und als Vegetationssubstrat.

Sortenreine Ziegelsande können im Sport- und Tennisplatzbau als RC- bzw. Sekundärbaustoffe verwertet werden. Diese Anwendungen bauen auf den charakteristischen Merkmalen von Ziegeln wie Porosität und neutrales chemisches Verhalten auf.

Die Nutzung von RC- bzw. Sekundärbaustoffen beim Tennissand führt unter Einhaltung einiger grundlegender Qualitätssicherungsmaßnahmen zu keinerlei Qualitätseinbußen oder Gesundheitsgefährdungen. Verunreinigungen können durch Qualitätskontrollen vermieden werden, welche durch die Forderung von Herkunftsnachweisen seitens der anliefernden Unternehmen, durch Sichtkontrollen bei der Anlieferung, sowie durch zusätzliche automatische und manuelle Sortier- und Ausscheidungsverfahren erfolgen. Die sich zwischenzeitlich aus umwelttechnischen Anforderungen abzeichnenden Einschränkungen sind aus dem Weg geräumt (Rosen, 2013).

Der Sandbelag ist der älteste und lange Zeit am häufigsten verwendete Belag für Tennisplätze. Neben dem Sandplatz verfügt auch der Hartplatz über die charakteristischen kleinen Steinchen. Allerdings unterscheiden sich beide bereits in der Färbung. Für Hartplätze wird kein zermahlener Ton verwendet, sondern es kommt Vulkanasche zum Einsatz, welche meist etwas blasser sowie feiner ist und sich daher besser verdichten lässt. Neben diesen Belägen wird der aus den USA stammende Spezialbelag CANADA TENN auch in Deutschland immer beliebter. Grundstoff bildet das Gestein „Grüner Diabas“ (auch „Grünstein“ genannt), welcher anschließend mit einem hydraulischen Bindemittel versetzt wird. Hierdurch bekommt er eine höhere Belastungsfähigkeit als der rote Sandbelag und erfordert deshalb weniger Pflegeaufwand. Da sich ein Trend zu diesem Spezialbelag abzeichnet, wird in der vorliegenden Studie das Gestein „Grüner Diabas gebrochen“ als äquivalenter Primärstoff angesetzt.

Gemäß DIN EN 18035-5:2007-08 ist eine Tennenfläche eine „wasserdurchlässige, mehrschichtige Sportfläche aus Baustoffgemischen (Gemische aus Gesteinskörnungen) ohne Bindemittel, bestehend aus Tennenbelag, dynamischer Schicht und ungebundener Tragschicht, die in ihrer Gesamtheit den Oberbau bilden.“

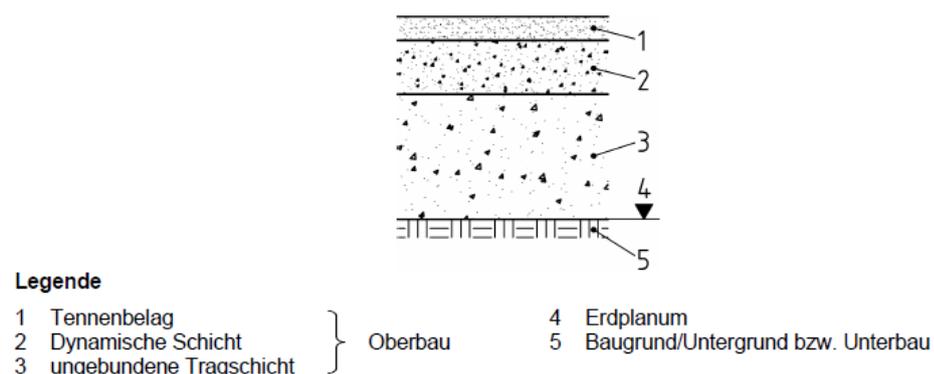


Abbildung 3-13: Schichtenfolge von Tennenflächen (Abbildung aus DIN EN 18035-5:2007-08).

Der Tennenbelag ist die oberste Schicht der Tennenfläche, von deren Beschaffenheit die sportfunktionellen Eigenschaften und die Schutzwirkung für die Sportler abhängen, die bei Spielfeldern und Leichtathletikanlagen einschichtig, bei Tennisfeldern ein- oder mehrschichtig ist.

Für den Tennenbelag für Tennisfelder sind einschichtige Beläge (mit einem Baustoffgemisch 0/2 mm) sowie mehrschichtige Aufbauten (Kombinationen aus den Baustoffgemischen 0/1 mm, 0/2 mm und 0/3 mm) zulässig. Die stoffliche Zusammensetzung ist in der DIN EN 18035-5:2007-08 gemäß Tabelle 3-8 geregelt.

Tabelle 3-8: Anforderungen an Baustoffgemische, die Wasserdurchlässigkeit und an die Oberflächenscherfestigkeit von Tennenflächen für Tennisfelder (Tabelle aus DIN EN 18035-5:2007-08).

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8
Zeile	Gesteinskörnung	Baustoffgemisch mm	Überkorn		Empfohlener Sieblinienbereich	Wasserdurchlässigkeit k^* cm/s	Oberflächenscherfestigkeit τ_s	Widerstand gegen Frost
			Massenanteil in % max.	mm max.				
1	Ziegelmaterial	0/1	10	1,4	nach Bild 5	$\geq 0,5 \times 10^{-4}$	≥ 40	Beim Frostversuch muss die Siebrückstandsfläche nach dem Versuch $\geq 95\%$ vom Ausgangswert sein. Prüfung nach 6.8
2	Ziegelmaterial, Haldenmaterial	0/2	10	2,8	nach Bild 6	$\geq 0,7 \times 10^{-4}$	≥ 40	
3	Ziegelmaterial, Haldenmaterial, natürliche Gesteinskörnungen	0/3	5	4,2	nach Bild 4	$\geq 1,0 \times 10^{-4}$	≥ 50	

Prozesskette R3-S3-E3

Rückbaumaterial: Hintermauerziegel mit Anhaftungen und mit Dämmstoff gefüllt

Substitut: Ziegelsplitt 0/12

Einsatzvariante: Vegetationssubstrat für ein- und mehrschichtige Extensivbegrünungen auf Dächern

Neben dem Erd-, Wege- und Straßenbau stellt der Garten- und Landschaftsbau (GaLaBau) ein interessantes Anwendungsgebiet für RC-Ziegelsplitt dar. Stofflich gesehen gibt es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den „speziellen“ RC-Baustoffen im GaLaBau und den stofflichen Gemischen des Erd- und Straßenbaus. Im GaLaBau sind jedoch auch Gesteinskörnungen mit geringerer Kornfestigkeit und Frostbeständigkeit und höherer Porosität einsetzbar, hier bestehen unter anderem Vorteile aufgrund der Wasserspeicherkapazität. Es ergeben sich daher weitere Absatzchancen für RC-Baustoffe, die den Ansprüchen des Erd- und Straßenbaus nicht genügen, z. B. für weichgebrannte Hintermauerziegel (R3). Sie eignen sich vor allem für durchwurzelte vegetationstechnische Anwendungen, wie Baum-, Dach- und Rasensubstrate (Großen & Kurkowski, 2013). Hintermauerziegel sind häufig mit Dämmstoffen gefüllt, um besonders gute Wärmedämmeigenschaften zu erreichen. Da es keine feste Verbindung zwischen Füllung und Ziegel gibt, sind die beiden Materialien einfach voneinander zu trennen und stellen für den Recyclingprozess kein Hindernis dar.

Anders als für Tragschichten ohne Bindemittel im Straßenbau (0/45) wird im GaLaBau bevorzugt eine geringere Korngröße von 0/22 und 0/32 verwendet. Hierdurch wird sichergestellt, dass auch geringere Schichtdicken für einfache Bauweisen genutzt werden (Großen & Kurkowski, 2013).

Die Qualitätsanforderungen an Vegetationssubstrat zur Dachbegrünung richten sich nach den FLL-Empfehlungen für Dachbegrünungen (FLL 2018) und sind nach Technischen Regeln gütegesichert (RAL-GZ 252: 2011-06 Dünger aus Recyclingprozessen; RAL-GZ 253:2004-06 Dachsubstrate; RAL-GZ 254:2004-03 Substratausgangsstoffe; RAL-GZ 259:2005-11 Baumsubstrate). Maßgeblich sind die Vorgaben der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) sowie der Düngemittelverordnung (DüMV).

Für den Einsatz in Kultursubstraten oder als Bodenhilfsstoffe im Sinne der DüMV sind ausschließlich sortenrein erfasster, aufbereiteter Tonziegel ohne losen oder anhaftenden Mörtel oder Beton zugelassen (Baustoff Recycling Bayern e.V., 2019).

Als Primärstoffe kommen im GaLaBau bzw. in der Vegetationstechnik (Substrate für die Dachbegrünung, Vegetationssubstrat zur Baumpflanzung, Substrate für die Rasenpflanzung) offeneporige Gesteine und Gesteinskörnungen wie Lava und Bims, Blähton oder Blähschiefer zum Einsatz, die regional oft nur begrenzt verfügbar sind. Nahezu sortenreiner Ziegel-RC-Splitt hingegen wird im gesamten Bundesgebiet aufbereitet und steht oft mit kurzen Transportentfernungen zur Verfügung.

In der vorliegenden Studie wurde exemplarisch die gängige Einsatzvariante der extensiven Ein- und Mehrschichtbegrünung (mineralisches/organisches Substrat, entmischungssicher zusammengesetzt, mit den Basiskomponenten Natur-Bims, Leicht-Lava, Rindenkompost, Grünkompost und Torf) auf Dächern gewählt. Da hier die Verkehrslast sehr gering ist, kann auch weichgebranntes Ziegelmaterial mit geringeren Druckfestigkeiten verwendet werden. Für Baum- und Rasenpflanzungen stellt die Vereinbarkeit von bautechnischen und vegetationstechnischen Anforderungen eine etwas größere Hürde dar. Eine schematische Darstellung von Dachbegrünungen ist in Abbildung 3-14 dargestellt.

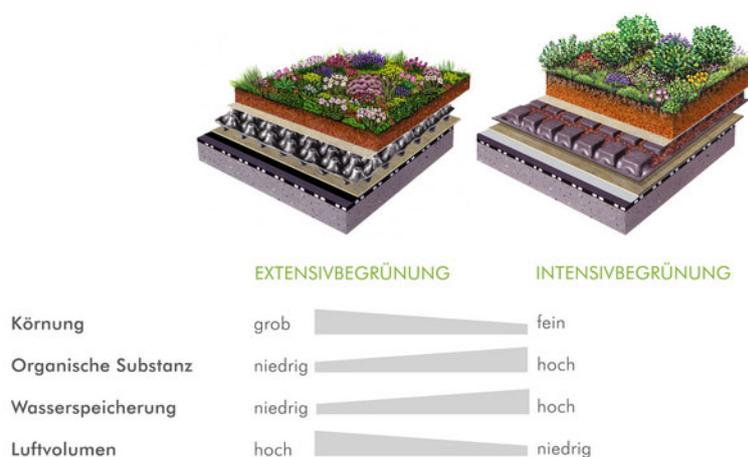


Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau und Unterschiede von Intensiv und Extensivbegrünungen auf Dächern (Abbildung aus Zinco 2018).

Prozesskette R4-S4-E4

Rückbaumaterial: Mauerziegel, Vormauerziegel und Klinker mit Anhaftungen

Substitut: Ziegelsplitt (0/2 - 2/12)

Einsatzvariante: Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) des ländlichen Wegebau nach TL LW 16⁷: und ZTV LW 16

(Vor-)Mauerziegel und Klinker gehören ebenso wie Dachziegel zu den hartgebrannten Ziegeln. Ihre Rohdichte sowie ihre Belastbarkeit sind höher als von weichgebrannten Ziegeln (z. B. Hintermauerziegel für den Innenbereich). Substitute aus hartgebrannten Mauerziegeln und Klinker (R4) kommen in erster Linie im Straßenbau in Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) zum Einsatz und können hier Sande und Kiese aus Primärmaterialien ersetzen. In anderen Korngrößen und je nach Reinheit können derartige Sekundärstoffe auch Primärmaterial in Technischen Belägen und Vegetationssubstraten substituieren. Insbesondere durch ihre Wasseraufnahmefähigkeit von 8 bis 9 M.-% und auch wegen ihres günstigen pH-Werts von 7 bis 9 sind Vormauerziegel für Vegetationsanwendungen sehr gut geeignet.

Anforderungen an Gesteinskörnungen, Baustoffe, Baustoffgemische und Bauprodukte von Wegebefestigungen ohne Bindemittel im ländlichen Wegebau werden in TL LW 16 und ZTV LW 16

⁷ Technische Lieferbedingungen für Böden, Gesteinskörnungen, Baustoffe und Baustoffgemische für den Bau ländlicher Wege.

geregelt. Sie regeln einschränkend oder ausweitend zu den im Straßenbau geltenden Regelwerken besondere Anforderungen, da im ländlichen Wegebau andere Beanspruchungen auftreten und andere Ansprüche an die Gebrauchstauglichkeit gestellt werden. Im Gegensatz zum Straßenbau sind dickere Schichten (Frostschutz-, Kiestrag-, Schottertragschichten) sowie Tragschichten aus unsortiertem Gestein und Deckschichten ohne Bindemittel zugelassen.

Nach der ZTV LW 16 müssen die Gesteinskörnungsgemische Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) der TL SoB - StB 04 und der TL Gestein StB 04 entsprechen.

Rezyklierte Gesteinskörnungen RC-2 und RC-3 dürfen nach Anhang D der TL Gestein-StB 04 nicht verwendet werden.

3.2.3 Energetische Bewertung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen betrachtet. Für die Herstellung von RC-Ziegelmaterial aus ziegelreichen Abbruchabfällen (R1), Dachziegeln mit Anhaftungen (R2), Hintermauerziegeln mit Anhaftungen und mit Dämmstoff gefüllt (R3) sowie Mauerziegeln, Vormauerziegeln und Klinker mit Anhaftungen (R4) sind dies die Prozesse Handauslese, Vorabsiebung, Zerkleinerung, Metallabscheidung, Siebung, Leichtstoffabtrennung, Nassaufbereitung, Klassierung, Gips-/Putzabscheidung und Sortierung.

Die Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf Durchschnitten zu technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.2.3.1 Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

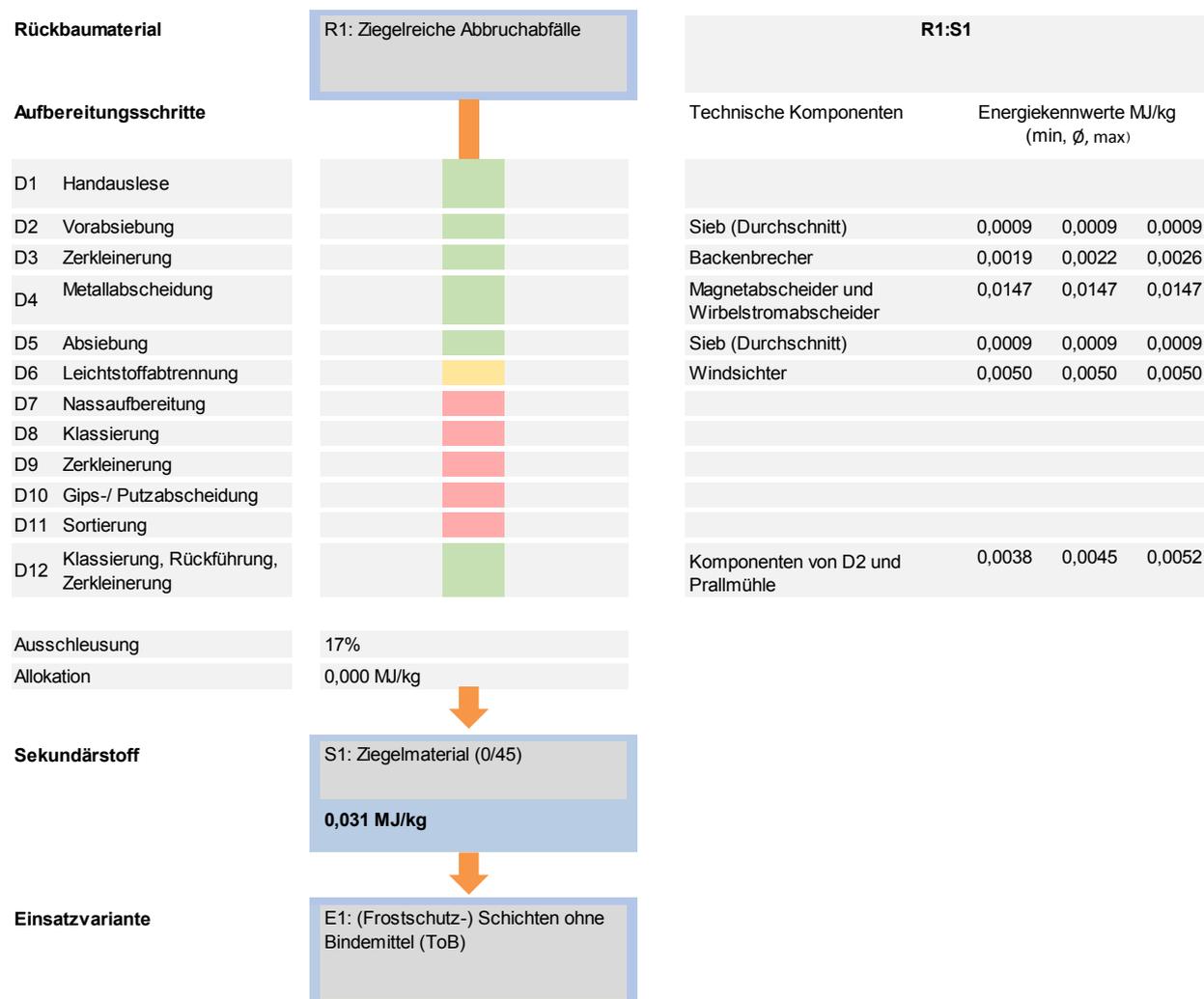


Abbildung 3-15: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von ziegelreichen Abbruchabfällen (R1) zu Ziegelmaterial der Korngröße 0/45 (S1) zum Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel (E1) können die Prozessschritte D7-D11 (Nassaufbereitung, Klassierung, Zerkleinerung, Gips-/Putzabscheidung, Sortierung) entfallen. Eine Leichtstoffabtrennung (D6) kann je nach Ausgangsmaterial erforderlich sein, sodass dieser Prozessschritt als optional betrachtet werden kann. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 17 M.-% bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Feinfraktion, Fremd- und Störstoffe) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-9 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-9: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,03193	0,02690	0,02941	0,00016	0,02926
Energieaufwand Ø	0,03366	0,02862	0,03114	0,00016	0,03098
Energieaufwand max.	0,03560	0,03056	0,03308	0,00016	0,03292

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

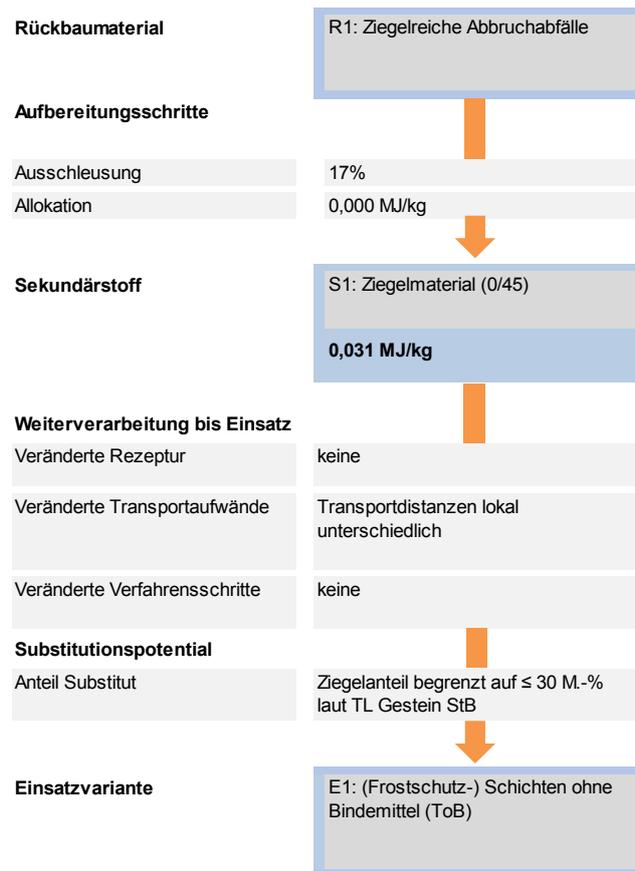


Abbildung 3-16: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Rezepturänderungen

Bei Weiterverarbeitung des Sekundärstoffs zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz kommt es zu keinerlei Rezepturveränderungen.

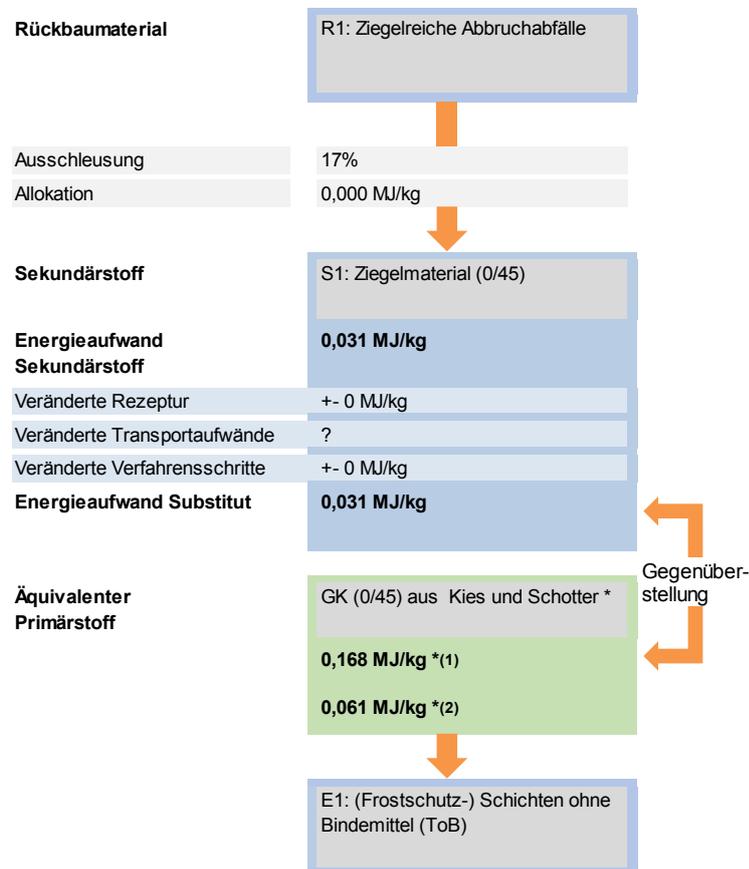
Veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort)

Transportdistanzen sind in Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorten sehr unterschiedlich. Aufgrund regionaler Unterschiede können für Transportdistanzen für RC- und Primärmaterialien keine pauschalen Annahmen getroffen werden. In der vorliegenden Studie wurde demnach keine Anpassung durch größere oder geringere Transportdistanzen vorgenommen. Hieraus ergibt sich neuer Forschungsbedarf. Auf dem aktuellen Kenntnisstand kann lediglich festgehalten werden, dass sich durch einen weiteren Ausbau des Recyclingnetzes und damit der Verringerung von Transportdistanzen ein klarer energetischer Vorteil für RC-GK ergeben kann.

Veränderte Verfahrensschritte

Durch den Einsatz von RC-Ziegelmaterial anstelle von Primärgesteinskörnungen kommt es bei der Herstellung von (Frostschutz-) Schichten ohne Bindemittel (ToB) (E1) zu keinen verfahrenstechnischen Unterschieden.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* nat. GK (50%) und gebrochene GK (50%)

* (1) Kies 2/32 nicht getrocknet (0,04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und Splitt 2/15 (0,28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02)

* (2) nat. GK rund (4/x) (0,05396 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4) und GK gebrochen (4/x) (0,06722 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4)

Abbildung 3-17: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-17 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit RC-Anteilen.

Dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe (MIRO) zufolge liegt der in der Ökobaudat bereitgestellte Energiewert für die Herstellung von Splitt/Schotter weit über dem tatsächlichen Wert. Einer von MIRO durchgeführten Erhebung über 120 Unternehmen zufolge ist für die Herstellung (A1-3) von natürlichen und gebrochenen Gesteinskörnungen ein durchschnittlicher Energieaufwand von 29 bis 35 MJ/kg vonnöten.

Objektiv kann keine eindeutige Aussage darüber gemacht werden, ob die in der Ökobaudat angegebenen Werte zu Splitt/Schotter zu hoch eingeschätzt wurden, weshalb in dieser Studie Werte aus beiden

Datenbanken (Ökobaudat, ecoinvent) als Vergleichswerte herangezogen wurden. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen von ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

Prozesskette R2-S2-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

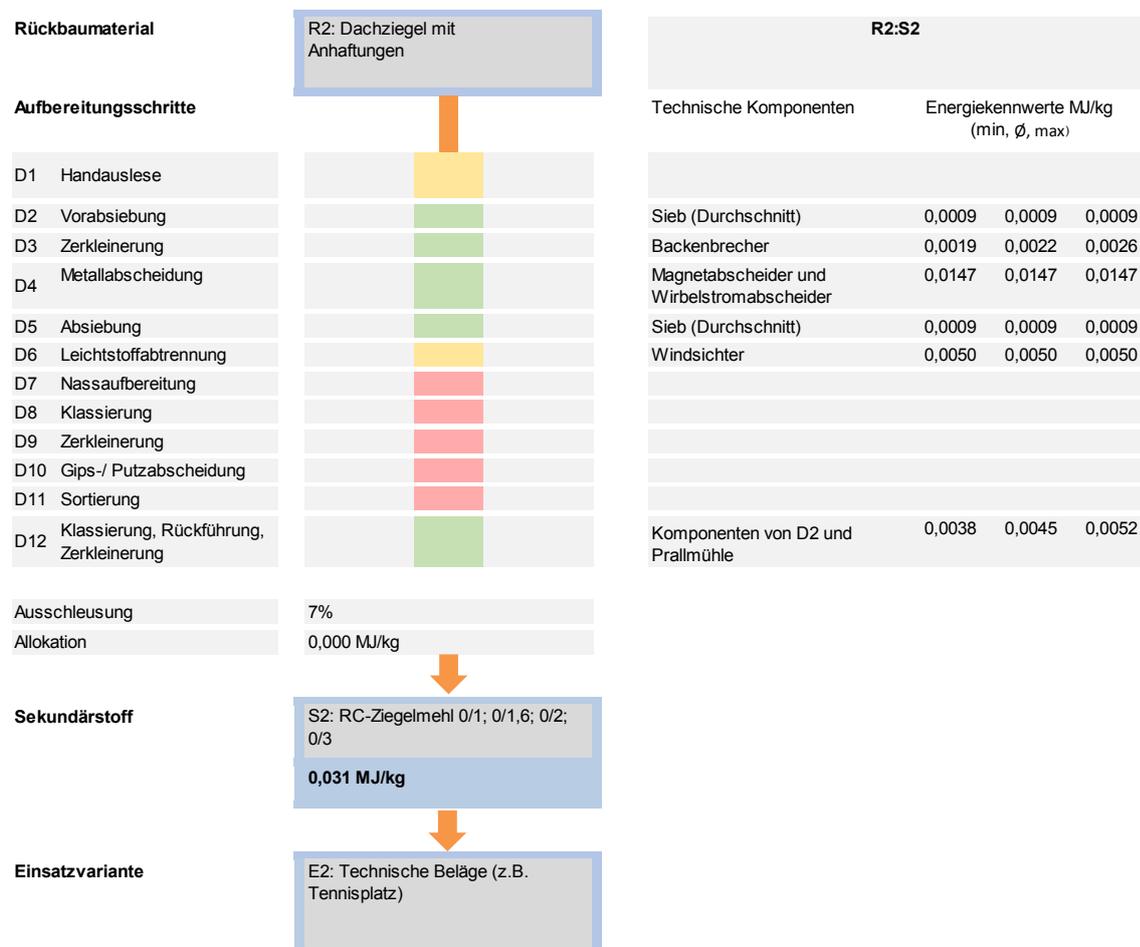


Abbildung 3-18: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Dachziegeln mit Anhaftungen (R2) zu Ziegelmehl (0/1; 0/1,6; 0/2; 0/3) (S2) zur Weiterverarbeitung zu Technischen Belägen (E2) können die Prozessschritte D7-D11 (Nassaufbereitung, Klassierung, Zerkleinerung, Gips-/Putzabscheidung, Sortierung) entfallen. Die Schritte D1 und D6 (Handauslese und Leichtstoffabtrennung) können je nach Ausgangsmaterial erforderlich sein, sodass diese Prozessschritte als optional betrachtet werden können. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 7 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Feinfraktion, Fremd- und Störstoffe) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-10 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg.

Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-10: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	003193	0,02690	0,02941	0,00017	0,02925
Energieaufwand Ø	0,03366	0,02862	0,03114	0,00017	0,03097
Energieaufwand max.	0,03560	0,03056	0,03308	0,00017	0,03291

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

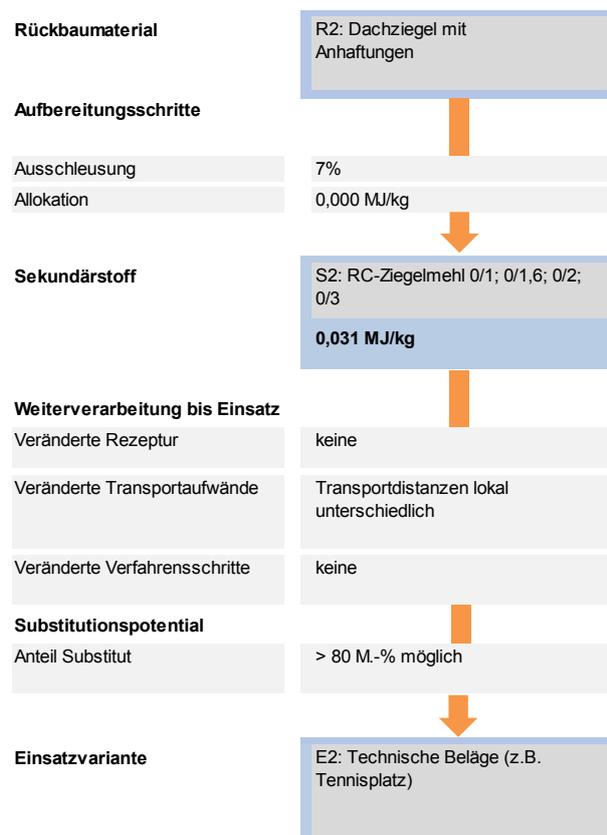
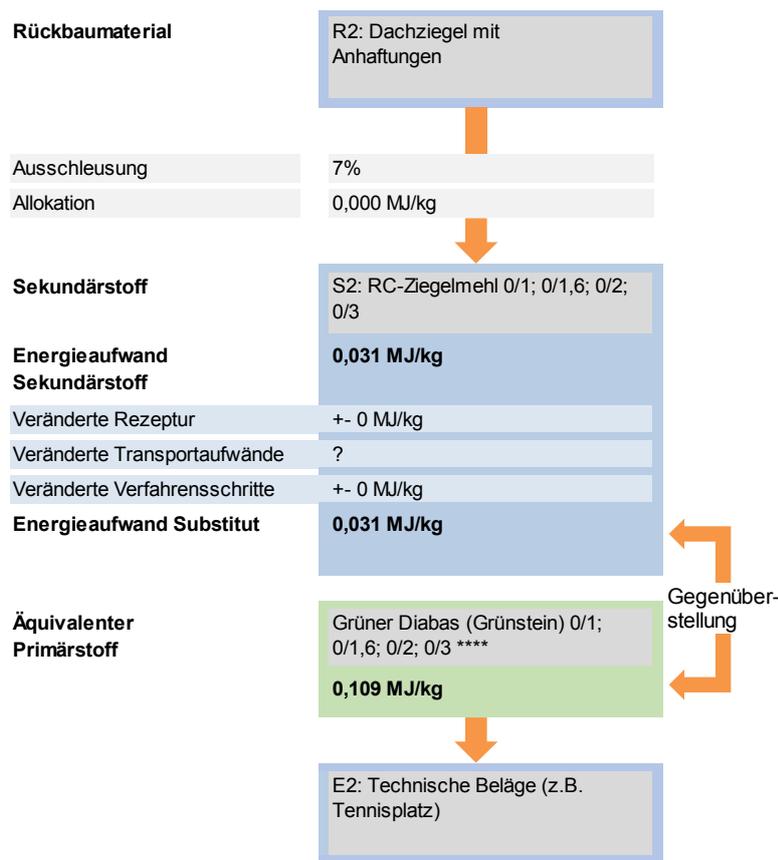


Abbildung 3-19: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.1.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



**** kein Datensatz zu Grünem Diabas verfügbar; aufgrund eines vergleichbaren Herstellungsaufwandes, Verwendung des Datensatzes "GaBi Basaltherstellung (gewaschen) GUID: {D37B2202-A7C9-4B80-AF67-C35C37689FE0}"

Abbildung 3-20: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-20 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Der relevante Auszug aus der DIN EN 15804 konformen GaBi-Datenbank (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), der für die Gegenüberstellung herangezogen wurde, kann Anhang 7.2 entnommen werden.

3.2.3.2 Prozesskette R3-S3-E3

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

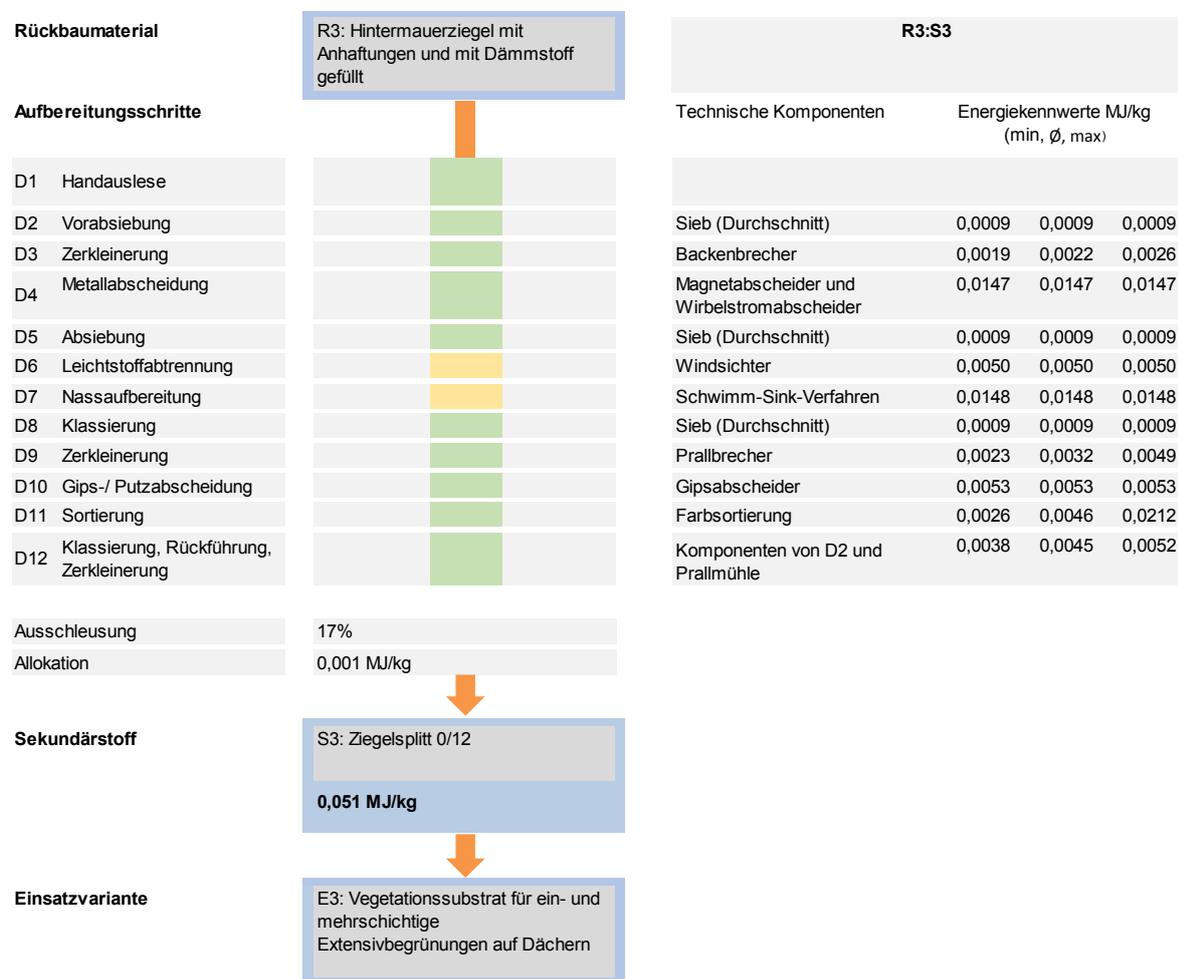


Abbildung 3-21: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Hintermauerziegeln mit Anhaftungen und mit Dämmstoff gefüllt (R3) zu Ziegelsplitt (0/12) (S3) zur Weiterverarbeitung zu Vegetationssubstraten (E3) können die Prozessschritte D6-D7 (Leichtstoffabscheidung, Nassaufbereitung) je nach Ausgangsmaterial erforderlich sein, sodass diese Prozessschritte als optional betrachtet werden können. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 17 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Der Großteil des ausgeschleusten Materials (Feinfraktion, Fremd- und Störstoffe) ist in der Regel nicht weiter verwertbar. Dämmstofffüllungen betragen ca. 6 M.-% und können wieder zu Dämmmaterialien aufbereitet werden. Eine Energieallokation wurde demnach ausschließlich auf diese Fraktion vorgenommen.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-11 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-11: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0578	0,0379	0,04787	0,00141	0,04646
Energieaufwand Ø	0,0625	0,0426	0,05252	0,00143	0,05110
Energieaufwand max.	0,0827	0,0629	0,07281	0,00146	0,07135

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

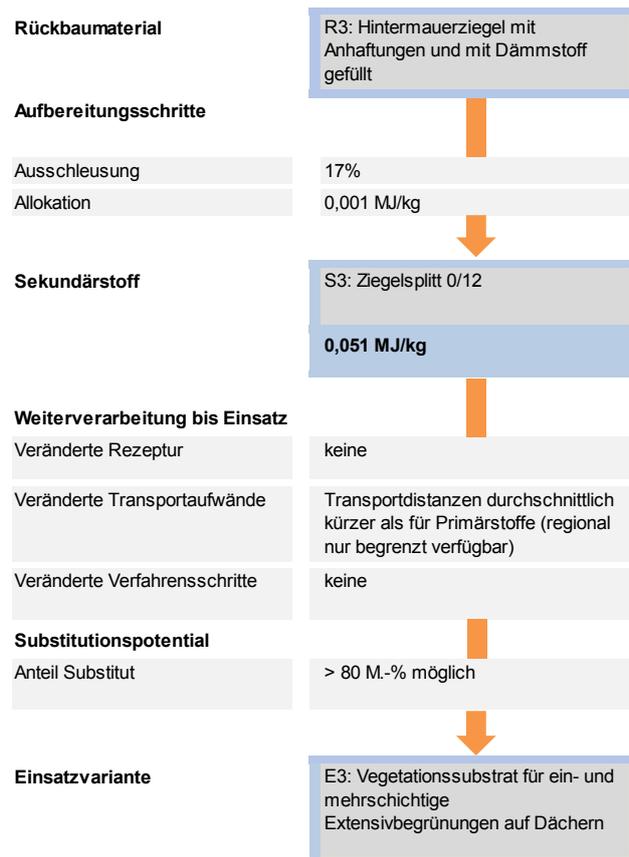
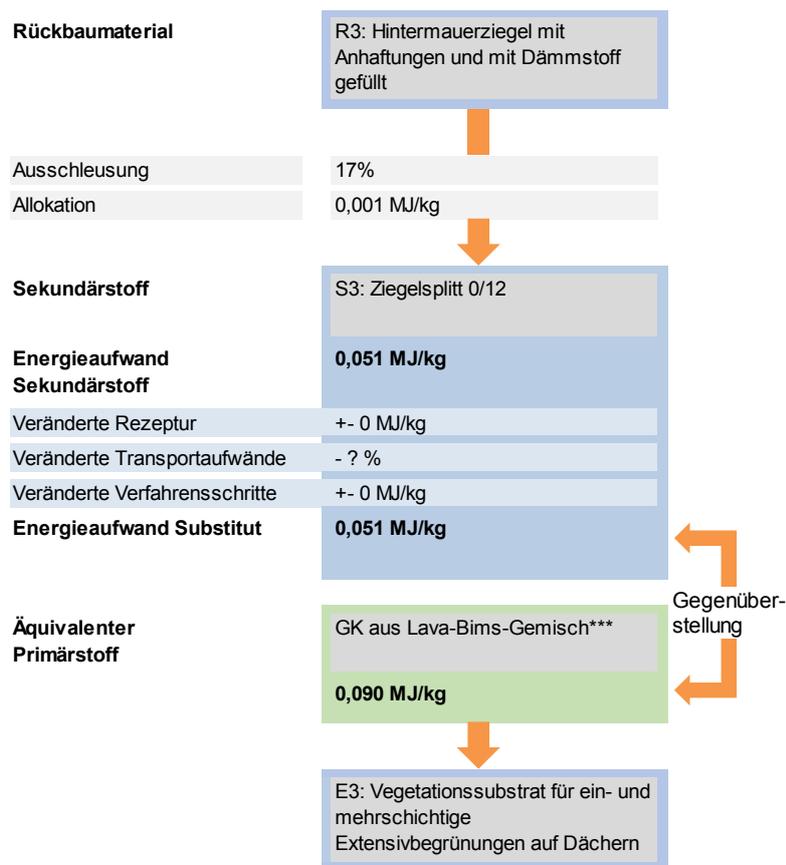


Abbildung 3-22: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.1.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



*** Durchschnitt aus Lava Körnung (0.056005 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.03) und Bimssand (0.12459 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.03)

Abbildung 3-23: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R3-S3-E3, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-23 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

3.2.3.3 Prozesskette R4-S4-E4

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

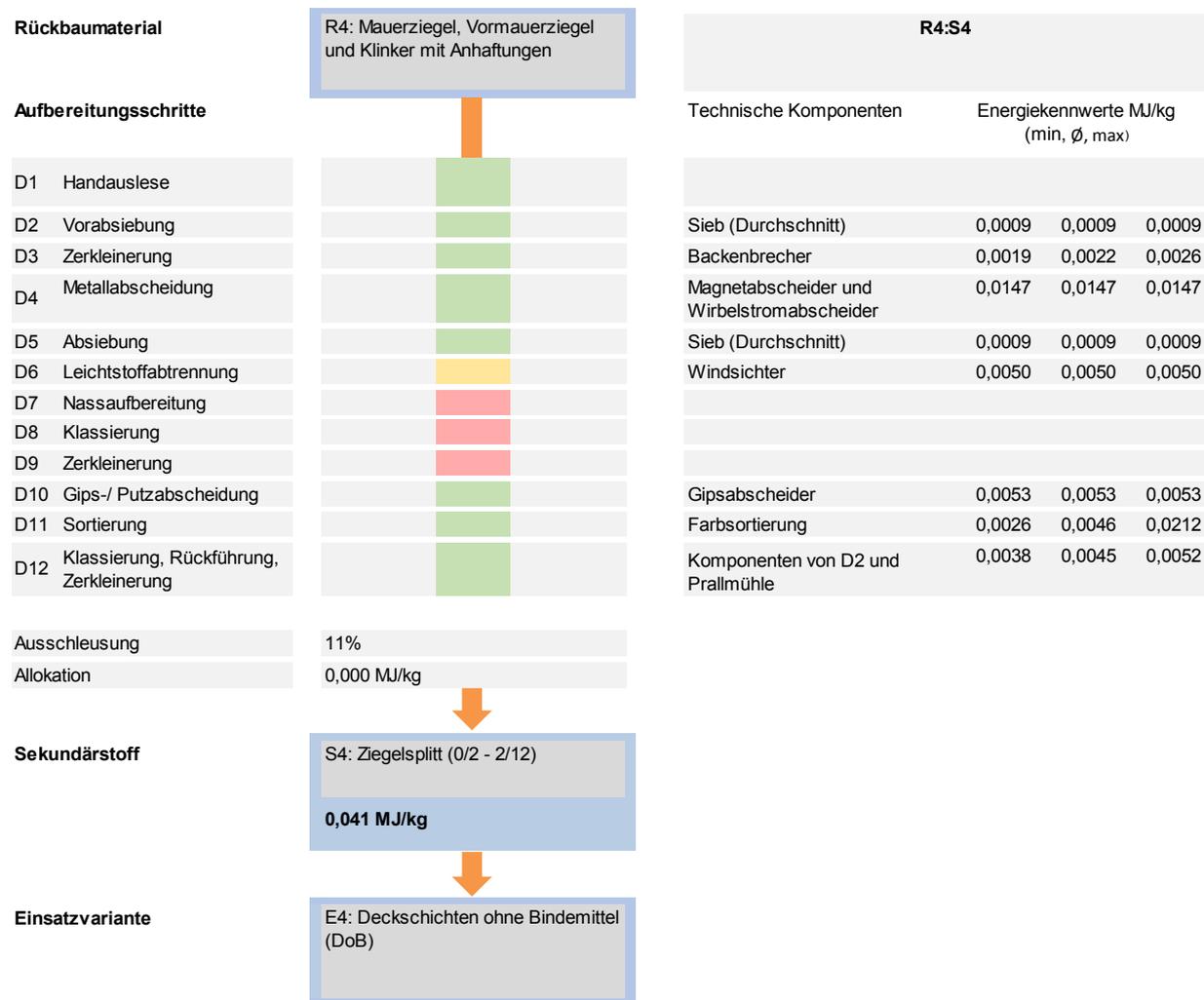


Abbildung 3-24: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Mauerziegeln, Vormauerziegeln und Klinker mit Anhaftungen (R4) zu Ziegelsplitt (0/2-2/12) (S4) zur Weiterverarbeitung zu Deckschichten ohne Bindemittel (E4) können die Prozessschritte D7-D9 (Nassaufbereitung, Klassierung, Zerkleinerung) entfallen. Eine Leichtstoffabtrennung kann je nach Ausgangsmaterial erforderlich sein, sodass dieser Prozessschritt als optional betrachtet werden kann. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 11 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Feinfraktion, Fremd- und Störstoffe) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-12 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-12: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,03983	0,03479	0,03731	0,00016	0,03715
Energieaufwand Ø	0,04350	0,03847	0,04099	0,00016	0,04083
Energieaufwand max.	0,06212	0,05708	0,05960	0,00016	0,05944

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

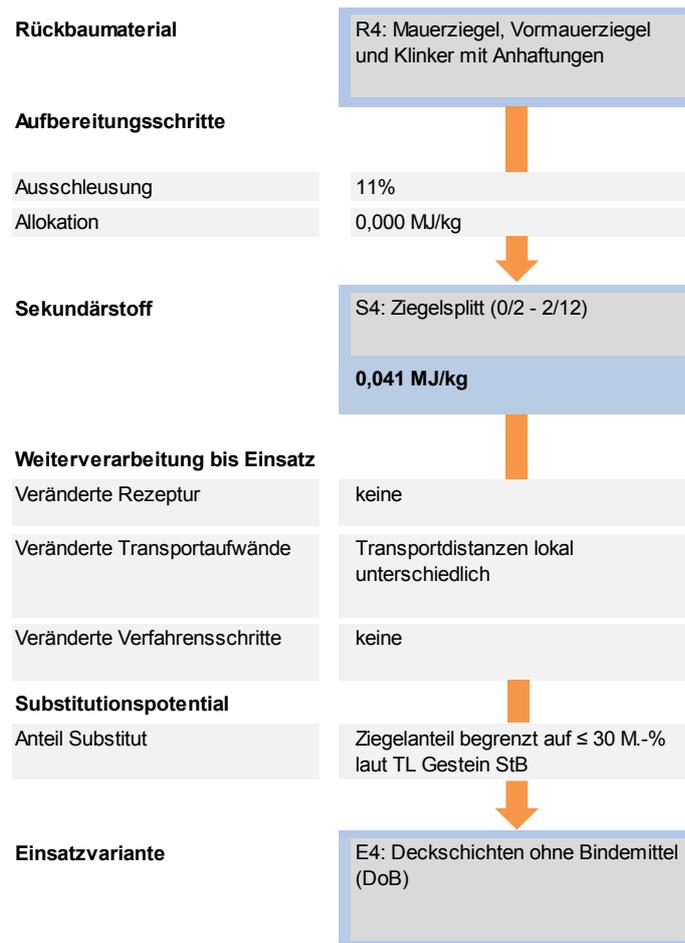
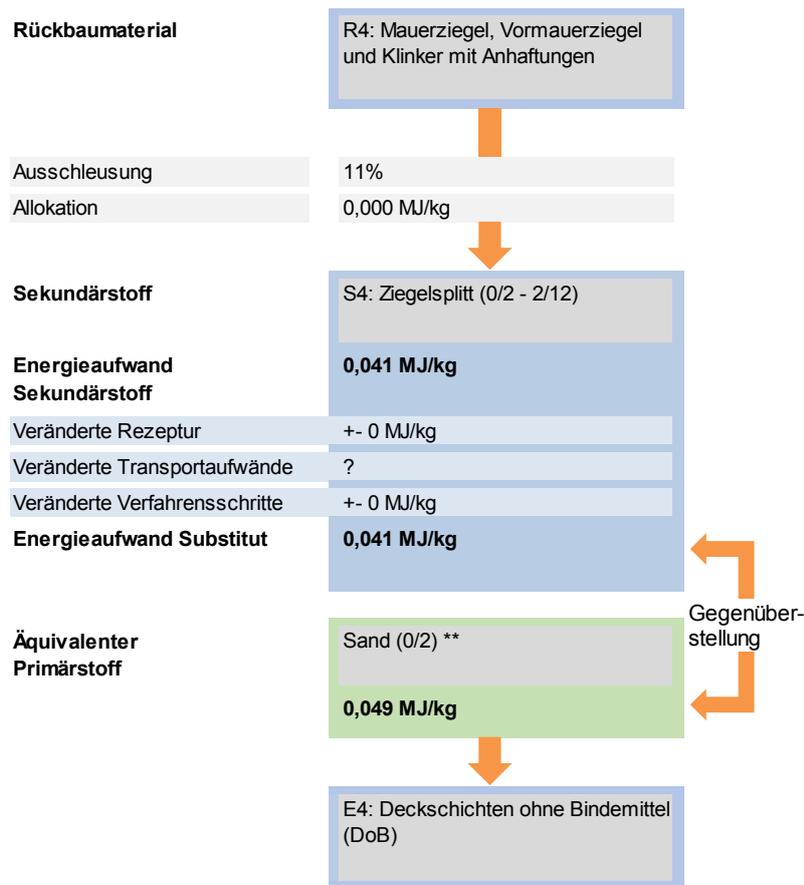


Abbildung 3-25: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.1.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



** Sand 0/2 nicht getrocknet (0.04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01)

Abbildung 3-26: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R4-S4-E4, Bauproduktgruppe Ziegel) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-26 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

3.2.4 Fazit

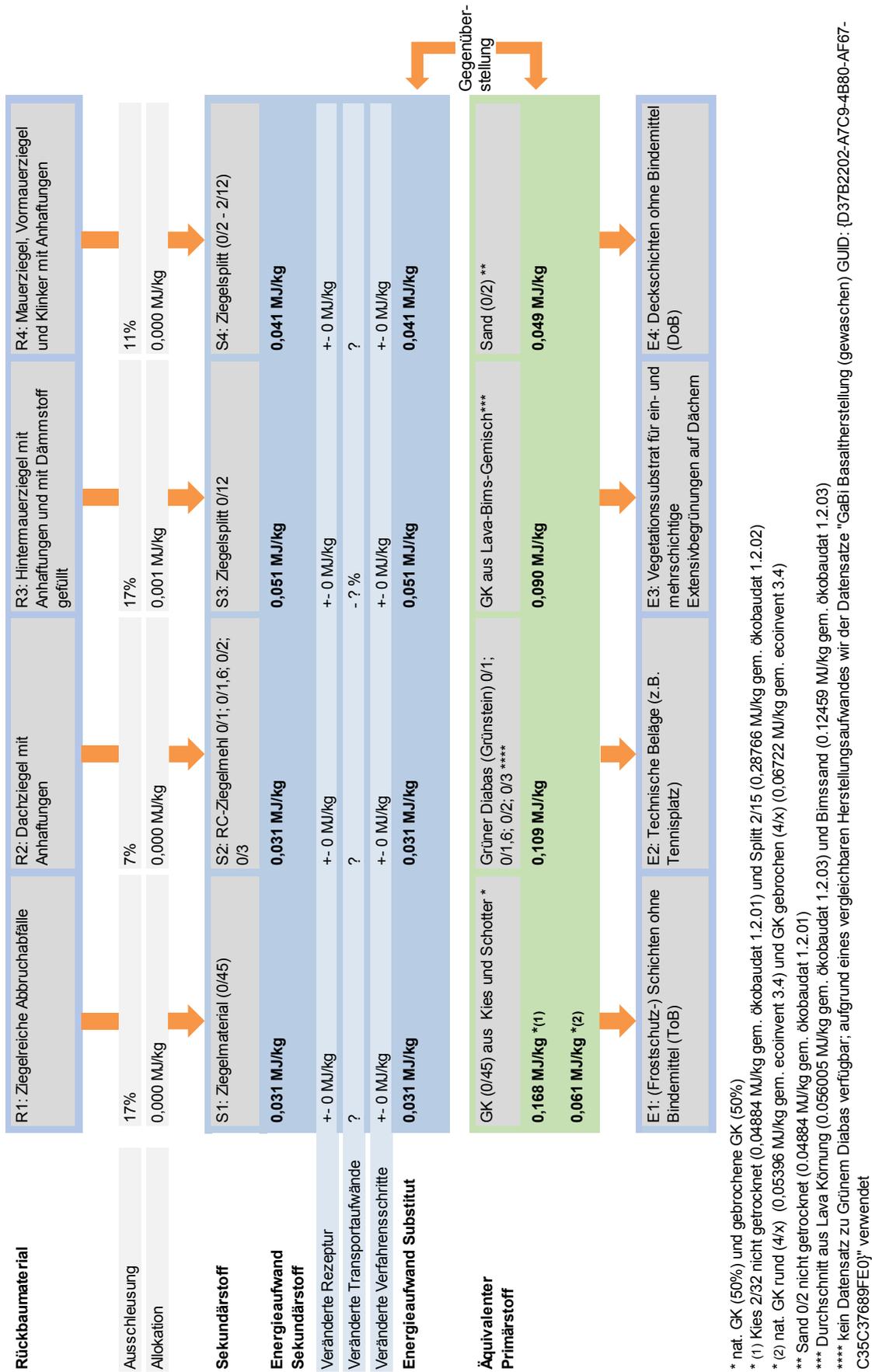


Abbildung 3-27: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Ziegel (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Ziegel-Recyclings	
Energieverbrauch	Recyclingprozesse zur Herstellung von RC-Ziegelmaterial teilweise deutlich energiesparender als die Gewinnung von Primärstoffen.
Besonderheiten	Sekundärstoffe müssen bis zum Einsatz in der Regel nicht weiter konfektioniert werden (Sekundärstoff = Substitut). Eine Nassaufbereitung erhöht zwar die Reinheit und verringert den Anteil der Feinfraktion, ist jedoch verhältnismäßig energieintensiv.
Ausschleusung & Allokationen	Je nach Ausgangsmaterial werden während des Recyclingprozesses ca. 7-17 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge ausgeschleust. Ausgeschleuste Fremd- und Störstoffe sowie Feinanteile können in der Regel keiner weiteren Nutzung zugeführt werden und müssen auf Deponien entsorgt werden.
Primärstoffeinsparungen	Substituierbare Primärstoffe (Sand, Kies, Schotter) sind in Deutschland noch ausreichend verfügbar.
Flächennutzungskonflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von konkurrierenden Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar, Flächen für Deponien können eingespart werden.

3.3 Kalksandstein

3.3.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe Kalksandstein

Kalksandstein (KS) wird im Rohbau für Innen- und Außenwände verwendet. Andere typische Mauerwerkbaustoffe sind Leichtbeton, Porenbeton und Ziegel. Die Anteile an Mauerwerksbaustoffen setzen sich derzeit wie folgt zusammen: 39,7 M.-% Ziegel, 35,4 M.-% Kalksandstein, 2,9 M.-% Porenbeton, 12,9 M.-% Leichtbeton und 9,1 M.-% Mörtel (Müller, 2018). Kalksandstein stellt dabei nach Ziegel die zweitgrößte Fraktion der Mauerwerksbaustoffe dar. Dementsprechend hoch ist auch das Aufkommen an KS-Abbruchmaterial. Im Bereich des KS-Recyclings führt insbesondere die Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. unternehmensübergreifende und vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung der deutschen Kalksandsteinindustrie durch. Das gemeinschaftliche Forschungsprojekt "Stoffkreislauf im Mauerwerksbau - SIM" hat sich zum Ziel gesetzt, technische Lösungsmöglichkeiten für ein breiter aufgestelltes Mauerwerkrecycling und neue Anwendungsbereiche für Gesteinskörnungen aus dem Mauerwerk-Recycling aufzuzeigen. Zu diesem übergreifenden Forschungsvorhaben wurden in der Zwischenzeit zwei SIM-Forschungsprojekte abgeschlossen. Es zeigt sich, dass die Hauptanwendungsbereiche von „post-consumer“ Kalksandsteinmaterial beim Wiedereinsatz in der Kalksandsteinproduktion, im Straßenbau und im Deponiebau liegen.

3.3.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden für die Produktgruppe Kalksandstein, wie in Abbildung 3-28 dargestellt, die in der Praxis typischerweise anfallenden Rückbauqualitäten Kalksandstein sortenrein und ohne grobe Anhaftungen (R1) und Kalksandstein mit groben Anhaftungen (R2) untersucht. Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die Hauptprozesse in der

Aufbereitungsanlage für die Berechnung mit einbezogen. Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (Modul C1 und C2).

Die für die Einsatzzwecke E1 und E3 hergestellten Substitute (vgl. Abbildung 3-28) werden in der Regel noch weiter konfektioniert. Die Unterschiede zwischen der Herstellung von Bauprodukten mit und ohne RC-Anteil werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialebene mit berücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

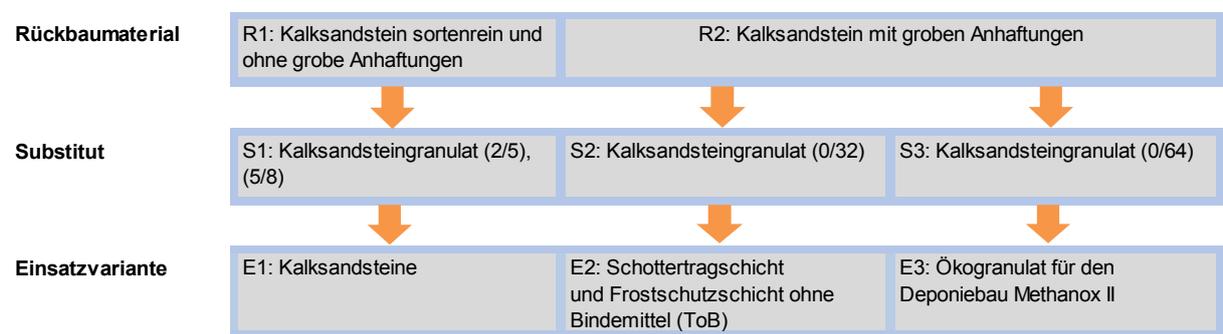


Abbildung 3-28: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Kalksandstein (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Kalksandstein sortenrein und ohne grobe Anhaftungen

Substitut: Kalksandsteingranulat (2/5), (5/8)

Einsatzvariante: Kalksandsteine im Hochbau nach DIN 20000-402 und DIN EN 771-2:2015-11

Bei der Herstellung von Kalksandsteinen nach DIN 20000-402 und DIN EN 771-2:2015-11 kann RC-Kalksandsteingranulat bis zu 10 M.-% der grobkörnigen Sande (2/5, 5/8 mm) substituieren. Feine und mittlere Sandkörnungen sowie Kalk und Wasser können nicht ersetzt werden, da die Rezyklate eine höhere Kornporosität als Natursande haben, was zu einer Rohdichte- und Festigkeitsabnahme der Kalksandsteine der zweiten Generation führt.

Keine wesentliche Festigkeitsabnahme kann hingegen festgestellt werden, wenn ein Natursand mit einer sehr engen Partikelgrößenverteilung durch RC-Kalksandsteingranulat der Körnung 0/5,6 mm ersetzt wird. Hier ist eine Substitution von bis zu 10 M.-% des Natursandes ohne relevante Einbußen hinsichtlich Rohdichte und Festigkeit realistisch. Untersuchungen im kleineren Maßstab haben ergeben, dass der Einsatz von RC-Kalksandsteingranulat einer weniger engen Partikelgrößenverteilung (2/5, 5/8 mm) bis zu 20 M.-% die mechanischen Eigenschaften der Kalksandsteine nicht verschlechtert (Eden, 1994). Des Weiteren haben Forschungsergebnisse gezeigt, dass eine leichte Änderung der Farbe (von weiß zu graubraun) sowie eine Abnahme der Druckfestigkeit um ca. 10 % nicht auszuschließen ist, dies jedoch keine Einschränkung für die Verwendung der RC-Kalksandsteinen bedeutet (Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., 2018).

Bei der Kalksandsteinherstellung werden die Rohstoffe Quarzsand und Branntkalk mit Wasser gemischt. Die Standardrezeptur von Kalksandstein sieht ca. 89 M.-% Sand, 6 M.-% Kalk und 5 M.-% Wasser vor.

Nach der Reaktion zwischen Branntkalk und Wasser zu Kalkhydrat folgen die Formgebung und die Härtung der Rohlinge, wie in Abbildung 3-29 schematisch dargestellt (Müller, 2018).

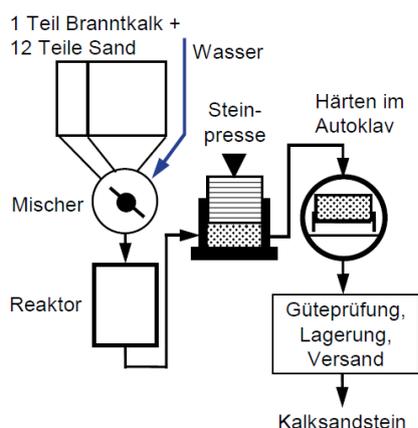


Abbildung 3-29: Vereinfachtes Schema der Herstellung von Kalksandsteinen (Abbildung aus Müller, 2018).

Eine separate Verwertung der verschiedenen in Mauerwerkbruch enthaltenen Wandbaustoffe setzt voraus, dass durch einen selektiven Rückbau und eine Sortierung Materialfraktionen mit ausreichender Sortenreinheit erzeugt werden. Diese Fraktionen können dann entsprechend ihren spezifischen Eigenschaften weiterverarbeitet und wiederverwendet werden. Eine Rückführung in das ursprüngliche Produktsystem ist bei Kalksandstein nur möglich, sofern das Abbruchmaterial unverputzt (z. B. in Parkhäusern, Industriebauten, oder auch im Wohnungsbau) oder mit geringen Mengen an Kalkzementputz und Mauermörtel verunreinigt ist (z. B. im Wohnungsbau dicke Wand mit dünner Putzschicht). Reste von Bitumenbahnen, Abdichtungsfolien sowie Wärmedämmverbundsystemen sind für ein hochwertiges Recycling ebenso hinderlich wie Verunreinigungen durch Gipsputzmörtel und führen zu einem eindeutigen Festigkeitsrückgang - selbst wenn ihr Anteil unter 1 M.-% liegt. Tabelle 3-13 zeigt die Qualitätsparameter für Kalksandsteinbruchmaterial für die Kalksandsteinherstellung.

Damit für Kalksandsteine vom Hersteller eine Leistungserklärung erstellt und die Steine auf dieser Grundlage CE-gekennzeichnet werden dürfen, ist die Einhaltung des vorgeschriebenen Verfahrens der Konformitätsbescheinigung nach DIN EN 771-2, Anhang ZA zu gewährleisten.

Tabelle 3-13: Qualitätsparameter für Kalksandsteinbruchmaterial für die Kalksandsteinherstellung (Tabelle aus Hendriks, 2000).

	Anforderung	Begründung/Auswirkungen
Reaktives SiO ₂	-	Reaktivität der von natürlichen Sanden vergleichbar.
TOC aus Holz, Kunststoffen, Dämmstoffen, Bitumen	< 0,1 M.-%	Organische Komponenten verursachen Schwachstellen im Gefüge. Punktförmige schwarze oder braune Verfärbungen entstehen.
Humusartige Komponenten	keine	Verursachen Verfärbungen.
Chloride	< 0,015 M.-%	Frost-Tau-Widerstand wird verringert. Ausblühungen können entstehen. Korrosion der Anlagen
Sulfate	< 0,1 M.-%	Der Löschprozess wird verzögert, was zu einer Volumenzunahme bei der Autoklavierung führt. Ausblühungen können entstehen. Als schwerlösliches Bariumsulfat oder im Zementstein gebundenes Sulfat ist weniger kritisch als lösliches Sulfat.
PAK	< 50 mg/kg	Grenzwert resultiert aus wasserwirtschaftlichen Erfordernissen.

Prozesskette R2-S2-E2

Rückbaumaterial: Kalksandstein mit groben Anhaftungen

Substitut: Kalksandsteingranulat (0/32)

Einsatzvariante: Schottertragschicht und Frostschuttschicht ohne Bindemittel (ToB) nach TL Gestein-StB 04 (sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09)

Die Rückbauqualität „Kalksandstein mit groben Anhaftungen“ beschreibt Mauerwerksbruch aus Kalksandstein mit einem relativ dicken oder beidseitigen Putzschichtenaufbau. Problematisch ist auch hier eine Verunreinigung durch Gipsputzmörtel – selbst in sehr geringen Mengen.

Eine gängige Verwertung von Recyclingmaterial aus Kalksandstein-Mauerwerk ist der Bereich Erd-, Straßen- und Wegebau.

Die hohe Porosität von Kalksandsteingranulaten stellt einen Nachteil für die Anwendung im Straßenbau dar, weil sie vergleichsweise geringe Kornfestigkeiten und Frostwiderstände verursacht. Im aktuellen Regelwerk des Verkehrswegebau (TL Gestein-StB 04 sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09) ist für Frostschuttschichten und Schottertragschichten der maximale Anteil an Kalksandstein, Putzen und ähnlichen Stoffen auf 5 M.-% begrenzt. Technisch möglich hingegen ist mit bis zu 20 bis 40 M.-% ein deutlich höherer RC-Kalksandsteinanteil.

Qualitätsanforderungen an Substitute von natürlichen Gesteinskörnungen (z. B. Splitt, Kies, Sande, Schotter) für den Straßenbau sind in der TL Gestein-StB 04 sowie TL SoB-StB 04 und ZTV E-StB 09 geregelt.

Prozesskette R2-S3-E3

Rückbaumaterial: Kalksandstein mit groben Anhaftungen

Substitut: Kalksandsteingranulat (0/64)

Einsatzvariante: Ökogränulat für den Deponiebau Methanox II zum Methanabbau

Durch Putz oder Mörtel verunreinigter Mauerwerksbruch aus Kalksandstein kann neben dem Hoch- und Straßenbau auch für den Deponiebau verwendet werden. Grob zerkleinertes RC-Kalksandsteingranulat wird hier auf Deponien zur Ansiedlung von Mikroben genutzt, die dann – wie in Abbildung 3-30 dargestellt – Methan in „weniger schädliches“ CO₂ und Wasser umwandeln. Dazu werden Porenbetonkörnungen mit methanoxidierenden Bakterien besiedelt und zusammen mit Kalksandstein als obere Schicht auf Hausmülldeponien aufgebracht. Das RC-Kalksandsteingranulat übernimmt dabei aufgrund seiner vergleichsweise hohen Kornfestigkeit die Stützkornfunktion und das Porenbeton-Granulat dient aufgrund seiner vergleichsweise großen inneren Oberfläche als Träger für die Mikroorganismen. Methanox II gilt als neuartiger Baustoff und wurde bereits auf großtechnischen Versuchsflächen erfolgreich getestet.

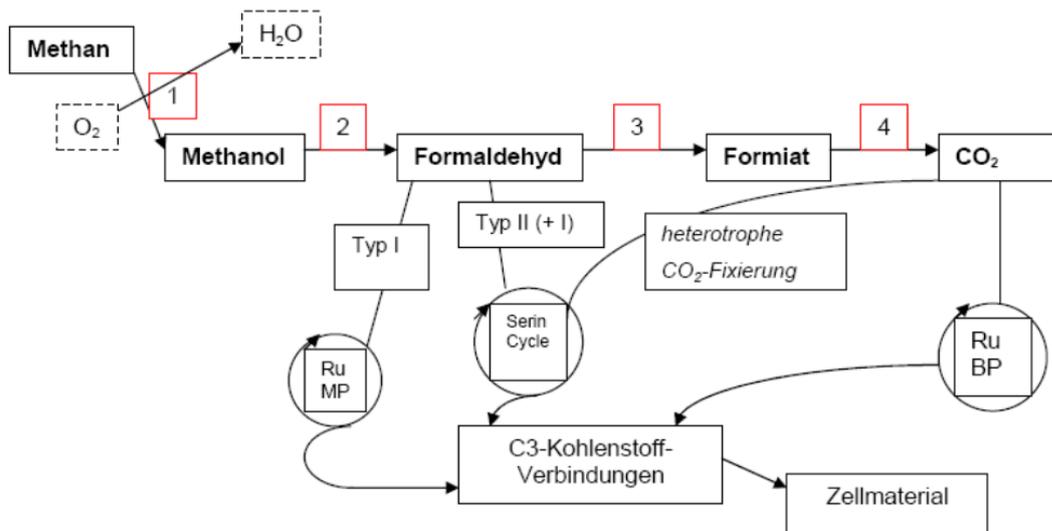


Abbildung 3-30: Stoffwechsel von Methan durch aerobe methanotrophe Bakterienenzyme (1: Methan-Monooxygenase (MMO); 2: Methanol-Dehydrogenase; 3: Formaldehyd-Dehydrogenase; 4: Formiat-Dehydrogenase). (Abbildung aus Eden, 2010)

3.3.3 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen betrachtet. Für die Herstellung von RC-Kalksandsteinmaterial aus sortenrein rückgebautem Kalksandstein ohne grobe Anhaftungen (R1) sowie aus Kalksandstein mit groben Anhaftungen (R2) sind dies die Prozesse Vorabsiebung, Handauslese, Zerkleinerung, Metallabscheidung, Gipsabscheidung, Klassierung, Rückführung, Leichtstoffabtrennung und Nassaufbereitung.

Die Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf Durchschnittswerten zu technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.3.3.1 Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff



Abbildung 3-31: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von sortenrein rückgebautem Kalksandstein ohne grobe Anhaftungen (R1) zu RC-Kalksandsteingranulat (2/5; 5/8) (S1) zur Weiterverarbeitung zu neuen Kalksandsteinen (E1) sind die Prozessschritte D1, D2 und D6-D9 (Vorabsiebung, Handauslese, Klassierung mit Rückführung und Zerkleinerung, Leichtstoffabtrennung und Nassaufbereitung) je nach Aufgabematerial und Aufbereitungsanlage nicht immer erforderlich, sodass diese Schritte als optional betrachtet werden können. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 14 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Fremd- und Störstoffe, Putz, Mörtel) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-14 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-14: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe Kalksandstein.

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0507	0,0228	0,03675	0,00000	0,03675
Energieaufwand Ø	0,0530	0,0231	0,03804	0,00000	0,03804
Energieaufwand max.	0,0569	0,0235	0,04018	0,00000	0,04018

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

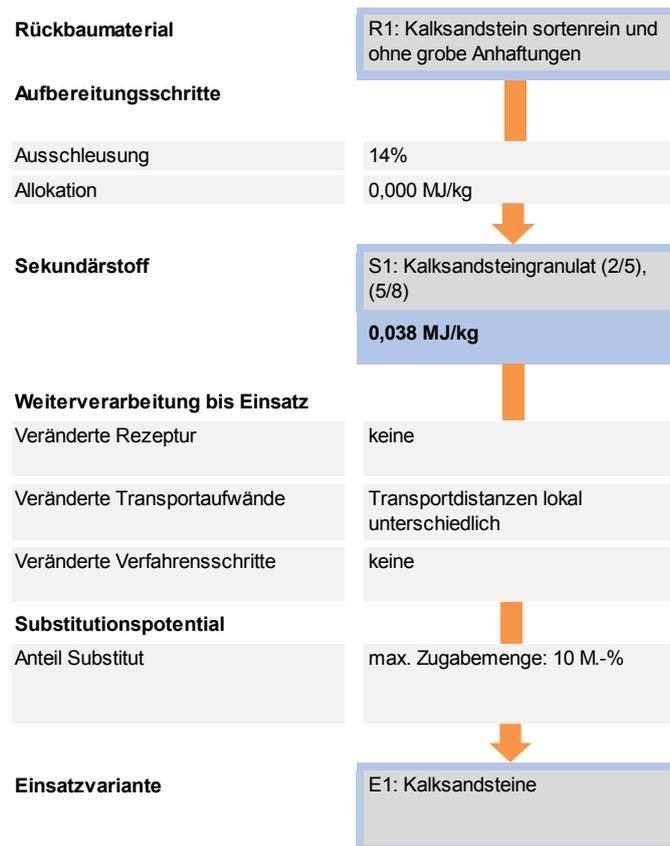


Abbildung 3-32: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Rezepturänderungen

Bei der erneuten Herstellung von Kalksandsteinen aus RC-Kalksandsteingranulat müssen Rezeptur und andere Herstellparameter werkspezifisch angepasst werden und sind jeweils im Einzelfall durch Werksversuche zu bestimmen. Im Wesentlichen sind jedoch keine nennenswerten Rezepturänderungen notwendig.

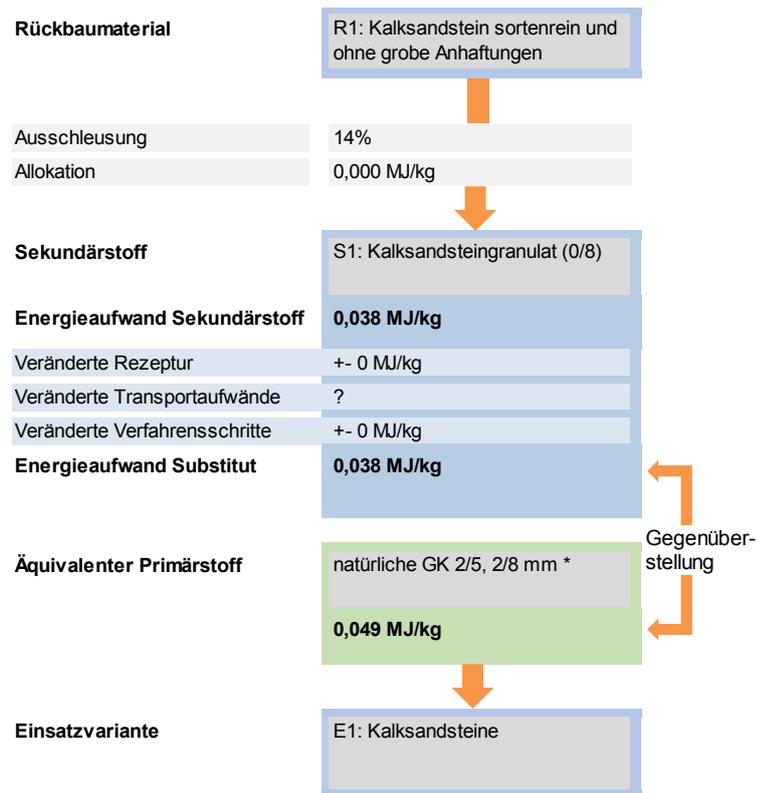
Veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort)

Bezüglich der Transportaufwände ist festzustellen, dass Kalksandsteinwerke meist unmittelbar neben Sandgruben errichtet werden. Der Transportaufwand von Sand (0/2) zum Kalksandsteinwerk ist demnach vernachlässigbar gering. Grobsand (2/5, 2/8), welcher durch RC-Kalksandsteingranulat substituiert werden kann, muss in der Regel zugeliefert werden. Die Transportdistanz variiert je nach Standort. Ebenso ist die Transportdistanz des RC-Kalksandsteingranulats vom Aufbereiter zum KS-Werk standortabhängig und nur schwer abschätzbar. In der vorliegenden Studie wurde keine Anpassung durch größere oder geringere Transportdistanzen vorgenommen. Hier ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

Veränderte Verfahrensschritte

Je nach Kapazitäten des Kalksandsteinwerkes ist ggf. ein zusätzlicher Sandbunker einzubauen, was mit zusätzlichen Investitionen und einer höheren grauen Energie für die Anlagenbereitstellung verbunden ist. Da es sich hier jedoch um einen einmaligen Aufwand handelt und Energie zur Infrastrukturbereitstellung gem. DIN EN 15804 in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wird in den Berechnungen davon abgesehen, einen Energiemehraufwand, verglichen zur Standardherstellung, anzusetzen.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. ökobaudat 1.2.01: Sand 0/2 und Kies 2/32 nicht getrocknet

Abbildung 3-33: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-33 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts mit 0,038 MJ/kg geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs mit 0,049 MJ/kg. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Der relevante Auszug aus der Ökobaudat zu Sand (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), der für die Gegenüberstellung herangezogen wurde, kann Anhang 7.2 entnommen werden.

3.3.3.2 Prozesskette R2-S2-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff



Abbildung 3-34: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von sortenrein rückgebautem Kalksandstein mit groben Anhaftungen (R2) zu RC-Kalksandsteingranulat (0/32) (S2) zum Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel (E2) sind die Prozessschritte D1, D2 und D6-D8 (Vorabsiebung, Handauslese, Klassierung mit Rückführung und Zerkleinerung, Leichtstoffabtrennung) je nach Aufgabematerial und Aufbereitungsanlage nicht immer erforderlich, sodass diese Schritte als optional betrachtet werden können. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 19 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Fremd- und Störstoffe, Putz, Mörtel) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-15 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-15: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Kalksandstein).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0359	0,0228	0,02933	0,00000	0,02933
Energieaufwand Ø	0,0382	0,0231	0,03063	0,00000	0,03063
Energieaufwand max.	0,0420	0,0235	0,03277	0,00000	0,03277

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

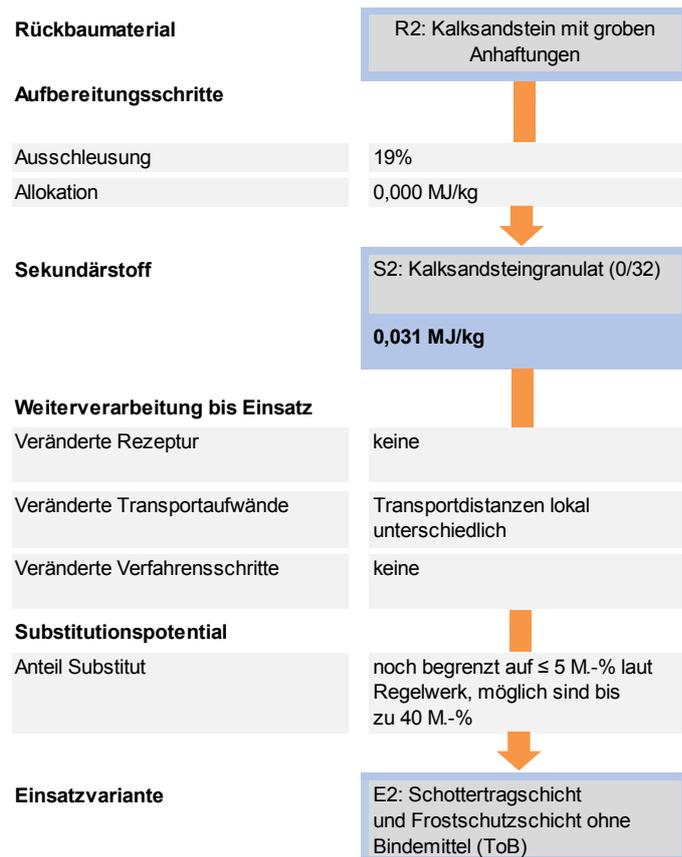
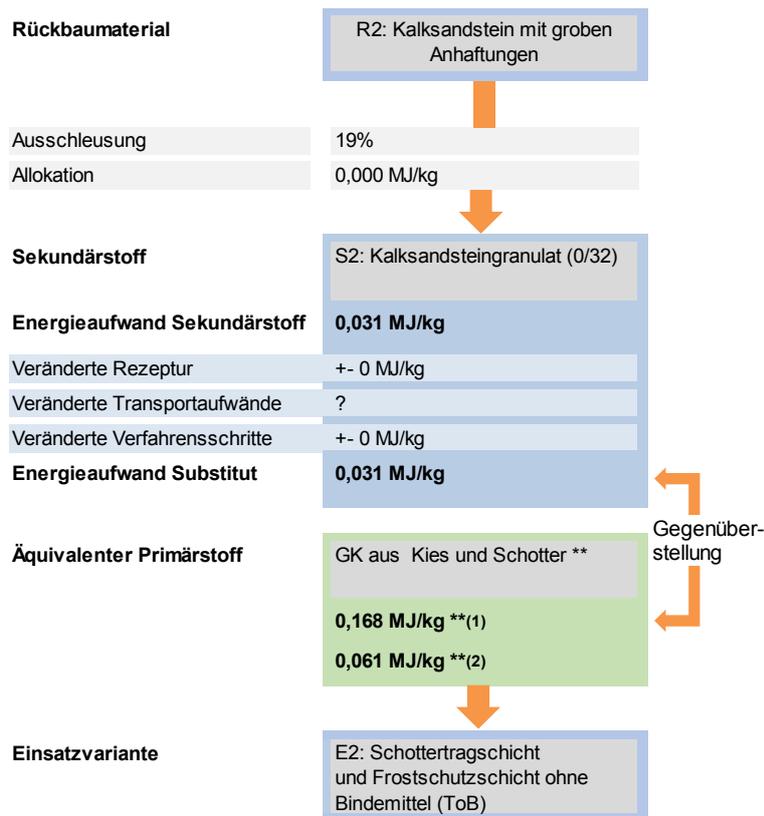


Abbildung 3-35: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E2, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände, sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in 3.3.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



** nat. GK (50%) und gebrochene GK (50%)

** (1) Kies 2/32 nicht getrocknet (0,04884 MJ/kg gem. ökobaodat 1.2.01) und Splitt 2/15 (0,28766 MJ/kg gem. ökobaodat 1.2.02)

** (2) nat. GK rund (4/x) (0,05396 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4) und GK gebrochen (4/x) (0,06722 MJ/kg gem. ecoinvent 3.4)

Abbildung 3-36: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-36 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit RC-Anteilen.

Dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe (MIRO) zufolge liegt der in der Ökobaodat bereitgestellte Energiewert für die Herstellung von Splitt/Schotter weit über dem tatsächlichen Wert. Einer von MIRO durchgeführten Erhebung über 120 Unternehmen zufolge ist für die Herstellung (A1-3) von natürlichen und gebrochenen Gesteinskörnungen ein durchschnittlicher Energieaufwand von 29 bis 35 MJ/kg vonnöten.

Objektiv kann keine eindeutige Aussage darüber gemacht werden, ob die in der Ökobaodat angegebenen Werte zu Splitt/Schotter zu hoch eingeschätzt wurden, weshalb in dieser Studie Werte aus beiden Datenbanken (Ökobaodat, ecoinvent) als Vergleichswerte herangezogen wurden. Relevante Auszüge aus der Ökobaodat sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen von ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

3.3.3.3 Prozesskette R2-S3-E3

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff



Abbildung 3-37: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S3-E3, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von sortenrein rückgebautem Kalksandstein mit groben Anhaftungen (R2) zu RC-Kalksandsteingranulat (0/64) (S3) für die Weiterverwendung als Ökogränulat für den Deponiebau (E3) sind die Prozessschritte D1, D2 (Vorabsiebung, Handauslese) je nach Aufgabematerial und Aufbereitungsanlage nicht immer erforderlich, sodass diese Schritte als optional betrachtet werden können. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 9 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Fremd- und Störstoffe) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-16 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-16: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S3-E3, Bauproduktgruppe Kalksandstein).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0175	0,0166	0,01708	0,00000	0,01708
Energieaufwand Ø	0,0178	0,0169	0,01736	0,00000	0,01736
Energieaufwand max.	0,0182	0,0173	0,01777	0,00000	0,01777

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

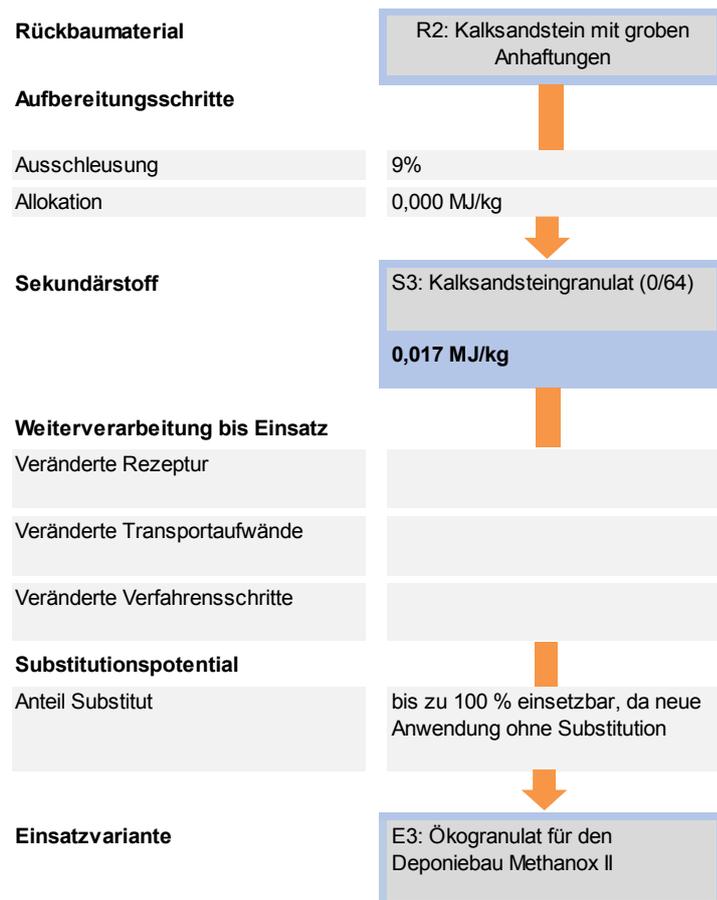


Abbildung 3-38: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S3-E3, Bauproduktgruppe Kalksandstein) (Quelle: eigene Darstellung).

Da es sich beim Ökogränulat Methanox II für den Deponiebau um eine neue Anwendung handelt und kein Primärstoffäquivalent vorhanden ist, kann kein Vergleich zwischen den Energieaufwänden einer „Standardherstellung“ und einer Herstellung mit RC-Material gemacht werden.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung

Schritt 3 entfällt, da es sich beim Ökogränulat Methanox II für den Deponiebau um eine neue Anwendung handelt und kein Primärstoffäquivalent vorhanden ist.

3.3.4 Fazit

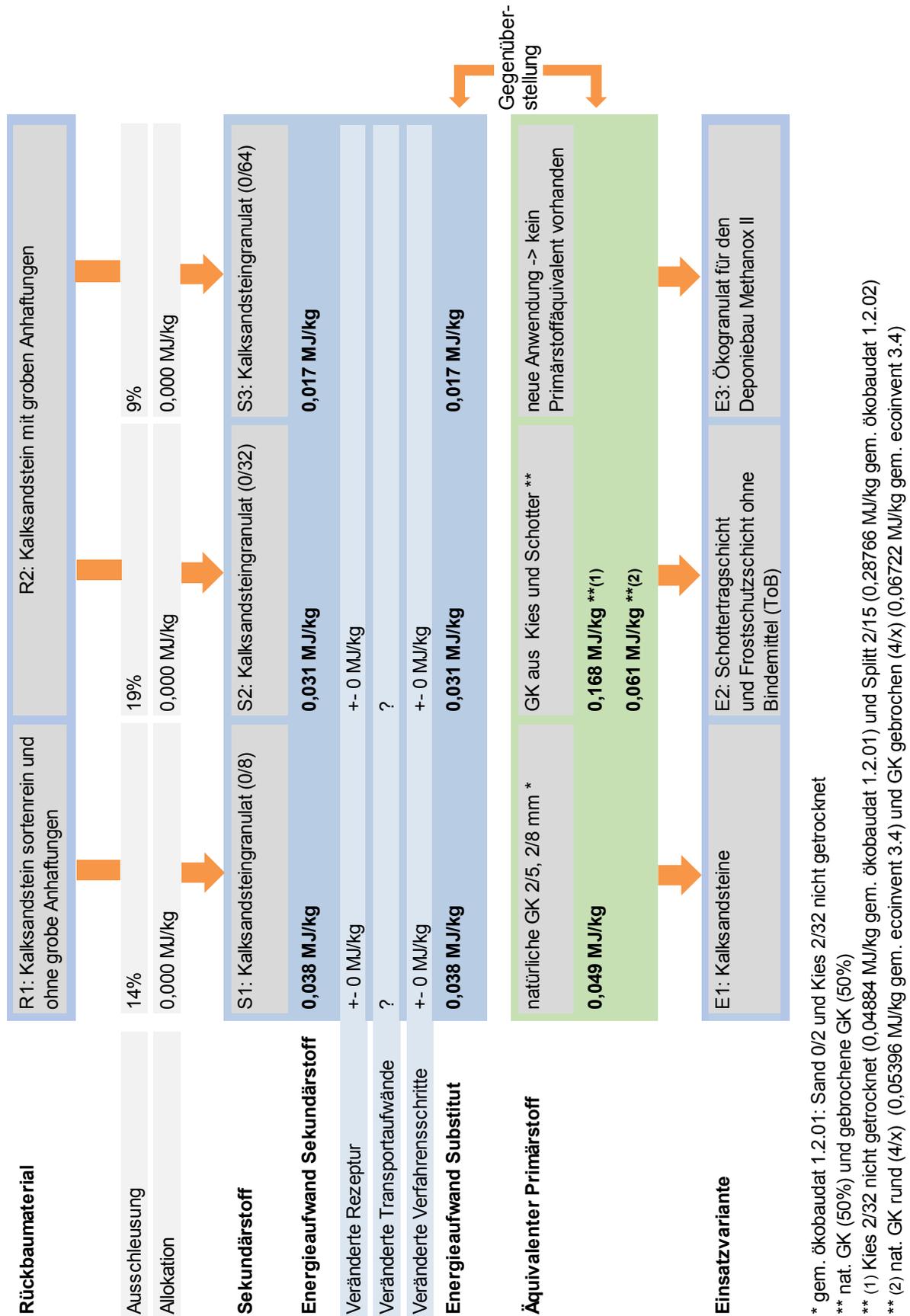


Abbildung 3-39: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Kalksandstein (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Kalksandstein-Recyclings

Energieverbrauch	Die Herstellung der Substitute innerhalb der betrachteten Prozessketten benötigt weniger Energie als die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Wird nicht nur Sand und Kies, sondern darüber hinaus auch Schotter und Splitt (gebrochene GK) substituiert, ist die unmittelbare Energieeinsparung deutlich schwerwiegender (Prozesskette 2).
Besonderheiten	Wichtig beim Kalksandsteinrecycling ist möglichst hohe Sortenreinheit. Reste von Bitumenbahnen, Abdichtungsfolien sowie Wärmedämmverbundsystemen sind für ein hochwertiges Recycling ebenso hinderlich wie Verunreinigungen durch Gipsputzmörtel und führen zu einem eindeutigen Festigkeitsrückgang - selbst wenn ihr Anteil unter 1 M.-% liegt.
Ausschleusung & Allokationen	Je nach Ausgangsmaterial werden während des Recyclingprozesses ca. 9 - 19 M.-% des Materialinputs ausgeschleust. Das ausgeschleuste Material besteht im Wesentlichen aus Gips- und Mörtelresten sowie Fremd- und Störstoffen, die keiner weiteren stofflichen Verwertung zugeführt werden können.
Primärstoffeinsparungen	Substituierbare Primärstoffe (Sand, Kies, Schotter) in Deutschland noch ausreichend verfügbar.
Flächennutzungskonflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar, Flächen für Deponien können eingespart werden
CO ₂ Emissionen	Verringerung von CO ₂ Emissionen durch einen relativ geringeren Energieaufwand der Sekundärstoffgewinnung. Durch den Einsatz von RC-Kalksandsteinmaterial (Ökogranulat Methanox II) auf Deponien werden bewusst CO ₂ -Emissionen provoziert, um „noch schädlichere“ Methan-Emissionen zu reduzieren.

3.4 Gips

3.4.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe Gips

Gips als Rohstoff wird vorwiegend bergmännisch als Gipsgestein gewonnen, fällt aber heute auch häufig als Nebenprodukt verschiedener chemischer großtechnischer Verfahren an.

Ca. 55 % der heutigen Gipsrohstoffe werden aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken gewonnen (Wagner, 2018). In Deutschland dienen vor allem Braunkohlekraftwerke als alternative Rohstoffquelle für Naturgips, da hier mehr Schwefel anfällt als bei Steinkohlekraftwerken. So konnte der Abbau von Naturgips mit der Verwendung dieses qualitativ ebenbürtigen Werkstoffs, der sonst auf Deponien entsorgt werden müsste, erheblich verringert werden. Jedoch stehen Kohlekraftwerke in der Kritik von Wissenschaft, Umweltschutz- und Naturschutzorganisationen und Menschenrechtlern. Gemäß Klimaschutzplan 2050 soll der Ausstoß von Treibhausgasen im Jahr 2050 um 80 bis 95 % reduziert werden. Um die Emissionen in der Energiewirtschaft weiter zu reduzieren empfiehlt die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (WSB-Kommission) als Abschlussdatum für die Kohleverstromung Ende des Jahres 2038. Sofern die energiewirtschaftlichen, beschäftigungspolitischen und die betriebswirtschaftlichen Voraussetzungen vorliegen, kann das Datum in Verhandlungen mit den Betreibern auf frühestens 2035 vorgezogen werden. Um die Wertschöpfungsketten der Gipsindustrie zu erhalten, sind Maßnahmen zu ergreifen, um den fortschreitenden Wegfall an REA-Gips durch eine zusätzliche umweltverträgliche Gewinnung von Naturgips auszugleichen (WSB-Kommission, 2019). Aus Nachhaltigkeitsgründen sowie aus Gründen einer langfristigen Rohstoffsicherung ist die deutsche Gipsindustrie demnach bestrebt, das Gipsrecycling zu stärken und weiterzuentwickeln.

In der heutigen Bautechnik sind Gipsbaustoffe nicht wegzudenken. Gips dient als Grundstoff für Gipswandbauplatten für Zwischenwände, Gipskartonplatten für den Trockenbau, verschiedene Putze und Trockenestriche als auch für Grundierungen und Füllmittel. Durch Vermengen mit Kalk wird formbarer Gipskalk für Stuckarbeiten erzeugt.

Dabei soll der komplette Produktlebenszyklus von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und den Einbau bis hin zum Rückbau und zum Recycling lückenlos realisiert werden. Ein Vorteil dabei ist, dass Gips nahezu unbegrenzt recycelt werden kann.

Aktuell werden sortenrein ausgebaute Gipsabfälle in Deutschland nicht direkt von Bauunternehmen entsorgt, sondern durch Entsorgungsunternehmen mit Containern bei den Recyclinganlagen angeliefert bzw. deponiert. In anderen europäischen Ländern (z. B. Belgien, Frankreich, Niederlande, Skandinavische Länder) werden Gipsabfälle in der Regel direkt zum GipsHersteller transportiert und dort aufbereitet. Die Transportentfernungen sind demnach sehr unterschiedlich und variieren von Land zu Land zwischen 80 bis 300 km. In Deutschland wird die durchschnittliche Entfernung auf einen Radius von 50 bis 100 km (maximal 200 km) geschätzt (Founti et al. 2015).

3.4.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden für die Produktgruppe Gips, wie in Abbildung 3-40 dargestellt, die typischen Rückbauqualitäten Gipskartonplatten (R1) und Gipsblöcke oder Gipswandbauplatten (R2) untersucht. Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die Hauptprozesse in der Aufbereitungsanlage für die Berechnung mit einbezogen.

Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (Modul C1 und C2).

Die für bestimmte Einsatzzwecke hergestellten Substitute (vgl. Abbildung 3-40) werden in der Regel noch weiter konfektioniert und bis zum Einsatzort transportiert. Die Unterschiede zwischen der Herstellung von Bauprodukten mit und ohne RC-Anteil werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialebene mit berücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

Die zwei untersuchten Prozessketten wurden instruktiv entwickelt, indem typische Rückbauqualitäten, Einsatzvarianten und Aufbereitungsverfahren ermittelt und zu durchgehenden Prozessketten zusammengeführt wurden.

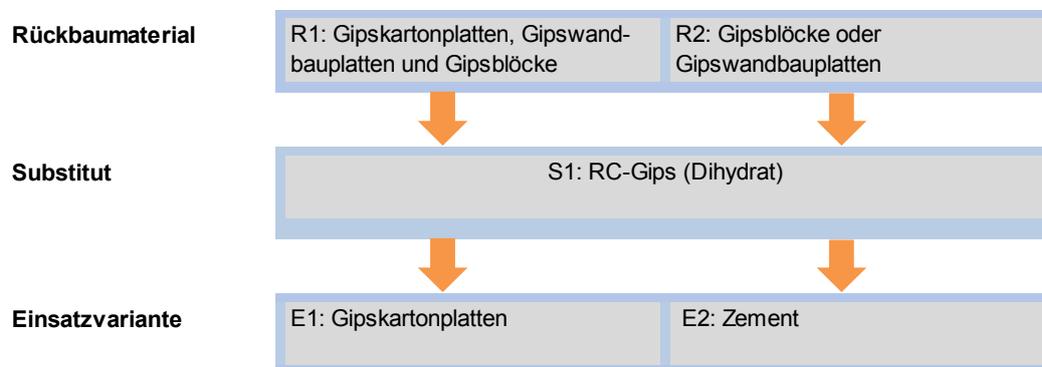


Abbildung 3-40: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Gips (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Gipskartonplatten, Gipswandbauplatten und Gipsblöcke

Substitut: RC-Gips (Dihydrat)

Einsatzvariante: Gipskartonplatten nach DIN EN 520 und DIN 18180

Gipskartonplatten bestehen aus einem Gipskern und einer Ummantelung aus Karton, Gipsfaserplatten enthalten neben dem Grundstoff Gips zur Armierung 15 - 20 % Papierfasern (Kolb, 2004). Gipskartonplattenabfälle fallen zum Großteil bei Rückbau- und Abrisstätigkeiten und nur zu kleineren Teilen bei Sanierungen und beim Neubau an. Sie sind mit anderen Stoffen (u. a. Anstrichen, Tapeten) vermischt und verweilen zum Teil Jahrzehnte in den Gebäuden. Aufgrund der in der Regel heterogenen Herkunft der Gipsabfälle aus Abbruch- bzw. Rückbauvorhaben kann es nicht nur zu Schwankungen der Materialeigenschaften, sondern auch zu Querkontaminationen mit bautypischen Schadstoffen kommen. Schadstoffe werden u. a. durch Annahmebeschränkungen für kontaminiertes Rückbaumaterial und strenge Qualitätsempfehlungen an RC-Gips begrenzt. Daneben sind auch die zurzeit in der Diskussion befindlichen möglichen Verunreinigungen der Gipsabfälle mit asbesthaltigen Spachtelmassen zu berücksichtigen. Diese können vor allem durch Querkontaminationen verursacht werden.

Bereits das Vorhandensein von Asbest in geringen Mengen kann dabei zum Ausschluss des Materials aus der Gipsaufbereitung führen (Beckert et al., 1995). Kein Recycling ist möglich, wenn der Asbestgehalt in zu recycelnden Gipsabfällen den Grenzwert von 0,1 M.-% gemäß Abfall- und Gefahrstoffrecht überschreitet (Einstufung als gefährlicher Abfall). Hinsichtlich der Frage, wann Gipsabfälle bzw. daraus hergestellte RC-

Gipse bezüglich eines Asbestgehalts in Verkehr gebracht werden dürfen, existieren unterschiedliche Rechtsauffassungen. Das BMU und auch die LAGA (LAGA M 23) vertreten bisher das „0-Faser-Prinzip“, d. h., keine einzige Asbestfaser für Recycling ist zulässig, absolutes Inverkehrbringungsverbot. Da dies nicht praktikabel ist, mehren sich die Auffassungen (so der AK Asbest im Rahmen der Novellierung der GefStV), dass z. B. als „Abschneidegrenze“ die Nachweisgrenze des „Verfahrens zur analytischen Bestimmung von Asbestfasern mit REM/EDX, TRGS 517 7487 BIFA“ mit 0,008 M.-% festgelegt werden sollte, bei deren Unterschreitung von „Asbestfreiheit“ auszugehen und damit Recycling möglich ist. Diese bisher fehlende Rechtssicherheit führt daher zu sehr eingeschränkten Gips-Recyclingaktivitäten.

Die Aufbereitung von Gipsabfällen aus dem Baubereich findet in stationären Recyclinganlagen statt. Dabei wird das Material zerkleinert, sortiert, klassiert und vermahlen. Ein Verfahrensschema der Aufbereitung von Gipsplattenabfällen ist in Abbildung 3-41 dargestellt.

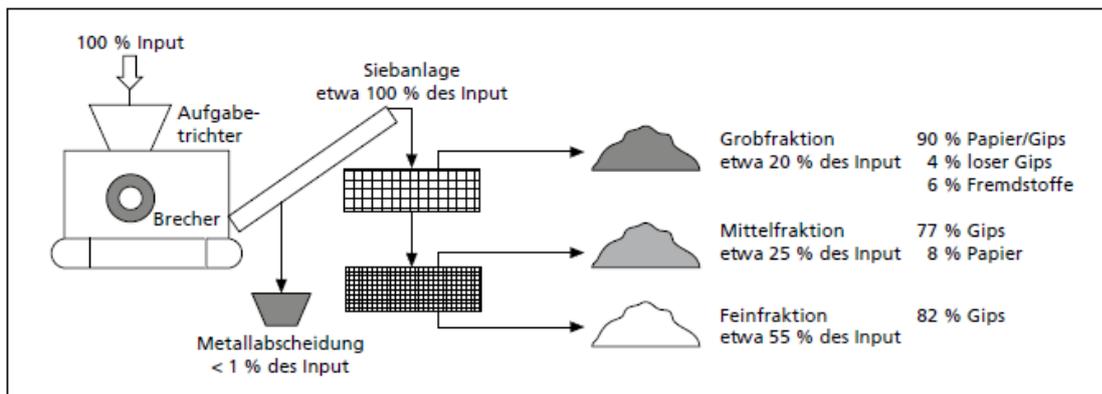


Abbildung 3-41: Verfahrensschema der Aufbereitung von Gipsplattenabfällen (Abbildung aus Zingk, 2009).

Qualitätsanforderungen an RC-Gipse richten sich nach dem entsprechenden Zielprodukt. Für den Wiedereinsatz von RC-Gips in der Gipskartonplattenherstellung sind die Regelwerke DIN EN 520 und DIN 18180 bezeichnend. Gipskartonplatten können aus Naturgips und/oder REA-Gips hergestellt sein. Dabei wird der Rohgips, wie in Abbildung 3-42 schematisch dargestellt, zunächst bei Temperaturen von ca. 150 °C zum sog. Stuckgips kalziniert. Schließlich wird der feingemahlene Stuckgips wieder mit Wasser vermischt und auf Bandstraßen zwischen zwei Kartonlagen aufgetragen (Bundesverband der Gipsindustrie e.V., 2013).

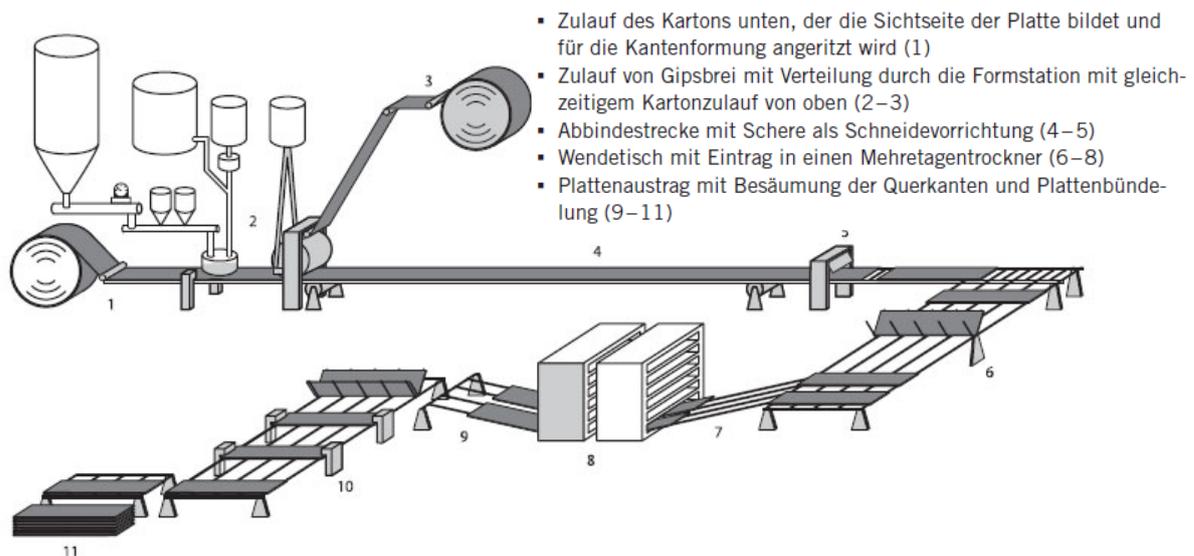


Abbildung 3-42: Schematische Darstellung einer Produktionsanlage für Gipskartonplatten (Abbildung aus Bundesverband der Gipsindustrie e.V., 2013).

Prozesskette R2-S1-E2

Rückbaumaterial: Gipsblöcke oder Gipswandbauplatten

Substitut: RC-Gips (Dihydrat)

Einsatzvariante: Zement nach DIN EN 197-1, DIN EN 14216, sowie DIN 1164, Teil 10, 11 und 12

Gipswandbauplatten sind Bauelemente aus massivem Stuckgips zum Herstellen von nichttragenden inneren Trennwänden, Schachtwänden, Vorsatzschalen oder Stützenummantelungen im Innenbereich. Die Wände werden ohne Unterkonstruktion allein mit Gipskleber errichtet.

Trennwände aus Gips-Wandbauplatten benötigen keinen Putz, sie werden lediglich im Fugen- und Anschlussbereich oder ganzflächig verspachtelt, wahlweise mit dem Gipskleber selbst oder einem Flächenspachtel.

Die Herstellung und Verarbeitung von Asbest sind in Deutschland zwar seit 1993 verboten, Experten stellten jedoch bei Prüfungen fest, dass asbesthaltige Spachtelmassen oder Fliesenkleber in ungefähr einem Viertel der vor 1995 errichteten Gebäude vorhanden sind (GVSS 2015).

Die Herstellung von RC-Gips aus Gipswandbauplatten und Gipsblöcken entspricht technologisch der Herstellung von RC-Gips aus Gipskartonplatten (vgl. Abbildung 3-41). Der gewonnene RC-Gips wird vornehmlich in der Gipsindustrie verwendet. Eine alternative Einsatzvariante stellt die Verwendung von RC-Gips als Zumahlstoff bei der Zementherstellung gemäß DIN EN 197-1, DIN EN 14216, sowie DIN 1164, Teil 10, 11 und 12 dar. Allerdings ist dieser Verwertungsweg noch nicht hinreichend etabliert und wird derzeit nur in sehr geringem Umfang realisiert.

Der gewonnene RC-Gips kann des Weiteren als Zumahlstoff bei der Zementherstellung verwendet werden, wobei dieser Recyclingweg noch nicht etabliert ist. Die Qualitätsanforderungen an die Ausgangs- und Zumahlstoffe von Zement sind in DIN EN 197-1, DIN EN 14216 sowie DIN 1164, Teil 10, 11 und 12 geregelt.

3.4.3 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen betrachtet. Für die Herstellung von RC-Gips aus Gipskartonplatten (R1) und Gipsblöcken oder Gipswandbauplatten (R2) sind dies die Prozesse Vorsortierung, Zerkleinerung, Klassierung, Metallabscheidung, Leichtstoffabtrennung, Vermahlung und Siebung.

Die Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf Durchschnittswerten zu technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.4.3.1 Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

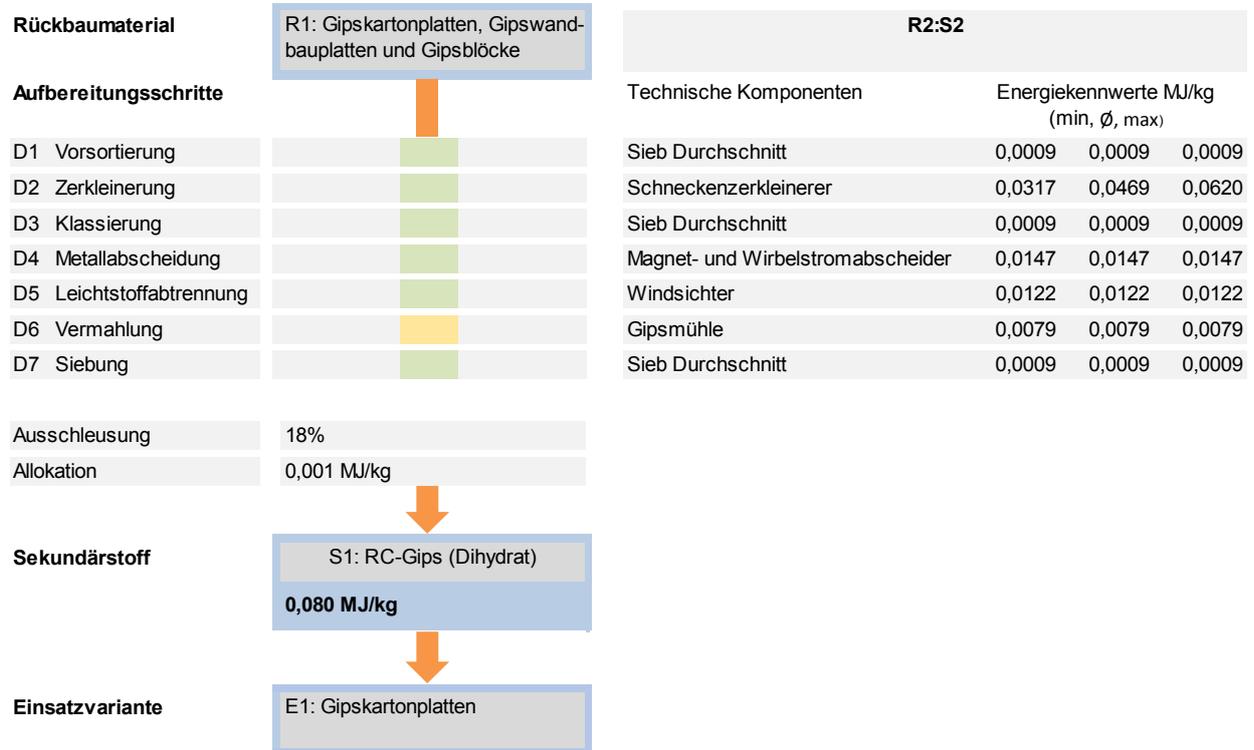


Abbildung 3-43: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Gips) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Gipskartonplatten, Gipswandbauplatten und Gipsblöcken (R1) zu RC-Gips (S1) zur Weiterverarbeitung zu Gipskartonplatten (E1) ist der Prozessschritt D6 (Vermahlung) zwar üblich, jedoch nicht immer erforderlich, sodass dieser Prozessschritt als optional betrachtet werden kann. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 18 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Der Großteil des ausgeschleusten Materials besteht aus Papier und Holz. Diesen Materialien kann ein thermisches Energiegewinnungspotenzial zugeschrieben werden. Auf Deponien zu entsorgende Stör- und Fremdstoffe fallen nicht oder nur in geringen Mengen an. Eine stoffliche Verwertung kommt nur für Metall (ca. 1 M.-%) infrage, sodass hier eine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-17 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg.

Tabelle 3-17: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe Gips.

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0691	0,0612	0,06513	0,00044	0,06469
Energieaufwand Ø	0,0843	0,0764	0,08037	0,00058	0,07979
Energieaufwand max.	0,0996	0,0996	0,09964	0,00072	0,09892

Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

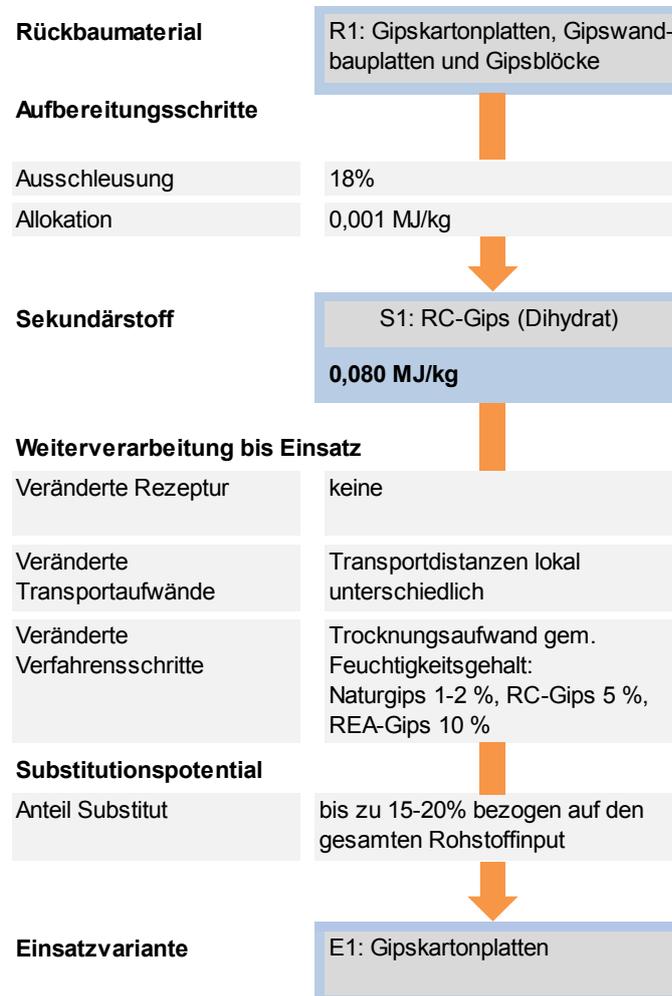


Abbildung 3-44: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Gips) (Quelle: eigene Darstellung).

Rezepturänderungen

Bei Weiterverarbeitung des Sekundärstoffs zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz kommt es zu keinerlei Rezepturveränderungen.

Veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort)

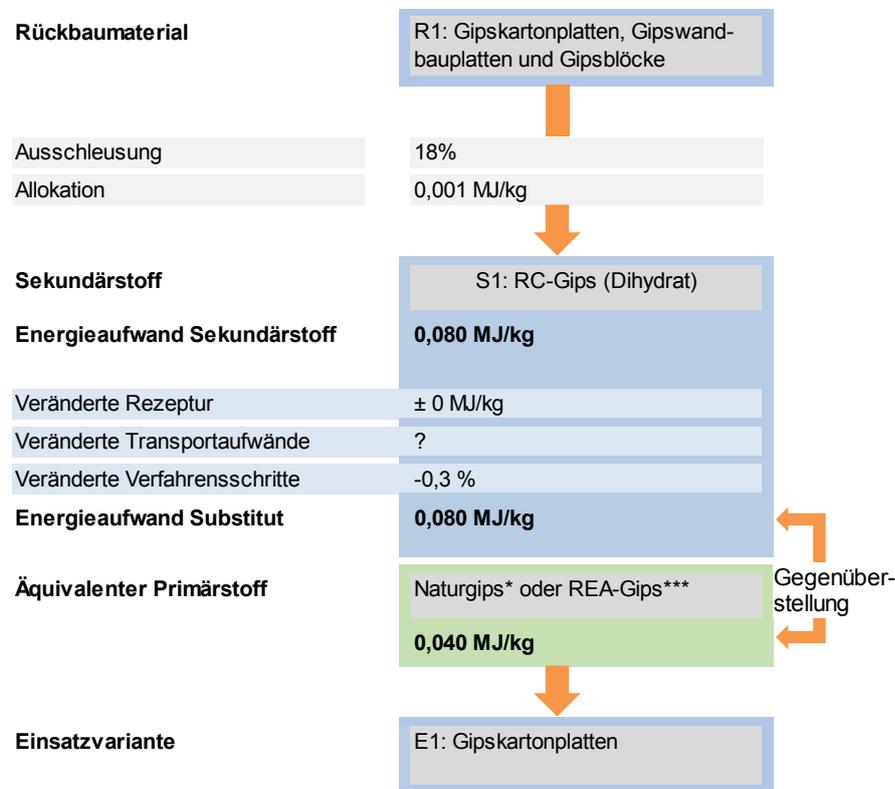
Transportdistanzen sind in Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorten sehr unterschiedlich. Aufgrund regionaler Unterschiede können für Transportdistanzen für RC- und Primärmaterialien keine pauschalen Annahmen getroffen werden. Durch einen Ausbau des Recyclingnetzes und damit der Verringerung von Transportdistanzen zwischen produzierenden Unternehmen und Recyclingwerken könnte sich ein weiterer energetischer Vorteil für RC-Gips ergeben.

Veränderte Verfahrensschritte

Bei der Herstellung von Gipskartonplatten wird Rohgips zu sogenanntem Stuckgips kalziniert (vgl. Kapitel 3.4.2). Je nach Feuchtegehalt ist ein entsprechender Trocknungsaufwand erforderlich. Der Feuchtegehalt von Naturgips beträgt dabei ca. 1-2 %, von RC-Gips ca. 5 % und von REA-Gips ca. 10 %.

Da in den Berechnungen angenommen wird, dass REA-Gips und Naturgips gleichermaßen zum Einsatz kommen, ergibt sich bei der Verwendung von RC-Gips anstelle des Primärstoffs (REA- und Naturgips) kein wesentlicher energetischer Unterschied hinsichtlich der Trocknungsenergie. Bezogen auf den Substitutanteil wird das energetische Einsparpotenzial vernachlässigbar gering.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. ökobaudat 1.1.03: Gipsstein (CaSO₄-Dihydrat)

** gem. ökobaudat 1.1.03: Anhydrit Mix

*** Annahme: Energieaufwand REA-Gips äquivalent zu Naturgips

Abbildung 3-45: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Gips) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-45 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts etwas höher ist als für die Herstellung des substituierbaren Baumaterials „Naturgips“ bzw. „REA-Gips“⁸. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit RC-Anteilen.

Relevante Auszüge aus der Ökobaudat (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

⁸ Da es sich bei REA-Gips um ein Nebenprodukt von industriellen Prozessen handelt, ist der Energieaufwand nicht eindeutig quantifizierbar. Mit Berücksichtigung von Energieallokationen vom Hauptprozess (z. B. der Kohlegewinnung) auf noch verwertbare Produkte wäre der Wert von REA-Gips relativ hoch, ohne deren Berücksichtigung läge der Energieaufwand bei null. Dementsprechend wird hier vereinfachend der Energieaufwand für die Bereitstellung von Naturgips als Vergleichswert gewählt.

3.4.3.2 Prozesskette R2-S1-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

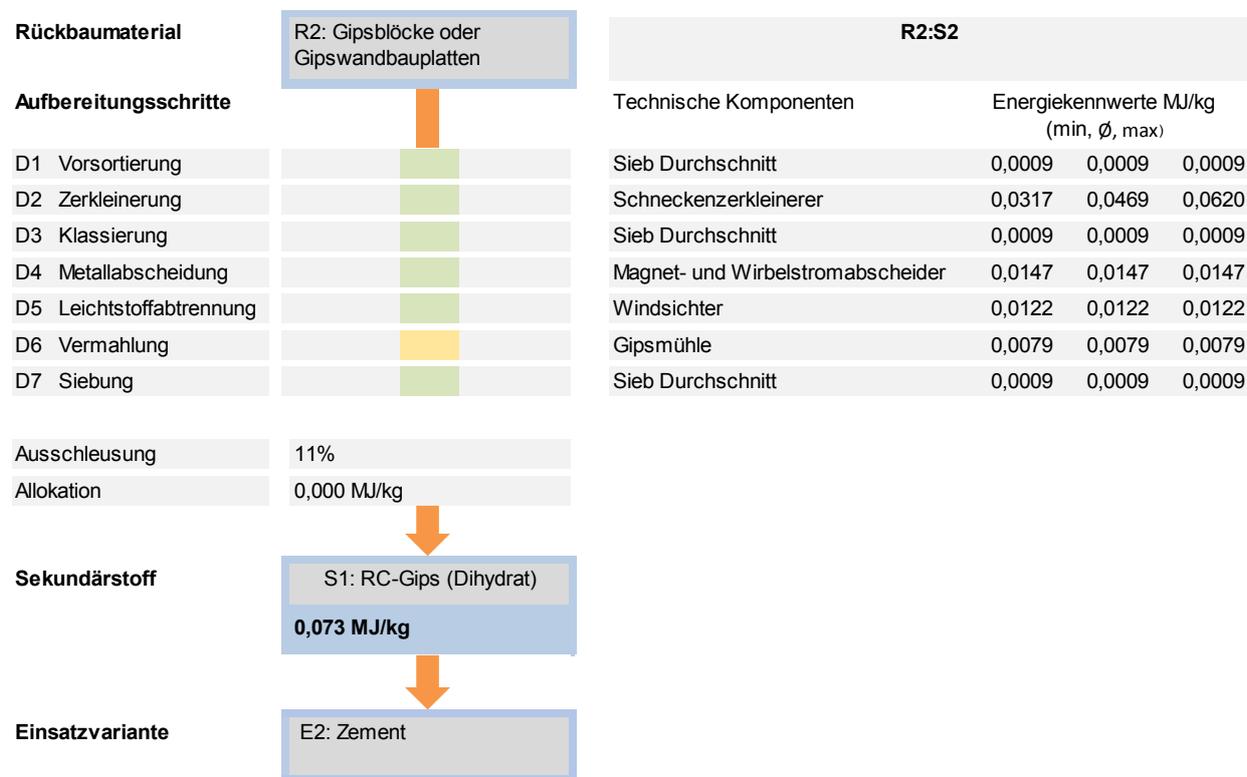


Abbildung 3-46: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S1-E2, Bauproduktgruppe Gips) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Gipsblöcken oder Gipswandbauplatten (R2) zu RC-Gips (S1) zur Weiterverwendung als Zementzumahlstoff (E2) ist der Prozessschritt D6 (Vermahlung) zwar denkbar, jedoch nicht erforderlich, sodass dieser Prozessschritt als optional betrachtet werden kann. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 11 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Das ausgeschleuste Material (Fremd- und Störstoffe) ist in der Regel nicht weiter verwertbar, sodass keine Energieallokation vorgenommen wurde.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-18 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg.

Tabelle 3-18: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff (Prozesskette R2-S1-E2, Bauproduktgruppe Gips).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0620	0,0541	0,05801	0,00000	0,05801
Energieaufwand Ø	0,0772	0,0693	0,07325	0,00000	0,07325
Energieaufwand max.	0,0925	0,0925	0,09252	0,00000	0,09252

Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

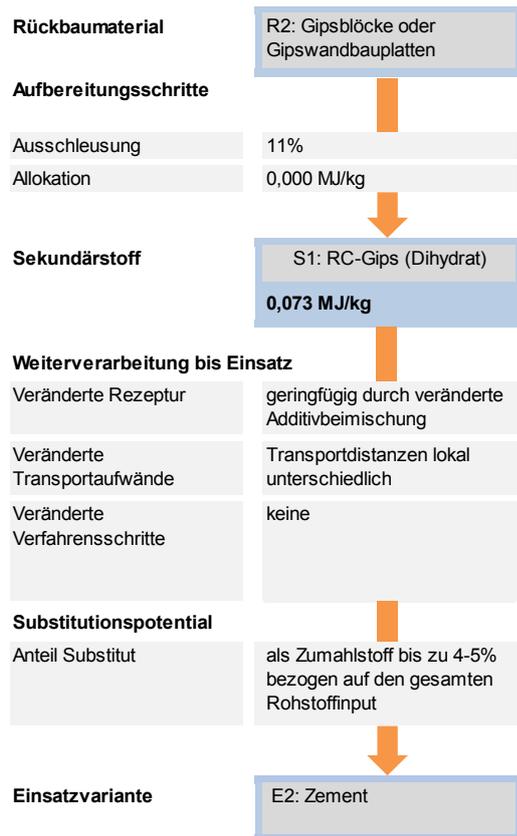
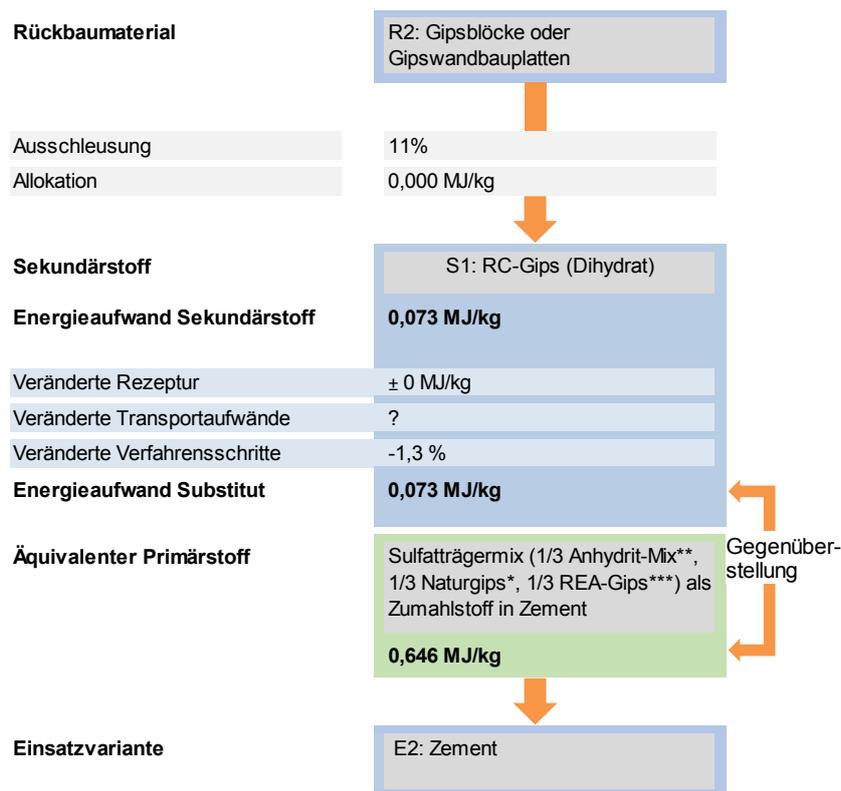


Abbildung 3-47: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S1-E2, Bauproduktgruppe Gips) (Quelle: eigene Darstellung).

Hinsichtlich Rezeptur und Verfahrensschritten gibt es keine energetisch relevanten Unterschiede zwischen der Herstellung von „Standardzement“ und Zement mit RC-Gips als Zumahlstoff. Transportdistanzen sind in Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorten sehr unterschiedlich. Es wird, wie in Kapitel 3.4.3.1 erläutert, keine Anpassung durch größere oder geringere Transportdistanzen vorgenommen.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. ökobaudat 1.1.03: Gipsstein (CaSO₄-Dihydrat)

** gem. ökobaudat 1.1.03: Anhydrit Mix

*** Annahme: Energieaufwand REA-Gips äquivalent zu Naturgips

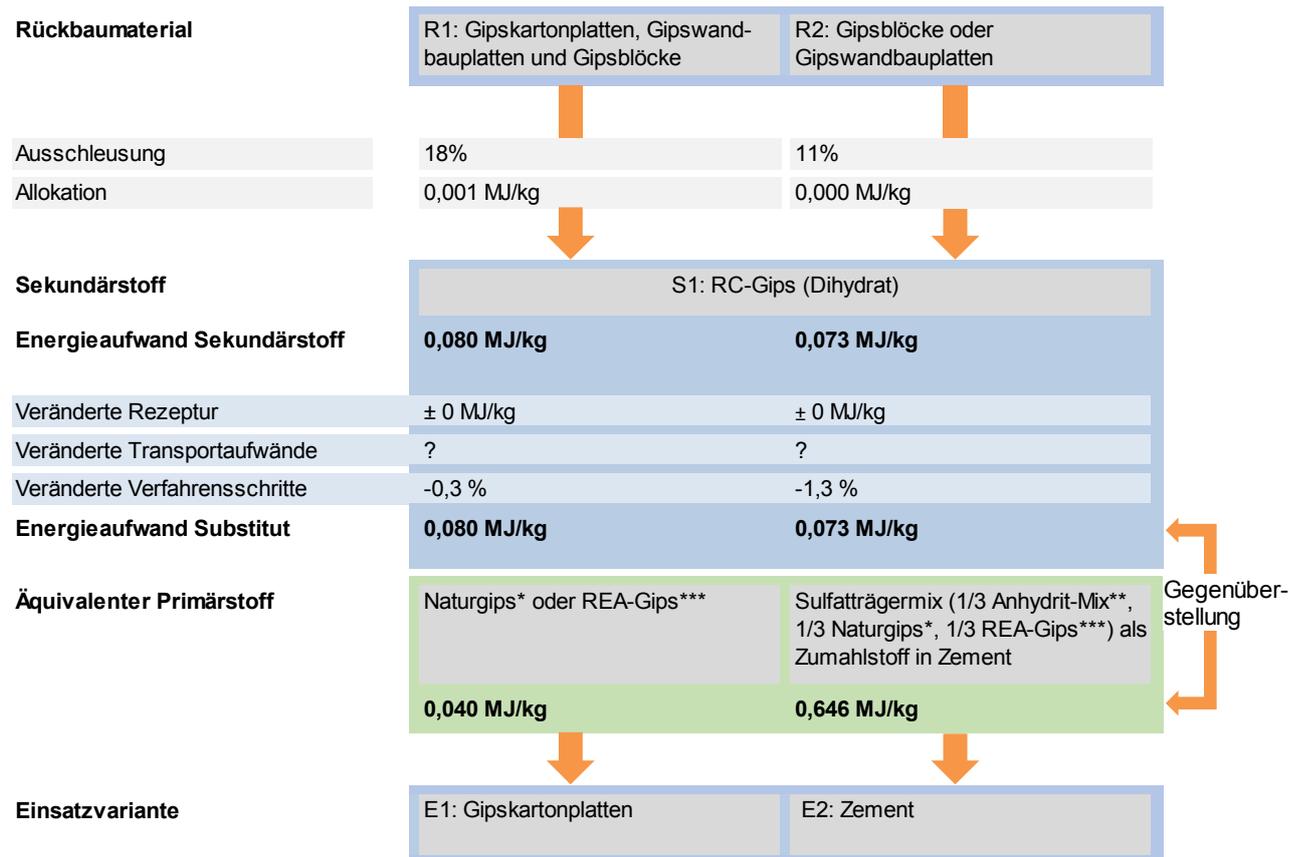
Abbildung 3-48: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-48 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des substituierbaren Sulfatträgermixes aus Anhydrit, Naturgips, und REA-Gips⁹. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen.

Relevante Auszüge aus der Ökobaudat (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

⁹ Da es sich bei REA-Gips um ein Nebenprodukt von industriellen Prozessen handelt, ist der Energieaufwand nicht eindeutig quantifizierbar. Mit Berücksichtigung von Energieallokationen vom Hauptprozess (z. B. der Kohlegewinnung) auf noch verwertbare Produkte wäre der Wert von REA-Gips relativ hoch, ohne deren Berücksichtigung läge der Energieaufwand bei Null. Dementsprechend wird hier vereinfachend der Energieaufwand für die Bereitstellung von Naturgips als Vergleichswert gewählt.

3.4.4 Fazit



* gem. ökobaudat 1.1.03: Gipsstein (CaSO₄-Dihydrat)

** gem. ökobaudat 1.1.03: Anhydrit Mix

*** Annahme: Energieaufwand REA-Gips äquivalent zu Naturgips

Abbildung 3-49: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Gips (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Gips-Recyclings	
Energieverbrauch	Der Recyclingprozess von Gips ist aktuell noch energieintensiver als die Gewinnung von Natur- oder REA-Gips, nicht jedoch als die Bereitstellung des Sulfatträgermixes aus Anhydrit, Naturgips und REA-Gips.
Besonderheiten	Asbestfasern in geringen Mengen führen zum Ausschluss des Materials aus der Gipsaufbereitung. Asbesthaltiger RC-Gips könnte alternativ einen Anteil des Rohmehlinputs für die Herstellung von Zement bilden (Prozesskette R2-S1-E2), da durch die Herstellung von Klinker hohe Temperaturen notwendig sind, unter denen Asbestfasern unschädlich gemacht werden. Diese Anwendung ist denkbar und technisch möglich, aktuell jedoch noch kein Standard. Die fehlende Rechtssicherheit bezüglich eines praktikablen Grenzwertes für Asbestfasern in RC-Gips führt zu sehr eingeschränkten Gips-Recyclingaktivitäten.

Ausschleusung & Allokationen	Je nach Ausgangsmaterial werden während des Recyclingprozesses ca. 11 - 18 M.-% des Materialinputs ausgeschleust. Ausschleustes Papier und Holz hat thermisches Energiegewinnungspotenzial. Auf Deponien zu entsorgende Stör- und Fremdstoffe fallen nicht oder nur in geringen Mengen an. Eine weitere stoffliche Verwertung kommt nur für Metall infrage. Der Anteil an ausgeschleustem Metall liegt jedoch bei max. 1%, bezogen auf den Materialinput.
Primärstoffeinsparungen	Natur- und REA-Gips ist noch ausreichend verfügbar, wird sich jedoch durch den Rückbau der stark umweltbelastenden Kohlekraftwerke (u. a. hohe CO ₂ -Emissionen) bis 2030 deutlich reduzieren. Der aktuelle Gipsbedarf kann nicht durch Naturgips gedeckt werden.
Flächennutzungskonflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von konkurrierenden Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar, Flächen für Deponien können eingespart werden.

3.5 Flachglas

3.5.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe Flachglas

Für den Baubereich ist insbesondere der Erzeugungspfad von Flachglas relevant, da dieses vor allem im konstruktiven Bereich zur Anwendung kommt. Für das im Bausektor eingesetzte und unter dem Abfallschlüssel 17 02 02 getrennt erfassbare Flachglas gibt es mittlerweile in Deutschland ein flächendeckendes Sammel-, Aufbereitungs- und Verwertungsnetz, wie es auch für Behälterglas etabliert ist.

Rückgebautes oder abgebrochenes Flachglas fällt in der Regel in Form von Flachglasscherben an, die für eine sekundäre Nutzung einem Aufbereitungsprozess unterzogen werden müssen. Für aufbereitete Flachglasscherben gibt es diverse sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten. Diese reichen vom Wiedereinsatz in der Flachglasproduktion über die Herstellung von Gussglas, Behälterglas, Dämmwolle, Schmirgelpapier bis hin zur Produktion von Glasbausteinen. An Verfahren, die es erlauben, den Anteil von aufbereitetem Altglas am Scherbeneinsatz in den Floatwannen für die Flachglasherstellung zu erhöhen, arbeiten Flachglas-Recyclingunternehmen, Flachglasindustrie und Anlagenbauer gemeinsam intensiv.

3.5.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden zwei typische Verwertungswege innerhalb des Bauwesens analysiert und in Hinblick auf den dafür nötigen Energieaufwand mit dem Standardherstellungsprozess (ohne RC-Anteil) verglichen. Ausgangsmaterial ist in beiden Fällen sortenrein rückgebautes Flachglas aus Fenster- und Türscheiben (R1).

Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die sich auf dem Recyclinghof abspielenden Hauptprozesse in die Berechnung mit einbezogen. Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (Modul C1 und C2).

Je nach Einsatzzweck wird das hergestellte Substitut (vgl. Abbildung 3-50) anschließend noch weiter konfektioniert und bis zum Einsatzort transportiert. Die Unterschiede zwischen der Herstellung von Bauprodukten (hier E1: Einscheibensicherheitsglas und E2: Schaumglasplatten) mit und ohne RC-Anteil werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialebene mit berücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

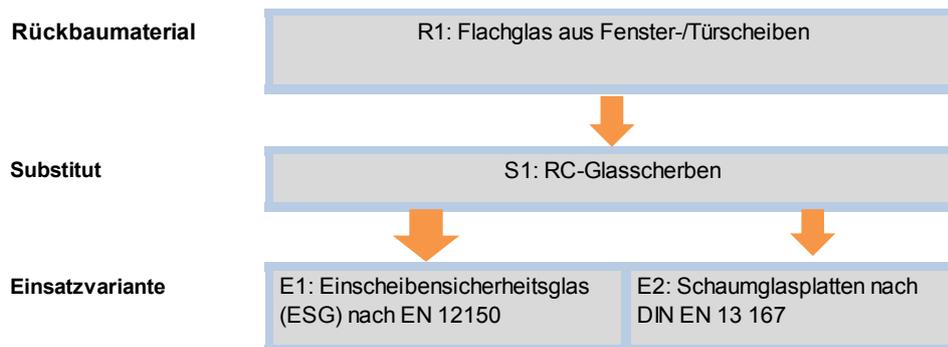


Abbildung 3-50: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Flachglas (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Flachglas aus Fenster-/Türscheiben

Substitut: RC-Glasscherben

Einsatzvariante: Einscheibensicherheitsglas (ESG) nach DIN EN 12150

Der Einsatz von RC-Glasscherben zur Wiederherstellung von Flachglas stößt derzeit wegen der hohen Qualitätsanforderungen in den Floatwannen noch an technische Grenzen. Schon kleinste Verunreinigungen (< 0,05 %) können Brechzahl oder Farbkonsistenz des Endproduktes beeinflussen. Überaus wichtig ist daher der Reinheitsgrad des Altglases. Für die Herstellung von Flach-, Einscheibensicherheits- und Verbundsicherheitsglas für die Weiterverarbeitung zu Mehrscheiben-Isolierglas und Anwendungen als Glas für das Bauwesen ist demnach eine gründliche Aufbereitung des Altglases unumgänglich. Beispielhaft wurde in der vorliegenden Studie Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) als Einsatzvariante gewählt. ESG besteht aus einer einzigen, speziell wärmebehandelten Scheibe, wodurch das Glas eine erhöhte Stoß- und Schlagfestigkeit besitzt. Wenn es bei hoher Belastung zerbricht, zerfällt es in kleinste Krümel ohne scharfe Kanten.

Die wesentlichen Bestandteile von Floatglas (in einem Floatprozess hergestelltes Flachglas) sind die natürlich vorkommenden Rohstoffe Sand (Siliziumkarbonat, 59 %), Soda (Natriumkarbonat, 18 %), Dolomit (15 %), Kalk (Kalziumkarbonat, 4 %), Nephelin (3 %) und Sulfat (1 %) (Frerichs Glas GmbH, 2012). Tabelle 3-19 zeigt die Anteile dieser stofflichen Ressourcen am Gesamtbedarf nicht erneuerbarer stofflicher Ressourcen zu Herstellung von Floatglas (FG), Einscheibensicherheitsglas (ESG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG) unter Berücksichtigung der entsprechenden Vorketten.

Tabelle 3-19: Anteile stofflicher Ressourcen am Gesamtbedarf nicht erneuerbarer stofflicher Ressourcen unter Berücksichtigung der Vorketten (Tabelle aus Frerichs Glas GmbH, 2012).

Nicht regenerierbare stoffliche Ressourcen		FG		ESG		VSG	
Gesamt	kg	7,73	100 %	18,49	100 %	19,4	100 %
Boden	kg	0,63	8 %	0,65	4 %	0,62	3 %
Taubes Gestein	kg	3,17	41 %	13,87	75 %	14,71	77 %
Quarzsand	kg	1,63	21 %	1,63	9 %	1,56	8 %
Dolomit	kg	0,46	6 %	0,46	2 %	0,44	2 %
Kalkstein	kg	1,00	13 %	1,04	6 %	1,00	5 %
Natriumchlorid	kg	0,80	10 %	0,80	4 %	0,76	4 %

Zur Herstellung von Floatglas gelangen die Rohstoffe als Gemenge in den Schmelzofen und werden dort, in der Regel mittels Gas als Energieträger, mit einer Temperatur von ca. 1.560 °C geschmolzen. Nach

Collart et al. (2017) beträgt der derzeitige Energiebedarf für die Herstellung einer Tonne Glas ca. 6-7 GJ, während der theoretische Mindestenergiebedarf (Energie, die für das Schmelzen der Materialien in der Glaszusammensetzung erforderlich ist) nur 2-3 GJ beträgt. Die Herstellung von ESG ist zu etwa 45 % vom Stromverbrauch dominiert, der zum Erreichen der Vorspannung benötigt wird, die verbleibenden 55 % sind auf die Vorketten der FG-Herstellung zurückzuführen.

Die Zugabe von Glasscherben reduziert den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen, da der Schmelzpunkt von Glasscherben niedriger ist als bei den mineralischen Rohstoffen. In der Regel führt eine Erhöhung des Glasbruchanteils um 10 % zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs im Ofen um 2,5 bis 3 %. Abbildung 3-51 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und dem Anteil der Glasscherben, der in einer Benchmarking-Studie an 130 Öfen ausgemacht werden konnte (Beerkens et al., 2001). Auf diese empirischen Befunde gestützt führt demnach der Einsatz von 100 % Glasbruch anstelle von 100 % Quarzsand zu einer theoretischen Energieeinsparung von ca. 25 bis 30 %. Ohne Qualitätseinbußen und Rezepturveränderungen beschränkt sich der Einsatz von RC-Scherben derzeit jedoch noch auf bis zu 20 M.-%.

Ein weiterer Vorteil eines erhöhten Anteils an Recyclingglas ist, dass für den Produktionsprozess weniger Soda benötigt wird. Etwa 18 % Soda werden dem Sand zugesetzt, um die Schmelztemperatur zu senken. Die Soda-Produktion benötigt ca. 10 GJ/t. Der Einsatz von 10 % zusätzlichen Glasscherben führt zu zusätzlichen Einsparungen von 1,0 GJ/Tonne durch reduzierte Soda-Produktion (IEA, 2007).

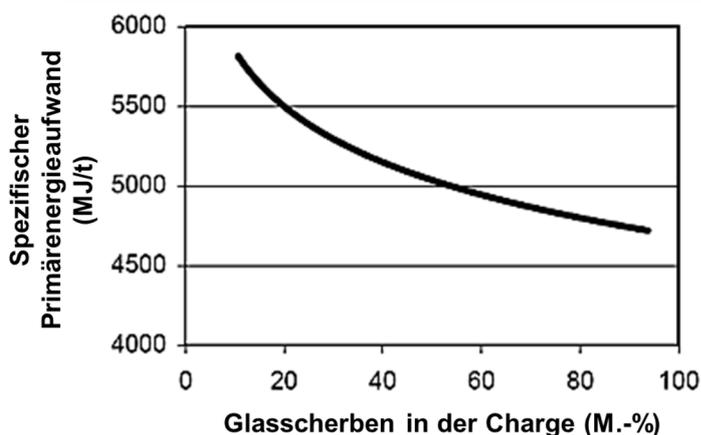


Abbildung 3-51: Energieverbrauch von Behälterglasöfen in Abhängigkeit vom Glasscherbenanteil in der Charge (Abbildung aus Beerkens et al., 2001).

Die Formgebung (Floaten) erfolgt anschließend durch Ausbreitung der flüssigen Glasmasse auf einem Bad aus geschmolzenem Zinn. Nach gleichmäßiger Abkühlung wird das Glasband zugeschnitten. Für die Herstellung von ESG wird Floatglas bis zum Transformationspunkt (min. 640 °C) erhitzt und danach abrupt abgekühlt. Die Oberflächen kühlen dadurch schneller ab und ziehen sich schneller zusammen. Damit entstehen in der Oberfläche zusätzliche Druckspannungen, die das Glas widerstandfähiger machen. Die beschriebenen Herstellprozesse sind repräsentativ für alle Herstellungsstandorte in Europa und unabhängig des Herstellers, da es bei der Herstellung von FG, ESG und VSG keine davon wesentlich abweichenden Herstellverfahren gibt.

Die Flachglasherstellung ist vom Energieträgereinsatz beim Schmelzprozess und den zugehörigen Emissionen auf Werksebene dominiert. Die Umweltwirkungen der Herstellung von ESG werden vorrangig durch den Stromverbrauch beim Prozess des Härtens in der ESG-Herstellung bestimmt, ebenso bei der VSG-Herstellung.

Prozesskette R1-S1-E2

Rückbaumaterial: Flachglas aus Fenster-/Türscheiben

Substitut: RC-Glasscherben

Einsatzvariante: Schaumglasplatten nach DIN EN 13 167

Die Erzeugung von Schaum- und Blähglas ist „weniger anspruchsvoll“ als die erneute Herstellung von Flachglas und wird bereits großtechnisch unter Einbringung hoher Anteile von recyceltem Glas (ca. 60 M.-%) realisiert. Bei Schaumglas ist dies vielfach Flachglasrecykat, das aus Fenster- und Türscheiben gewonnen wird. Neben den Rückbaumaterialien aus dem Hochbau finden auch Behälterglasscherben sowie Scherben aus Autoscheiben ihre Anwendung in der Schaum- und Blähglasproduktion. Schaumglas ist ein durch Zugabe von Kohlenstoff werksmäßig aufgeschäumter, geschlossenzelliger Werkstoff aus Glas. Schaumglas findet breite Verwendung für Dämmstoffanwendungen, als Ausgleichs- und Dämmschüttungen, sowie in Form von Dämmplatten. Glasschaumschotter, -platten und -schüttungen können sogar auf bis zu 100 % Altglas basieren. Indem Schaumglas wieder eingeschmolzen wird, ist auch dessen vollständiges Recycling prinzipiell möglich.

Bei der Herstellung durchläuft Schaumglas einen zweistufigen Hochtemperaturprozess. Zunächst werden die Grundstoffe bei ca. 1100 °C zu Rohglas geschmolzen. Nach Erkalten wird das Rohglas zu Glaspulver gemahlen und Kohlenstoff zugesetzt. Zur Energieeinsparung und Ressourcenschonung wird der Rohstoffmasse mittlerweile standardmäßig bis zu gut einem Drittel Recyclingglas beigemischt, u. a. auch Glasstaub, der beim Zuschnitt der Platten entsteht. In einem zweiten Hochtemperaturprozess bei ca. 900 °C erhält das Gemisch durch Aufschäumen seine Form. In den letzten Jahren ist es der Schaumglasindustrie gelungen, den Energiebedarf durch Erhöhung des Altglasanteiles und den Einbau von effizienten Energierückgewinnungsmaßnahmen signifikant zu reduzieren (Kolb, 2004). Wie bei der Flachglasherstellung kann durch eine Erhöhung des Glasbruchanteils um 10 % eine Reduzierung der Schmelzenergie um ca. 2,5 bis 3 % erzielt werden (Abbildung 3-52).

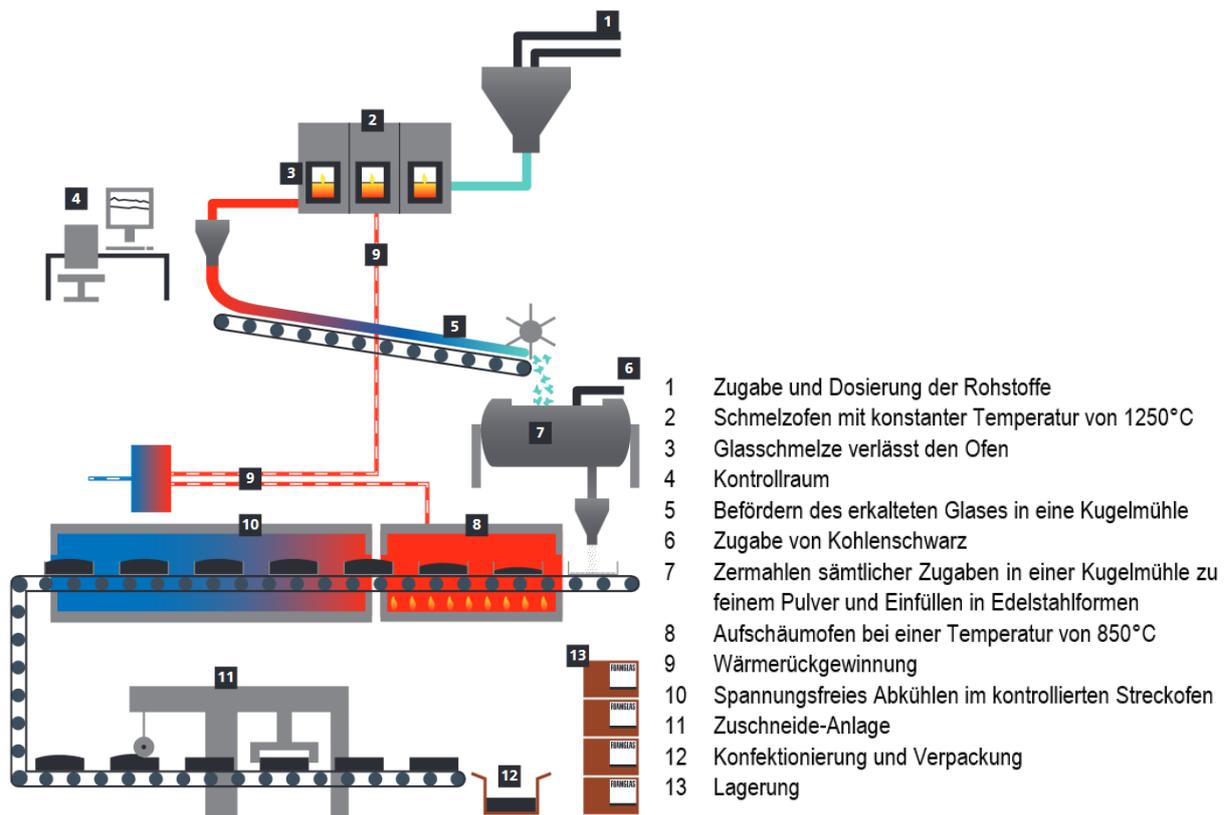


Abbildung 3-52: Schematische Darstellung des Produktionsprozesses von Schaumglas (Abbildung aus Pittsburgh Corning Europe NV, 2015).

3.5.3 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen betrachtet. Für die Herstellung von RC-Glasscherben (S1) aus sortenrein rückgebautem Flachglas aus Fenster- und Türscheiben (R1) sind dies die Prozesse Vorzerkleinerung, Handauslese, Metallabscheidung, Klassierung, Rückführung, Zerkleinerung, Leichtstoffabtrennung und Aussortieren von Fremdscherben und Fremdstoffen vonnöten. Die durchschnittlichen Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.5.3.1 Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

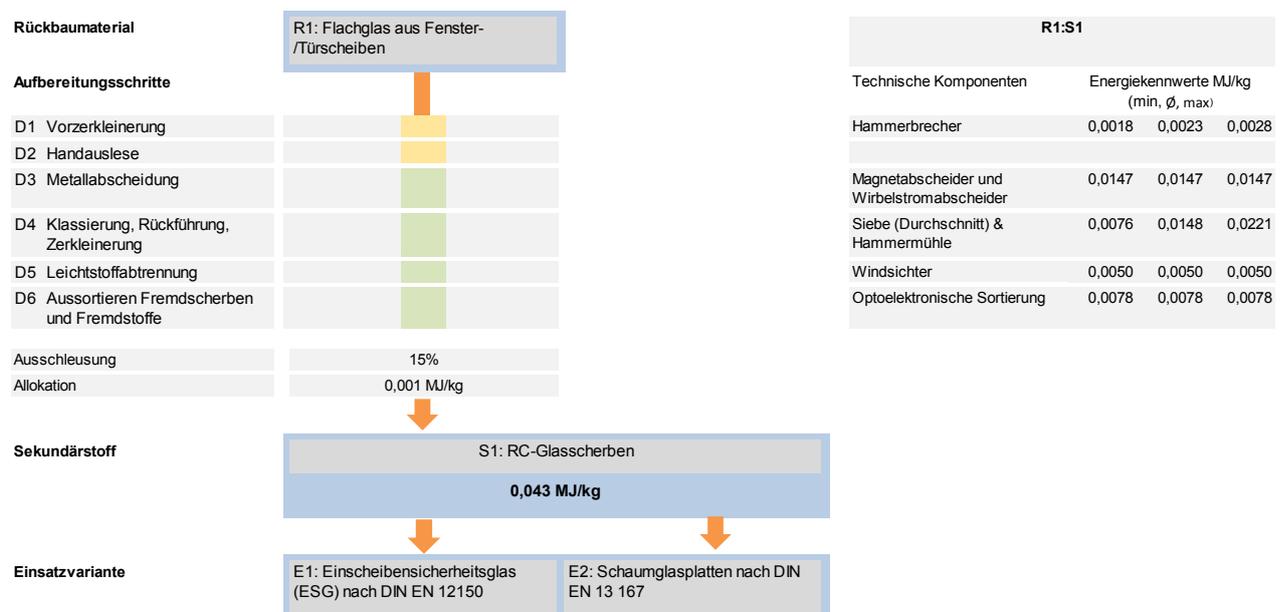


Abbildung 3-53: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff (Bauproduktgruppe Flachglas) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von sortenrein rückgebautem Flachglas aus Fenster- und Türscheiben (R1) zu RC-Glasscherben (S1) zur Weiterverarbeitung zu neuem Flachglas (hier Einscheibensicherheitsglas E1) sind die Prozessschritte D1 und D2 (Vorzerkleinerung und Handauslese) je nach Aufgabematerial und Aufbereitungsanlage nicht immer erforderlich, sodass diese Schritte als optional betrachtet werden können. Es wird von einem sehr reinen Rückbaumaterial ausgegangen, welches für die Herstellung von Flachglas geeignet ist.

Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 15 M.-% bezogen auf die Aufgabemenge. Für das nicht weiter verwertbare ausgeschleuste Material (Fremd- und Störstoffe) wurde keine Energieallokation vorgenommen. Metallreste werden durchschnittlich auf eine Größenordnung von ca. 5 M.-% geschätzt. Da hierfür eine stoffliche Verwertung infrage kommt, wurde eine Energieallokation vorgenommen.

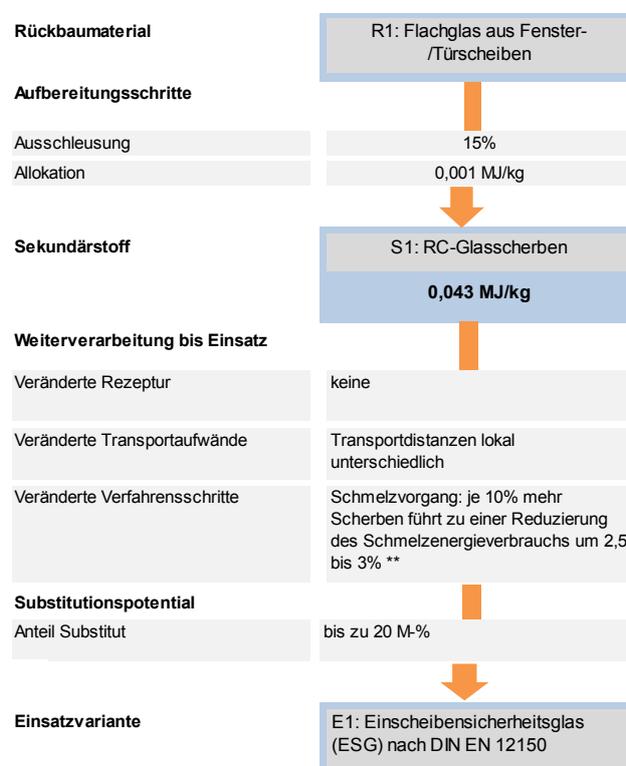
Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-20 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg.

Tabelle 3-20: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe Flachglas.

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0370	0,0351	0,03604	0,00079	0,03525
Energieaufwand Ø	0,0447	0,0423	0,04351	0,00081	0,04270
Energieaufwand max.	0,0524	0,0496	0,05099	0,00083	0,05016

Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)



** Beerkens, R.G.C., van Limpt, J. (2001), Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces, Proceedings of the 62. Conference on Glass Problems at University of Illinois at Urbana-Champaign, 16.-17. October 2001.

Abbildung 3-54: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Flachglas) (Quelle: eigene Darstellung).

Rezepturänderungen

Bei Weiterverarbeitung des Sekundärstoffs zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz kommt es zu keinerlei Rezepturveränderungen.

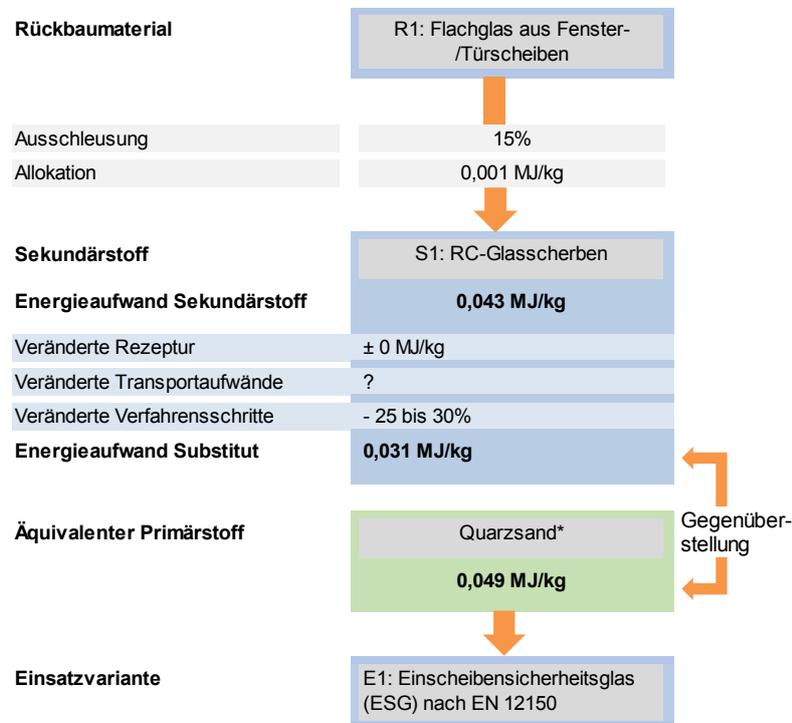
Veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort)

Transportdistanzen sind in Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorten sehr unterschiedlich. Aufgrund regionaler Unterschiede können für Transportdistanzen für RC- und Primärmaterialien keine pauschalen Annahmen getroffen werden.

Veränderte Verfahrensschritte

Durch den Einsatz von RC-Glasscherben anstelle von Quarzsand kommt es bei der Herstellung von Einscheibensicherheitsglas (E1) zu einem veränderten Schmelzvorgang, da sich die Schmelzenergie durch die Zugabe von RC-Glasscherben verringert (vgl. Kapitel 3.5.2).

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. ökobaudat 1.2.01: Sand 0/2 nicht getrocknet

Abbildung 3-55: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe Flachglas) (Quelle: eigene Darstellung).

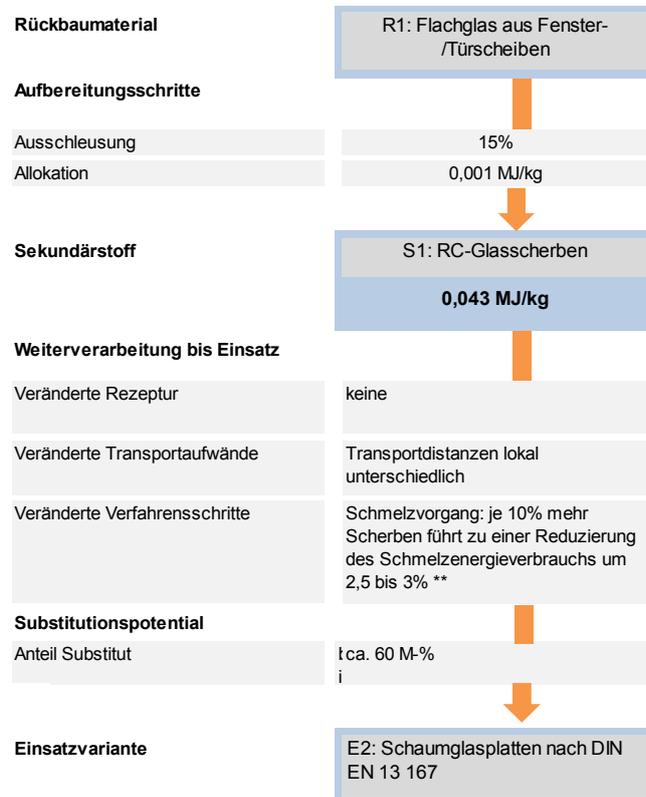
Abbildung 3-55 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts etwas niedriger ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs „Quarzsand“. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat oder aus EPDs (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können dem Anhang 7.2 entnommen werden. Wird zusätzlich die Einsparung an Schmelzenergie berücksichtigt, fällt die Energieeinsparung, die durch Recycling erreicht werden kann, noch höher aus. Ein Recycling ist jedoch nicht nur hinsichtlich der möglichen Energieeinsparungen sinnvoll. Obwohl Quarzsand in Deutschland aktuell noch ausreichend verfügbar ist, wird dieser auch als Massenbaustoff für andere Einsatzzwecke verwendet (z. B. Betonherstellung). Außerdem ist anzumerken, dass Primärstoffquellen aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar sind. Eine Verwendung von Sekundärstoffen ist demnach dennoch als sinnvoll und notwendig zu bewerten.

3.5.3.2 Prozesskette R1-S1-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

Entsprechend Prozesskette R1-S1-E1. Ebenso wie in R1-S1-E1 wird von einem sehr reinen Rückbaumaterial ausgegangen, sodass es zu keinen Unterschieden in der Aufbereitung kommt.

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

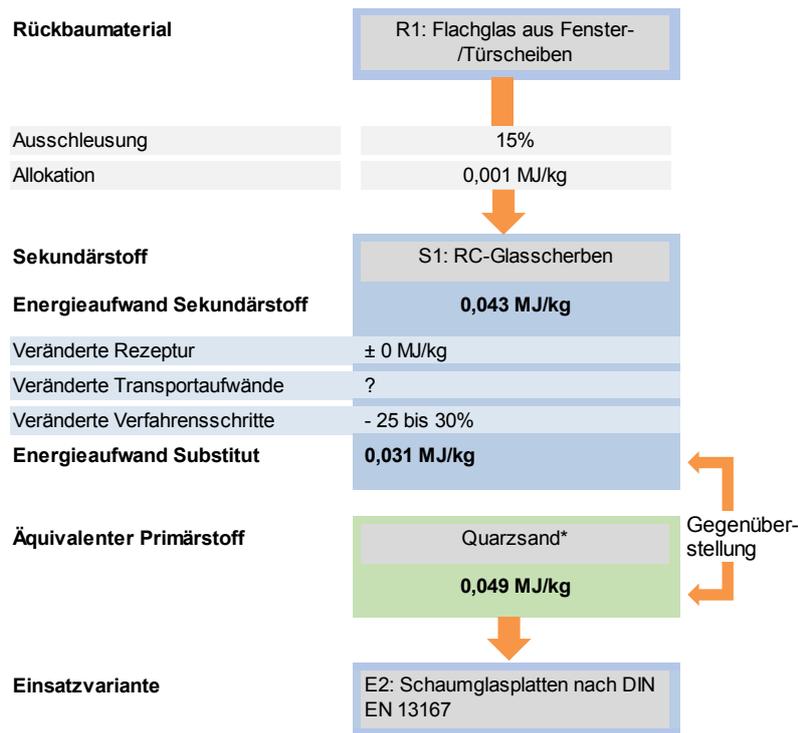


** Beerkens, R.G.C., van Limpt, J. (2001), Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces, Proceedings of the 62. Conference on Glass Problems at University of Illinois at Urbana-Champaign, 16.-17. October 2001.

Abbildung 3-56: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E2, Bauproduktgruppe Flachglas) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.5.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



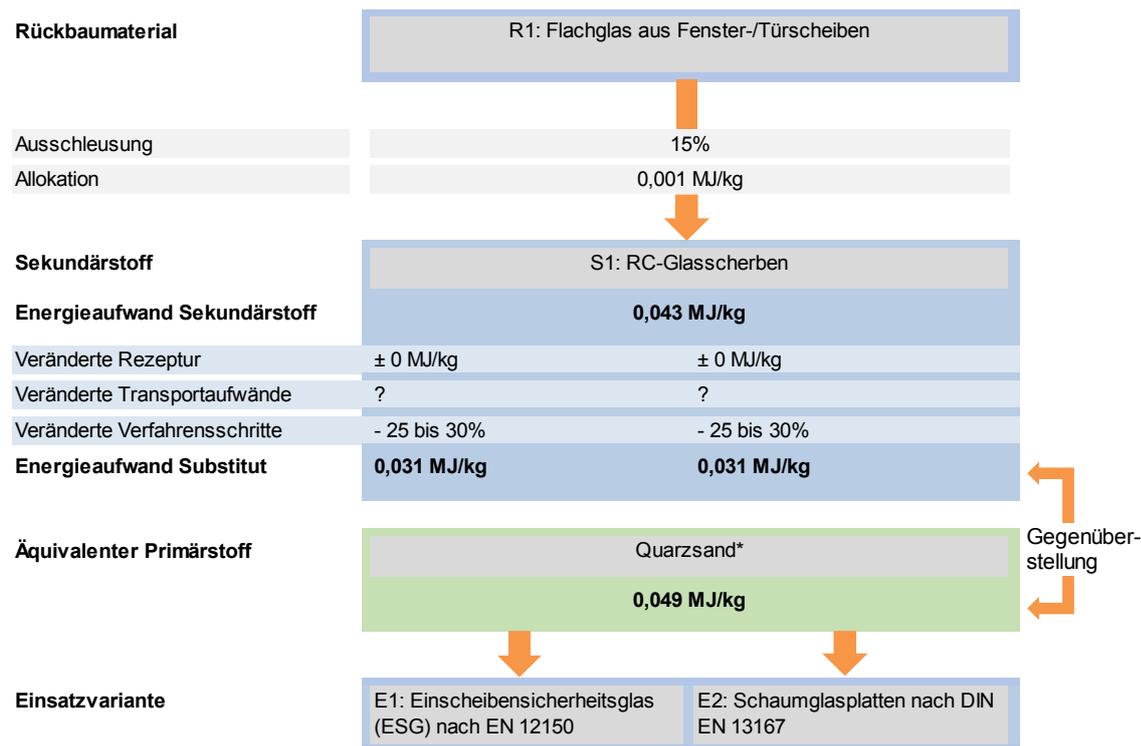
* gem. ökobaudat 1.2.01: Sand 0/2 nicht getrocknet

Abbildung 3-57: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E2, Bauproduktgruppe Flachglas) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-57 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts etwas höher ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs „Quarzsand“. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat oder aus EPDs (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen.

Quarzsand ist noch ausreichend verfügbar, wird jedoch auch als Massenbaustoff für andere Einsatzzwecke verwendet (z. B. Betonherstellung). Außerdem ist anzumerken, dass Primärstoffquellen aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar sind. Eine Verwendung von Sekundärstoffen ist demnach dennoch als sinnvoll und notwendig zu bewerten.

3.5.4 Fazit



* gem. ökobaudat 1.2.01: Sand 0/2 nicht getrocknet

Abbildung 3-58: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Flachglas (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Flachglas-Recyclings	
Energieverbrauch	Der Recyclingprozess von Altglas ist energiesparender als die Gewinnung von Quarzsand. Dies gilt sowohl ohne als auch unter Berücksichtigung der Einsparungen von Schmelzenergie bei der Glasschmelze (Scherben schmelzen unter geringeren Temperaturen als Quarzsand).
Besonderheiten	Bei der Herstellung von Flachglas ist der Reinheitsgrad des Altglases von besonderer Bedeutung. Schon kleinste Verunreinigungen (< 0,05 %) können Brechzahl oder Farbkonsistenz des Endproduktes beeinflussen. Es ist erwähnenswert, dass neben den beiden Anwendungsvarianten „Floatglas“ und „Schaumglas“ (nach DIN EN 13167) die mengenmäßig bedeutendste Verwendung von RC-Scherben in der Herstellung von Behälterglas liegt, in die nach Aussagen von Fachleuten ca. 2/3 der Flachglasscherben in Deutschland fließen.
Ausschleusung & Allokationen	Je nach Ausgangsmaterial werden während des Recyclingprozesses ca. 15 M.-% des Materialinputs ausgeschleust. Dabei entfallen ca. 5 M.-% auf weiter verwertbares Metall, welches eine Energieallokation von 0,001 MJ/kg zugeschrieben bekommt. Die übrigen 10 M.-% werden in Form von groben Verunreinigungen und Störstoffen ausgeschleust, die nicht weiter verwertbar und auf Deponien zu entsorgen sind.
Primärstoff-einsparungen	Quarzsand ist noch ausreichend verfügbar, wird jedoch auch als Massenbaustoff für andere Einsatzzwecke verwendet (z. B. Betonherstellung) und könnte aufgrund der weltweit großen Nachfrage zu einem umkämpften Rohstoff werden.
Flächennutzungs-konflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar, Flächen für Deponien können eingespart werden.

3.6 Mineralische Dämmstoffe

3.6.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe Mineralische Dämmstoffe

Mineralwolle besteht aus künstlich aus mineralischen Rohstoffen hergestellten, amorphen Fasern (KMF). Je nach Ausgangsstoff kann zwischen Glas-, Stein- und Schlackenwolle unterschieden werden. Im Bauwesen findet Mineralwolle Anwendung für Wärmedämmungen, für den Kälte- und Brandschutz sowie für Schallsolationen. Neben „Wollen“ gibt es noch andere Produktarten, die den mineralischen Dämmstoffen zugeordnet sind. Diese werden im Folgenden jedoch nicht behandelt.

In den 1990er Jahren wurde die bis dahin hergestellte Mineralwolle als potenziell kanzerogen eingestuft. Durch eine Umstellung der Faserchemie gelang es den Herstellern ab etwa 1996, Mineralwolle mit einer höheren Biolöslichkeit herzustellen. Diese als „neue“ Wolle bezeichneten Produkte erfüllen die Kriterien des Gefahrstoffrechts und sind für die Gesundheit unbedenklich. Diese Produkte werden seit 1999 mit dem RAL-Gütezeichen „Erzeugnisse aus Mineralwolle“ (RAL-GZ 388) gekennzeichnet. Da Mineralwolle eine lange Nutzungsdauer aufweist, fallen bei Sanierungs- und Abbruchmaßnahmen auch heute und in den kommenden Jahrzehnten noch Baustellenabfälle aus „alter“ Mineralwolle an. Beim Rückbau dieser Produkte sind insbesondere die Technischen Regeln für Gefahrstoffe Nummer 521 (TRGS 521) zu berücksichtigen. Diese enthalten je nach Art und Umfang der Baumaßnahme beispielsweise Anforderungen an die Belüftung.

Für Glaswolle-Abfälle gibt es derzeit noch kein praktikables Rücknahme- und Verwertungskonzept. Die Entsorgung gestaltet sich schwierig, da sie aufgrund ihrer vorwiegend mineralischen Struktur thermisch nicht nutzbar und nicht volumenbeständig ist (ungünstiges Deponieverhalten). Aus den gleichen Gründen gestaltet sich auch die Entsorgung von Steinwolle verhältnismäßig umständlich. Mit dem RockCycle-System von Rockwool konnte jedoch in den vergangenen Jahren ein Sammel- und Recyclingsystem für Steinwolle eingerichtet werden, wobei nur Baustellenabfälle mit geringen Verunreinigungen rezykliert werden können. Bislang gibt es keine gesetzlich verankerte Pflicht für die Hersteller, Baustellenabfälle aus Mineralwolle zurückzunehmen.

Da bislang nur für Steinwolle ein funktionierendes Recyclingsystem existiert, wird in der vorliegenden Studie ausschließlich dieser mineralische Dämmstoff betrachtet. Steinwolle zählt neben Glaswolle und Polystyrol zu den Massendämmstoffen mit zahlreichen Herstellerwerken in Deutschland und den Nachbarländern. Die verwendeten Rohstoffe setzen sich wie folgt zusammen: Natürlich vorkommende Gesteine Diabas/Basalt (27 - 50 M-%), zementgebundene Formsteine (40 - 73 M-%), ca. 3,5 M-% Bindemittel (z. B. Formaldehyd-Harz), ca. 0,2 M-% aliphatisches Mineralöl und ca. 0,1 M-% Haftvermittler (z. B. Siloxanol). Zementgebundene Formsteine sind gepresste Briketts aus gemahlener, während der Produktion anfallenden Reststoffen (Verschnitt, fehlerhafte Produkte usw.), Sekundärstoffen aus anderen Industrien (z. B. Stahlwerksschlacken, Asche und Schieferbruch), Zement und weiteren Zuschlagstoffen, mit denen die definierte Rezeptur der Schmelze eingestellt wird. Es ist anzumerken, dass in Deutschland keine Steinwolle ohne RC-Anteil hergestellt wird. Dabei ist unter RC-Anteil insbesondere der Einsatz von Sekundärstoffen aus anderen Industrien gemeint.

3.6.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden für die Produktgruppe Steinwolle die üblichen Rückbauqualitäten „Steinwolle auf Baustelle getrennt erfasst und mit leichten Verunreinigungen“ (R1) und „Steinwolle im Verbund mit Ziegeln“ (R2) untersucht (siehe Abbildung 3-59). Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die Hauptprozesse in der Aufbereitungsanlage für die Berechnung mit einbezogen. Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (siehe Bilanzrahmen in Kapitel 2.2). Die ausgebaute Mineralwolle wird derzeit ohne Aufbereitung direkt zum Hersteller neuer Steinwolleprodukte transportiert und dort zu einem einsatzfähigen Substitut (vgl. Abbildung 3-59) gemahlen. Perspektivisch ist auch denkbar, dass die Aufbereitung (Mahlen) zur Verringerung des Transportvolumens dezentral erfolgt. Forschungen und Maschinenentwicklungen hierzu laufen derzeit, sind jedoch noch nicht abgeschlossen bzw. hinreichend praktisch erprobt.

Die Unterschiede zwischen der aktuellen Herstellung von Steinwolle und einer Produktion mit einem erhöhten Anteil an RC-Wolle werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk/Hersteller zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialeben mitberücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

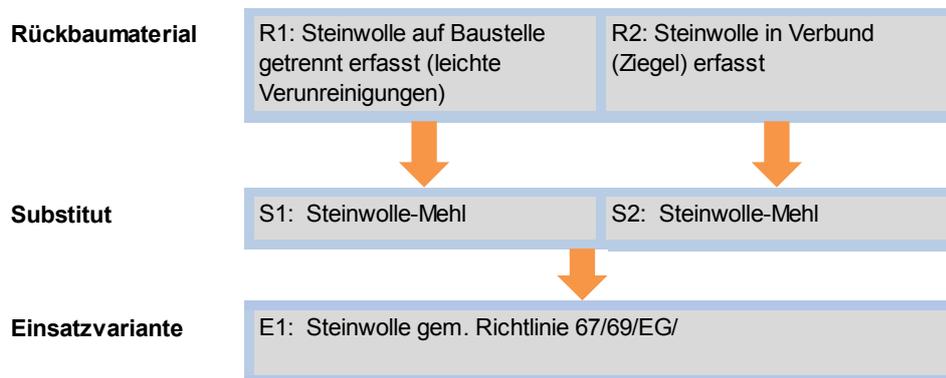


Abbildung 3-59: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Steinwolle auf Baustelle getrennt erfasst (leichte Verunreinigungen)

Substitut: Steinwolle-Mehl

Einsatzvariante: Steinwolle gem. Richtlinie 67/69/EG/

Der Rückbauaufwand von Steinwolle bei loser Verlegung ist relativ gering. Sobald eine formschlüssige Verbindung mit anderen Baustoffen vorliegt, ist der Rückbau entsprechend aufwändig. Nach der Aufbereitung der rückgebauten Steinwolle (siehe hierzu Kapitel 3.6.3.1 und 3.6.3.2) kann das Steinwolle-Mehl in Form zementgebundener Betonformsteine wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden.

Wie in Abbildung 3-60 dargestellt werden für die Herstellung von Steinwolle die Grundstoffe zusammen mit Koks und Rezyklaten gemischt und bei ca. 1500 °C geschmolzen. Anschließend fließt die Schmelze auf rotierende Scheiben, wird dabei zerfasert und kühlt gleichzeitig ab. Gleich im Anschluss werden

Schmelzmittel (z. B. Mineralöle) und Bindemittel (z. B. harnstoffmodifiziertes Phenol-Formaldehyd-Harz) in wässriger Lösung aufgesprüht. Die Rohwolle wird in Sammelkammern auf unter Unterdruck stehenden Transportbändern abgelegt. Das Rohvlies wird kontinuierlich ausgetragen und Härteöfen zugeführt, in denen 200 - 300 °C heiße Luft durch die Wollmasse gesaugt wird (ROCKWOOL, 2018).

Umweltbelastungen entstehen hauptsächlich durch die Verbrennung von Koks. Nicht bedacht ist hier jedoch der „ausgelagerte“ Energieaufwand für die Herstellung der Rohstoffe für die Herstellung der Betonformsteine (z. B. Zement). Für Steinwolle werden in der Regel 40 bis 60 % Recycling-Formsteine verwertet. Theoretisch können auch 100 % Betonformsteine eingesetzt werden, sofern bei der Zusammensetzung der Betonformsteine schon die erforderliche Faserchemie des Endproduktes berücksichtigt wird.

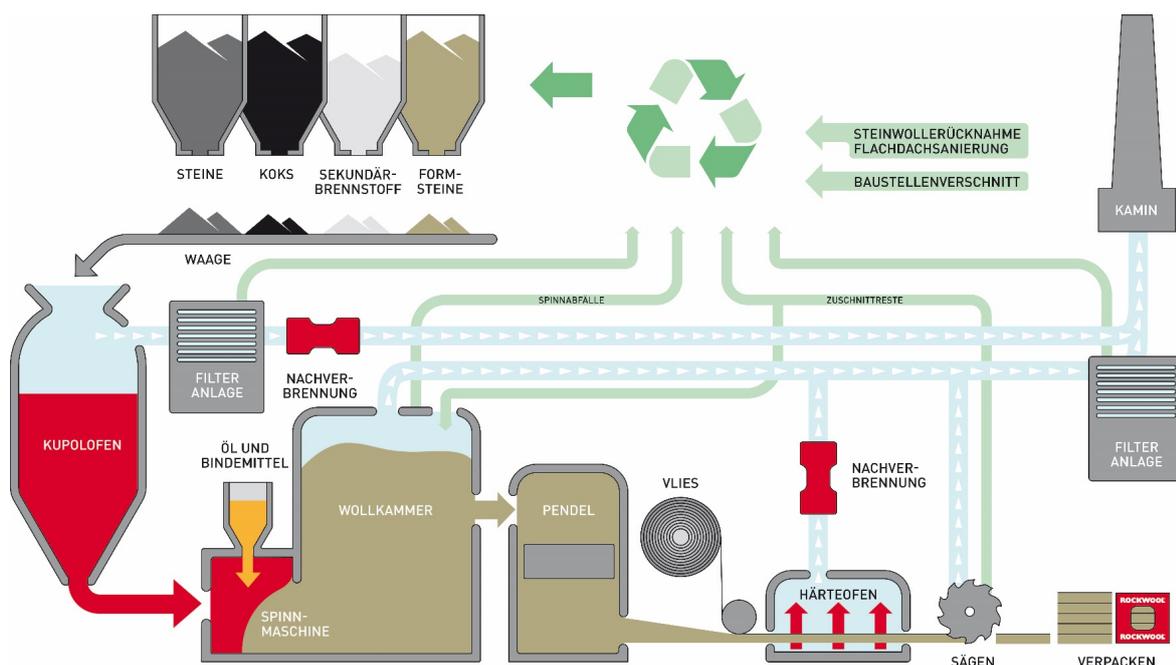


Abbildung 3-60: Herstellungsprozess von Steinwolle (Abbildung aus ROCKWOOL, 2018).

Prozesskette R2-S2-E1

Rückbaumaterial: Steinwolle in Verbund (Ziegel) erfasst

Substitut: Steinwolle-Mehl

Einsatzvariante: Steinwolle gem. Richtlinie 67/69/EG/

Die Prozesskette R2-S2-E1 unterscheidet sich von der Prozesskette R1-S1-E1 insofern, dass hier als Rückbauqualität Steinwolle im Verbund (Ziegel) erfasst angenommen wurde, was einen zusätzlichen Aufbereitungsschritt erfordert. Die Steine müssen erst in einer möglichst baustellennahen Aufbereitungsanlage gebrochen und von der Wolle getrennt werden. Danach liegt ein Ausgangsmaterial wie bei R1 nach dem Rückbau vor. Zusammen mit der Rückbauqualität R1 bilden die beiden Rückbauqualitäten die Praxis annähernd ab.

3.6.3 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen betrachtet. Für

die Herstellung von Steinwolle mit erhöhtem Anteil an RC-Wolle sind dies die Prozesse Grobzerkleinerung, Sortierung, Mahlen und Metallabscheidung.

Da die Prozessschritte Grobzerkleinerung und Sortierung entfallen (vgl. Kapitel 3.6.3.1), wurden hierfür keine Energiekennwerte benötigt. Für den Prozessschritt Mahlen (D3) und Metallabscheidung (D4) wurde ein von einem Hersteller genannter aggregierter Wert von 0,040 MJ/kg angenommen.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und die Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials beim Recycler (= Hersteller). Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand der derzeitigen Herstellung (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zum Einbau des fertigen Bauprodukts Unterschiede zwischen einer Herstellung mit erhöhtem Anteil an RC-Wolle und einer Standardherstellung mit „äquivalentem Primärstoff“ ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand der derzeitigen Standardherstellung verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

3.6.3.1 Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

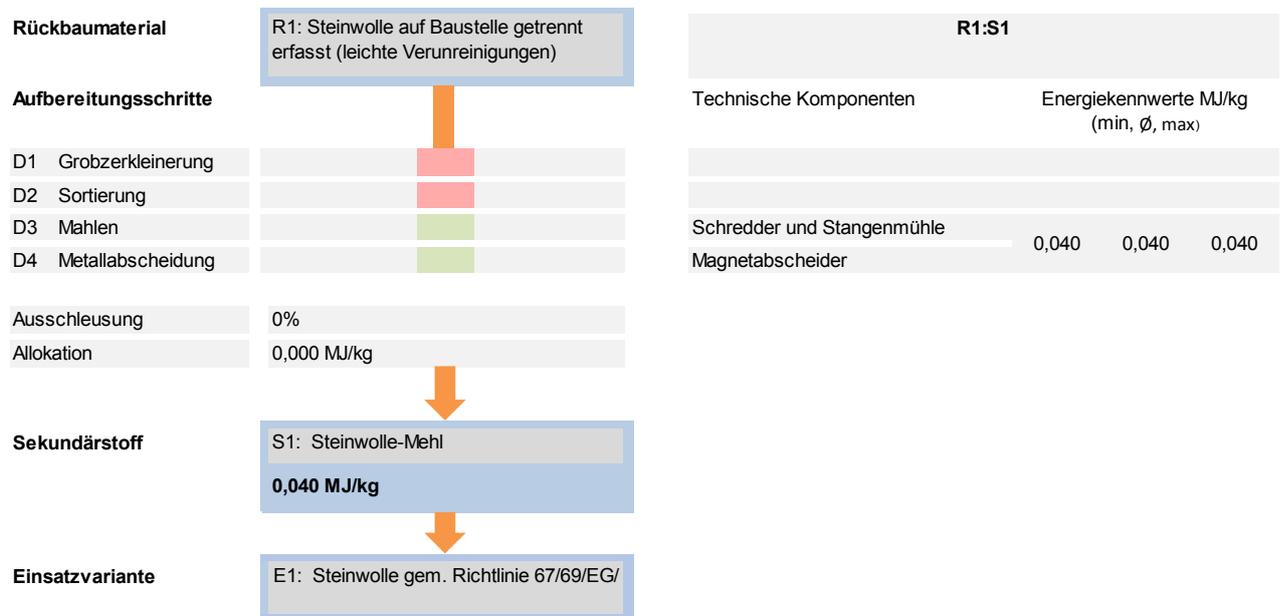


Abbildung 3-61: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von sortenrein ausgebaute Steinwolle mit leichten Verunreinigungen (R1) zu einem Steinwolle-Mehl (S1) zur Weiterverarbeitung zu neuer Steinwolle (E1) sind die Prozessschritte D1 und D2

(Grobzerkleinerung und Sortierung) nicht erforderlich. Bei der Aufbereitung getrennt erfasster Steinwolle fallen nahezu keine Stör- und Fremdmaterialien an.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-21 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-21: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe min. Dämmstoffe.

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0400	0,0400	0,04000	0,00000	0,04000
Energieaufwand Ø	0,0400	0,0400	0,04000	0,00000	0,04000
Energieaufwand max.	0,0400	0,0400	0,04000	0,00000	0,04000

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

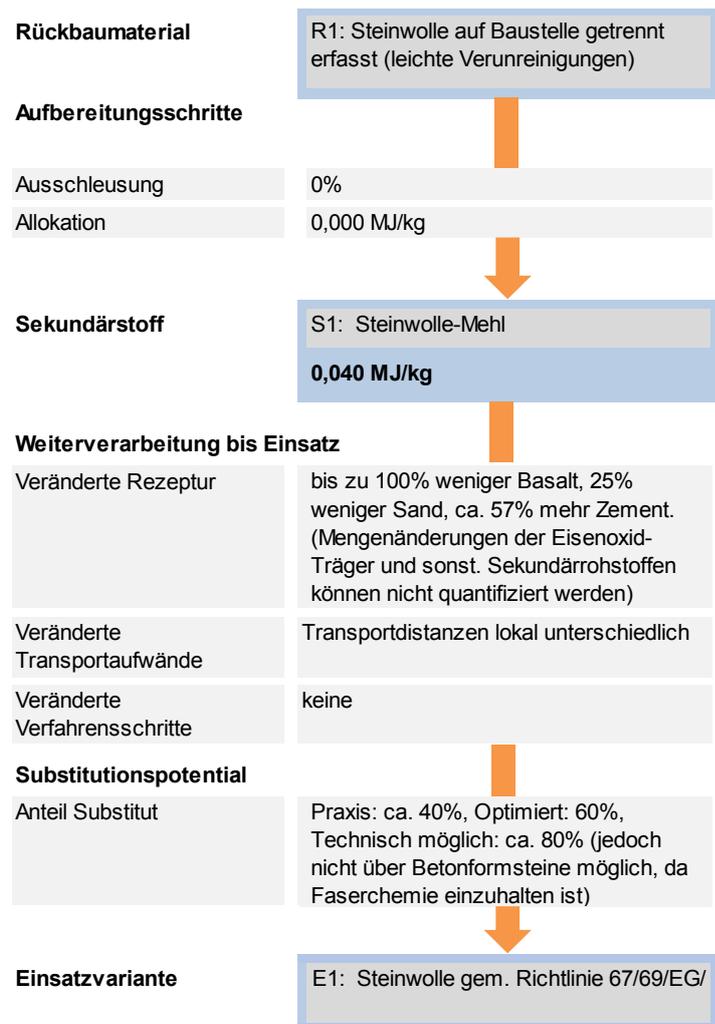


Abbildung 3-62: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe) (Quelle: eigene Darstellung).

Rezepturänderungen

Bei der Weiterverarbeitung des Substituts „Steinwolle-Mehl“ zu neuer Steinwolle kommt es zu Rezepturänderungen. Es wird davon ausgegangen, dass durch eine Steigerung des Anteils an RC-Wolle auf 39 Prozentpunkte, bezogen auf die Gesamtrezeptur, der vollständige Basalteinsatz (44 % des aktuellen Rohstoffeinsatzes) ersetzt werden kann.¹⁰

Energetisch relevante Änderungen betreffen den Sand- und Zementanteil der Betonformsteine sowie den Einsatz des Primärrohstoffs Basalt. Für die Berechnung von Energieaufschlägen bzw. -abzügen in Schritt 3 wurden diese Rezepturänderungen berücksichtigt und entsprechend Tabelle 3-22 quantifiziert. Da die genaue Rezeptur der Betonformsteine geheim zu halten ist, dürfen an dieser Stelle nur die Summenwerte abgebildet werden.

Tabelle 3-22: Relevante Rezepturänderungen zwischen Standard-Steinwolle und Steinwolle mit RC-Wolle und deren Auswirkungen auf den Primärenergieinhalt.

	MJ/kg	Standard-Steinwolle		Steinwolle mit RC-Wolle	
		M.-%	MJ/kg	M.-%	MJ/kg
Quarzsand*, Zement**, Wasser für Standard-Betonformsteine	1,219	14 %	0,171		
Quarzsand*, Zement**, Wasser für Standard-Betonformsteine	1,403			19 %	0,267
sonstige Rohstoffe: Sek.-Rohstoffe, Eisenoxidträger, RC-Steinwolle extern (Substitut), Basalt (äqu. Primärstoff), etc.		86 %		81 %	
Summe			0,171		0,267
Unterschied "Standard"Steinwolle zu Steinwolle mit RC-Wolle				+ 0,096	MJ/kg Wolle
				+ 0,240	MJ/kg Substitut

* gem. Ökobaudat 1.2.01: Sand 0/2 und Kies 2/32 nicht getrocknet

** gem. Ökobaudat 1.1.01: Zement

Veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort)

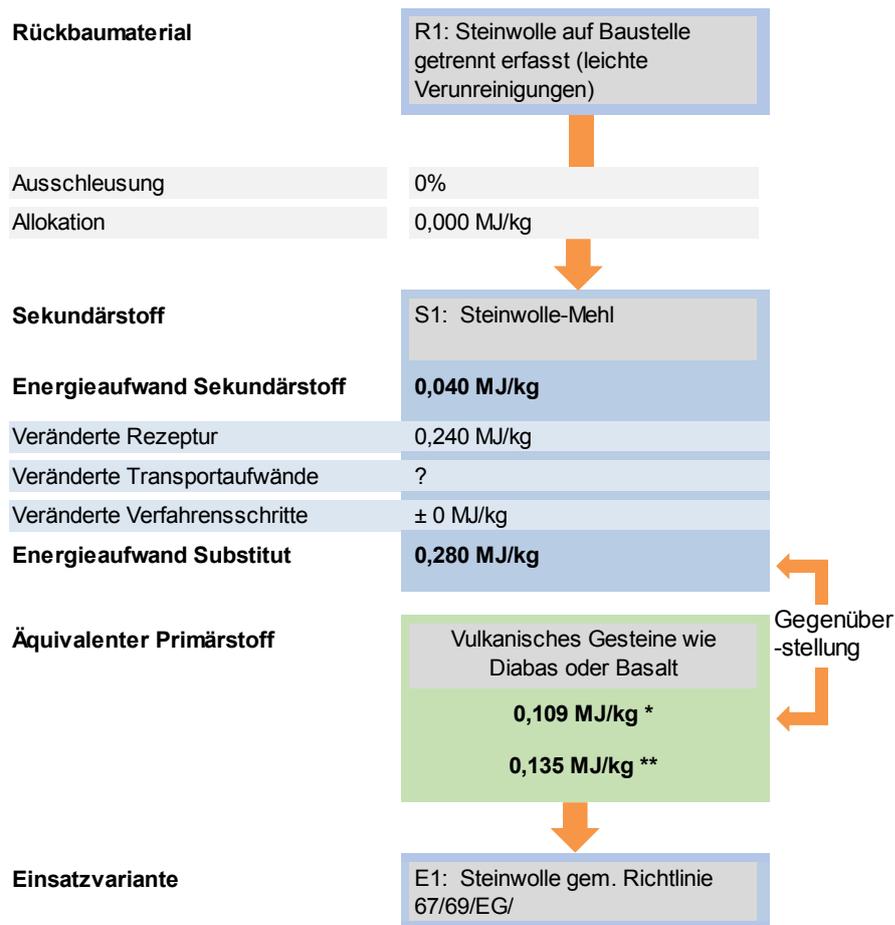
Transportdistanzen sind in Abhängigkeit der regionalen Ressourcenvorkommen und Recyclingstandorte sehr unterschiedlich. Aufgrund dieser Unterschiede können für Transportdistanzen für RC- und Primärmaterialien keine pauschalen Annahmen getroffen werden. In der vorliegenden Studie wurde demnach keine Anpassung durch größere oder geringere Transportdistanzen vorgenommen. Hieraus ergibt sich neuer Forschungsbedarf, der auch die Möglichkeit des zukünftigen Aufbaus dezentraler Aufbereitungsanlagen (zur Verringerung des Transportvolumens der rückgebauten Materialien) berücksichtigen sollte.

Veränderte Verfahrensschritte

Das Verfahren zur Herstellung von Steinwolle mit erhöhtem RC-Anteil unterscheidet sich nur im Hinblick auf die oben beschriebene Rohstoffzusammensetzung.

¹⁰ Derzeit werden etwa 1 % Steinwolle-Abfälle von Baustellen rezykliert. Zur Vereinfachung der Berechnungen wurden diese im Folgenden vernachlässigt.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. GaBi Basaltherstellung (gewaschen) GUID: {D37B2202-A7C9-4B80-AF67-C35C37689FE0}

** gem. ecoinvent Basalt

Abbildung 3-63: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R1-S1-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe) (Quelle: eigene Darstellung).

Da die Ökobaudat keinen Datensatz für Basalt bereithält, wurden alternativ Datensätze aus ecoinvent und GaBi als Vergleichsbasis herangezogen. Die Datensätze Splitt und Schotter aus der Ökobaudat beziehen sich explizit auf Kalkstein, weshalb diese beim vorliegenden Vergleich ausgeschlossen wurden.

Abbildung 3-63 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen (Mehraufwand Zement) etwas über dem Energieaufwand für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs liegt. Wird ausschließlich der Energieaufwand bis zum Sekundärstoff betrachtet, liegt dieser deutlich unter dem Energieaufwand für die Herstellung des Primärstoffs.

Relevante Auszüge aus GaBi (Ökobaudat-konform) sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen von ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

3.6.3.2 Prozesskette R2-S2-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

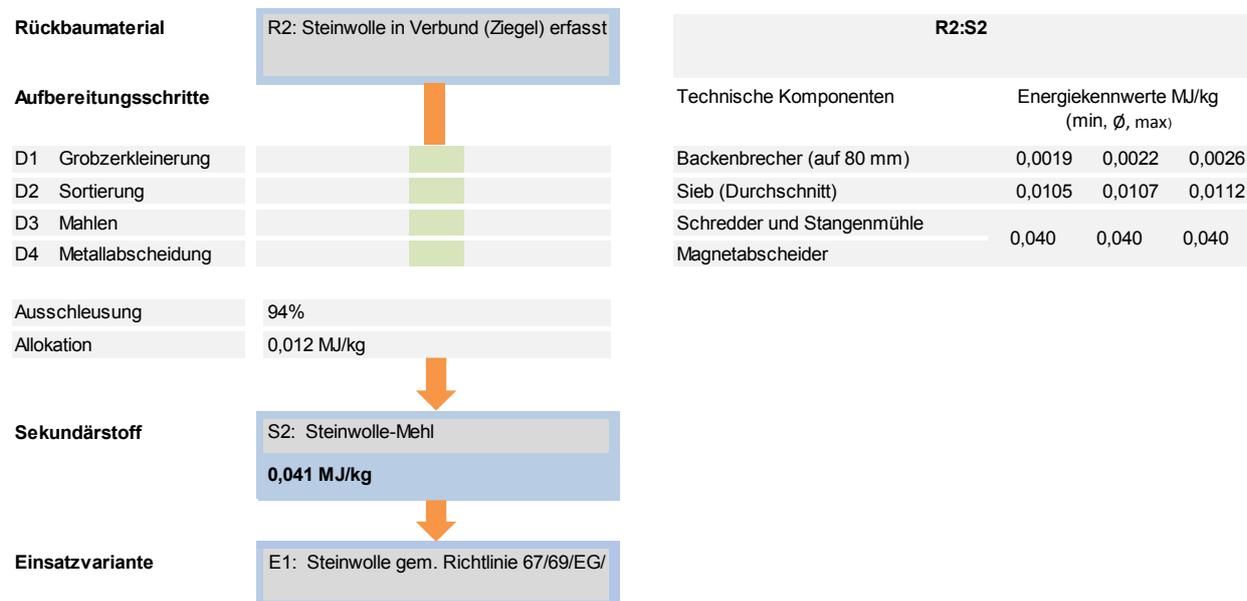


Abbildung 3-64: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Steinwolle im Verbund (Ziegel) erfasst (R1) zu einem Steinwolle-Mehl (S1) zur Weiterverarbeitung zu neuer Steinwolle (E1) wird etwa 94 M.-% Ziegelmaterial (Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2015), bezogen auf die Aufgabemenge, ausgeschleust.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können den entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-23 zeigt die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-23: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Baustoffgruppe min. Dämmstoffe.

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,0524	0,0524	0,05240	0,01166	0,04074
Energieaufwand Ø	0,0529	0,0529	0,05293	0,01216	0,04078
Energieaufwand max.	0,0538	0,0538	0,05383	0,01300	0,04083

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

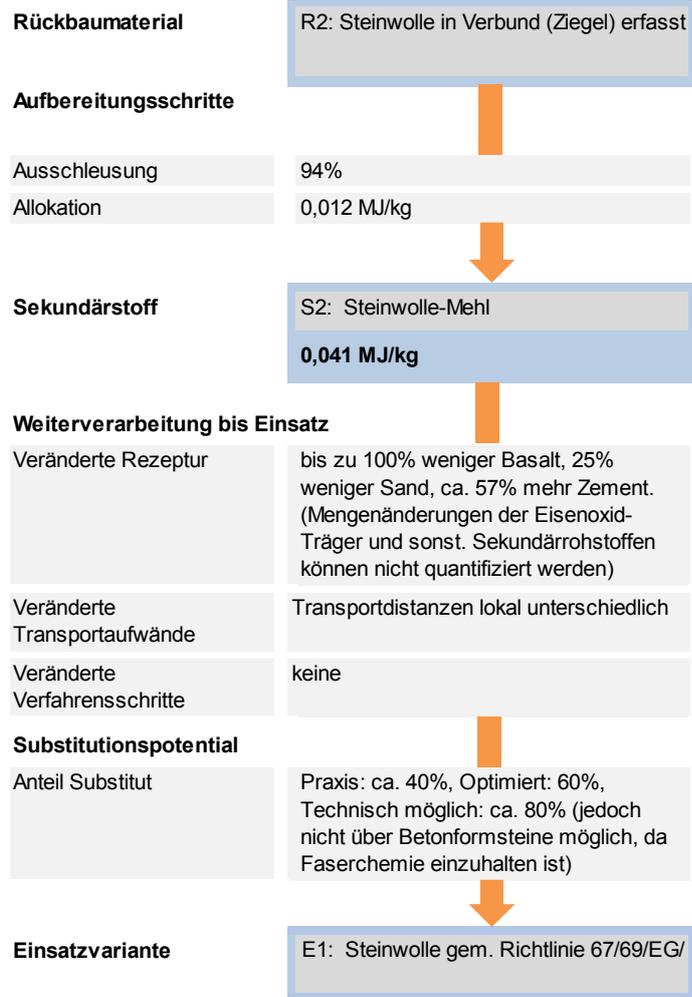
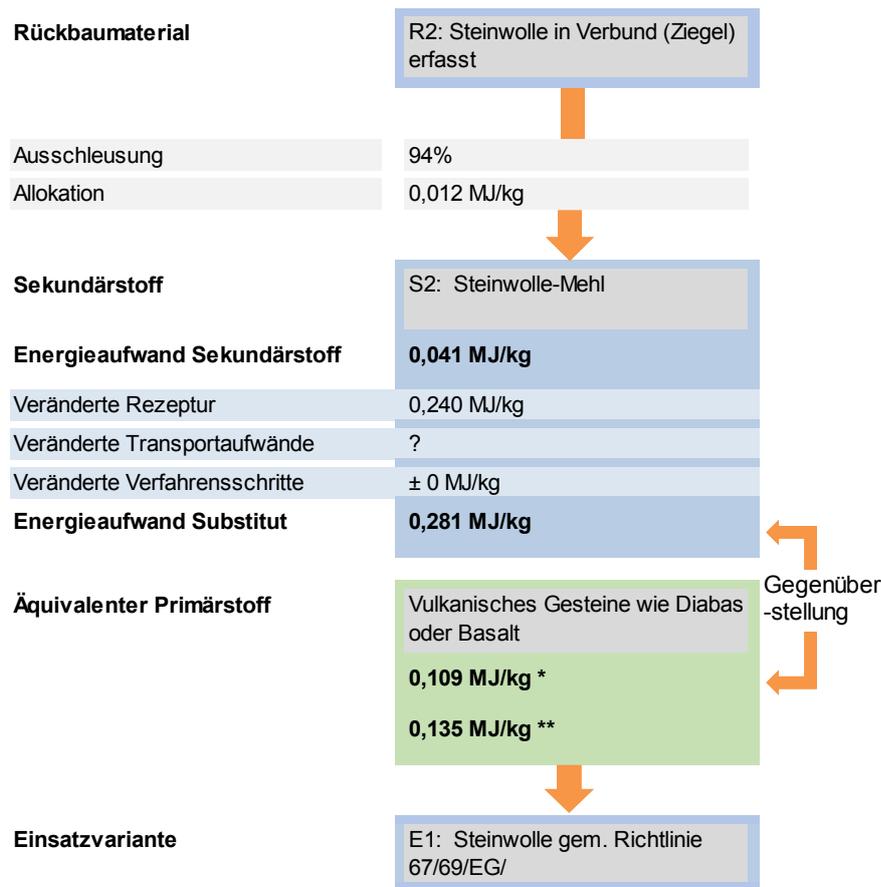


Abbildung 3-65: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe) (Quelle: eigene Darstellung).

Veränderungen hinsichtlich der Rezeptur, der Transportaufwände sowie der Verfahrensschritte entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3.6.3.1.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. GaBi Basaltherstellung (gewaschen) GUID: {D37B2202-A7C9-4B80-AF67-C35C37689FE0}

** gem. ecoinvent Basalt

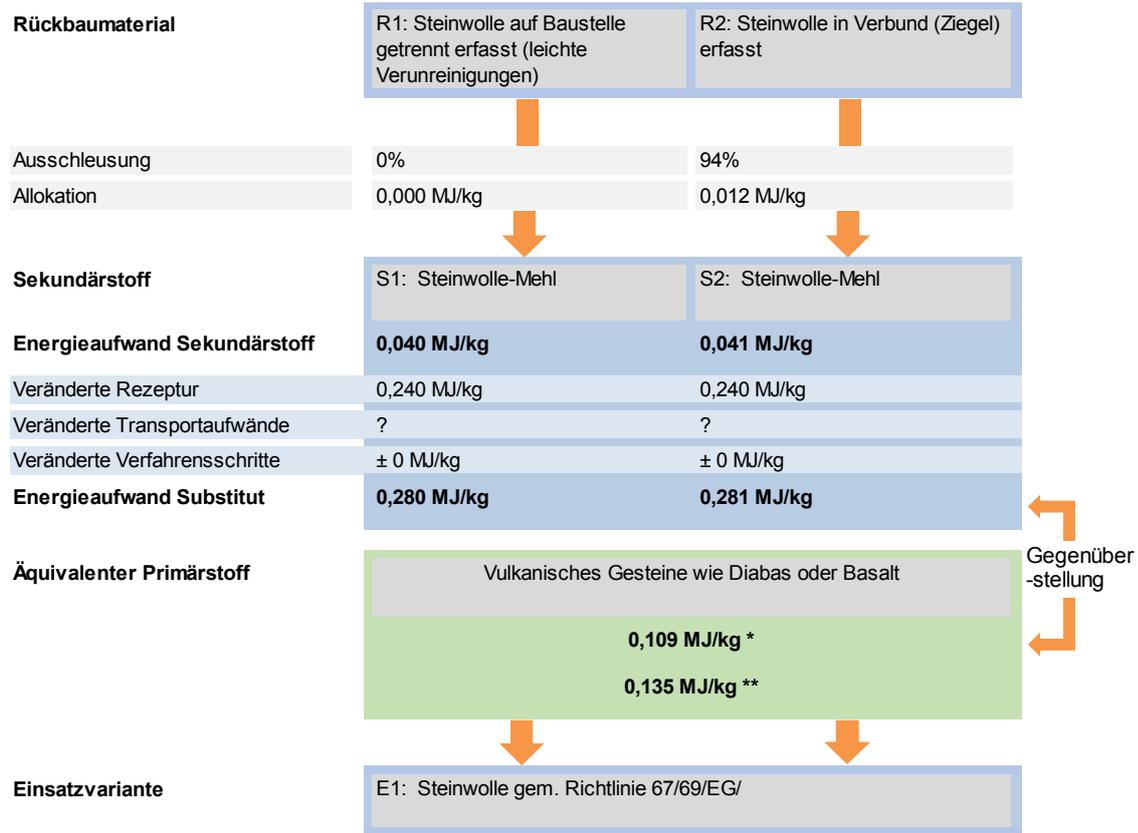
Abbildung 3-66: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung (Prozesskette R2-S2-E1, Bauproduktgruppe min. Dämmstoffe) (Quelle: eigene Darstellung).

Da die Ökobaudat keinen Datensatz für Basalt bereithält, wurden alternativ Datensätze aus ecoinvent und GaBi als Vergleichsbasis herangezogen. Die Datensätze Splitt und Schotter aus der Ökobaudat beziehen sich explizit auf Kalkstein, weshalb diese beim vorliegenden Vergleich ausgeschlossen wurden.

Abbildung 3-66 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit RC-Anteilen (Mehraufwand Zement) etwas über dem Energieaufwand für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs liegt. Wird ausschließlich der Energieaufwand bis zum Sekundärstoff betrachtet liegt dieser deutlich unter dem Energieaufwand für die Herstellung des Primärstoffs.

Relevante Auszüge aus GaBi sowie eine Beschreibung der Systemgrenzen der ecoinvent können Anhang 7.2 entnommen werden (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen).

3.6.4 Fazit



* gem. GaBi Basaltherstellung (gewaschen) GUID: {D37B2202-A7C9-4B80-AF67-C35C37689FE0}

** gem. ecoinvent Basalt

Abbildung 3-67: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe mineralische Dämmstoffe (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Steinwolle-Recyclings	
Energieverbrauch	Die Herstellung eines Substituts benötigt mehr Energie als die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Unmittelbare Energieeinsparungen durch Recycling sind demnach nicht möglich.
Besonderheiten	In den Berechnungen wurde in Schritt 2 die veränderte Herstellung von Betonformsteinen mit einbezogen. Da dadurch ein Aufschlag von 0,240 MJ/kg auf den Energieaufwand für die Aufbereitung bis zum Steinwolle-Mehl vorgenommen wurde, liegt der energetische Aufwand für die Herstellung des einsatzfertigen Substituts über jenem des äquivalenten Primärmaterials.
Ausschleusung & Allokationen	Je nach Ausgangsmaterial wird während des Recyclingprozesses kein Material (R1-S1-E1) oder bis zu 94 M.-% (R2-S2-E1), bezogen auf die Aufgabemenge, ausgeschleust. Das ausgeschleuste Ziegelmaterial kann einer weiteren stofflichen Verwertung zugeführt werden, weshalb eine Energieallokation vorgenommen wurde.
Primärstoff-einsparungen	Substituierbare Primärstoffe (Diabas, Basalt, Kalksandstein, Dolomit) sind noch ausreichend verfügbar.
Flächennutzungs-konflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar. Flächen für Deponien können eingespart werden (schlechtes Deponieverhalten aufgrund geringer Rohdichte).

3.7 PVC-Profil

3.7.1 Allgemeines zum PVC Recycling

Die Palette an kunststoffbasierten Bauprodukten umfasst vor allem die hier durch Handelskürzel angegebenen Werkstoffarten PVC, HDPE, EPS, PUR, PP, PS, PMMA, PA, ABS, ASA, SAN und ist somit weitgefächert. Der Anteil von PVC in Bauprodukten und dementsprechend in Bauproduktabfällen lag 2007 in Deutschland bei etwa 60 % (Consultic, 2011).

Bei den Einsatzbereichen der Kunststoffwerkstoffe dominieren in Deutschland drei Hauptbauproduktgruppen, dies sind der Bereich Profile (34 % Anteil an der Gesamteinsatzmenge in 2007), Dämmungen (27 %) und Rohre (24 %). Sonstige Anwendungsbereiche umfassen neben Kabelummantelungen und unzähligen Kleinteilen (Dübel, Putzschienen u. ä.) vor allem Dach- und Dichtungsbahnen sowie Fußbodenbeläge. PVC ist der mengenrelevanteste Kunststoffwerkstoff im Baubereich. Seit Jahrzehnten ist ein nur zeitweilig unterbrochener Anstieg der Gesamtproduktionsmenge an PVC in Deutschland festzustellen (Weigang, 2013).

Die Verwertung von „post-consumer“-PVC wird in Deutschland seit 1988 praktiziert und stetig weiterentwickelt. Die Europäische PVC-Branche hat im März 2000 ein 10-Jahres-Nachhaltigkeits-Programm in Form einer freiwilligen Selbstverpflichtung unterzeichnet, das 2010 erfolgreich abgeschlossen wurde. Diese Selbstverpflichtung wird seit 2011 unter dem Namen VinylPlus fortgeführt. Wesentliches Ziel und Schwerpunkt von VinylPlus ist es, in Europa ein Controlled-Loop waste management zu etablieren (u. a. 800 kt/a PVC-Recycling ab 2020; 100 kt davon Technologieentwicklung für das Recycling von schwierig verwertbarem, vermischtem PVC). Für das PVC-Recycling im Baubereich haben sich für die unterschiedlichen Bauprodukte Arbeitsgemeinschaften und Recyclingsysteme gebildet (AgPR Arbeitsgemeinschaft für PVC-Bodenbeläge, RoofCollect für Kunststoff-Dach- und Dichtungsbahnen, Rewindo für Fenster, KRV Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie für Rohre, epcoat für Kunststoff-Planen, recovinyl für Kabel und Mix-PVC) (Vetter, 2016).

3.7.2 Allgemeines zur Baustoffgruppe PVC-Profil

In Deutschland sorgt das Recyclingsystem Rewindo Fenster-Recycling-Service dafür, dass Altfenster, -rollläden und -türen in die Wiederaufbereitungsanlagen der Rewindo Recyclingpartner gelangen. Dort erfolgt die Trennung von Glas, Metall und anderen Stoffen. Aus dem aufbereiteten PVC wird dann sortenreines PVC-Granulat gewonnen. Dieses wird bei der Herstellung von neuen Fenster- oder Bauprofilen genutzt.

Die potenzielle Gesamtabfallmenge an alten PVC-Fenstern, -Rollläden und -Türen (reiner Anteil PVC-Compound ohne Metall und Glasreste) lag nach einer von Rewindo in Auftrag gegebener und von der Firma Conversio Market & Strategy GmbH durchgeführten Studie im Jahr 2017 in Deutschland bei 49.070 t. Die wiederverwertete Menge an PVC im Rewindo-System lag dabei bei 32.161 t, was 65 % der potenziellen Gesamtabfallmenge ausmacht. 2003 lag die wiederverwertete Menge noch bei 6.000 t.

3.7.3 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden für die Produktgruppe Kunststoffprofile, wie in Abbildung 3-68 dargestellt, die typische Rückbauqualität „Fensterprofile und Bauprofile aus PVC“ (R1) untersucht. Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die Hauptprozesse in der Aufbereitungsanlage für die Berechnung mit einbezogen. Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (Modul C1 und C2).

Die für bestimmte Einsatzzwecke hergestellten Substitute (vgl. Abbildung 3-68) werden in der Regel noch weiter konfektioniert und bis zum Einsatzort transportiert. Die Unterschiede zwischen der Herstellung von Bauprodukten mit und ohne RC-Anteil werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialeben mit berücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

Die zwei untersuchten Prozessketten wurden instruktiv entwickelt, indem typische Rückbauqualitäten, Einsatzvarianten und Aufbereitungsverfahren ermittelt und zu durchgehenden Prozessketten zusammengeführt wurden.

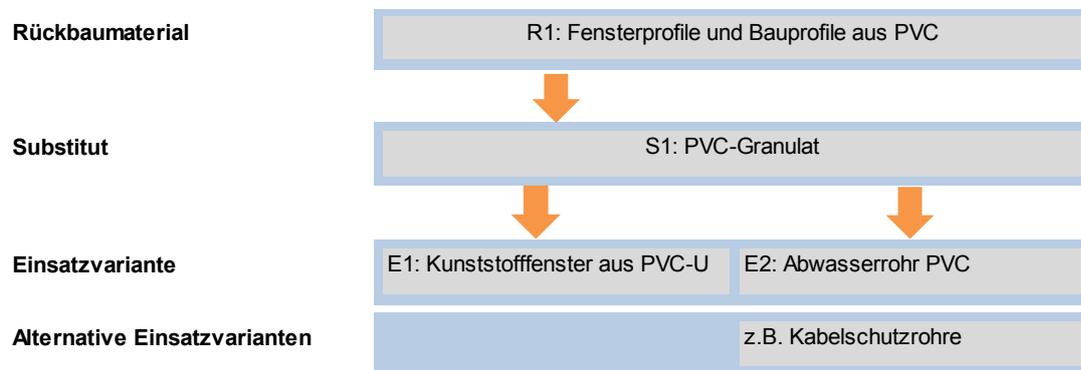


Abbildung 3-68: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC) (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: Fensterprofile und Bauprofile aus PVC

Substitut: PVC-Regranulat

Einsatzvariante: Kunststofffenster aus PVC-U

Unabhängig der Weiterverarbeitung bis zum einsatzfähigen RC-Bauprodukt wird „post-consumer“ PVC standardmäßig mechanisch aufbereitet, wobei reine PVC-Anteile von anderen Materialien abgetrennt und Rezyklate mit einer definierten Partikelgröße (Regranulat) hergestellt werden. Im Allgemeinen besteht der Aufbereitungsprozess aus Zerkleinerungsvorgängen, Separationsvorgängen zur Extraktion bestimmter Partikelgrößen oder Materialien aus dem Hauptmaterialstrom (z. B. Magnettrommeln zur Abscheidung von Eisenmetallen) und Mühlen und Extrudern zur Umwandlung der separierten Fraktionen in ein Regranulat (Baitz et al., 2004). Dieses Regranulat kann polymerisiertes und granuliertes Polyvinylchlorid (PVC), welches durch die radikalische Polymerisation von Vinylchlorid (Monochlorethen) hergestellt wird, ohne

wesentliche Qualitätseinbußen substituieren. Ausgangsprodukte für die PVC-Herstellung sind Erdöl/Erdgas und Steinsalz. Das daraus hergestellte Ethylen und Chlor wird im Verhältnis 43 % zu 57 % zu Vinylchlorid (VC) weiterverarbeitet. VC ist der monomere Baustein von PVC (AGPU, 2016). Eine schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von PVC-Produkten ist in Abbildung 3-69 dargestellt.

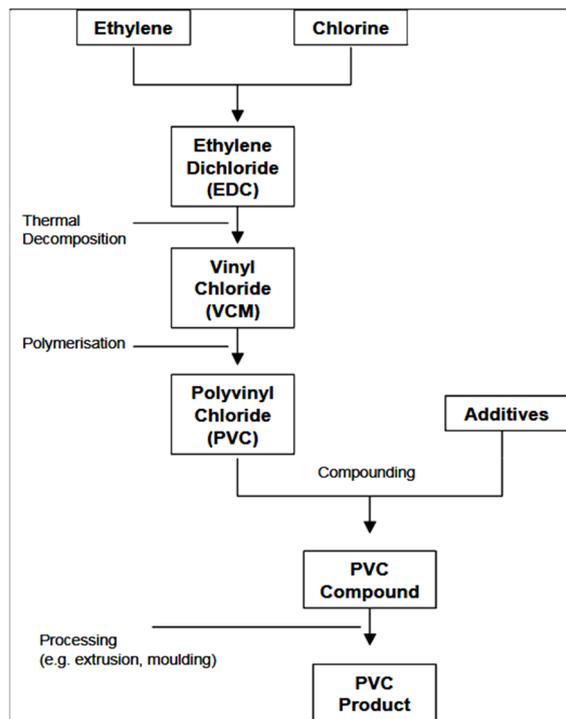


Abbildung 3-69: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von PVC-Produkten (Abbildung aus Baitz et al., 2004).

Das PVC-Regranulat kann dann polymerisiertes und granuliertes Polyvinylchlorid (PVC), welches auf Grundlage der Ausgangsmaterialien Erdöl/Erdgas und Steinsalz hergestellt wird, substituieren.

Kunststofffenster werden aus verschiedenen Einzelkomponenten gefertigt: Jedes Fenster besteht aus einem PVC-Rahmen mit Dichtungen, der Verglasung, Beschlägen und falls erforderlich einer Armierung. PVC-Profile für Fensterrahmen werden in einem Extrusionsverfahren aus einer Mischung von PVC-Pulver und Additiven hergestellt. Diese schützen das PVC vor Schädigungen während der Verarbeitung und verleihen dem Profil die erforderlichen Eigenschaften wie z. B. Schlagzähigkeit, Farbe, Witterungsstabilität. Das PVC-Pulver zur Herstellung des Rahmens ist ein weit verbreiteter Massenkunststoff und wird durch Polymerisation hergestellt. Aufgrund seiner chemischen Struktur enthält PVC einen erheblichen Anteil des Halogens Chlor. Die meisten Fensterrahmen werden aus weißen Hart-PVC-Profilen gefertigt. Einige Rahmen werden aus Profilen hergestellt, die zusätzlich mit PVC-Folie kaschiert, mit PMMA beschichtet oder lackiert sind. Sofern PVC-Regranulat verwendet wird, wird in der Regel anstelle eines Mono-Extrusionsverfahrens ein Co-Extrusionsverfahren angewendet. Grund dafür ist, dass das Regranulat aufgrund seiner Farbe nur für den Profilkern verwendet wird. Aus diesem Grund können max. 40 - 50 M. % des PVC-Materials durch Regranulat substituiert werden.

Die für die Herstellung des PVC-Rahmenmaterials verwendeten Rohstoffe und Additive sind PVC (81,0 M.-%), Füllstoff (Kreide) (8,1 M.-%), Schlagzähmodifikatoren (4,9 M.-%), Calcium-Zink-Stabilisatoren (2,8 M.-%) und Pigment-Titanoxid (TiO₂) (3,2 M.-%) (QKE, 2016).

Prozesskette R1-S1-E2

Rückbaumaterial: Fensterprofile und Bauprofile aus PVC

Substitut: PVC-Regranulat

Einsatzvariante: Abwasserrohre aus PVC

Die Herstellung von PVC-Regranulat erfolgt unabhängig von der Weiterverarbeitung bis zum einsatzfähigen RC-Bauprodukt gemäß des im voranstehenden Abschnitt „Prozesskette R1-S1-E1“ beschriebenen Recyclingprozesses.

Das PVC-Regranulat kann dann polymerisiertes und granuliertes Polyvinylchlorid (PVC), welches auf Grundlage der Ausgangsmaterialien Erdöl / Erdgas und Steinsalz hergestellt wird, substituieren.

PVC-Rohre werden überwiegend im Extrusionsverfahren produziert und in unterschiedlichen Konstruktionen hergestellt. Formteile werden in der Regel im Spritzgussverfahren hergestellt. Anders als bei der Herstellung von Fenster- oder Türprofilen wird auch bei der Verwendung von Regranulat ein Mono-Extrusionsverfahren gewählt, da die Farbreinheit eine untergeordnete Rolle spielt. Somit können bis zu 100 M.-% des PVC-Materials durch Regranulat substituiert werden.

3.7.4 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen für die Herstellung von PVC-Regranulat aus Fenster- und Bauprofilen aus PVC (R1) betrachtet.

Die Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf Durchschnitten zu technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

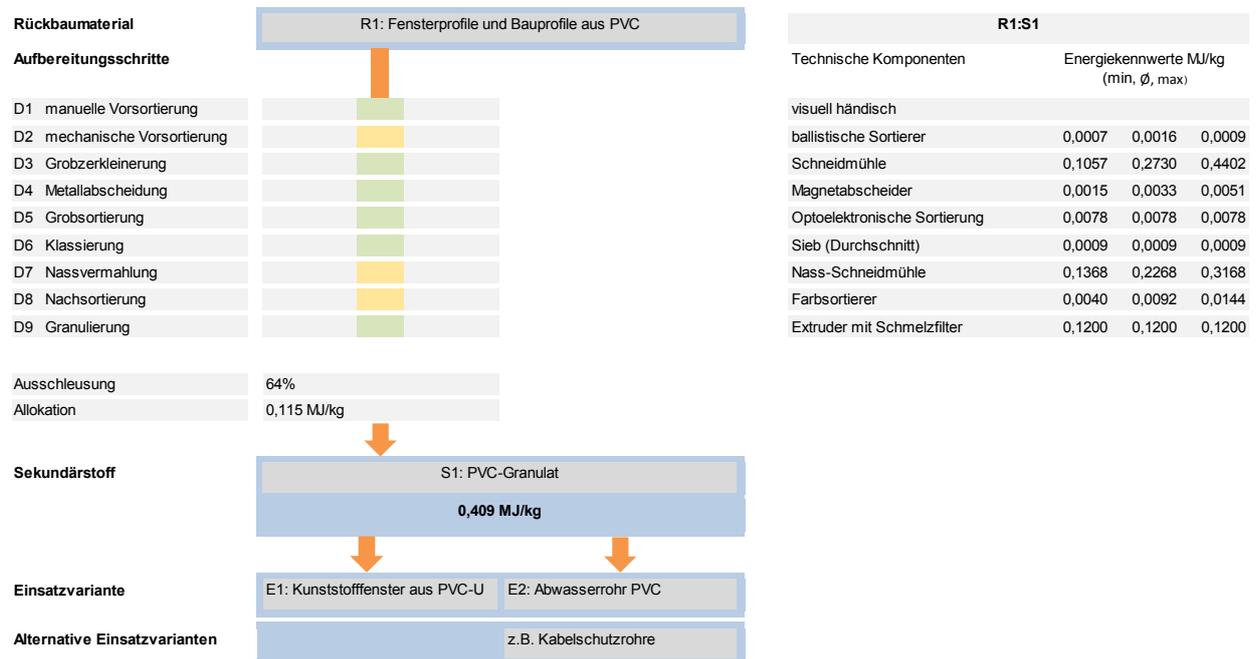


Abbildung 3-70: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von Fenster- und Bauprofilen aus PVC (R1) zu PVC-Regranulat (S1) zur Weiterverarbeitung zu neuen PVC-Fenstern (E1) oder PVC-Abwasserrohren ist der Prozessschritt D2 (mechanische Vorzerkleinerung) zwar üblich, jedoch nicht immer erforderlich, sodass dieser Prozessschritt als optional betrachtet werden kann. Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 64 M.-% bezogen auf die Aufgabemenge. Der Großteil des ausgeschleusten Materials besteht aus Metall. Da Metall stofflich verwertet werden kann und demnach einen Absatzmarkt besitzt, wurde hierfür eine Energieallokation vorgenommen, die 0,115 MJ/kg beträgt.

Es ist zu berücksichtigen, dass der wirkliche Stromverbrauch höher ist als in den Kalkulationen auf Basis der Gerätehersteller. Laut einer Studie der RE|CARBON Deutschland GmbH beträgt der Energiebedarf für den Aufbereitungsprozess von PVC ca. 6,5 % des Energiewerts von Primär-PVC (Vetter, 2016). Bei einem Energiewert von 56,73 MJ/kg für Primär-PVC läge demnach der Energiebedarf für die Aufbereitung von PVC-Mahlgut bei etwa 3,3 MJ/kg. Davon sind nach Expertenangaben ca. 1/3 Ventilatoren und anderen Nebenprozessen zuzuordnen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der erneute Aufschmelzprozess des Fensterregranulats mit einbezogen ist und ca. 50 % auf den Transport entfallen.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden. Tabelle 3-24 zeigt die Bandbreite des in dieser Studie errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-24: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC).

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	0,3772	0,2358	0,30652	0,04470	0,26182
Energieaufwand Ø	0,6425	0,4049	0,52368	0,11515	0,40853
Energieaufwand max.	0,9061	0,5740	0,74007	0,18481	0,55526

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

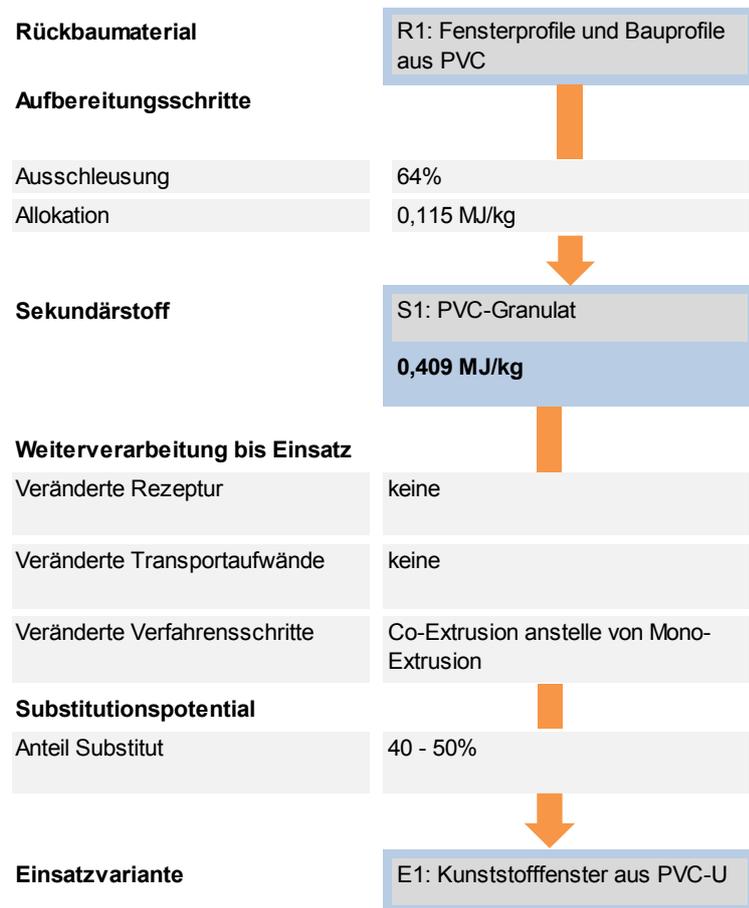
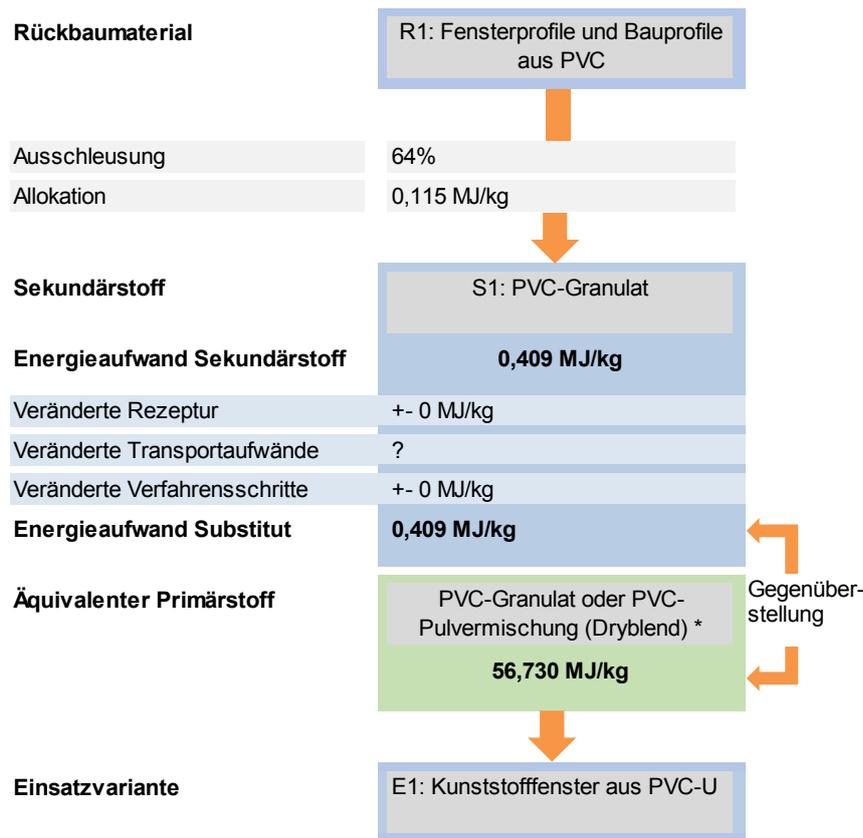


Abbildung 3-71: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Herstellung von PVC-Profilen mit Anteilen an PVC-Reggranulat wird anstelle eines Mono-Extrusionsverfahrens ein Co-Extrusionsverfahren angewendet. Es gibt keine Hinweise dafür, dass eines der beiden Verfahren grundsätzlich energieintensiver ist. Es wird demnach von einem Energieaufschlag oder -abzug abgesehen.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation)

Abbildung 3-72: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC) (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-72 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat oder aus EPDs (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

Prozesskette R1-S1-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

Wie Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

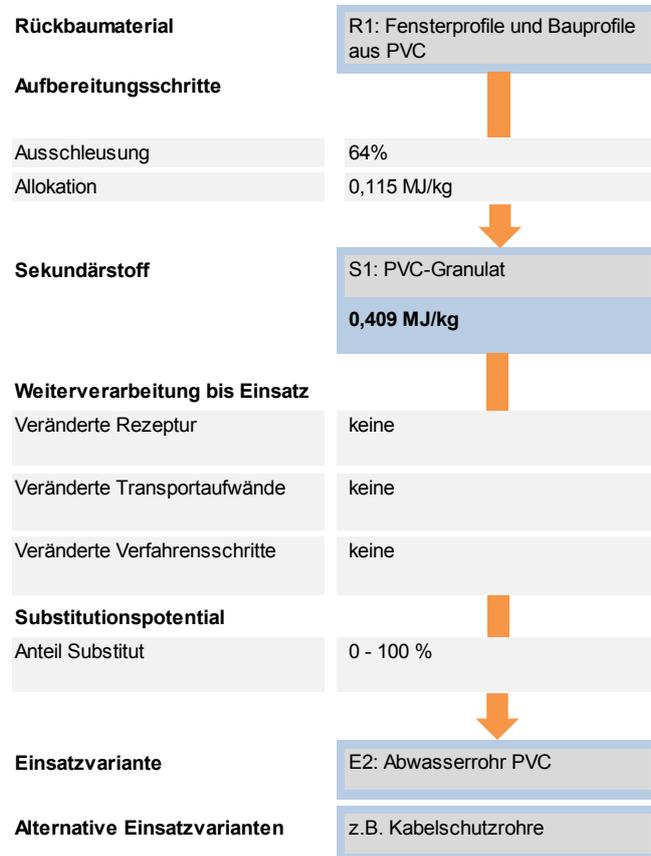
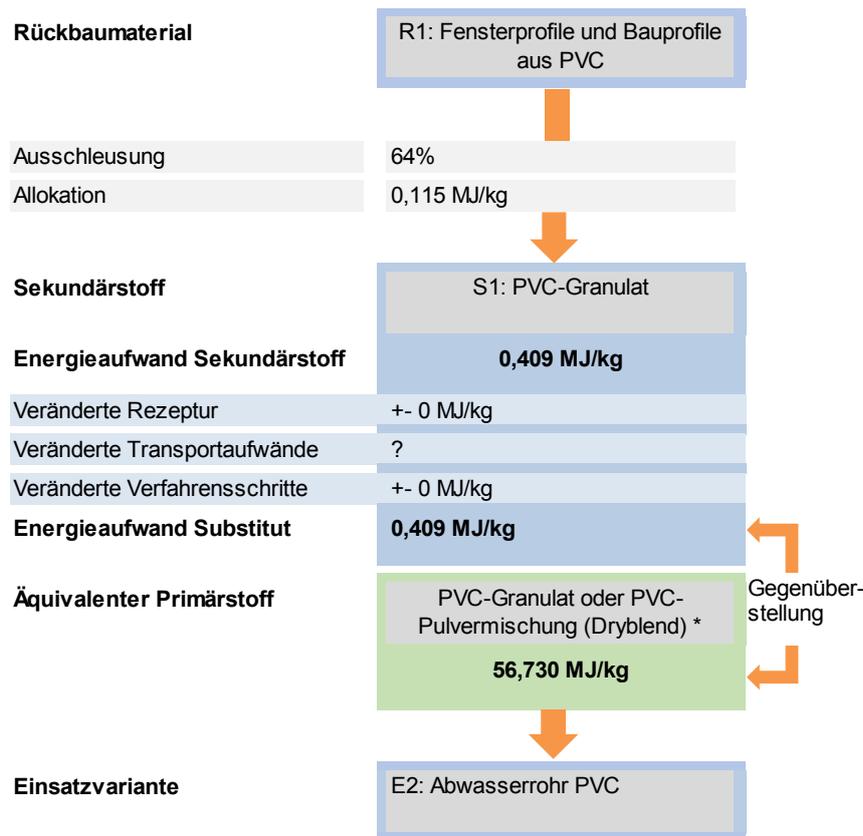


Abbildung 3-73: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (Quelle: eigene Darstellung).

Es ergeben sich bei der Weiterverarbeitung bis zur Einsatzvariante „PVC-Abwasserrohr“ (E2) keine Unterschiede zwischen der Standardherstellung und der Herstellung eines RC-Produkts. Von Energieaufschlägen oder -abzügen wird demnach abgesehen.

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung

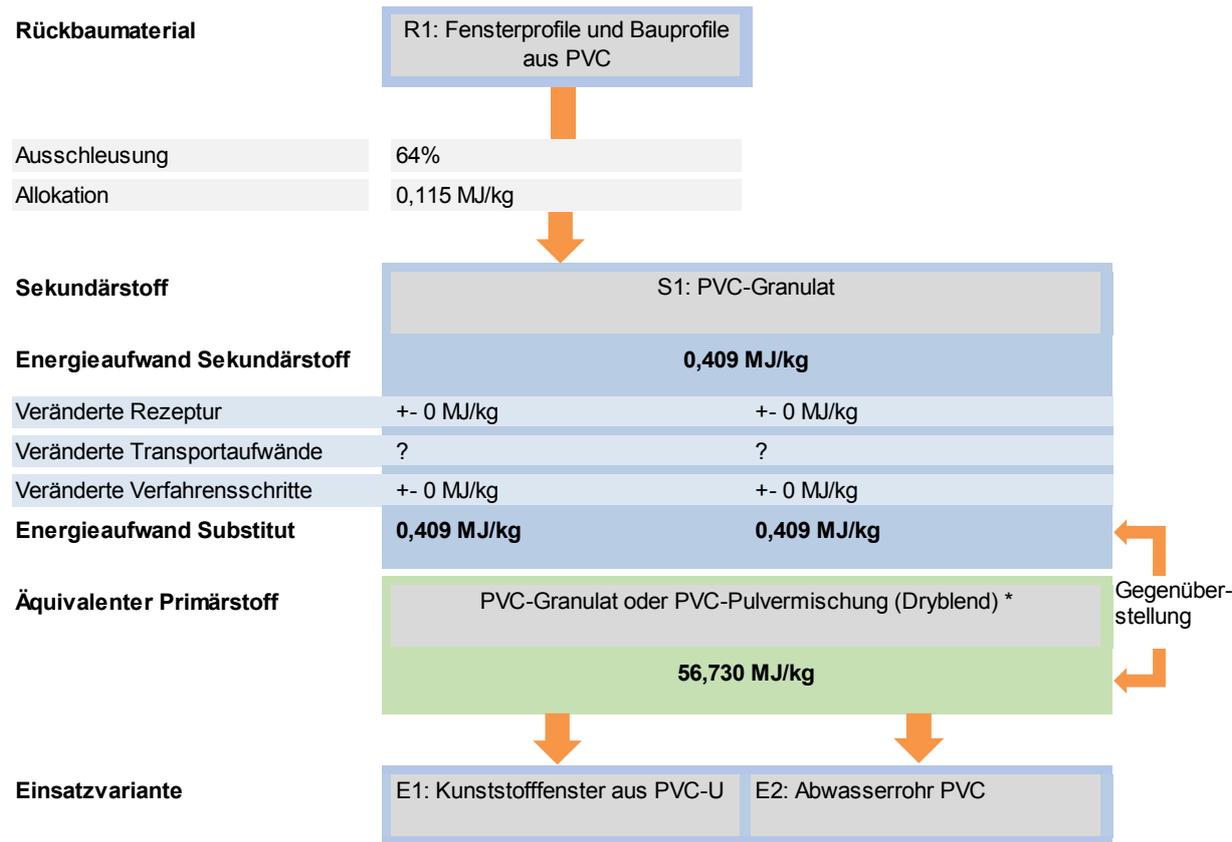


* gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation)

Abbildung 3-74: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-74 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat oder aus EPDs (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

3.7.5 Fazit



* gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation)

Abbildung 3-75: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe Kunststoffprofile (PVC) (Quelle: eigene Darstellung).

Zusammenfassung des Recyclings von Kunststoffprofilen (PVC)	
Energieverbrauch	Durch Recycling sind deutliche Energieeinsparungen möglich
Besonderheiten	Die Herstellung von PVC aus den Primärstoffen Erdöl/Erdgas ist mit einem sehr hohen Energieaufwand verbunden. Die Aufbereitung von ausgebauten PVC-Profilen bis zu PVC-Granulat, welches Primär-PVC-Granulat substituieren kann, bedarf eines relativ geringen Energieaufwands. Expertenangaben zufolge sind Nebenprozesse, die in der vorliegenden Studie nicht in die Berechnungen eingeflossen sind, nicht unerheblich. Dennoch ist der Herstellungsaufwand von RC-Granulat deutlich energiesparender als jener von Primär-PVC-Granulat.
Ausschleusung & Allokationen	Durchschnittlich kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 64 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Der Großteil des ausgeschleusten Materials besteht aus Metall. Da Metall stofflich verwertet werden kann und demnach einen Absatzmarkt besitzt, wurde hierfür eine Energieallokation vorgenommen, die 0,115 MJ/kg beträgt.
Primärstoffeinsparungen	Substituierbare Primärstoffe (Erdöl, Erdgas) begrenzt verfügbar.
Flächennutzungskonflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar, Flächen für Deponien können eingespart werden.

3.8 PVC-Bodenbeläge

3.8.1 Allgemeines zur Baustoffgruppe PVC-Bodenbeläge

Grundsätzlich gelten die in Kapitel 3.7.1 allgemeinen Informationen zum PVC-Recycling. So wie das Recyclingsystem Rewindo Fenster-Recycling-Service dafür sorgt, dass Altfenster, -rollläden und -türen in die Wiederaufbereitungsanlagen der Rewindo Recyclingpartner gelangen, sammelt die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (AgPR) bundesweit und in einigen europäischen Nachbarländern ausgediente PVC-Bodenbeläge im Rahmen von Abbruch- oder Sanierungsmaßnahmen. Sie kooperiert dabei besonders mit den Abbruchunternehmen, die im Rahmen des selektiven Rückbaus von Gebäuden PVC-Bauprodukte von den übrigen Bauabfällen trennen. Die in der Recyclinganlage angelieferten PVC-Alt-Bodenbeläge werden nach vorheriger Aussortierung anderer Materialien im Rahmen eines technisch hochentwickelten Prozesses zu Feinmahlgut verarbeitet. Bei entsprechender Eignung lässt sich dieses dann bei der Produktion neuer PVC-Bauprodukte einsetzen. (Rewindo, 2019). Die AgPR garantiert die Sammlung und Verwertung von Alt-PVC-Bodenbelägen und PVC-Belagsresten. Dazu gehören Homogenbeläge (einschichtige Beläge, durchgehend gemustert), Heterogenbeläge (PVC-Nutzschicht auf PVC-Trägerschicht), Systembeläge (dickere PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum), CV-Beläge (dünnere PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum), PVC-Wandbeläge (PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum) und PVC-Schweißschnur. Anhaftende Estrich- und Kleberreste stören beim Recycling nicht.

3.8.2 Betrachtungsgrenzen und qualitative Beschreibung der Prozessketten vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

In der vorliegenden Studie wurden für die Produktgruppe PVC-Bodenbeläge, wie in Abbildung 3-76 dargestellt, die typische Rückbauqualität PVC-Bodenbeläge ohne weitere Spezifikation (R1) untersucht.

Für die Berechnung des Energieaufwands bis zum Sekundärstoff (Schritt 1) wurden ausschließlich die Hauptprozesse in der Aufbereitungsanlage für die Berechnung mit einbezogen. Abbruchaufwendungen sowie der Transport zum Recyclinghof werden gemäß DIN EN 15804 dem vorangehenden Produktsystem zugeordnet (Modul C1 und C2).

Die für bestimmte Einsatzzwecke hergestellten Substitute (vgl. Abbildung 3-76) werden in der Regel noch weiter konfektioniert und bis zum Einsatzort transportiert. Die Unterschiede zwischen der Herstellung von Bauprodukten mit und ohne RC-Anteil werden hinsichtlich der Aspekte a) veränderter Transportaufwand (vom Aufbereitungswerk zum Einsatzort bzw. von der Primärstoffquelle bis zum Einsatzort), b) Rezepturänderungen und c) Veränderung der Verfahrensschritte qualitativ erläutert (Schritt 2). Um eine Vergleichbarkeit von Primärstoff und entsprechendem Substitut herstellen zu können, werden die sich ergebenden energetischen Mehr- oder Minderaufwände bis zum Wiedereinsatz bereits auf Materialeben mit berücksichtigt und mithilfe von Annäherungen quantitativ bewertet (Schritt 3).

Die zwei untersuchten Prozessketten wurden instruktiv entwickelt, indem typische Rückbauqualitäten, Einsatzvarianten und Aufbereitungsverfahren ermittelt und zu durchgehenden Prozessketten zusammengeführt wurden.

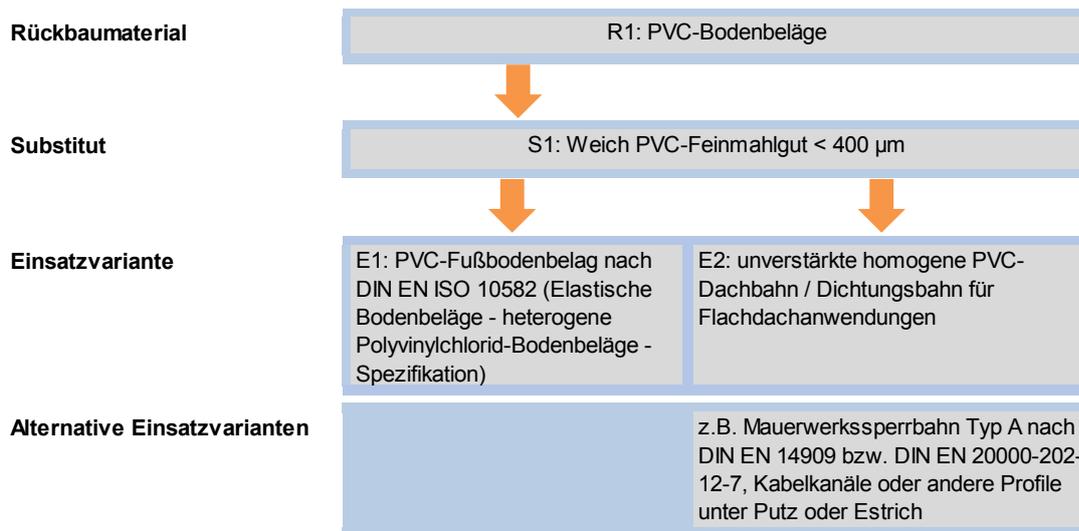


Abbildung 3-76: Gewählte Prozessketten der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Prozesskette R1-S1-E1

Rückbaumaterial: PVC-Bodenbelag

Substitut: Weich PVC-Feinmahlgut

Einsatzvariante: PVC-Fußbodenbelag nach DIN EN ISO 10582 (Elastische Bodenbeläge – heterogene Polyvinylchlorid-Bodenbeläge)

Die Herstellung von PVC-Regranulat erfolgt unabhängig von der Weiterverarbeitung bis zum einsatzfähigen RC-Bauprodukt. Die sortierten Alt-PVC-Bodenbeläge werden zuerst zu Chips zerkleinert. Nach einer magnetischen Metallabscheidung befreit eine Hammermühle die Chips von anhaftenden Estrich- und Kleberresten, die dann abgesiebt werden. Zur anschließenden Feinmahlung wird das PVC-Material mit flüssigem Stickstoff auf eine Temperatur von minus 40 °C gekühlt. Durch die Abkühlung verspröden die PVC-Chips kurzzeitig und können so in der Feinmühle zu Partikeln mit einem Durchmesser von maximal 0,4 Millimetern zermahlen werden. Abgefüllt in Big Bags wird das Material ausgeliefert.

Das gewonnene Regranulat kann in der Produktion neuer PVC-Bodenbeläge Anwendung finden. Heterogene Polyvinylchlorid-Bodenbeläge bestehen aus einer Verschleißschicht und weiteren kompakten Schichten, die sich in Zusammensetzung und/oder Design unterscheiden und Verstärkungen enthalten können. Grundmaterialien und Hilfsstoffe von heterogenen PVC-Bodenbelägen sind Additive (ca. 2 – 3 M.-%), Füllstoffe (ca. 25 M.-%), Weichmacher (ca. 20 M.-%), Pigmente (ca. 1 M.-%), PVC (ca. 50 M.-%), Hilfsstoffe (ca. 1 - 2 M.-%), Lackierung (ca. 1 M.-%) (ERFMI, 2013). Etwa 10 - 20 % des benötigten PVC kann durch Regranulat aus „post consumer“-PVC-Bodenbelägen substituiert werden.

Prozesskette R1-S1-E2

Rückbaumaterial: PVC-Bodenbelag

Substitut: Weich-PVC-Feinmahlgut

Einsatzvariante: Unverstärkte homogene PVC-Dachbahnen/Dichtungsbahnen für Flachdachanwendungen

Die Herstellung von Regranulat aus „post consumer“-PVC-Bodenbelägen erfolgt unabhängig von der Weiterverarbeitung bis zum einsatzfähigen RC-Bauprodukt gemäß des im voranstehenden Abschnitt „Prozesskette R1-S1-E1“ beschriebenen Recyclingprozesses. Das gewonnene Regranulat kann neben der Herstellung neuer PVC-Bodenbeläge auch in der Produktion Anwendung finden. Heterogene Polyvinylchlorid-Bodenbeläge bestehen aus einer Verschleißschicht und weiteren kompakten Schichten,

die sich in Zusammensetzung und/oder Design unterscheiden und Verstärkungen enthalten können. Grundmaterialien und Hilfsstoffe von heterogenen PVC-Bodenbelägen sind Additive (ca. 2 - 3 M.%), Füllstoffe (ca. 25 M.%), Weichmacher (ca. 20 M.%), Pigmente (ca. 1 M.%), PVC (ca. 50 M.%), Hilfsstoffe (ca. 1 - 2 M.%), Lackierung (ca. 1 M.-%) (ERFMI, 2013). Etwa 10 - 20 % des benötigten PVC kann durch Regranulat aus „post consumer“-PVC-Bodenbelägen substituiert werden.

3.8.3 Energetische Bewertung des Recyclings vom Rückbau bis zum Wiedereinsatz

Bei der Berechnung des Energieaufwandes zur Herstellung eines Sekundärstoffs wurden nur typische Hauptprozesse unter Berücksichtigung von Materialrückführungen und Ausschleusungen für die Herstellung von PVC-Regranulat aus PVC-Bodenbelägen (R1) betrachtet.

Die Energiekennwerte der einzelnen Prozessschritte basieren auf Durchschnittswerten zu technischen Datenblättern der entsprechenden Aggregate. Da es sich um Herstellerangaben handelt, muss berücksichtigt werden, dass die „realen“ Verbrauchswerte von diesen Werten abweichen können.

Energieaufwendungen für interne Transporte, Nebenprozesse und Bereitstellung der Anlagen (z. B. Haustechnik, Baumaßnahmen) sind nicht Bestandteil der Berechnung. Systemgrenzen des ersten Berechnungsschritts (Schritt 1) bilden die Anlieferung des Rückbaumaterials sowie die Bereitstellung des fertigen Sekundärstoffs auf dem Recyclinghof. Die Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff wird in MJ/kg quantifiziert. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzüglich Allokationen auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Da sich bis zur Fertigstellung des auslieferfertigen Bauprodukts im produzierenden Werk Unterschiede zwischen der Standardherstellung und einer Herstellung mit RC-Material ergeben können, werden in Schritt 2 diese Unterschiede qualifiziert. In Schritt 3 werden abschließend diese Unterschiede quantifiziert und mit dem Energieaufwand zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs verglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Prozesskette die drei Schritte sowie die Rechenergebnisse anhand von schematischen Darstellungen illustriert. Eine allgemeine Beschreibung des Rechenweges und der Systemgrenzen ist Kapitel 2 zu entnehmen.

Prozesskette R1-S1-E1

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

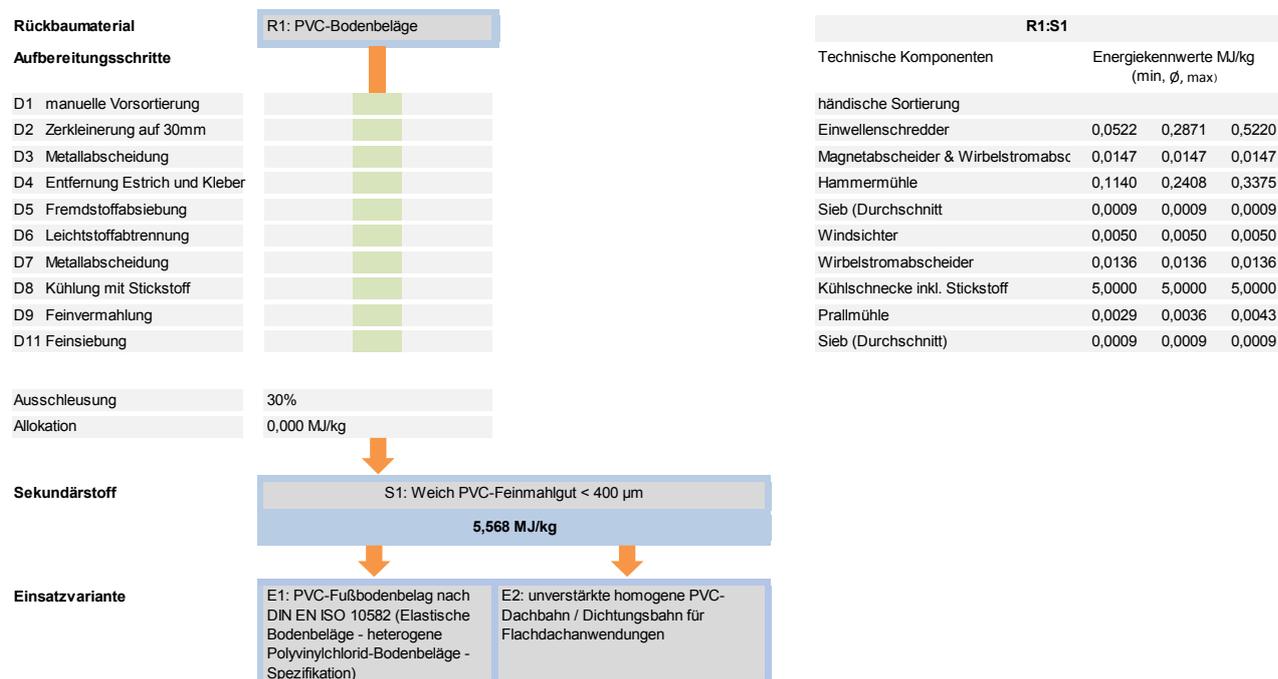


Abbildung 3-77: Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Aufbereitung von PVC-Bodenbelägen (R1) zu PVC-Regranulat (S1) zur Weiterverarbeitung zu neuen PVC-Bodenbelägen (E1) oder unverstärkten homogenen PVC-Dachbahnen (E2) kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 30 M.-%, bezogen auf die Aufgabemenge. Der Großteil des ausgeschleusten Materials besteht aus Fremd- und Störstoffen wie Putz, Kleber etc., welche keinen Absatzmarkt besitzen. Eine Energieallokation wird demnach nicht vorgenommen.

Es ist zu berücksichtigen, dass der wirkliche Stromverbrauch höher ist als in den Kalkulationen auf Basis der Gerätehersteller. Laut einer Studie der RE|CARBON Deutschland GmbH beträgt der Energiebedarf für den Aufbereitungsprozess von PVC ca. 11 % des Energiewerts von Primär-PVC (Vetter, 2016). Bei einem Energiewert von 56,73 MJ/kg für Primär-PVC läge demnach der Energiebedarf für die Aufbereitung von PVC-Granulat bei etwa 6,3 MJ/kg. Davon sind nach Expertenangaben ca. 1/3 Ventilatoren und anderen Nebenprozessen zuzuordnen. Der deutlich höhere Energiebedarf als bei der Aufbereitung von PVC-Fensterprofilen ist der Kühlung des PVC-Materials mit Stickstoff geschuldet.

Detaillierte Informationen zu den energetischen Auswirkungen der optionalen, erforderlichen und entbehrlichen Aufbereitungsschritte sowie der Veränderungen des Massestroms können dem entsprechenden Flussbildern im Anhang 7.1 entnommen werden.

Tabelle 3-25 zeigt die Bandbreite des in dieser Studie errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff in MJ/kg. Zur weiteren Berechnung und zum Vergleich mit dem äquivalenten Primärstoff (Schritt 2, Schritt 3) wird der Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte herangezogen.

Tabelle 3-25: Bandbreite des errechneten Energieaufwandes für die Aufbereitung vom Rückbaumaterial bis zum Sekundärstoff der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge.

	MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand min.	5,2054	5,2054	5,20536	0,00000	5,20536
Energieaufwand Ø	5,5677	5,5677	5,56772	0,00000	5,56772
Energieaufwand max.	5,9001	5,9001	5,90013	0,00000	5,90013

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

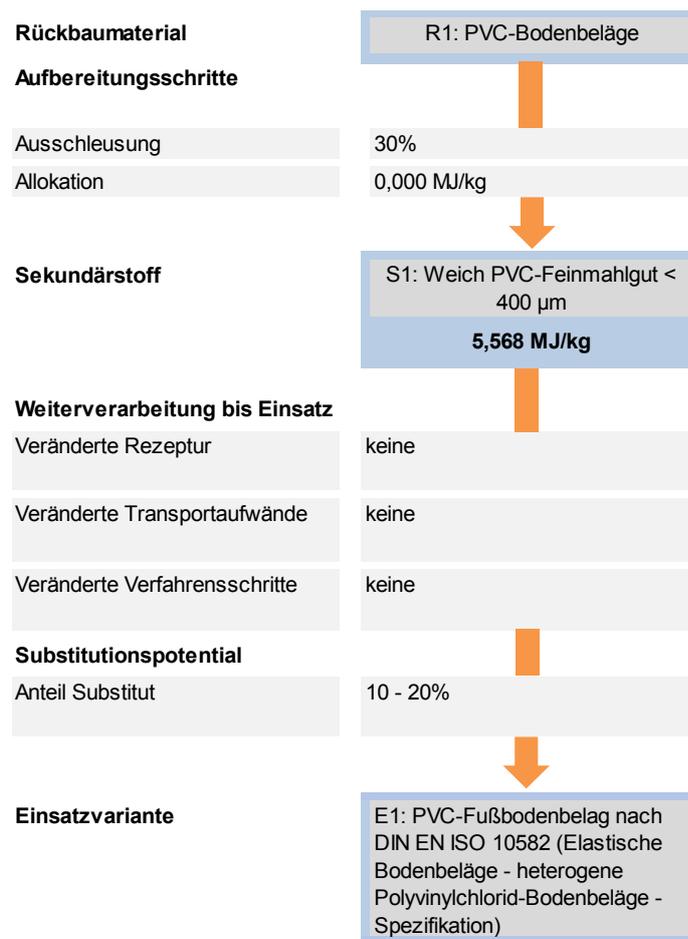
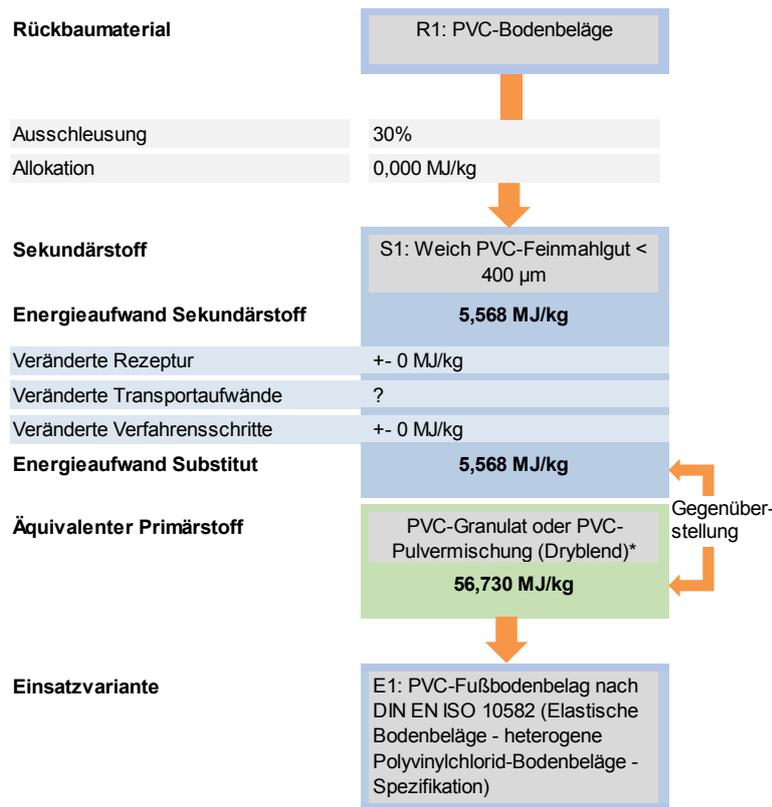


Abbildung 3-78: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung



* gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation)

Abbildung 3-79: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E1 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-79 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat oder aus EPDs (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

Prozesskette R1-S1-E2

Schritt 1: Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Rückbaumaterials bis zum Sekundärstoff

Wie Prozesskette R1-S1-E1.

Schritt 2: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut)

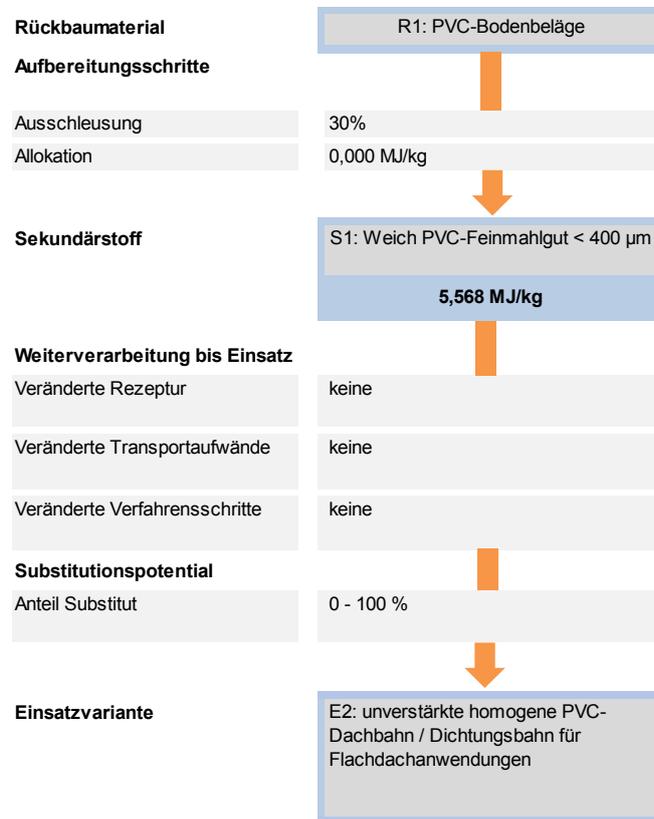
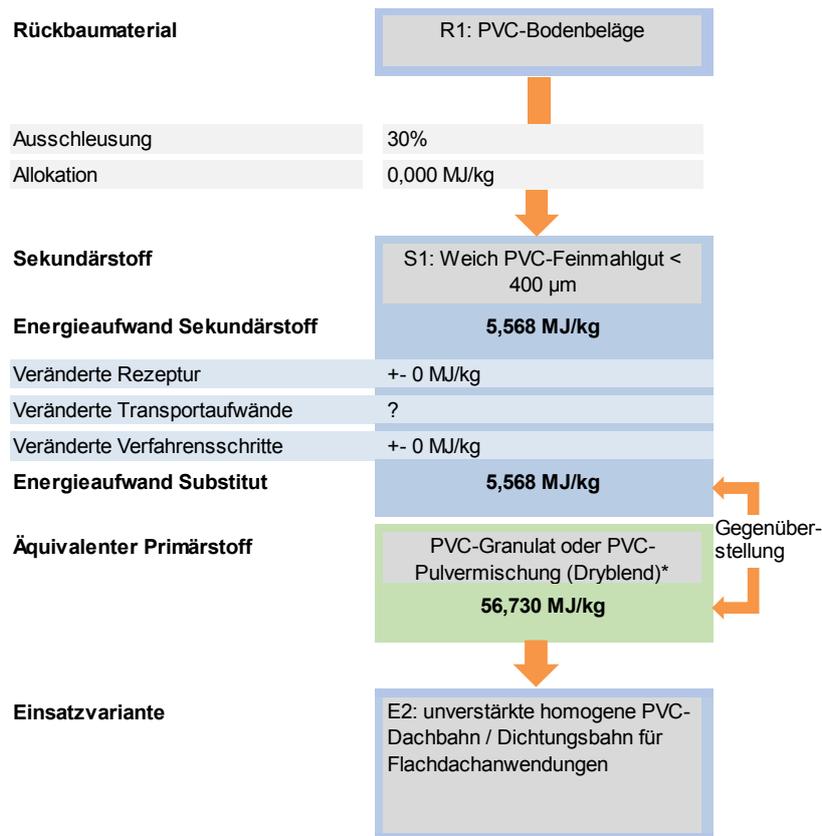


Abbildung 3-80: Erreichen der funktionalen Äquivalenz (Einsatzfähigkeit als Substitut) der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Schritt 3: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung

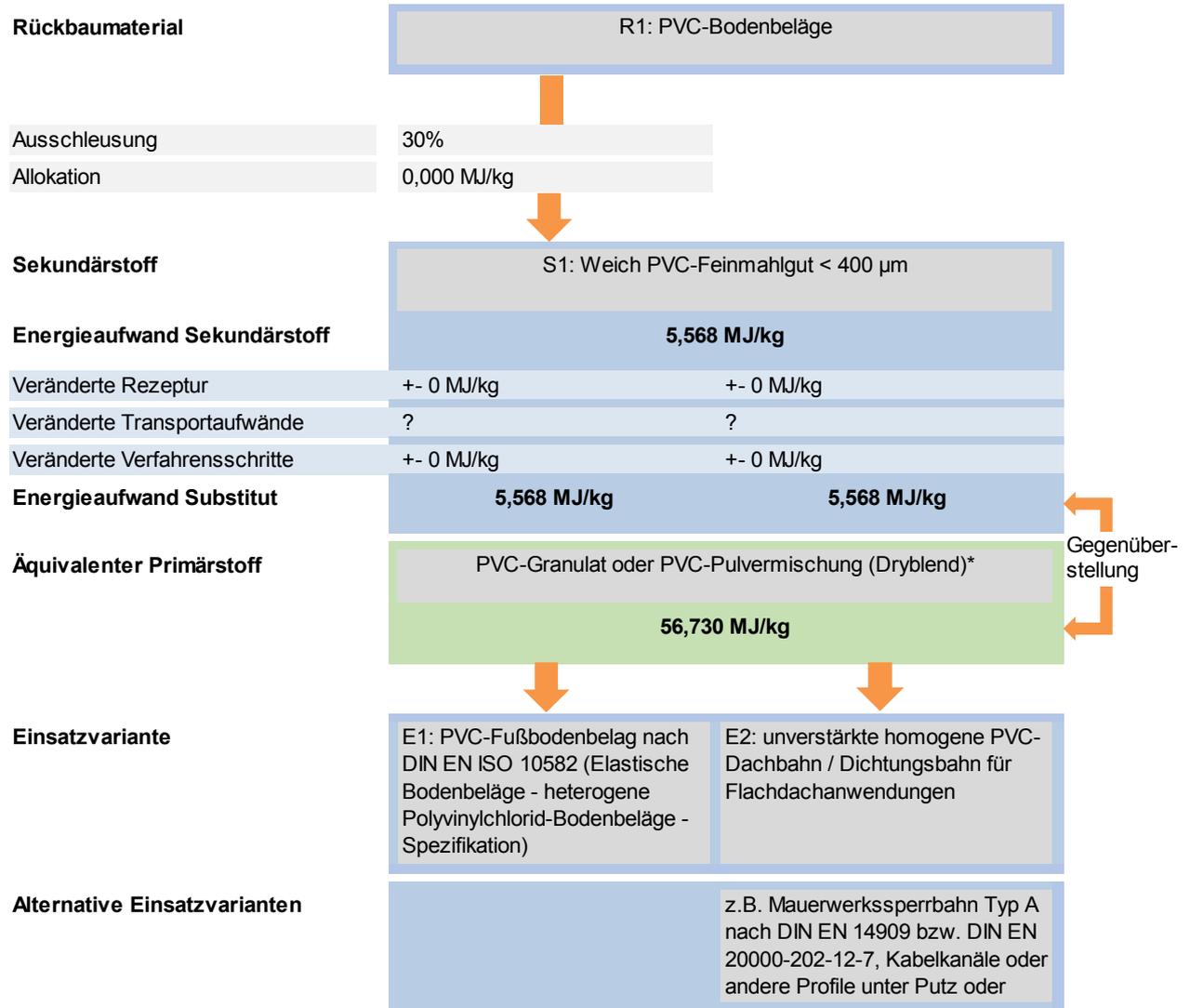


* gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation)

Abbildung 3-81: Gegenüberstellung der Energieaufwendungen für die Substitut- und Primärstoffherstellung der Prozesskette R1-S1-E2 der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 3-81 zeigt, dass der Energieaufwand für die Herstellung des Substituts geringer ist als für die Herstellung des äquivalenten Primärstoffs. Dies gilt sowohl für eine Berechnung des Energieaufwands vom Rückbaumaterial bis zum Substitut, als auch unter Einbeziehung der bis zum auslieferfertigen Bauprodukt entstehenden energetischen Unterschiede zwischen der Herstellung eines Standardprodukts und eines Produkts mit an RC-Anteilen. Relevante Auszüge aus der Ökobaudat oder aus EPDs (technische Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme sowie die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen), die für die Gegenüberstellung herangezogen wurden, können Anhang 7.2 entnommen werden.

3.8.4 Fazit



* gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation)

Abbildung 3-82: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Prozessketten der Bauproduktgruppe PVC-Bodenbeläge (Quelle: eigene Darstellung).

Bewertung des Recyclings von Kunststoffbodenbelägen (PVC) hinsichtlich	
Energieverbrauch	Durch Recycling sind deutliche Energieeinsparungen möglich.
Besonderheiten	Die Herstellung von PVC aus den Primärstoffen Erdöl/Erdgas ist mit einem sehr hohen Energieaufwand verbunden. Die Aufbereitung von ausgebauten PVC-Profilen bis zu PVC-Granulat, welches Primär-PVC-Granulat substituieren kann, bedarf eines relativ geringen Energieaufwands. Expertenangaben zufolge sind Nebenprozesse, die in der vorliegenden Studie nicht in die Berechnungen eingeflossen sind, nicht unerheblich. Dennoch ist der Herstellungsaufwand von RC-Granulat deutlich energiesparender als jener von Primär-PVC-Granulat. Im Gegensatz zur Aufbereitung von Hart-PVC aus PVC-Profilen muss Weich-PVC aus Bodenbelägen mit Stickstoff versetzt und somit gehärtet werden, um granuliert werden zu können. Dieser Prozessschritt ist im Verhältnis zum Gesamtenergieaufwand für die Aufbereitung besonders energieintensiv.

Ausschleusung & Allokationen	Bei der PVC-Aufbereitung kommt es zu einer Ausschleusung von etwa 30 M.-% bezogen auf die Aufgabemenge. Der Großteil des ausgeschleusten Materials besteht aus Fremd- und Störstoffen, wie Putz, Kleber etc., welche keinen Absatzmarkt besitzen. Eine Energieallokation wird demnach nicht vorgenommen.
Primärstoffeinsparungen	Substituierbare Primärstoffe (Erdöl, Erdgas) begrenzt verfügbar.
Flächennutzungskonflikte	Primärstoffquellen sind aufgrund von Flächennutzungsansprüchen nur begrenzt erschließbar, Flächen für Deponien können eingespart werden.

3.9 Erdölbasierende Dämmstoffe

Während des ersten Serobau-Workshops mit den Verbandsvertretern wurde darüber befunden, die Baustoffgruppe „erdölbasierende Dämmstoffe“ keiner tieferen Betrachtung im Sinne des Projektansatzes zu unterziehen. Grund dafür ist, dass Abfälle aus dem Rückbau durch die meist zu starke HBCD-Belastung nur theoretische bzw. nur im Labormaßstab erprobte Möglichkeiten bestehen, erdölbasierende Dämmstoffe stofflich zu recyceln. In diesem Kapitel erfolgt demnach nur eine generelle Abhandlung des aktuellen Stands bezüglich der Entsorgung bzw. der Wiederverwertung dieser Bauproduktgruppe.

Erdölbasierende Dämmmaterialien zeichnen sich gegenüber anderen Dämmmaterialien neben ihren besonders guten Wärmedämmeigenschaften durch ihre Beständigkeit gegen Feuchtigkeit aus. Aufgrund ihrer guten Verarbeitbarkeit werden sie außerdem verstärkt zur Dämmung von Dächern eingesetzt. Auch die ursprünglich relativ schlechten Schallschutzeigenschaften konnten durch höhere Veredelung soweit verbessert werden, dass heute Spezialformen auch für Trittschalldämmungen eingesetzt werden.

Grundsätzlich kann zwischen erdölbasierenden Dämmmaterialien aus Polyurethan (PU) und Polystyrol (PS) unterschieden werden. PU-Hartschäume bestehen aus Polyolen, polymeren Methylendiisocyanate (MDI), Treibmitteln wie n-Pentan, einem phosphorhaltigem Flammschutzmittel (TCPP) und einer Kaschierung aus Mineralvlies oder Aluminiumfolie. Sie entstehen durch die chemische Reaktion aus Erdöl mit den Polyolen und MDI, unter Zusatz von Treibmitteln weiterer Hilfsstoffe. Der Schaumkunststoff Polyisocyanurat (PIR) ist eine Variante des Dämmstoffs PUR mit einem höheren Isocyanat-Anteil (Baunetz Wissen, 2019). Für PU-Werkstoffe kommt als Entsorgungsweg ausschließlich die kontrollierte Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen infrage, weil nur so sichergestellt ist, dass eventuell vorhandene FCKW oder HFCKW, das früher als Treibgas verwendet wurde, unschädlich vernichtet werden bzw. nicht in die Atmosphäre gelangen. Eine Wiederverwertung wird nur bei Produktionsresten praktiziert. Eine sonstige stoffliche Verwertung ist derzeit weder ökologisch noch ökonomisch vertretbar (Kolb, 2004).

PS-Hartschäume können wiederum in expandiertes Polystyrol (EPS) und extrudiertes Polystyrol (XPS) untergliedert werden. Der Hauptbestandteil von XPS sowie von EPS ist Polystyrol, das als Granulat-Lieferung zu den Dämmstoffherstellern kommt. EPS-Hartschaumplatten für Böden und Perimeterdämmung bestehen einer Produktdeklaration des Industrieverbandes Hartschaum e.V. zufolge aus 80 bis 99 M.-% Polystyrol-Granulat, wobei der Anteil an Rezyklat 0 bis 19 % betragen kann. Als flammhemmender Zusatz enthält die Polymatrix von EPS Abfällen außerdem 0,5 bis 1 % nicht chemisch gebundenes Hexabromcyclododecan (HBCD) als Flammschutzmittel (bis 2015 im Einsatz). Im Basismaterial von XPS-Dämmplatten bewegt sich der Anteil von Polystyrol-Granulat bei 85 - 93 M.-%. Der HBCD-Gehalt ist mit 2 - 3 M.-% aufgrund der höheren Dichte deutlich höher als bei EPS. Hinzu kommen Talkum, Pigmente und Zusatzstoffe zur Stabilisation des Materials.

Bei der EPS-Herstellung wird in einem ersten Arbeitsschritt das Granulat bei Temperaturen von 90°C mit Hilfe von Wasserdampf vorgeschäumt. Dabei bläht es sich um etwa das 20- bis 50-fache seines ursprünglichen Volumens auf. In der weiteren Bearbeitung werden die vorgeschäumten Schaumstoffperlen zu Blöcken oder Platten gepresst oder geschäumt. Je nach Zeitdauer, Temperatur und Anlagenform dieses Vorgangs unterscheiden sich natürlich auch die Eigenschaften der Endprodukte, wie z. B. die Rohdichte. Umgangssprachlich wird oft der Markenname Styropor® für EPS verwendet. Polystyrol-Extruderschaumstoff (XPS) ist ein geschlossenzelliger, harter Dämmstoff aus Polystyrol. Das Polystyrol-Granulat wird unter Zusatz eines Treibmittels (Kohlendioxid) zu Platten in einem Extruder aufgeschäumt. Durch die Extrusion wird eine Vielzahl kleiner geschlossener Zellen erzeugt, die für eine hohe mechanische Belastbarkeit und eine hohe Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit sorgen (Baunetz Wissen, 2019)

Dem Recycling von alten XPS- und EPS-Dämmplatten steht in erster Linie deren HBCD-Belastung im Wege (HBCD ist aus dem Produktkreislauf auszuschleusen). Aus Bauwerken rückgebautes Material ist darüber hinaus häufig mit mineralischem Kleber oder Bitumen verschmutzt. Beides führt derzeit dazu, dass nur geringe Mengen in den Wiederverwendungsprozess überführt werden können.

Grundsätzlich ist das technische Recycling von expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) und extrudiertem Polystyrol Dämmstoff (XPS) bereits vollständig entwickelt. Rückgeführtes EPS, das hauptsächlich aus Verpackungsmaterial oder sortenreinem, unverschmutztem Verschnitt besteht, wird zu kleinen Fraktionen zerkleinert und unter Wasserdampf in neue EPS-Produkte geformt. Dieser Prozess verläuft ohne chemische Prozesse, so dass er mehrmals hintereinander stattfinden kann. Entsprechendes XPS wird zerkleinert und dem Prozess des Extrudierens beigemischt. Aus Bauwerken rückgebautes und mit HBCD belastetes Material kann diesem Verwertungsweg jedoch nicht zugeführt werden. Die anfallenden EPS-Bauabfälle werden in der Regel in Ersatzbrennstoffkraftwerken thermisch in Energie umgewandelt. Weitere Verwertungsmöglichkeiten für sortenrein getrennte Fraktionen an EPS-Abfällen ist die Verwendung als Ziegelporosierung, aber auch die Rückführung in den Herstellungsprozess (Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., 2018).

Darüber hinaus sind erste labortechnische Anlagen zu nennen, die EPS und XPS in Styrol zurückwandeln können. Diese Anlagen arbeiten derzeit jedoch noch nicht im industriellen Maßstab. Genannt sei hier das CreaSolv® Recyclingverfahren für Polystyrol. Bei diesem neu entwickelten lösungsmittelbasierten Recyclingverfahren, sollen PS-Platten zunächst in eine zentrale Recyclinganlage transportiert, anschließend das PS von Flammenschutzmitteln (FSM) getrennt und schließlich das gewonnene Polystyrol (PS) dem Herstellungsprozess von XPS- und EPS-Materialien wieder zugeführt werden. In einem sicheren Verfahren wird das Brom aus den FSM zurückgewonnen.

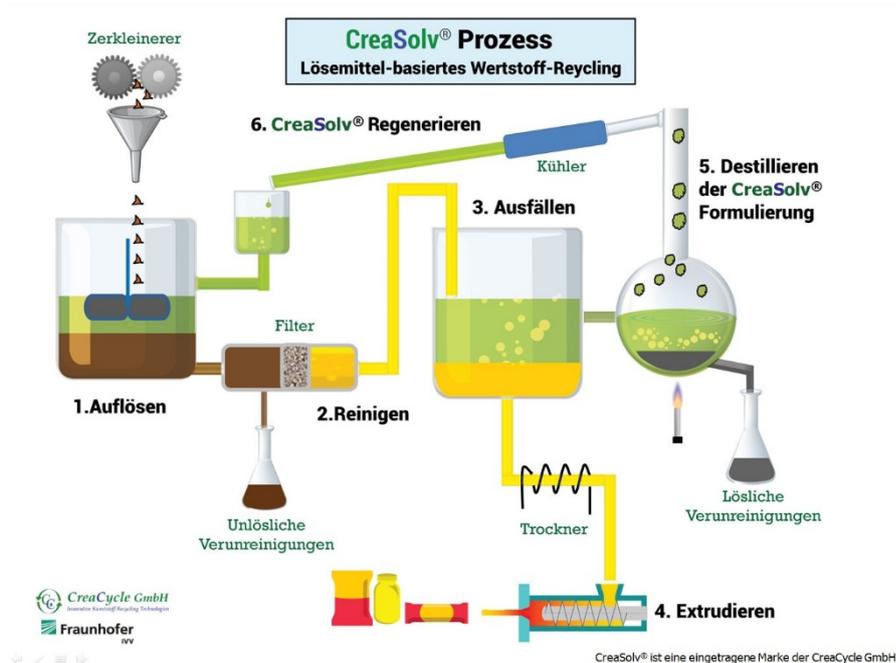


Abbildung 3-83: CreaSolv® - Lösungsmittelbasiertes Recycling von EPS-Bauabfällen (Abbildung aus CreaCycle 2016).

Eine europäische Kooperative (PSLoop) hat sich das Ziel gesetzt, eine CreaSolv®-Pilotanlage in den Niederlanden zu errichten, EPS und XPS Bauabfälle so zu recyceln, dass das heute verbotene HBCD (Hexabromocyclododecan) ausgeschleust und das Polystyrol zurückgewonnen wird. Das CreaSolv-Verfahren, wie schematisch in Abbildung 3-83 dargestellt, erfüllt die Maßstäbe des Baselabkommens zur Ausschleusung von POP-haltigen Abfällen aus dem Produktkreislauf (EUMEPS, 2015; CreaCycle 2016).

Für XPS ist das derzeit effizienteste Verfahren die kontrollierte Energie-Erzeugung. Hierbei ist sichergestellt, dass eventuell vorhandene halogenierte oder teilhalogenierte Treibmittel unschädlich vernichtet werden. Bei der Verbrennung lassen sich ca. 40 % der eingesetzten Energie als Heizwert zurückgewinnen.

3.10 Bauholz

Während des ersten Serobau-Workshops mit den Verbandsvertretern wurde darüber befunden, die Baustoffgruppe „Holz“ keiner tieferen Betrachtung im Sinne des Projektansatzes zu unterziehen. Grund dafür ist, dass durch die AltholzV nur theoretische bzw. in sehr kleinem Umfang Möglichkeiten bestehen, Bauholz stofflich zu recyceln. In diesem Kapitel erfolgt demnach nur eine generelle Abhandlung dieser Bauproduktgruppe.

Altholz wird nach der AltholzV in Abhängigkeit von der Belastung mit Schadstoffen in die Altholzkategorien A I bis A IV und die Sonderkategorie PCB-Altholz wie folgt eingeteilt:

- Altholzkategorie A I: naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde.
- Altholzkategorie A II: verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz (ohne halogenorganische Verbindungen und ohne Holzschutzmittel).
- Altholzkategorie A III: Altholz mit halogenorganischen Verbindungen und ohne Holzschutzmittel.

- Altholzkategorie A IV: mit Holzschutzmittel behandelt wie Bahnschwellen, Leitungsmasten.
- PCB-Altholz: Altholz, das PCB im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung ist und nach deren Vorschriften zu entsorgen ist.

Das bundesweite Aufkommen an Altholz lässt sich für das Jahr 2003 nach einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamts in den verschiedenen Anfallsbereichen wie in Tabelle 3-26 dargestellt quantifizieren. Es ist ersichtlich, dass der Großteil des Baualtholzes der Altholzkategorie A II zuzurechnen ist (LfU, 2012).

Tabelle 3-26: Bundesweites Aufkommen an separat vorliegendem Altholz in den verschiedenen Anfallsbereichen und Abschätzung der Anteile der einzelnen Altholzkategorien nach der AltholzV (Tabelle aus UBA 2007).

	Absolut [kt/a]	Anteile [%]	Anteile Altholzkategorie nach AltholzV [%]			
			A I	A II	A III	A IV
Siedlungsabfälle	385	7	20		80	
Verpackungsabfälle	229	4	70	20	10	
Bauabfälle	2.348	44		70		30
Abfälle der Holzindustrie	2.441	45	70	30		
Summe [kt/a]	5.403		1.923	2.422	331	727
Anteil [%]		100	36	45	6	13

Die seit 2002 geltende Altholzverordnung (AltholzV) sieht eine Zuordnung der als Abfall anfallenden Althölzer in Altholzkategorien entlang eines sogenannten Ansatzes der Regelvermutung vor. Nach dieser Regelvermutung werden Althölzer aus dem Baubereich lediglich mit sehr geringen Ausnahmen Altholzkategorien zugeordnet, die eine weitere stoffliche Nutzung nur unter erheblichen Einschränkungen bzw. Auflagen zulassen (A II bis A IV). Dabei wird nach dem Prinzip der Regelvermutung auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit vorhandener Kontaminationen und Schadstoffbelastungen im Bauabfallholz abgestellt. Die Anwendung des Prinzips ist vor allem durch den bislang wirtschaftlich als nicht vertretbar bzw. beim Vollzug von Abriss und Entsorgungsvorgängen als wenig praktikabel eingestuftem Aufwand für die Schadstofffeststellung durch Analytik veranlasst. Insbesondere für Bauholz aus Einsatzbereichen mit Außenkontakt (Wetter-/Feuchtigkeitsexposition) gilt daher eine Zuordnung, die ein Recycling des Altholzes ausschließt. Aus diesem Grund bleibt in Deutschland das Recycling von Bauabfallholz in der Praxis ohne nennenswerten Stellenwert und ist bislang nur im Rahmen entwicklungstechnischer Forschung bzw. im Praktikumsmaßstab und Demonstrationsbetrieb in Erprobung.

Obwohl durch die AltholzV nur theoretische bzw. in sehr kleinem Umfang Möglichkeiten bestehen, Baualtholz stofflich zu recyceln sollen einige Erkenntnisse zu möglichen kreislaufführenden Prozessen und deren energetischen Konsequenzen im Rahmen des vorliegenden Berichtes dennoch zur Sprache gebracht werden.

Insbesondere soll darauf hingewiesen werden, dass auch bei jenen Bauabfallholzsortimenten, die nach AltholzV grundsätzlich vom Recycling auszuschließen sind, keineswegs eine durchgängige Belastung besteht. Andererseits ist die Regelvermutung und ihre Anwendung entlang der bestehenden Kriterien dennoch ratsam. Dies liegt insbesondere im breiten Spektrum an Untersuchungen über die praktischen Umstände bei Abriss- und Entsorgung (z. B. Materialvermischungen oder Querkontamination) und in der Praxis unzureichend gegebenen Unterscheidbarkeit von Belastungszuständen begründet. Auch die

inzwischen eingeleitete und für das Jahr 2019 in Aussicht stehende Überarbeitung der AltholzV lässt nicht erwarten, dass es eine Abkehr von diesem Prinzip und grundsätzliche Veränderungen der Beurteilung von Bauhölzern in diesem Zusammenhang geben wird.

Parallel dazu ist auf die durchaus vorhandene und praktisch nachgewiesene Möglichkeit zu verweisen, in Teilen schadstoffbelastetes Bauholz soweit zu reinigen, dass die für das Recycling angelegten Reinheits- und Qualitätskriterien erreicht werden. Ebenso wären die unmittelbaren Wiedernutzungsmöglichkeiten von Baualtholzsortimenten zu erwähnen, für die sich in der Praxis ebenfalls konkrete Anwendungsfälle aber genauso der Fortbestand erheblicher Hürden haftungs- und regelungsrechtlicher Art anbringen lassen. Beide Ansätze, direkte Wieder- und Weiternutzung sowie Schadstoffbeseitigung durch mechanische Bearbeitung und Reinigung würden zumindest Lösung bieten können, um die anstrebenswerte Kaskadennutzung von Holz auch im Baubereich verstärkt zu realisieren.

Aus Sicht des Studiengegenstandes würden die zusätzlichen energetischen Aufwände für die mechanische Befreiung und Reinigung des Baualtholzes von Schadstofffrachten ein Betrachtungs- und Bilanzierungsgegenstand sein.

Bemerkenswert ist ferner, dass der Hauptpfad des Holzrecyclings die Verwendung von Altholzanteilen bei der Spanplattenproduktion ist. Hierdurch würde durch vorgenannte Maßnahmen also tatsächlich ein unmittelbarer Materialkreislauf im Bereich von Bauprodukten aus Holz herbeiführbar sein. Derzeit wird in Deutschland von einem durchschnittlichen Altholzanteil von ca. 25 % im Input von Spanplattenprodukten ausgegangen. Technisch möglich und international realisiert werden in der Spanplattenerzeugung sogar Altholzanteile oberhalb von 50 %. Der Rückfluss von Spanplattenholz in die Spanplatte stellt technisch allerdings eine hohe Herausforderung dar und wird aus diesem Grund nicht großmaßstäblich sondern lediglich als betriebsinterner Vorgang praktiziert. Maßnahmen, die sich mit einem energetischen Zusatzaufwand verbinden und bilanztechnisch somit für die Studie relevant würden (z. B. weitere Bindemittelzusätze), können sich auch hier ergeben.

Im Weiteren energetischen Betrachtungsprozess ist dann vor allem dem Trocknungsvorsprung von Altholz gegenüber Frischholzanteilen im Prozess der Spanplattenherstellung noch Aufmerksamkeit zu geben. Dieser „Trocknungsvorsprung“ verringert den Aufwand an thermischer Energie der für eine vergleichbare Menge Frischholzinput aufgebracht werden müsste, um den in der Produktion benötigten einheitlichen Trocknungsgrad des Holzmaterialstromes zu erhalten. Diese durch die Altholzverwendung eingesparte Energiemenge ist den Energieaufwendungen zur Altholzvorbereitung (dies wären dann bei einem theoretisch denkbaren Einsatz von Bauholzsortimenten insbesondere solche im Zusammenhang mit dem Durchlaufen einer Schadstoffanalytik und eventuell zusätzlichen Reinigungsprozessen) entsprechend gegenzurechnen.

3.11 Zusammenschau der Analyseergebnisse der betrachteten Bauproduktgruppen

Für die instruktiven Prozessketten der betrachteten Bauproduktgruppen wurden die Energieaufwendungen für die Aufbereitung und Herstellung der Sekundärstoffe und weiter der Substitute ermittelt und dem Energieaufwand zur Primärstoffherstellung gegenübergestellt (Tabelle 3-27). Durch die in Abbildung 3-84 gewählte Darstellung soll dargelegt werden, a) wie viel Energie zur Herstellung von Sekundärstoffen unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.2 definierten Bilanzgrenzen aufgewendet werden muss (Berechnungen aus Schritt 1), b) welchen Einfluss Änderungen in Rezeptur oder Verfahrensschritten auf den Energieaufwand zur Herstellung von funktional äquivalenten Substituten haben (Berechnungen aus Schritt 2) und c) ob sich durch die Verwendung von Substituten anstelle von äquivalenten Primärstoffen energetische Vorteile ergeben (Ergebnis aus Schritt 3). Als „Standard“-Datenbank wurde für den Vergleich in Schritt 3 die Ökobaudat herangezogen. Sofern in der Ökobaudat keine, zu undifferenzierte oder angezweifelte Energiekennwerte zu finden waren, wurde auf Vergleichswerte aus anderen DIN EN 15804 konformen Sekundärquellen (EPDs, GaBi, ecoinvent) zurückgegriffen. Um auf Unstimmigkeiten bzw. Unsicherheiten bzgl. der Energiekennwerte von Primärstoffen aufmerksam zu machen, wurden in Abbildung 3-84 bei Bedarf zwei Vergleichswerte aufgeführt.

Tabelle 3-27: Instruktive Prozessketten der Bauproduktgruppen und ihre Energieaufwendungen für entsprechende Sekundärstoffe, Substitute und funktional äquivalente Primärstoffe.

Bauproduktgruppe	R – Rückbaumaterial	S – Sekundärstoff	S – Substitut	P – Primärstoff	E – Einsatzvariante
Beton	R1: Betonbruch ohne grobe Anhaftungen	S1: RC-GK 2/16 Typ 1		GK aus nat. Kies (80 %) und Splitt/Schotter (20 %)	E1: Betonfundament C20/25
		0,024 MJ/kg	0,076 MJ/kg bzw. 0,060 MJ/kg	0,097 MJ/kg (ökobaudat) bzw. 0,057 MJ/kg (ecoinvent)	
	R2: Betonbruchgemisch (mit Ziegel, Kalksandstein, Putz)	S2: RC-GK 2/22 Typ 2		GK aus nat. Kies (80 %) und Splitt/Schotter (20 %)	E1: Betonfundament C20/25
		0,022 MJ/kg	0,114 MJ/kg bzw. 0,094 MJ/kg	0,097 MJ/kg (ökobaudat) bzw. 0,057 MJ/kg (ecoinvent)	
	R2: Betonbruchgemisch (mit Ziegel, Kalksandstein, Putz)	S3: RC-GK 0/32 für den Straßenbau		GK aus Kies und Schotter	E2: Schottertragschicht
		0,023 MJ/kg	0,023 MJ/kg	0,168 MJ/kg (ökobaudat) bzw. 0,061 MJ/kg (ecoinvent)	
		5,568 MJ/kg	5,568 MJ/kg	56,73 MJ/kg (EPD)	

Tabelle 3-27 (Fortsetzung 1): Instruktive Prozessketten der Bauproduktgruppen und ihre Energieaufwendungen für entsprechende Sekundärstoffe, Substitute und funktional äquivalente Primärstoffe.

Ziegel	R1: Ziegelreiche Abbruchabfälle	S1: Ziegelmaterial 0/45	GK 0/45 aus Kies und Schotter	E1: (Frostschutz-) Schicht ohne Bindemittel
		0,031 MJ/kg	0,031 MJ/kg	0,168 MJ/kg (ökobaudat) bzw. 0,061 MJ/kg (ecoinvent)
	R2: Dachziegel mit Anhaftungen	S2: RC-Ziegemehl 0/1; 0/1,6; 0/2; 0/3	Grüner Diabas 0/1; 0/1,6; 0/2; 0/3	E2: Technische Beläge
		0,031 MJ/kg	0,031 MJ/kg	0,109 MJ/kg (GaBi)
Kalksandstein	R3: Hintermauerziegel mit Anhaftungen und mit Dämmstoff gefüllt	S3: Ziegelsplitt 0/12	GK aus Lava-Bims-Gemisch	E3: Vegetationssubstrat für Extensivbegrünungen auf Dächern
		0,051 MJ/kg	0,051 MJ/kg	0,090 MJ/kg (ökobaudat)
	R4: Mauerziegel, Vormauerziegel und Klinker mit Anhaftungen	S4: Ziegelsplitt 0/2-2/12	Sand 0/2	E4: Deckschichten ohne Bindemittel
		0,041 MJ/kg	0,041 MJ/kg	0,049 MJ/kg (ökobaudat)
Kalksandstein	R1: KS sortenrein und ohne grobe Anhaftungen	S1: Kalksandsteingranulat 0/8	Natürliche GK 2/5, 2/8	E1: Kalksandsteine
		0,038 MJ/kg	0,038 MJ/kg	0,049 MJ/kg (ökobaudat)
	R2: KS mit groben Anhaftungen	S2: Kalksandsteingranulat 0/32	GK aus Kies und Schotter	E2: Schottertrag- und Frostschutzschicht ohne Bindemittel
	0,031 MJ/kg	0,031 MJ/kg	0,168 MJ/kg (ökobaudat) bzw. 0,061 MJ/kg (ecoinvent)	
	R2: KS mit groben Anhaftungen	S1: Kalksandsteingranulat 0/64	Neue Anwendung; kein Primärstoffäquivalent	E3: Ökogränulat für den Deponiebau Methanox II
		0,017 MJ/kg	0,017 MJ/kg	
Gipskarton	R1: Gipskartonplatten, Gipswandbauplatten und Gipsblöcke	S1: RC-Gips (Dihydrat)	Naturgips oder REA-Gips	E1: Gipskartonplatten
		0,080 MJ/kg	0,080 MJ/kg	0,040 MJ/kg (ökobaudat)
	R2: Gipsblöcke oder Gipswandbauplatten	S1: RC-Gips (Dihydrat)	Sulfatträgergips (1/3 Anhydritmix, 1/3 Naturgips, 1/3 REA-Gips) als Zumahlstoffe	E2: Zement
		0,073 MJ/kg	0,073 MJ/kg	0,646 MJ/kg (ökobaudat)

Tabelle 3-27 (Fortsetzung 2): Instruktive Prozessketten der Bauproduktgruppen und ihre Energieaufwendungen für entsprechende Sekundärstoffe, Substitute und funktional äquivalente Primärstoffe.

Flachglas	R1: Flachglas aus Fenster-/Türscheiben	S1: RC-Glasscherben	Quarzsand	E1: Einscheibensicherheitsglas nach EN 12150
		0,043 MJ/kg 0,031 MJ/kg	0,049 MJ/kg (ökobaudat)	
Flachglas	R1: Flachglas aus Fenster-/Türscheiben	S1: RC-Glasscherben	Quarzsand	E2: Schaumglasplatten nach DIN EN 13 167
		0,043 MJ/kg 0,031 MJ/kg	0,049 MJ/kg (ökobaudat)	
Mineralische Dämmstoffe (Steinwolle)	R1: Steinwolle auf Baustelle getrennt erfasst (leichte Verunreinigungen)	S1: Steinwolle-Mehl	Vulkanische Gesteine (Diabas, Basalt, Kalkstein, Dolomit)	E1: Steinwolle gem. Richtlinie 67/69/EG/
		0,040 MJ/kg 0,280 MJ/kg	0,109 MJ/kg (GaBi) bzw. 0,135 MJ/kg (ecoinvent)	
Mineralische Dämmstoffe (Steinwolle)	R2: Steinwolle in Verbund (Ziegel) erfasst	S2: Steinwolle-Mehl	Vulkanische Gesteine (Diabas, Basalt, Kalkstein, Dolomit)	E1: Steinwolle gem. Richtlinie 67/69/EG/
		0,041 MJ/kg 0,281 MJ/kg	0,109 MJ/kg (GaBi) bzw. 0,135 MJ/kg (ecoinvent)	
Kunststoffprofile (PVC-Fensterprofile)	R1: Fensterprofile und Bauprofile aus Kunststoff	S1: PVC-Granulat oder PVC-Mahlgut	PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend)	E1: Kunststofffenster aus PVC-U
		0,409 MJ/kg 0,409 MJ/kg	56,73 MJ/kg (EPD)	
Kunststoffprofile (PVC-Fensterprofile)	R1: Fensterprofile und Bauprofile aus Kunststoff	S1: PVC-Granulat oder PVC-Mahlgut	PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend)	E2: Abwasserrohr PVC
		0,409 MJ/kg 0,409 MJ/kg	56,73 MJ/kg	
Sonstige Kunststoffe (PVC-Fußböden, PVC-Bahnen)	R1: PVC-Bodenbeläge	S1: Weich PVC-Feinmahlgut < 400 µm	PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend)	E1: PVC-Fußbodenbelag nach DIN EN ISO 10582
		5,568 MJ/kg 5,568 MJ/kg	56,73 MJ/kg (EPD)	
Sonstige Kunststoffe (PVC-Fußböden, PVC-Bahnen)	R1: PVC-Bodenbeläge	S1: Weich PVC-Feinmahlgut < 400 µm	PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend)	E2: unverstärkte homogene PVC-Dachbahn /Dichtungsbahn für Flachdachanwendungen

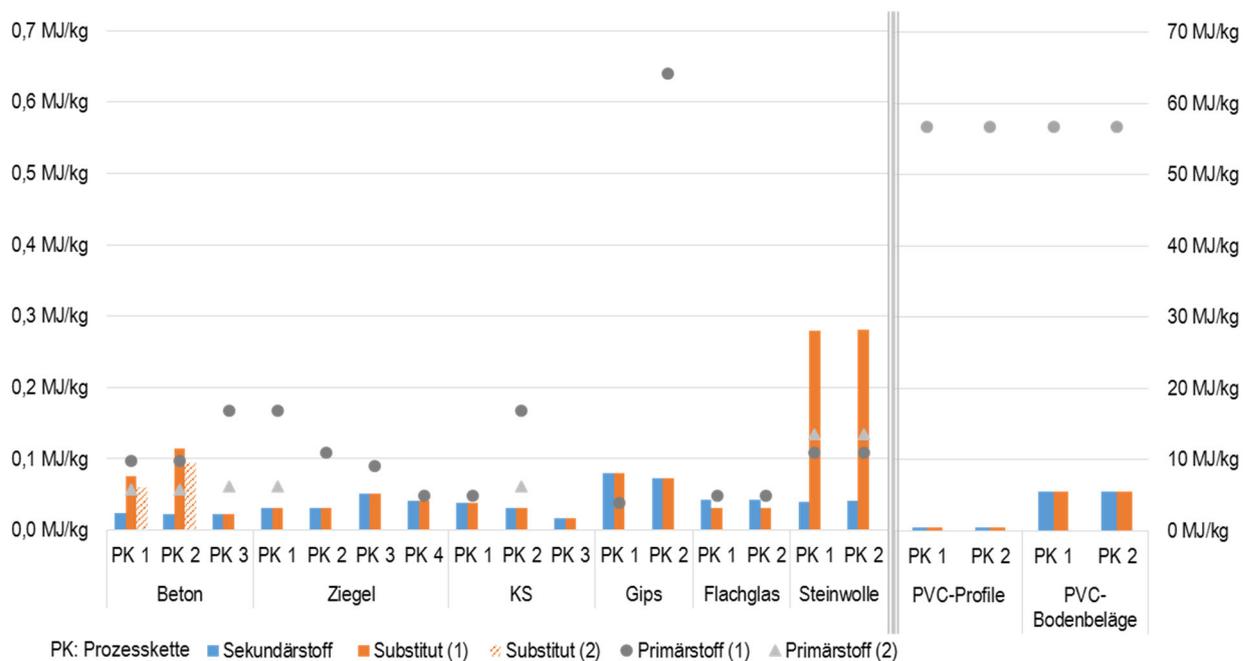


Abbildung 3-84: Energiebedarfe in MJ/kg – Prozessketten der Bauproduktgruppen im Vergleich.

Unter Beachtung der gegebenen Rahmenseetzungen wird deutlich, dass einem Recycling aus energetischer Perspektive grundsätzlich nichts entgegensteht. Bei den mineralischen Materialien liegen die Energieaufwände zur Herstellung von Sekundärstoffen in der Regel unter jenen zur Primärstoffherstellung. Eine Ausnahme stellt hier Prozesskette 1 von Gips dar, bei der die Aufbereitung des Rückbaumaterials (Gipskartonplatten, Gipswandbauplatten und Gipsblöcke) zu RC-Gips mehr Energie in Anspruch nimmt als die Gewinnung von Naturgips. Auch unter Berücksichtigung der Energieeinsparungen während des Trocknungsprozesses zur Herstellung von Gipskartonplatten mit erhöhten RC-Gips-Anteilen (Schritt 2 „Erreichen der funktionalen Äquivalenz“) lässt sich der Primärenergiewert für Naturgips nicht unterbieten.

Die Berücksichtigung von Rezepturänderungen und Unterschiede in den Verfahrensschritten zwischen Standardherstellungsprozess und Herstellung mit RC-Anteilen sind insbesondere für die Bauproduktgruppen Beton und Steinwolle wesentlich. So übersteigen die Energieaufwände zur Herstellung von funktional äquivalenter RC-GK Typ 2 für den Einsatz in Beton sowie von RC-Steinwolle-Mehl für den Einsatz in neuer Steinwolle jene zur Herstellung der entsprechenden Primärstoffe. Wird der Energiewert für die Herstellung von Primärkörnung aus der Datenbank ecoinvent als Vergleichswert herangezogen, so gilt dies darüber hinaus für die Prozesskette 1 (Betonbruch - RC-GK Typ 1 – Betonfundament). In den genannten Fällen führt eine notwendige Rezepturanpassung zu einem Energiemehraufwand. Die Berücksichtigung von Unterschieden in den Transportaufwendungen (Distanz zwischen Aufbereitungswerk über produktherstellendes Werk zum Einsatzort vs. Distanz zwischen Primärstoffmine über produktherstellendes Werk zum Einsatzort) konnten in der vorliegenden Studie aufgrund gravierender regionaler Unterschiede weder qualifiziert noch quantifiziert werden. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf. Die Berücksichtigung der Transportunterschiede könnte zu deutlichen Verschiebungen der in Abbildung 3-84 dargestellten Energiebedarfe führen. Um mögliche Verschiebungen in den Ergebnissen bewerten zu können wäre hierfür eine breite Datenbasis von Nöten, welche derzeit noch nicht existiert. Bei den Kunststoffen liegt der Energieaufwand zur Herstellung von Primärstoffen (aus Erdöl, Erdgas) um den Faktor 10 über den Werten zur Herstellung von funktional äquivalenten Substituten. Diese andere Größenordnung ergibt sich aus dem sehr hohen Primärenergieinhalt der, durch die Herstellung eines Primär-PVC-Granulats aus den Rohstoffen Erdöl und Erdgas entsteht.

4. Stofflicher und energetischer Aufwand von Recycling – Hochrechnungen für Deutschland

Die Hochrechnungen dieser Studie für Deutschland sollten in Anlehnung an das Vorgängerprojekt „Materialflüsse im Hochbau“ (Deilmann et al. 2014 und 2017) erfolgen. Aus diesem liegen für sechzehn Bauproduktgruppen Materialberechnungen vor. Die Materialberechnungen sind Sensitivitätsstudien und basieren auf der Bautätigkeitsstatistik und den dort erfassten Aktivitäten. Sie bilden das Bauen in Deutschland nicht vollständig, sondern nur das „Kerngeschäft“ des Bauens ab. In den Sensitivitätsstudien ging es nicht um konkrete Vorhersagen, sondern um das Ausloten von Größenordnungen und der Bedeutung des Recyclings im Zusammenhang mit sich abzeichnenden Veränderungen.¹¹

Die Sensitivitätsstudie „BAU“ (Business As Usual) bildet die Veränderung des Bauvolumens entsprechend der Bautätigkeitsannahmen für 2030 und 2050 ab; in BAU-RC (Business As Usual mit Recycling) werden die Entwicklungen in „BAU“ mit den von Experten optimistisch eingeschätzten Recycling-Anteilen realisiert. Die Materialberechnungen der Sensitivitätsstudien spiegeln den Bestand 2010 sowie die Neubau- und Abbruch-Aktivitäten bis 2030 und 2050 wider und weisen die möglichen Recycling-Beimengungen in Tonnen aus.

Diese Recycling-Beimengungen entsprechen den möglichen Primärstoffeinsparungen (in t). Sie lassen sich nicht auf direktem Weg mit den in dieser Studie ermittelten energetischen Aufwendungen für das Recycling verknüpfen (zehn Bauproduktgruppen werden betrachtet und für acht davon wurden energetische Recycling-Aufwendungen berechnet). Hier müssen Schnittstellen geschaffen werden.

Zunächst werden die sechzehn Bauproduktgruppen des Vorgängerprojekts den zehn bzw. acht in dieser Studie relevanten Bauproduktgruppen zugeordnet. In welcher Form dies erfolgt, verdeutlicht Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Bauproduktzuordnungen.

Vorgängerprojekt (Deilmann et al. 2014)	SEROBAU-Studie
Beton	Beton
Ziegel	Ziegel
Kalksandstein	Kalksandstein
Gipskarton	Gipskarton
Flachglas	Flachglas
Mineral. Dämmstoffe	Mineral. Dämmstoffe (Steinwolle)
Kunststoffprofile	Kunststoffprofile (PVC-Fensterprofile)
Sonst. Kunststoffe	Sonst. Kunststoffe (PVC-Bodenbeläge)
Bau-/Konstruktionsholz	Sonstiges
Erdölbasierte Dämmstoffe	
Sonst. Mineralische (inkl. Bodenbeläge)	
Sonst. Gipsprodukte	
Sonst. Holz (inkl. Bodenbeläge)	
Metalle (inkl. Leitungen)	
Sonst. Stoffe (inkl. Leitungen & Beläge)	

¹¹ Ein direkter Vergleich mit der BBS-Studie 2016, die gleichfalls in Szenarien künftige Rückbau- und Neubau-Mengen thematisiert, ist nicht möglich, da beide Studien unterschiedliche Betrachtungsrahmen und Herangehensweisen verfolgen.

Für Bauholz und erdölbasierte Dämmstoffe kann zwar eine Zuordnung erfolgen, aber für beide Bauproduktgruppen gibt es derzeit kein praxistaugliches Recycling. So bleiben beide Gruppen von den Betrachtungen ausgeschlossen.

Gleichfalls wird auch das „Sonstige“ nicht weiter betrachtet. Im Sonstigen „stecken“ unter „sonstiges Mineralische“ Schüttungen, Kies- und Schotterschichten sowie Estriche, Putze und Mörtel. Sie haben ein hohes Recyclingpotenzial für Tiefbauarbeiten beim Hochbau auf Grundstücksebene (z. B. Baugrubenverfüllungen, Zuwegungen, Terrassen) sowie generell im (öffentlichen) Tiefbau (Straßen-, Wege-, Kanal-Bau).

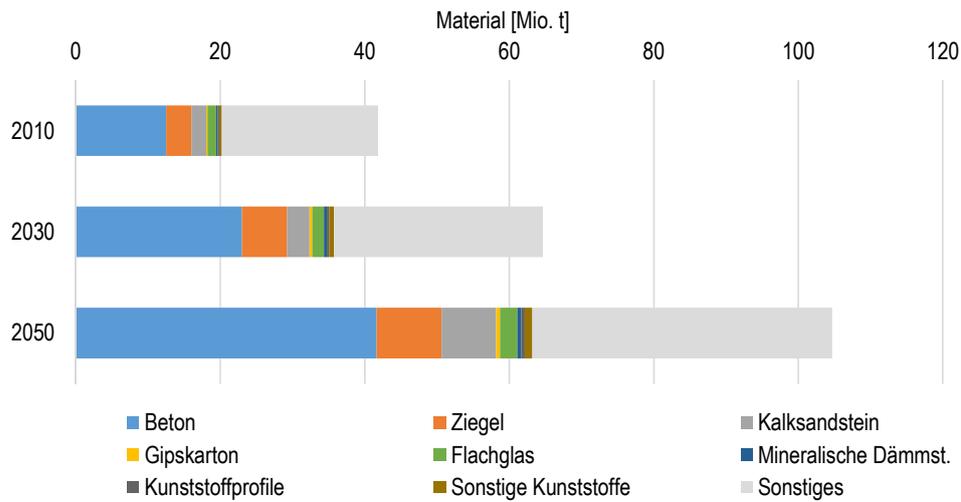
Trotz der scheinbar problemlosen Zuordnungen der Bauproduktgruppen – Beton zu Beton oder mineralische Dämmstoffe zu mineralischen Dämmstoffen – sind die Zuordnungen mit Ungenauigkeiten bzw. Unschärfen verbunden. So wird neben Steinwolle z. B. auch Glaswolle den mineralischen Dämmstoffen zugeordnet. Werden nun für Hochrechnungen energetische Abschätzungen für Steinwolle aus dieser Studie (SEROBAU) mit den Mengenangaben zu mineralischen Dämmstoffen aus dem Vorgängerprojekt gekoppelt, so handelt es sich hierbei um grobe Abschätzungen. Die energetischen Abschätzungen für Steinwolle werden auf alle mineralischen Dämmstoffe übertragen. Ähnlich ist die Problematik bei den Kunststoffen. Dies muss stets bei Betrachtung und Interpretation der Hochrechnungen der energetischen Parameter beachtet werden.

Bereits in der Vorgängerstudie wurde deutlich, dass das IÖR-Materialfluss-Modell nicht alle Bautätigkeiten, sondern nur das „Kerngeschäft“ des Bauens in Deutschland abbildet (Deilmann et al. 2014, S. 36). Vergleiche mit Produktions- und Verbandsstatistiken top down haben gezeigt, dass die Materialströme je nach Bauproduktgruppe unterschiedliche Abweichungen gegenüber den einzelnen Statistiken aufweisen (vgl. S. 37 ff.). Im Durchschnitt kann jedoch ausgegangen werden, dass ca. 50 % der Materialströme durch die Modellierung erfasst sind. Die Abweichungen sind über alle Bauproduktgruppen ähnlich, somit entsteht innerhalb der Modellierung keine „Verzerrung“. Ausnahme bilden die Gipskartonplatten. Hier liegen die Abweichungen über dem Durchschnitt, sodass Korrekturen bzw. Anpassungen vorgenommen werden müssen. Grundlage dafür ist die Studie UBA 2017

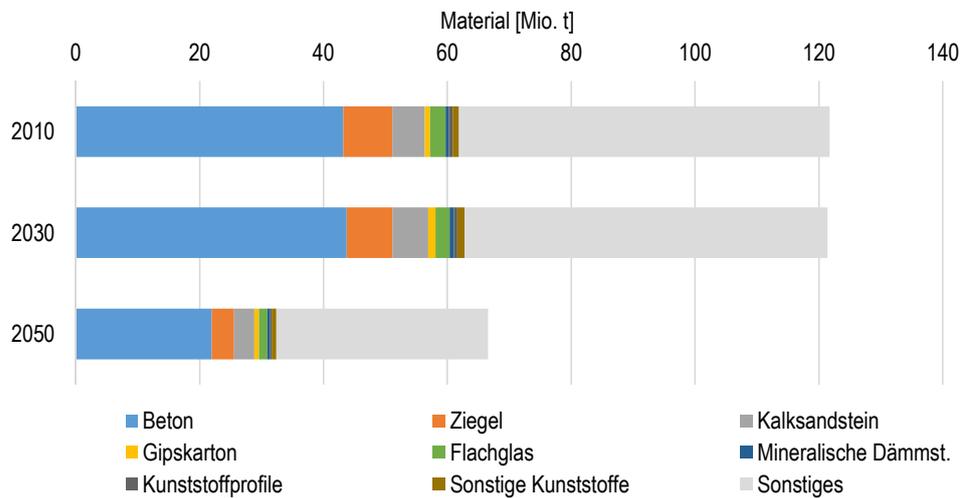
Im Vergleich mit der UBA-Gips-Studie (UBA 2017) wird der Gipskartonplatten-Verbrauch im IÖR-Modell um 90 %, das Gipskartonplatten-Abfallaufkommen um 91 % und die RC-fähigen Beimengungen um 88 % (Vergleichsjahr 2030) unterschätzt. Die Gründe für diese Unterschätzung liegen vermutlich im in der Statistik nicht erfassten privaten Um- und Ausbaubereich (nicht meldepflichtige Um- und Ausbaumaßnahmen durchgeführt von kleinen und mittleren Handwerksbetrieben sowie Heimwerkern). In diesem Bereich wird i. d. R. mit leichten Gipskarton-Konstruktionen gearbeitet (Trennwände, Dachschrägen-Verkleidungen, Beplankungen). Um ein realistischeres Bild vom Gipskartonplatten-Recycling zu zeichnen, wird daher der bisher abgeschätzte Beimengungs-Anteil erhöht. In Einklang mit den anderen berechneten Materialgruppen und der ca. 50-prozentigen Schätzgenauigkeit des IÖR-Materialstrom-Modells wird der Gipskartonplatten-Mengenanteil auf 50 % erhöht. Das bedeutet, Erhöhung des Gipskartonplatten-Outputs um 41 %, des Inputs um 40 % und der RC-Beimengungen um 38 %.

Nach durchgeführten Korrekturen ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 4-1, Tabelle 4-2).

Material-Output Gebäudeabbruch BAU-RC



Material-Input Gebäudeneubau BAU-RC



Sekundärstoff-Beimengungen BAU-RC

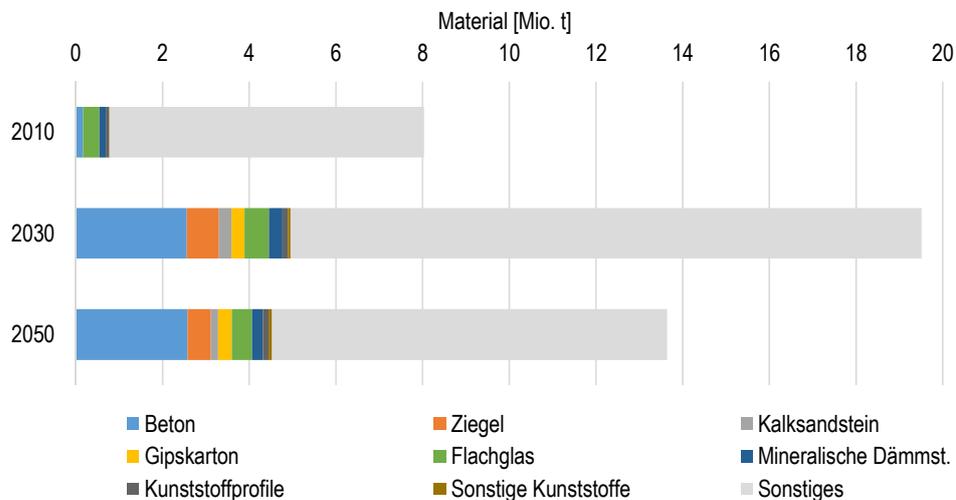


Abbildung 4-1: Material-Output und -Input sowie Recycling-Beimengungen mit Korrekturen – Deutschland (Quelle: eigene Darstellung).

Tabelle 4-2: Material-Output und -Input sowie Recycling-Beimengungen mit Korrekturen – Deutschland.

Bauproduktgruppen	2010			2030			2050		
	Mio. t			Mio. t			Mio. t		
	Input	Output	RC	Input	Output	RC	Input	Output	RC
Beton	43,208	12,529	0,167	43,717	22,998	2,563	21,950	41,640	2,579
Ziegel	7,905	3,489	0,000	7,433	6,250	0,743	3,604	8,979	0,541
Kalksandstein	5,252	2,055	0,000	5,752	3,098	0,288	3,290	7,561	0,165
Gipskarton	0,841	0,176	0,000	1,192	0,381	0,298	0,759	0,545	0,316
Flachglas	2,518	1,171	0,378	2,251	1,637	0,563	1,320	2,402	0,462
Mineral. Dämmstoffe	0,550	0,235	0,148	0,743	0,401	0,312	0,456	0,535	0,255
Kunststoffprofile	0,591	0,209	0,077	0,508	0,325	0,127	0,266	0,487	0,133
Sonst. Kunststoffe	1,012	0,354	0,010	1,180	0,624	0,059	0,762	1,031	0,076
Summe	61,877	20,217	0,780	62,776	35,713	4,952	32,408	63,179	4,527
Sonstiges	59,862	21,620	7,254	58,626	28,930	14,555	34,178	41,510	9,114
Gesamt	121,739	41,838	8,034	121,402	64,643	19,507	66,586	104,689	13,641

Sonstiges beinhaltet: Bauholz, erdölbasierte Dämmstoffe, sonstiges Mineralische (inkl. Bodenbeläge), sonstige Gipsprodukte, sonstiges Holz (inkl. Bodenbeläge), Metalle (inkl. Leitungen), sonstige Stoffe (inkl. Leitungen & Beläge).

Hinweis: abgeschätzten Materialeinsparungen (RC-Beimengungen) beziehen sich auf die stoffliche Nutzung (keine energetische Verwertung)

Für die in dieser Studie relevanten acht Bauproduktgruppen sind in der nächsten Abbildung die RC-Beimengungen noch einmal einzeln – ohne das „Sonstige“ – dargestellt (Abbildung 4.2).

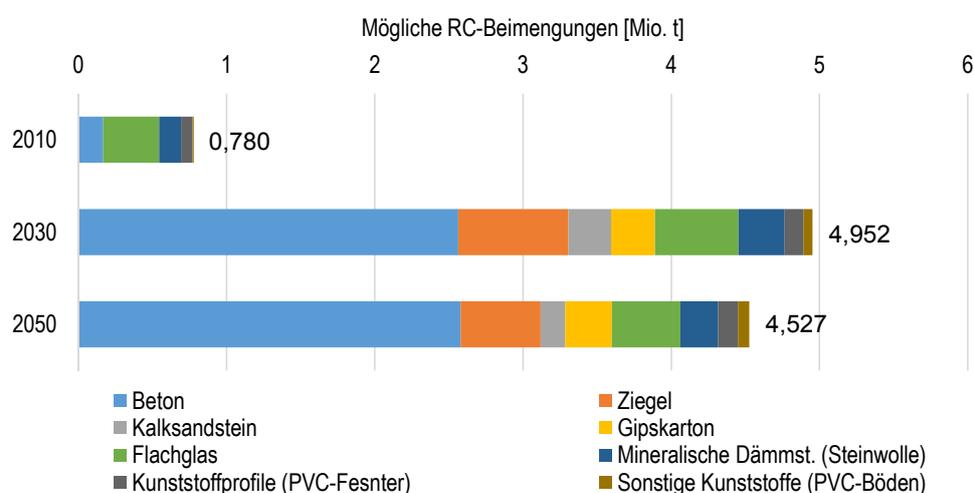


Abbildung 4.2: RC-Beimengungen (BAU-RC) der acht SEROBAU-Bauproduktgruppen in Mio.t (Quelle: eigene Darstellung).

Diese Materialmengen spiegeln in Tonnen auf Massenebene das Potenzial an möglichen Primärstoffeinsparungen wider und können mit den energetischen Betrachtungen gekoppelt werden. Sie werden in ihrem Ausmaß und ihrer Dynamik zum einen von der Bautätigkeit (vor allem Errichtung neuer und Abriss ganzer Gebäude) und zum anderen von den geschätzten möglichen RC-Beimengungsanteilen bestimmt.

Nachdem die mit dem Projekt Serobau „kopplungsfähigen“ RC-Beimengungen in Tonnen vorliegen, wird geprüft, wie die Kopplung (Zusammenführung/Vergleich von Masseangaben mit energetischen Einschätzungen) konkret erfolgen kann. Da die Vorgängerstudie Materialströme aus dem Hochbau in den

Hochbau bilanziert, ist eine Kopplung nur dann möglich, wenn die Einsatzvariante des jeweiligen RC-Baustoffs eine Hochbauanwendung ist. Das bedeutet, das Rückbaumaterial aus dem Hochbau (z. B. Betonbruch mit Anhaftungen – R2) muss wieder bei einer Hochbaumaßnahme (z. B. Stahlbetondecke C 20/25 – E1) eingesetzt werden. Damit sind die Energiekennwerte der RC-Gesteinskörnung 2/22 (Typ2) relevant, die für RC-Schüttgut im Tiefbau (z. B. Schottertragschicht einer Straße – E2) bleiben unberücksichtigt.

Im Folgenden wird geprüft, bei welchen Bauproduktgruppen Hochbauanwendungen vorkommen und mit welchem energetischen Aufwand ihre Sekundärstoff- bzw. Substitut-Herstellung verbunden ist.

Tabelle 4-3 zeigt die für die einzelnen Bauproduktgruppen gewählten „vom Hochbau zu Hochbau“ Prozessketten. Diese Prozessketten sind die Grundlage für die Hochrechnungen auf Bundesebene. Damit bildet immer nur eine „Beispiel“-Prozesskette das eigentlich deutlich breitere Recyclinggeschehen stellvertretend ab. Das bedeutet, die energetische Abschätzung für jeweils eine spezielle Substitut-Einsatzvariante steht hier für einen teilweise deutlich vielfältigeren RC-Einsatz im Rahmen der einzelnen Bauproduktgruppen. Dieser Sachverhalt muss bei Analyse und Interpretation der Hochrechnungen und Gegenüberstellungen bedacht werden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Bautätigkeitsannahmen für 2030 und 2050¹² der Vorgängerstudie (Deilmann et al. 2014) sowie die dort von den Experten geschätzten Recycling-Beimengungsanteile¹³ als Grundannahme herangezogen wurden.

Für die beschriebenen acht Bauproduktgruppen und jeweils eine konstruktive „von Hochbau zu Hochbau“ Prozesskette wurden Hochrechnungen vorgenommen. Die möglichen RC-Beimengungen in Tonnen aus der Vorgängerstudie für die Jahre 2010, 2030 und 2050 wurden für den Sekundärstoff, das Substitut und den Primärstoff in Joule umgerechnet und einander gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind im Folgenden für alle acht Bauproduktgruppen zusammengefasst (Tabelle 4-4, Abbildung 4.4) sowie differenziert nach mineralischen Materialien abgebildet (Abbildung 4.5).

¹² Die Bautätigkeit in Form von Abgang und Zugang verändert die Bestandsmenge an Wohn- und Nutzfläche. Gekoppelt an den Bevölkerungsrückgang, wird bei den Wohngebäuden die Fläche pro Person bis 2050 gegenüber 2010 um 11 % steigen. Bei den Nichtwohngebäuden wird die Nutzfläche 2050 maximal 30 % über dem Niveau von 2010 liegen.

¹³ RC-Anteile steigen von durchschnittlich 7 % (2010) auf 16 % (2030) bzw. 21 % (2050) (vgl. Deilmann et al. 2014, S 96).

Tabelle 4-3: Instruktive „von Hochbau zu Hochbau“ Prozessketten der acht gewählten Bauproduktgruppen für die Hochrechnungen.

Bauproduktgruppe	R – Rückbaumaterial	S – Substitut	P – Primärstoff	E – Einsatzvariante
Beton	R2: Betonbruchgemisch (mit Ziegel, Kalksandstein, Putz)	S2: RC-GK 2/22 Typ 2 0,114 MJ/kg bzw. 0,097 MJ/kg	GK aus nat. Kies (80 %) und Splitt/Schotter (20 %) 0,097 MJ/kg (Ökobaudat) bzw. 0,057 MJ/kg (ecoinvent)	E1: Betonfundament C20/25
Ziegel	R3: Hintermauerziegel mit Anhaftungen und mit Dämmstoff gefüllt	S3: Ziegelsplitt 0/12 0,051 MJ/kg	GK aus Lava-Bims-Gemisch 0,090 MJ/kg (ökobaudat)	E3: Vegetationssubstrat für Extensivbegrünungen auf Dächern
Kalksandstein	R1: KS sortenrein und ohne grobe Anhaftungen	S1: Kalksandsteingranulat 0/8 0,038 MJ/kg	Natürliche GK 2/5, 2/8 0,049 MJ/kg (ökobaudat)	E1: Kalksandsteine
Gipskarton	R1: Gipskartonplatten, Gipswandbauplatten und Gipsblöcke	S1: RC-Gips (Dihydrat) 0,080 MJ/kg	Naturgips oder REA-Gips 0,040 MJ/kg (ökobaudat)	E1: Gipskartonplatten
Flachglas	R1: Flachglas aus Fenster-/Türscheiben	S1: RC-Glasscherben 0,031 MJ/kg	Quarzsand 0,049 MJ/kg (ökobaudat)	E1: Einscheibensicherheitsglas nach EN 12150
Mineralische Dämmstoffe (Steinwolle)	R1: Steinwolle auf Baustelle getrennt erfasst (leichte Verunreinigungen)	S1: Steinwolle-Mehl 0,280 MJ/kg	Vulkanische Gesteine (Diabas, Basalt, Kalkstein, Dolomit) 0,109 MJ/kg (GaBi) bzw. 0,135 MJ/kg (ecoinvent)	E1: Steinwolle gem. Richtlinie 67/69/EG/
Kunststoffprofile (PVC-Fensterprofile)	R1: Fensterprofile und Bauprofile aus Kunststoff	S1: PVC-Granulat oder PVC-Mahlgut 0,409 MJ/kg	PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend) 56,73 MJ/kg (EPD)	E1: Kunststofffenster aus PVC-U
Sonstige Kunststoffe (PVC-Fußböden, PVC-Bahnen)	R1: PVC-Bodenbeläge	S1: Weich PVC-Feinmahlgut < 400 µm 5,568 MJ/kg	PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend) 56,73 MJ/kg (EPD)	E1: PVC-Fußbodenbelag nach DIN EN ISO 10582

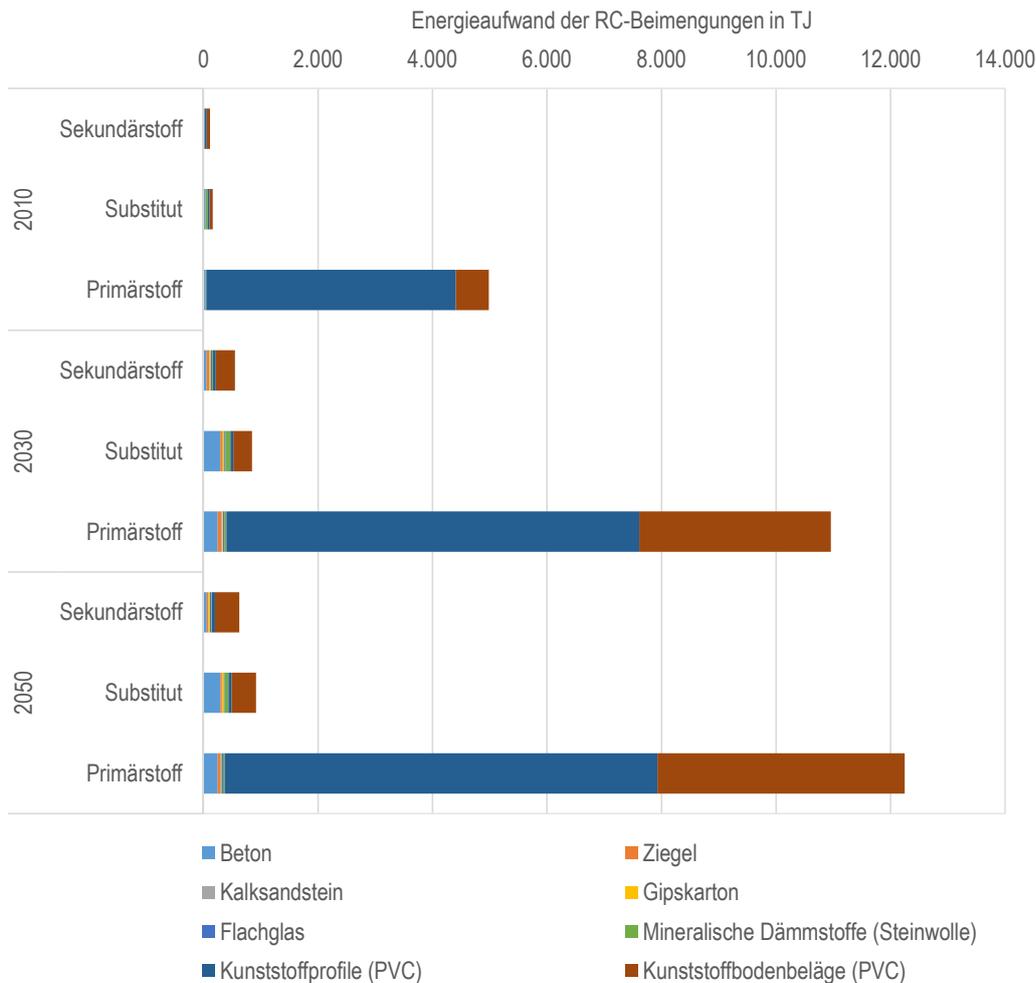


Abbildung 4.4: Energieaufwand der RC-Beimengungen aller Bauproduktgruppen – Gegenüberstellung von Sekundärstoff, Substitut und Primärstoff (Rahmensetzungen beachten).

Tabelle 4-4: Energieaufwand der RC-Beimengungen aller Bauproduktgruppen in TJ – Gegenüberstellung von Sekundärstoff, Substitut und Primärstoff (Rahmensetzungen beachten).

	2010			2030			2050		
	Sekundärstoff	Substitut	Primärstoff	Sekundärstoff	Substitut	Primärstoff	Sekundärstoff	Substitut	Primärstoff
Beton	3,7	19,0	16,2	56,4	292,1	248,6	56,7	294,0	250,1
Ziegel	0,0	0,0	0,0	37,9	37,9	66,9	27,6	27,6	48,7
Kalksandstein	0,0	0,0	0,0	10,9	10,9	14,1	6,3	6,3	8,1
Gipskarton	0,0	0,0	0,0	23,8	23,8	11,3	25,3	25,3	12,0
Flachglas	16,2	11,7	18,5	24,2	17,4	27,6	19,9	14,3	22,6
Mineral. Dämmst. (Steinwolle)	5,9	41,6	16,2	12,5	87,4	34,0	10,2	71,5	27,8
Kunststoffprofile (PVC)	31,4	31,4	4356,6	52,0	52,0	7207,2	54,5	54,5	7559,0
Kunststoffbodenbeläge (PVC)	56,4	56,4	574,3	328,5	328,5	3346,9	424,2	424,2	4321,8
Summe	113,6	160,1	4981,8	546,2	850,1	10956,6	624,6	917,6	12250,1

Hinweise:

Basis der Primärstoff-Daten sind Ökobaudat und GaBi.

Im Jahr 2010 sind die Recycling-Anteile bei Ziegel, Kalksandstein und Gipskarton 0 % (vgl. Deilmann et al. 2014, S.96).

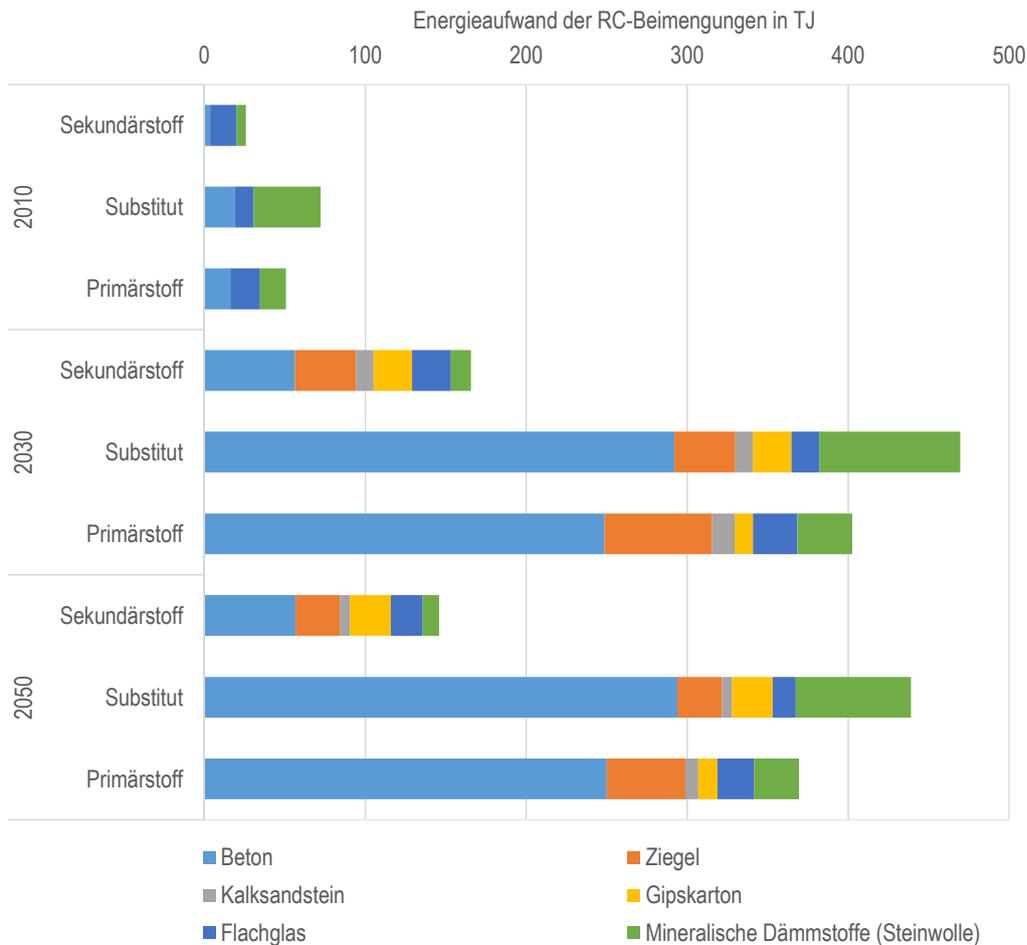


Abbildung 4.5: Energieaufwand der RC-Beimengungen der mineralischen Materialien – Gegenüberstellung von Sekundärstoff, Substitut und Primärstoff (Rahmensetzungen beachten).

In der Zusammenschau der möglichen RC-Beimengungen in Mio. t (Abbildung 4.2) mit den Energieaufwendungen für diese Mengen (Abbildung 4.4) wird deutlich, dass mineralische Materialien und Kunststoffe umgekehrte Proportionen aufweisen. Auf Massenebene (Mio. t) werden über 90 % der Aufwendungen von den mineralischen Materialien bestimmt, demgegenüber auf Energieebene (TJ) zu über 95 % von den Kunststoffen. Kunststoffe haben aufgrund ihrer energieintensiven Herstellungsprozesse gegenüber mineralischen Bauprodukten generell einen sehr hohen Primärenergieinhalt (im Sinne der dafür aufzuwendenden Energie) und erreichen damit im Rahmen der Hochrechnungen deutlich andere Größenordnungen. Direkte Vergleiche zwischen beiden Gruppen sind dadurch nicht sinnvoll.

Der Vergleich der Primärstoffanwendung gegenüber der Sekundärstoff- bzw. Substitutanwendung bei den Kunststoffen zeigt (Abbildung 4.4), dass ein Recycling aus energetischer Perspektive sinnvoll ist, da die notwendigen Prozessketten vom Rohstoff (Erdöl, Erdgas) bis zur Kunststoff-Granulat (Primärstoff) deutlich energieaufwendiger sind als die wenigen Aufbereitungsschritte vom Abbruchmaterial bis zum Kunststoff-Granulat (Sekundärstoff, Substitut). Bei den mineralischen Bauproduktgruppen muss das Recycling gegenüber der Primärstoffanwendung aus energetischer Perspektive detaillierter betrachtet werden (Abbildung 4.5). Auf Sekundärstoffebene ist das Recycling gegenüber dem Primärstoffeinsatz in der Regel mit einem geringeren Energieaufwand verbunden (Ausnahme größerer Energieaufwand: Gipskarton). Demgegenüber ergeben sich auf der Substitutebene, die veränderte Rezepturen und Verfahrensschritte mit prozentualen Energieauf- oder Energieabschlägen berücksichtigt, sowohl geringere als auch größere Energieaufwände (größerer Energieaufwand: Beton, Gipskarton, Steinwolle).

5. Diskussion und Ausblick

Energiekenndaten

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es schwierig ist, empirische Energiekenndaten für Prozess- und Transportaufwendungen im Rahmen des Recyclings zu ermitteln. Wie bereits in Kap. 2.2 erwähnt sind Energieverbräuche sensible Informationen, die eng an die Geschäftsmodelle der Recycling-Unternehmen gekoppelt sind. Energieverbräuche sind mit Kosten verbunden und beeinflussen das Betriebsergebnis. Kostengünstiges Wirtschaften wirkt sich maßgeblich auf die Wettbewerbs- und Marktfähigkeit von Produkten aus. Daher zögern die Recycling-Unternehmen, energetische Kennzahlen offenzulegen. Um dennoch zu energetischen Kennwerten zu gelangen, wurde in dieser Sondierungsstudie mit Einschätzungen von Standardprozessen und Standardkomponenten gearbeitet. Die ermittelten Energiekennwerte sind aus technischen Datenblättern von Anlagen, Aggregaten und Maschinen (technische Komponenten) abgeleitet bzw. wurden aus veröffentlichten Untersuchungen und Studien, sowie Hinweisen aus der Praxis zusammengetragen. Die Kennzahlen spiegeln Bedarfswerte wider, d. h. Energieverbräuche, die sich unter den gegebenen Annahmen ergeben würden, und entsprechen i. d. R. nicht den tatsächlich gemessenen Verbrauchswerten. Das Arbeiten mit diesen Werten ist mit gewissen Unschärfen verbunden, jedoch derzeit die einzige Möglichkeit, Daten zur energetischen Abschätzung von Recycling zu liefern sowie eine über alle Bauproduktgruppen einheitliche, für den Vergleich geeignete Vorgehensweise zu ermöglichen.

Transportaufwände

Bei den Transportaufwendungen für Recycling ist die Informations- und Datenlage noch prekärer und es ist demnach äußerst schwierig, allgemeingültige Aussagen zum Transportenergieaufwand zu machen. Durch Recycling können sich gegenüber dem Primärstoff durchaus höhere Transportaufwände ergeben, wenn sich die Transportdistanzen/Wege durch Zwischenschalten eines Recycling-Unternehmens verlängern oder der Weg von der Baustelle über das Recycling-Unternehmen zum Bauprodukthersteller kürzer ist als der Weg des Primärstoffs zum Hersteller. Da das Recyclingnetz regional und produktspezifisch große Unterschiede aufweist, konnten in der vorliegenden Sondierungsstudie die Transporte nicht abgebildet werden. Grobe Abschätzungen ohne detaillierte Analyse der Transportwege würden die Ergebnisse nicht aufwerten, sondern vielmehr verzerren und weitere Fragen aufwerfen. In dieser Studie hat man sich daher darauf beschränkt, Unterschiede in den Transportaufwendungen (Primärstoff versus Substitut) zu thematisieren und nicht quantitativ zu bewerten. Im Laufe des Projektes hat sich die Vermutung verfestigt, dass Transporte einen wesentlichen und nicht vernachlässigbaren Beitrag zum Energieaufwand von Recycling und Primärstoffgewinnung leisten. Es wird empfohlen, hier weitere Forschungen anzustellen, um Transport- und Wegenetze genauer beschreiben (Distanzen, Transportmittel etc.) sowie die damit verbundenen energetischen Aufwendungen abschätzen zu können.

Bilanzrahmen

Um die Besonderheiten der einzelnen Bauproduktgruppen herauszuarbeiten, sind klare materialflussorientierte Betrachtungen wichtig. Vergleiche von Substitut und Primärstoff sind nur auf Materialebene sinnvoll und müssen Unterschiede in der Weiterverarbeitung bis zum Bauprodukt bzw. der Einsatzvariante integrieren. Die Untersuchungen des Recyclingprozesses setzen mit Blick auf die DIN EN 15804 am Schritt Abfallbehandlung (C3) an. Abbruchmaterial mit einer bestimmten Ausgangsqualität ist für die Nutzung im Rahmen einer neuen Einsatzvariante vorgesehen. Durch die Aufbereitung verliert es seine Abfalleigenschaften und wird zum Sekundärstoff. Werden die Nebeneffekte zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz eines Primärstoffs eingerechnet, wird es als Substitut bezeichnet. Alle Verfahrensschritte

(Abbruch) und Transporte zur Bereitstellung des Abbruchmaterials (C1 und C2) werden dem voranstehenden Produktsystem (Gebäude) angerechnet. Die Untersuchungen der Sondierungsstudie beginnen mit der Bereitstellung des Abbruchmaterials beim Recycling-Unternehmen. Alle notwendigen Aufbereitungsschritte für die Herstellung eines Sekundärstoffs sowie die Berücksichtigung von Unterschieden (Rezeptur, Verfahrensschritte, Transporte) zwischen dem Standardherstellungsprozess und der Herstellung von Bauprodukten mit RC-Anteilen sind innerhalb des Bilanzrahmens und werden energetisch der Herstellung eines funktional äquivalenten Substituts zugerechnet. Die Bilanzgrenzen wurden so gewählt, um einen plausiblen Vergleich mit den Energieaufwänden zur Herstellung des äquivalenten Primärstoffs anstellen zu können. Die zum Vergleich herangezogenen Energiewerte der äquivalenten Primärstoffe umfassen Energieaufwände für die Rohstoffbereitstellung, interne Transporte sowie die Herstellung. Transporte zu weiterverarbeitenden Unternehmen (z. B. vom Kieswerk zum Betonwerk) werden in den Energiewerten nicht berücksichtigt. Die gesetzten Betrachtungsgrenzen und gewählten Energiewerte für die Primärstoffproduktion sind demnach analog zu denen der Sekundärstoffherstellung und führen zu einem realistischen Vergleich.

Energetische und massebezogene Bewertung von Recycling

Zwischen den mineralischen Materialien und den Kunststoffen zeigen sich deutliche Unterschiede. Die mineralischen Materialien sind aufgrund ihrer hohen spezifischen Dichten schwerer. In der Materialbilanz erzielen sie aufgrund ihrer absoluten Mengen im Bauwesen hohe Einsparpotenziale. Die Kunststoffe „punkten“ demgegenüber bei der Energiebilanz. Wird Recycling-Granulat bei der Kunststoffherstellung verwendet, spart dies viel Energie, da die Kunststoffe, bedingt durch ihre sehr energieintensiven Ausgangsrohstoffe, generell einen hohen Primärenergieinhalt (im Sinne der dafür aufzuwendenden Energie) haben. In der Summe ist die Gesamtbilanz aller Bauproduktgruppen eher positiv zu sehen.

Im Rahmen der Energieaufwendungen des Recyclings sind neben den Aufbereitungsschritten zum Sekundärstoff auch die Verfahrensschritte zur Herstellung funktional äquivalenter Substitute zu berücksichtigen, die Rezepturänderungen sowie Unterschiede in Verfahrensschritten enthalten. Die vorliegende Sondierungsstudie liefert hierzu für alle Bauproduktgruppen ein erstes einheitlich strukturiertes Zahlenwerk und versucht aufzudecken, welche Prozesse aktuell mit einem relativ hohen Energieaufwand verbunden sind bzw. wo besonders große Energieeinsparpotenziale nutzbar gemacht werden könnten. So können z. B. veränderte Rezepturen einen nicht unerheblichen zusätzlichen Energieaufwand erzeugen (z. B. 1 % mehr Zement verursacht bei der Herstellung von RC-Beton einen Energiemehraufwand von 0,020 MJ pro kg Beton bzw. 0,052 MJ pro kg Substitut). Demgegenüber kann es aber auch durch veränderte Verfahrensschritte zur Reduzierung des Energieaufwandes kommen (z. B. bei Flachglas 25 – 30 % weniger Energieaufwand je kg RC-Scherben durch geringere Schmelztemperatur). Hier sollten detailliertere Untersuchungen folgen, um bauproduktsspezifische RC-„Schwächen und Stärken“ zu ermitteln.

Bei den mineralischen Materialien ist ein Recycling vor allem aus Entnahmesicht sinnvoll, wenn dadurch der Rohstoffabbau reduziert und Natur- bzw. Landschaftsraum geschont werden. Bei den Kunststoffen spielt der energetische Aspekt eine entscheidendere Rolle. Auch hier können durch Recycling Rohstoffe (Erdöl/Erdgas) bzw. Ressourcen gespart werden. Um das Recycling weiter zu fördern, müssen die notwendigen Grundvoraussetzungen weiter verbessert werden. Wichtig sind dabei die Gewinnung von sortenreinen Abbruchmassen (verbundstoffarme Planung, geeignete Abbruchtechnologien), die Schaffung der Rahmenbedingungen für eine qualitätsgerechte Recyclingmaterial-Herstellung (Anerkennung des Recyclingmaterials als Produkt mit Anwendungsgenehmigung, Schaffung von Marktsicherheit) sowie der Aufbau von Sammel- und Transportstrukturen (Vernetzung von Recycling-Unternehmen mit

Bauproduktherstellern). Jedoch sind dem Recycling auch quantitativ Grenzen gesetzt, da je nach Bauproduktgruppe und Einsatzvariante nur bestimmte Recycling-Beimengungsanteile möglich sind. Jede Bauproduktgruppe muss dabei individuell betrachtet werden. In der Regel ist die Beimengung bei den Einsatzvarianten mit höheren Qualitätsanforderungen geringerer (z. B. Beton: bis zu 45 Vol.-% bei RC-GK 2/16 Typ 1 für Betonfundament C20/25 bzw. bis zu 100 Vol.-% bei RC-GK 0/32 für Schottertragschicht).

Gleichfalls sollten beim Recycling auch die Anteile an ausgeschleustem Material mit bedacht werden. Hier ergeben sich bauprodukt-spezifische Unterschiede bezüglich der Menge und Art verwertbarer Nebenprodukte. So verringert sich z. B. bei der Bauproduktgruppe Beton der Massestrom vom Abbruchmaterial zum Substitut um durchschnittlich ca. die Hälfte. Das ausgeschleuste Material ist größtenteils gemischter Betonbruch mit weiteren Verwendungsmöglichkeiten. Bei Kalksandstein werden durchschnittlich nur 15 M.-% ausgeschleust. Hier handelt es sich vor allem um Gips- und Mörtelreste sowie Fremd- und Störstoffe, die derzeit keiner weiteren Verwertung zugeführt werden können.

Einsatzmöglichkeiten von Recyclingmaterialien

In der Sondierungsstudie wird das Recycling vom Hochbau in alle Bereiche des Bauwesens betrachtet. Sekundärstoffe wieder im Hochbau unterzubringen ist sinnvoll und erstrebenswert, doch hochwertige Recyclingpfade sind nicht immer ressourceneffizient und erfordern meist mehr Energie als weniger „hochwertige“. Bei allen betrachteten Bauproduktgruppen gibt es neben der Verwendung im Hochbau auch sinnvolle Einsatzbereiche im Tief-, Landschafts- und Gartenbau. Entscheidend ist, dass die Recyclingprodukte nachgefragt werden und endliche Primärstoffe funktional äquivalent ersetzen. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Ziegelsplitt. Dieser wird nur in geringen Mengen im Hochbau verwendet, kann jedoch sinnvoll als Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen in Tragschichten verwendet werden und hat vor allem als Vegetationssubstrat in Extensivbegrünungen sowie für technische Beläge und im Wegebau einen breiten Einsatzbereich.

Die Einsatzmöglichkeiten von Recyclingmaterialien im Landschafts-, Garten- und Tiefbau sollten nicht als „minderwertig“ abgetan werden. Gerade mineralische Massenbaustoffe haben in diesen Bereichen geringere Aufbereitungsaufwände (geringerer Energieverbrauch und weniger spezifische CO₂-Emissionen je Substitut). Wichtig ist, dass Bauabbruch so lange wie möglich recycelt wird und nicht beseitigt und aus dem Nutzungskreislauf ausgeschleust werden muss.

Die Befürchtung, dass das Recycling teilweise mit einem deutlich höherem energetischen Aufwand verbunden ist als die Bereitstellung von Primärstoffen trifft i. d. R. nicht zu (Ausnahme: Gipskartonplatten sowie Steinwolle und teilweise Beton, sofern nachträgliche Rezepturveränderungen mit berücksichtigt werden). Die Bauproduktgruppen Steinwolle und Beton zeigen auf, dass eine Gegenüberstellung von Energiewerten zur Dekomposition von Rückbaumaterial zu Sekundärstoffen und zur Primärstoffherstellung zu kurz gegriffen ist. Die Recyclingprozessketten müssen bis zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz des Substituts bzw. bis zum Einsatzort gedacht werden. Erst unter Berücksichtigung der Unterschiede (Rezeptur, Verfahrensschritte, Transporte) zwischen dem Standardherstellungsprozess und der Herstellung von Bauprodukten mit RC-Anteilen können Aussagen über die energetischen Vor- oder Nachteile von Recycling getroffen werden. Den massebezogenen Einsparpotenzialen in Tonnen stehen im Durchschnitt mehr oder weniger große energetische Einsparungen gegenüber. Recycling lohnt sich: es hilft Kreisläufe zu schließen, Ressourcen zu schonen, CO₂ einzusparen, und in den meisten Fällen profitieren die Bauprodukthersteller durch einen geringeren Energieverbrauch.

6. Literatur

- AGPU (2016): Alles über PVC - Von der Herstellung bis zum Recycling, https://www.agpu.de/wp-content/uploads/2016/03/AGPU_AllesueberPVC_DE.pdf, zuletzt aufgerufen am 26.02.2019
- Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel (2015): EPD (Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) für Mauerziegel (Dämmstoff gefüllt), Deklarationsnummer EPD-AMZ-20140245-ICG1-DE, August 2015. https://www.lebensraumziegel.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Downloads/PDF_Mauerziegel_Daemmstoff-verfuellt.pdf; zuletzt aufgerufen am 30.04.2019.
- Baitz, M. et al. (2004): "PVC - Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials"; Commissioned by the European Commission, April 2004; <http://www.pvc.org/upload/documents/PVC-final-report-lca.pdf>, zuletzt aufgerufen am 26.02.2019
- Baunetz Wissen (2019): <https://www.baunetzwissen.de/>
- Baustoff Recycling Bayern e.V. (2019): RC Ziegel; <https://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/49>. Zuletzt abgerufen am 15.01.2019.
- Baustoff Recycling Bayern e.V. (2019): RC Ziegel; <https://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/49>. Zuletzt abgerufen am 15.01.2019.
- BBodSchV: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung: Ausfertigungsdatum: 12.07.1999; Zuletzt geändert durch Art. 3 Abs. 4 V v. 27.9.2017; <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv/BBodSchV.pdf>; zuletzt aufgerufen am 16.03.2019.
- BBS (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (Hrsg.), Berlin.
- Becke, A.; Reiners, J.; Sülün, C. (2014): Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton; InformationsZentrum Beton GmbH; Verlag Bau+Technik GmbH; Düsseldorf
- Beckert, J.; Einbrodt, H.J.; Fischer, M. (1995): Bericht und gutachterliche Stellungnahme über Untersuchungen zur gesundheitlichen Beurteilung von Naturgips und REA-Gips aus Kohlekraftwerken im Hinblick auf deren Verwendung zur Herstellung von Baustoffen, 1995
- Beerens, R.G.C. van Limpt, J. (2001), Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces, Proceedings of the 62. Conference on Glass Problems at University of Illinois at Urbana-Champaign, 16.-17. October 2001
- BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf
- Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz. <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv/BJNR155400999.html>
- Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2013): Gips-Datenbuch; Berlin; Mai 2013.
- Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2018): KALKSANDSTEIN – Planungshandbuch Planung, Konstruktion, Ausführung, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf; Auflage 7 – Stand 05/2018;

https://www.kalksandstein.de/bv_ksi/binaries/content/59667/file_planungshandbuch_auflage7_gesch_de.pdf, zuletzt abgerufen am 11.02.2019.

Collart, O.; Ligot, B. Coppens, A.; Lambrechts, B.; Soares, L. (2017): LAYMAN'S REPORT: LIFE PROJECT: FLAT TO FLAT (LIFE12ENV/BE/000214); Demonstration of an innovative fine crushing method for glass and alternative cullet in flat glass production.

Consultic (2011): Wissens- und Innovationsnetzwerk Polymertechnik: Studie „Produktion, Verbrauch und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011“, Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH. Kurzfassung: https://wip-kunststoff-fe.de/wip/fileadmin/user_upload/news_downloads/Kunststoff_Endbericht_2011_31_08_2012_Kurzversion.pdf, zuletzt aufgerufen am 26.02.2019

CreaCycle (2016): PolyStyrene Loop: CreaSolv® Demonstrationsanlage in Holland (NL) - EPS Recycling mit POP-Ausschleusung, <https://www.creacycle.de/de/creasolv-werke/polystyrene-loop-2016.html>

DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, 12.2010

DAfStb-Alkalirichtlinie:2013-10 nach DIN EN 2620, DIN EN 206-1, DIN 4226-100 und DIN 1045-2: DAfStb-Richtlinie - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton.

DBU (2016): Newsletter DBU aktuell Nr. 8, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, https://www.dbu.de/708artikel36998_2486.html, zuletzt aufgerufen am 15.03.2019

Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.; Reichenbach, J. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotential im Hochbau. Berlin: BBSR, online, 152 S. http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2013/Kreislaufwirtschaftspotential/01_start.html?nn=436654&First=true&docId=1153180

Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.; Reichenbach, J. (2017): Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Berlin: BBSR, Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, 86 S.

Destatis (2016): Umwelt. Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1, Statistisches Bundesamt.

DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

DIN 4226-100:2002-02:Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen

DIN EN 12620:2013-07: Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2013

DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013, <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15804/195229515>.

DIN EN 18035-5:2007-08: Sportplätze – Teil 5: Tennenflächen.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/wdc-beuth:din21:96937060>

DIN EN 206-1:2001-07: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000

- DüMV: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln; Ausfertigungsdatum: 05.12.2012; Zuletzt geändert durch Art. 3 V v. 26.5.2017; https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf; zuletzt aufgerufen am 16.03.2019.
- Düngemittelverordnung (DüMV): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz. https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf
- Eden, W. (1994): Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess. Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Forschungsbericht Nr. 80. Hannover 1994.
- Eden, W. (2010): Recyclingmöglichkeiten für Kalksandsteine, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Präsentation 23.09.2010, http://www.abw-recycling.de/r10/18_Eden.pdf, zuletzt aufgerufen am 03.04.2019.
- ERFMI (2013): EPD (Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) für Heterogeneous polyvinyl chloride floor coverings according to EN ISO 10582, European Resilient Flooring Manufacturers' Institute (ERFMI vzw), Deklarationsnummer EPD-ERF-2013211-E, April 2013.
- EUMEPS (2015): Non-profit foundation under Dutch law „Polystyrene Loop“; press release; November 2015; https://www.creacycle.de/images/2015.10.28_Polystyrene_loop_foundation.pdf
- FLL-Dachbegrünungsrichtlinien (2018): Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltungen von Dachbegrünungen; Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.; 6. Ausgabe; 2018.
- FLL-Empfehlungen für Dachbegrünungen (2008): AK und RWA Dachbegrünung. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. <https://www.fll.de/fachgremien/bauwerksbegruenung/dachbegruenung.html>
- Founti, M.; Marlet, Ch.; Della Sala, L.; Pichon, T. (2015): Gypsum to Gypsum: From production to recycling: a circular economy for the European gypsum Industry with the demolition and recycling Industry. Eurogypsum.
- Frerichs Glas GmbH (2012): EPD (Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) für Flach-, Einscheibensicherheits- und Verbundsicherheitsglas, Deklarationsnummer M-EPD-FEV-001008, Mai 2012.
- Großen, T. & Kurkowski, H. (2013): Der Einsatz von Recycling-Baustoffen im GaLaBau: Aktuelle Entwicklungen (2013); veröffentlicht in: Neue Landschaft 12/2013, Fachzeitschrift für Garten-, Landschafts-, Spiel- und Sportplatzbau, Patzer Verlag GmbH & Co. KG, Berlin – Hannover, 2013.
- GVSS (2015): Asbesthaltige Spachtelmassen und Fliesenkleber: Bauten vor 1995 zu mindestens einem Viertel betroffen, Gesamtverband Schadstoffsanierung e.V. (GVSS), Pressemitteilung, Berlin, Mai 2015, http://www.gesamtverband-schadstoff.de/files/asbesthaltige_spachtelmassen_und_fliesenkleber_in_geb_uden.pdf?src=aspcu&typ=pdf&cid=4351, zuletzt aufgerufen am 18.02.2019
- Hendriks, Ch., F. (2000): The Building Cycle. Aeneas technical publishers. The Netherlands 2000.

- IBU 2018: Institut Bauen und Umwelt. EPD Programm. <https://ibu-epd.com/epd-programm/>
- ifeu (2018): Bauen mit RC-Beton, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, <http://www.rc-beton.de/rc-beton.html>, zuletzt aufgerufen am 18.02.2019
- International Energy Agency (2007), Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions, OECD/IEA, Paris, 2007. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/tracking_emissions.pdf
- Kolb, B. (2004): Nachhaltiges Bauen in der Praxis. Blok Verlag, Auflage: 1, 15. Juni 2004
- LAGA 20 (2003): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen – Technische Regeln; Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20; 5. Auflage; November 2003.
- LAGA M20: Links zu den länderspezifische Regelungen zur Umsetzung der LAGA M20. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. <https://www.laga-online.de/Links-51-Links-zu-M20.html>
- Leismann, A.; Caparros, M. G.; Nykiel, G. (2006): Verfahren zur Herstellung einer mineralischen Schmelze sowie Formsteinen; German Patent DE102005038032; Deutsche Rockwool Mineralwoll GmbH; <http://www.freepatentsonline.com/DE102005038032A1.html>. zuletzt aufgerufen am 29.04.2019.
- LfU (2012): Abfallratgeber Bayern; Bayerisches Landesamt für Umwelt Informationsstelle Kreislaufwirtschaft des LfU; infoBlätter Kreislaufwirtschaft; Stand 2/2012; https://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/entsorgung_einzeln_abfallarten/doc/alholz.pdf
- Mettke, A.; Heyn, A. (2010): Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), Brandenburgische Technische Universität, Cottbus, 2010
- Müller, A. (2018): Baustoffrecycling - Entstehung - Aufbereitung – Verwertung, Springer-Verlag GmbH, 11/2018
- Müller, A.; Kurkowski, H. (2017): Potentialstudie zur Umsetzung eines Re-/Upcyclingkonzeptes im Gebiet der IRR GmbH – Schwerpunkt mineralische Baustoffe. Weimar/Soest: Schlussbericht, 188 S. http://rheinisches-revier.de/fileadmin/user_upload/pdf/allgemein/irr_Endfassung_Potentialst_KWB_15-10-2017_01.pdf.
- ÖkobaDat (2016): Prozess-Datensatz: Kies 2/32, https://www.oekobaDat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225&stock=OBD_2019_I&lang=de, zuletzt aufgerufen am 15.03.2019
- ÖkobaDat (2018): Informationsportal Nachhaltiges Bauen. <http://oekobaDat.de/datenbank/browser-oekobaDat.html>.
- ÖKOPOL GmbH, 2014: Ermittlung des Standes der Technik in Deutschland bei der Herstellung von Platten auf Holzbasis: Spanplatten, Faserplatten und OSB. TEXTE 70/2014, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, August 2014
- Pittsburgh Corning Europe NV (2015): EPD (Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) für FOAMGLAS® W+F and FOAMGLAS® T3+, Deklarationsnummer EPD-PCE-20150042-IBA1-EN, August 2015
- QKE (2016): EPD (Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) für Kunststofffenster aus PVC-U, Qualitätsverband Kunststoffherzeugnisse e.V. (QKE) und European PVC Window Profiles and

- Related Building Products Association ivzw (EPPA), Deklarationsnummer EPD-QKE-20150313-IBG1-DE, März 2016.
- RAL-GZ 253: RAL-GZ 253:2004-06 Dachsubstrate – Gütesicherung. DIN.
<https://www.din.de/de/meta/suche/62730!search?query=RAL-GZ+253>
- RECARBON (2011): Vergleichender Emissionsbericht von PVC-Granulat & PVC-Mahlgut, RE|CARBON Deutschland GmbH, 04/2011 (im Auftrag von Tönsmeier Kunststoffe GmbH & Co. KG)
- Rewindo (2019): Best Practice für die Umwelt – Werkstoffliches Recycling von PVC-Bauprodukten, <https://www.rewindo.de/rewindo-downloads/index.html>, zuletzt aufgerufen am 26.02.2019.
- ROCKWOOL (2018): EPD nach ISO 14025 und EN 15804 für Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich, DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG; Deklarationsnummer: EPD-DRW-20180118-IBC1-DE; Ausstellungsdatum: 27.08.2018, <https://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-at/downloads/nachhaltigkeit/wu-umwelt-produktdeklaration-epd-mittlere-rd-rockwool-at.pdf>, zuletzt abgerufen am 07.05.2019.
- Rosen, D. (2013): Recycling und Verwertung von keramischen Reststoffen. 52. Würzburger Ziegel-Lehrgang. Würzburg 2013.
- Schiller, G.; Deilmann, C.; Gruhler, K.; Röhm, P.; Reichenbach, J.; Baumann, J.; Günther, M. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. UBA-Texte 56/10, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 191 S.
- Schmidmeyer, S. (2014): Markt für mineralische Recycling-Baustoffe – Erfahrungen aus der Praxis, http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2014_mna/2014_mna_105_116_schmidmeyer.pdf, zuletzt aufgerufen am 18.02.2019.
- STV (2019): Standortkarten Asphalt, Baustoff-Recycling / Sand und Kies / Natursteinbetriebe / Transportbeton, Stein Verlag Baden Baden GmbH, <https://shop.stein-verlaggbmh.de/c/standortkarten>, zuletzt aufgerufen am 02.04.2019.
- SÜGB (2018): Umwelt-Produktdeklarationen nach ISO 14025 und EN 15804 - Durchschnitts-EPD für Gesteinskörnungen; Schweizerischer Überwachungsverband für Gesteinsbaustoffe; 01.10.2018; https://www.fskb.ch/wp-content/uploads/2018/11/CLEAR_2018-09-04_EP-Dokument-Gesteinskoernung_unterschrieben.pdf; zuletzt aufgerufen am 23.04.2019.
- TL Gestein-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsausschuss Gesteinskörnungen; FGSV-Verlag; 2008; Köln.
- TL Gestein-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. <https://d-nb.info/990549046/04>
- TL LW 13: Technische Lieferbedingungen für Böden, Gesteinskörnungen, Baustoffe und Baustoffgemische für den Bau Ländlicher Wege
- TL LW 16: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen, Baustoffe, Baustoffgemische und Bauprodukte für den Bau Ländlicher Wege. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. [https://www.dwa.de/dwa/shop/produkte.nsf/files/TL_LW%2016.pdf/\\$file/TL_LW%2016.pdf](https://www.dwa.de/dwa/shop/produkte.nsf/files/TL_LW%2016.pdf/$file/TL_LW%2016.pdf)

- TL SoB-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau; Teil: Güteüberwachung, Ausgabe 2004/ Fassung 2007.
- UBA (2007): Institut für Energetik und Umwelt gGmbH: Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung.- Endbericht.- Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA): 196 S., Leipzig
- UBA (Hrsg.) (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. Endbericht, UBA Texte 33/2017, Dessau-Roßlau, 109 S.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekobilanzielle-betrachtung-des-recyclings-von>
- UM (2017): Leitfaden zum Einsatz von R-Beton, Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg, September 2013, https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden_R-Beton.pdf, zuletzt aufgerufen am 18.02.2019
- UM BW (2013): Stoffkreisläufe von RC-Beton, Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg, Dezember 2013, https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/BW_Stoffkreislaeufe_7214.pdf, zuletzt aufgerufen am 18.02.2019
- VDI 4600 (2012): Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden.
https://m.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1807038.pdf.
- Vetter, M. (2016): PVC-Recycling und Urban Mining - Mengensteigerung durch neue Wege, 25. Seminar „Kunststoffrecycling in Sachsen“, 10. Mai 2016, http://ig-kuris.de/daten/kunststoffrecycling_2016/08_Vortrag_Vetter.pdf, zuletzt aufgerufen am 26.02.2019
- Wagner, T. (2018): Gips-Rohstoffsicherung in Zeiten der Energiewende. Unterlage zur Fahrt der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ in das Lausitzer Revier am 11. Oktober 2018.
- WSB-Kommission (2019): Abschlussbericht Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ Beschluss vom 26.01.2019.
- WECOBIS (2018): Rezyklierte Gesteinskörnung, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) und Bayerische Architektenkammer (ByAK),
<https://www.wecobis.de/en/bauproduktgruppen/grundstoffe-gs/gesteinskoernung-gs/rezyklierte-gesteinskoernung.html>, zuletzt aufgerufen am 18.02.2019
- Weigang (2013): Verteidigung einer bisher unveröffentlichten Dissertationsschrift an der TU Dresden: Vergleich der PVC-Herstellung zwischen dem Rohstoff Erdöl und den Rohstoffen Carbid / Recycling-PVC hinsichtlich Luftschadstoffen und Ökonomie. 2013
- Zinco (2018): Substrate und Systemerden für Dachbegrünungen, <https://www.zinco.de/substrate>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2019
- Zingk, M. (2009): Aufbereitung und Verwertung von Gipsplattenabfällen, Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Reststoffen mbH (GFR),
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwjY5pGszsvdAhXyk4sKHZqzCLUQFjACegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.vivis.de%2Fkostenfreie-artikel%2Fbeitraege%2Fcategory%2F98-bauabfaelle-und-sonstige-mineralische-nebenprodukte-und-abfaelle%3Fdownload%3D989%3Aaufbereitung-und-verwertung-von->

gipsplattenabfaellen%26start%3D40&usg=AOvVaw0KoLgXXAsayDbOjNik6Smk, zuletzt abgerufen am 20.02.2019

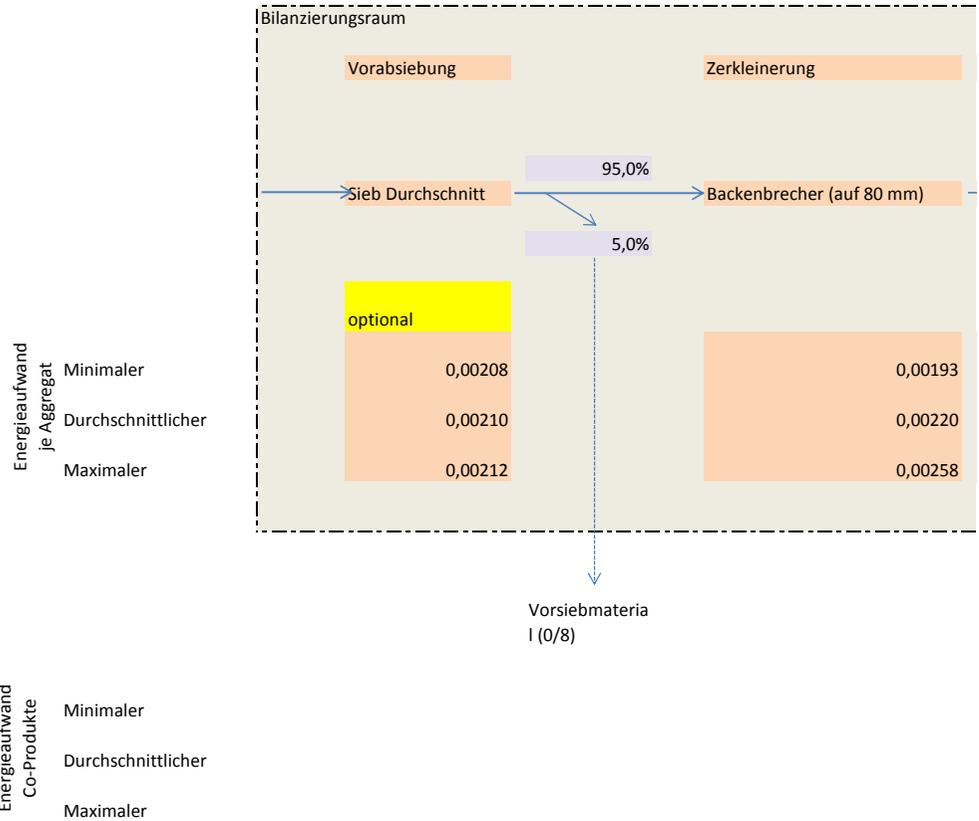
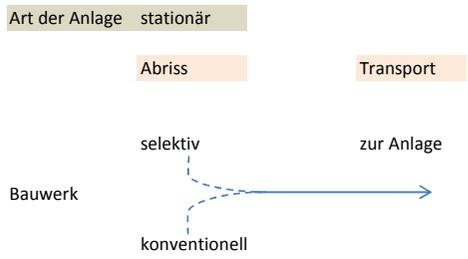
ZTV E-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (FGSV e. V.); letzte Überarbeitung 2017.

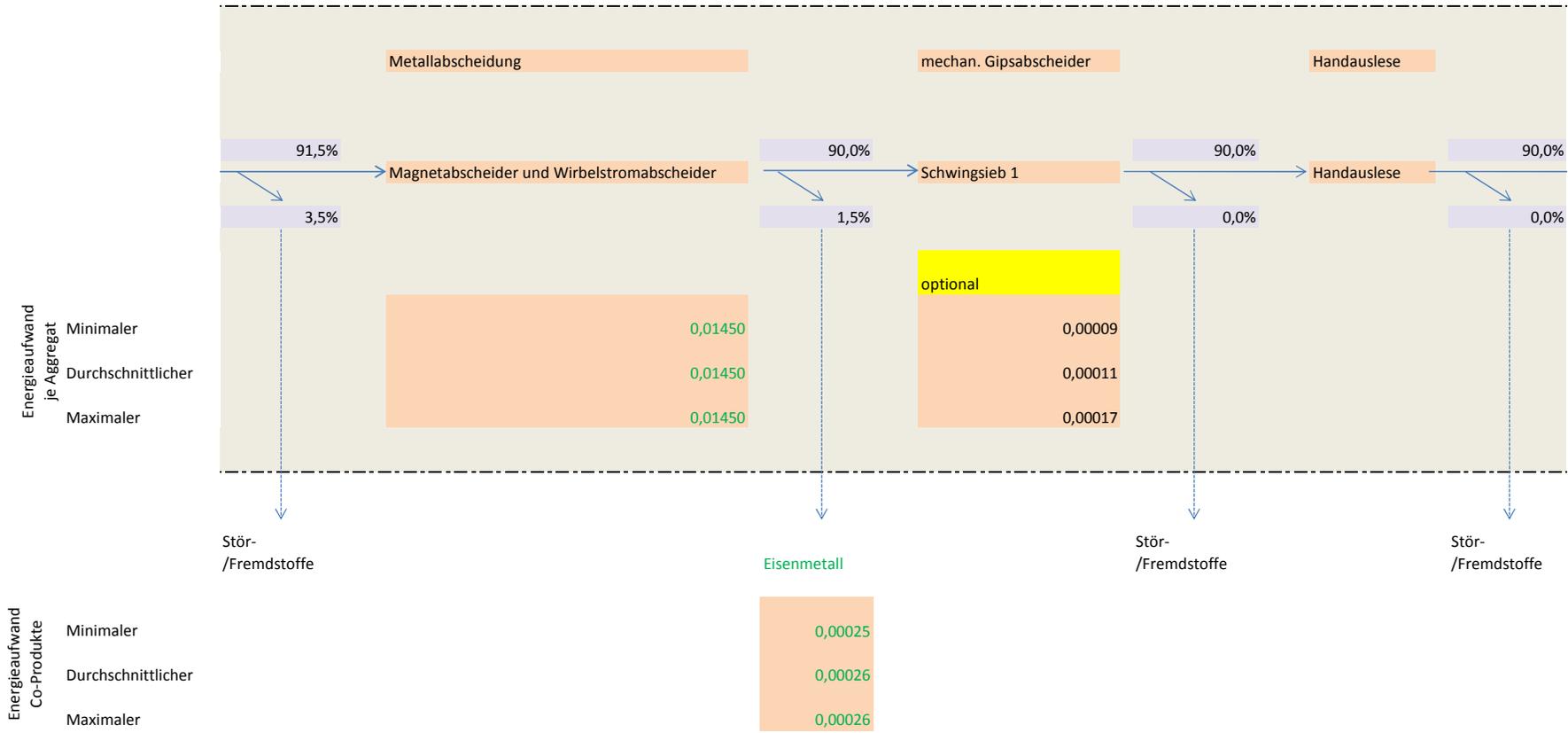
ZTV LW 16: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau Ländlicher Wege. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
[https://www.dwa.de/dwa/shop/produkte.nsf/files/ZTV_16.pdf/\\$file/ZTV_16.pdf](https://www.dwa.de/dwa/shop/produkte.nsf/files/ZTV_16.pdf/$file/ZTV_16.pdf)

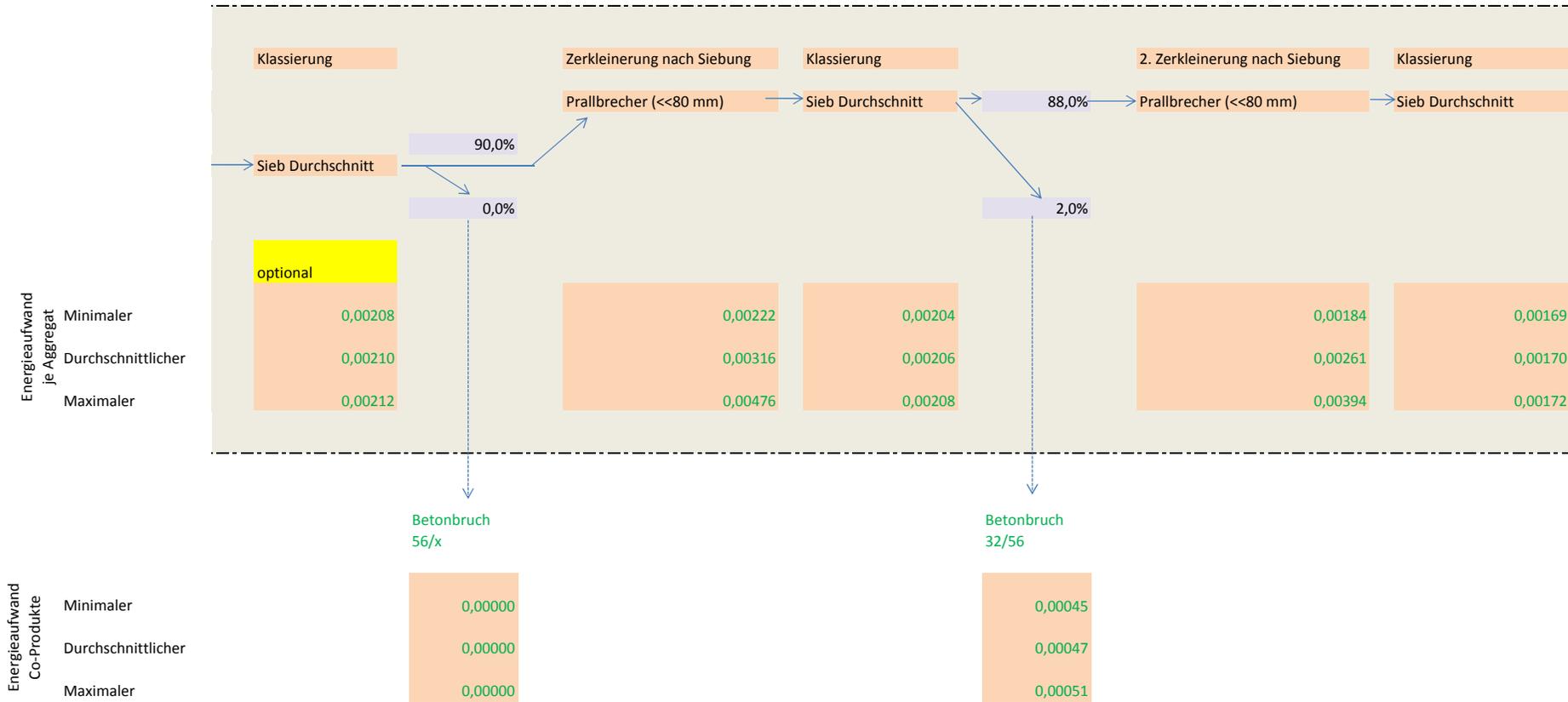
7. Anhang

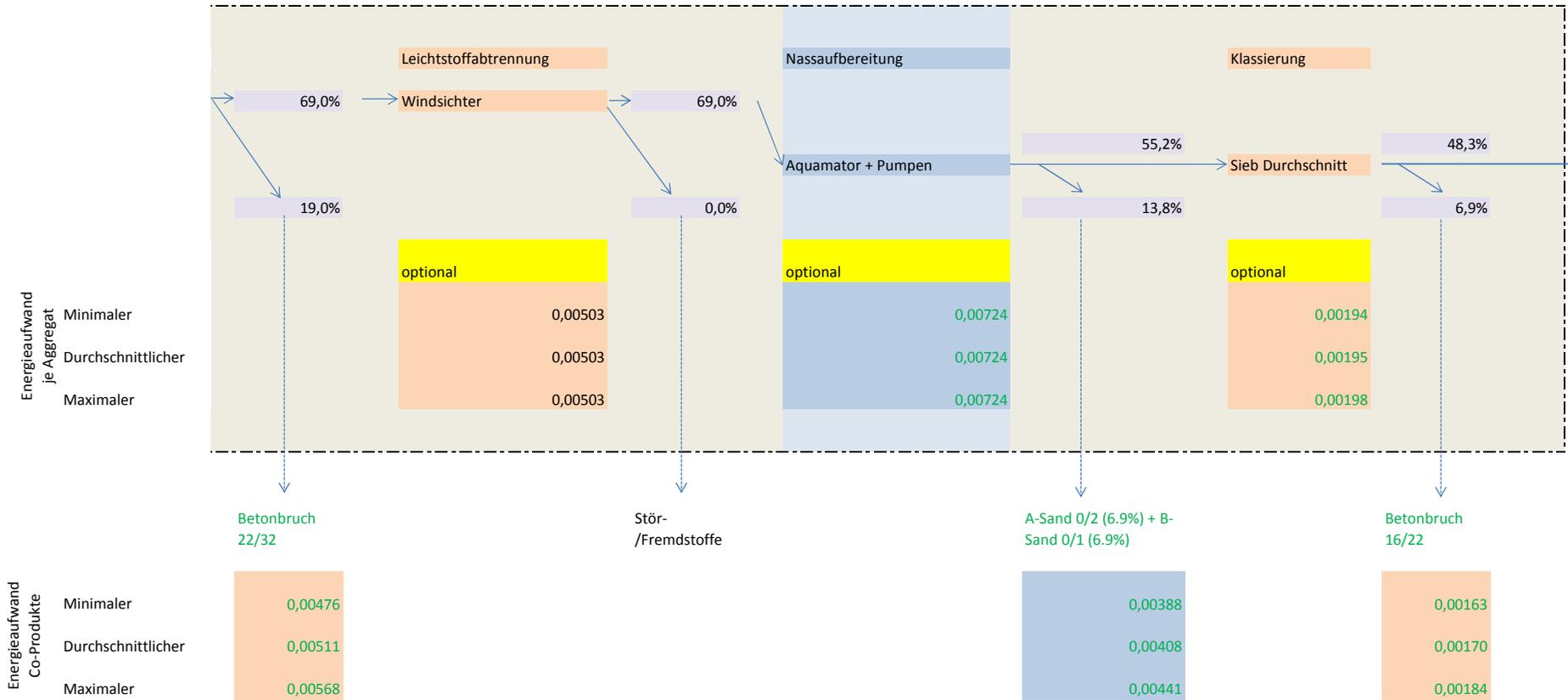
7.1 Flussbilder zu den untersuchten Prozessketten	A1
Beton R1-S1-E1	A1
Beton R2-S2-E1	A6
Beton R2-S3-E2	A11
Ziegel R1-S1-E1	A15
Ziegel R2-S2-E2	A20
Ziegel R3-S3-E3	A25
Ziegel R4-S4-E4	A30
Kalksandstein R1-S1-E1	A35
Kalksandstein R2-S2-E2	A40
Kalksandstein R2-S3-E3	A45
Gips R1-S1-E1	A50
Gips R2-S1-E2	A53
Flachglas R1-S1-E1/E2	A56
Mineralische Dämmung R1-S1-E1	A59
Mineralische Dämmung R2-S2-E1	A61
Kunststoffprofile R1-S1-E1/E2	A63
PVC-Bodenbeläge R1-S1-E1/E2	A67
7.2 Berechnungsgrundlagen der Energiekennwerte zur Herstellung von Primärstoffen	A71
7.2.1 Beton	A71
7.2.2 Ziegel	A78
7.2.3 Kalksandstein	A84
7.2.4 Flachglas	A85
7.2.5 Gips	A86
7.2.6 PVC	A90
7.2.7 Steinwolle	A91

7.1 Flussbilder zu den untersuchten Prozessketten Beton R1-S1-E1





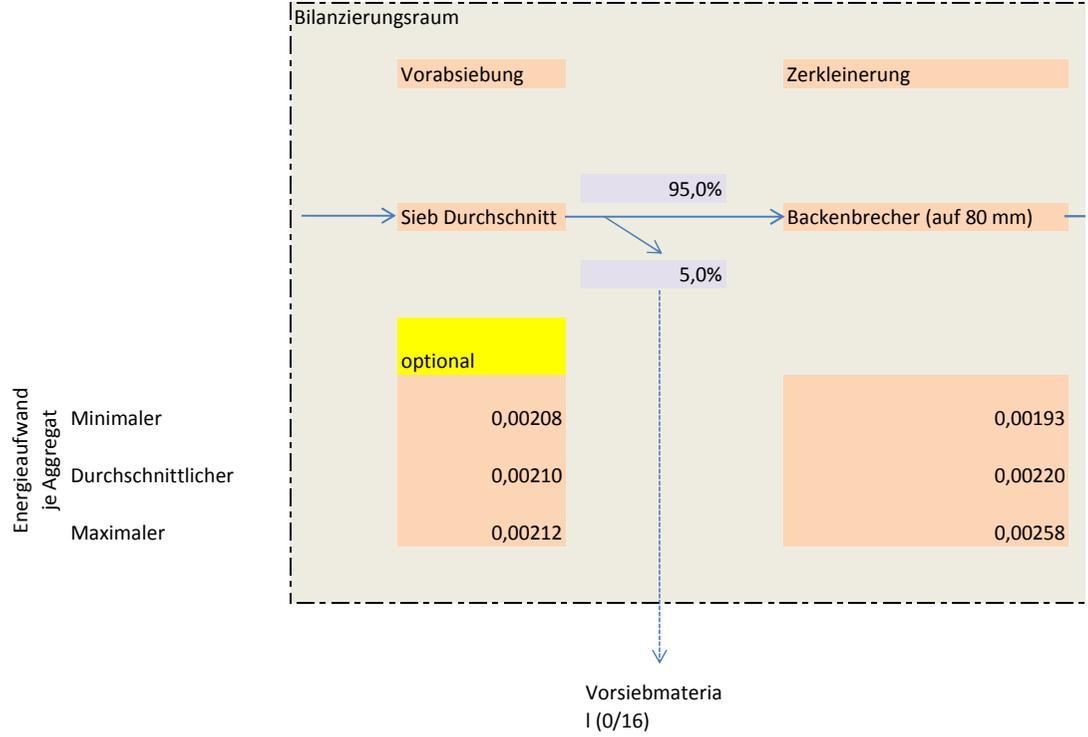
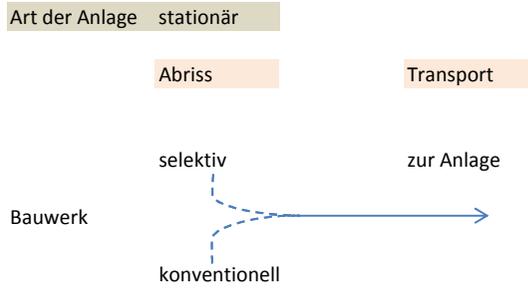




→ Output
 GK 8/16 (34.5%) + GK 2/8 (13.8%)

Energieaufwand je Aggregat		MJ/kg inkl.	MJ/kg ohne	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert abzgl. Allokation auf verwertbare Co-Produkte
		optional	optional				
Minimaler	Minimaler	0,0427	0,0242	0,0185	0,0335	0,0110	0,0225
	Durchschnittlicher	0,0448	0,0262	0,0185	0,0355	0,0116	0,0239
	Maximaler	0,0482	0,0296	0,0187	0,0389	0,0127	0,0262

Beton R2-S2-E1



Energieaufwand Co-Produkte

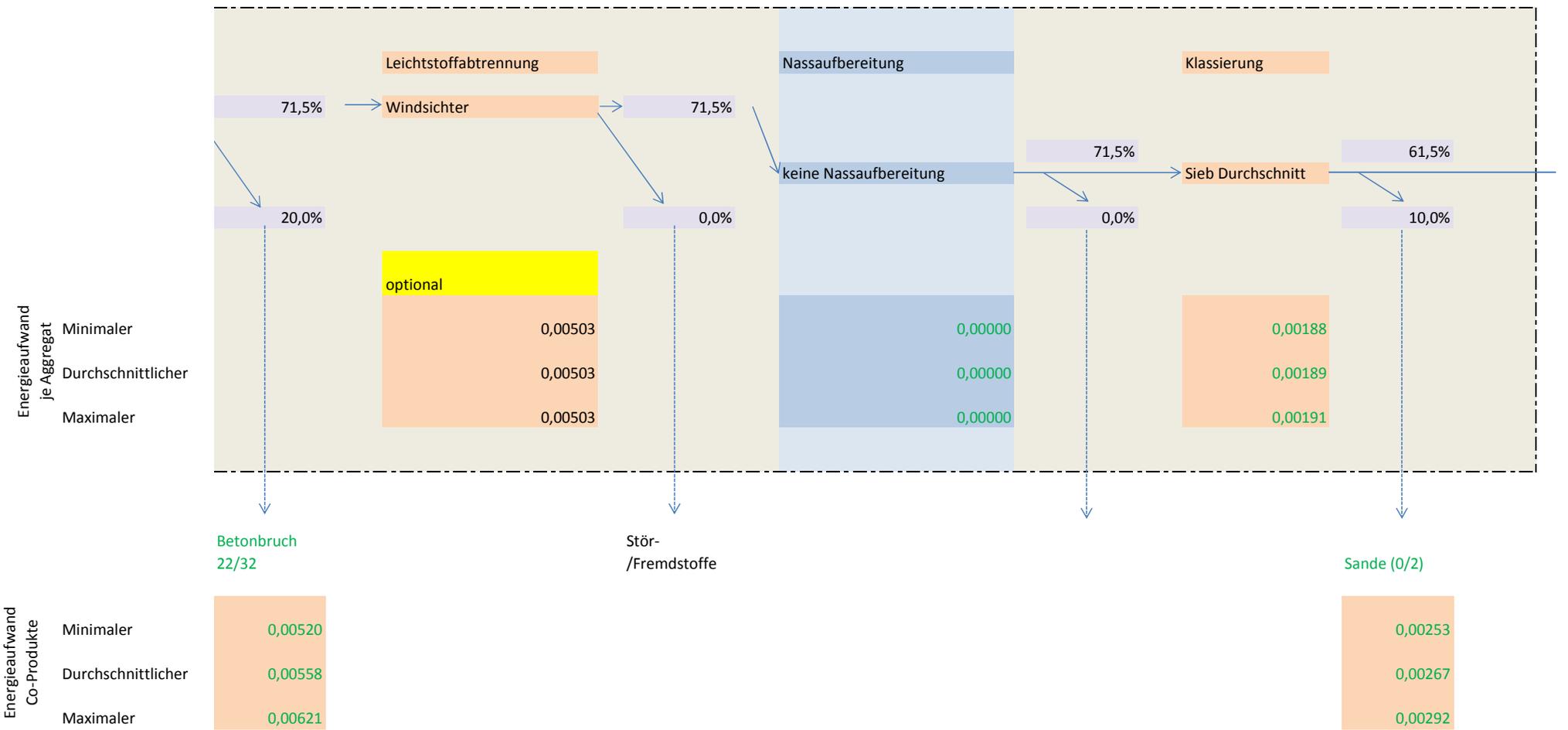
Minimaler

Durchschnittlicher

Maximaler







→ Output
GK 2/22

		MJ/kg inkl. optional	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co- Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Energieaufwand je Aggregat	Minimaler	0,0353	0,0239	0,0296	0,0085	0,0212
	Durchschnittlicher	0,0374	0,0250	0,0312	0,0090	0,0222
	Maximaler	0,0409	0,0268	0,0338	0,0099	0,0239

Beton R2-S3-E2

Art der Anlage stationär

Abriss Transport

selektiv zur Anlage

konventionell

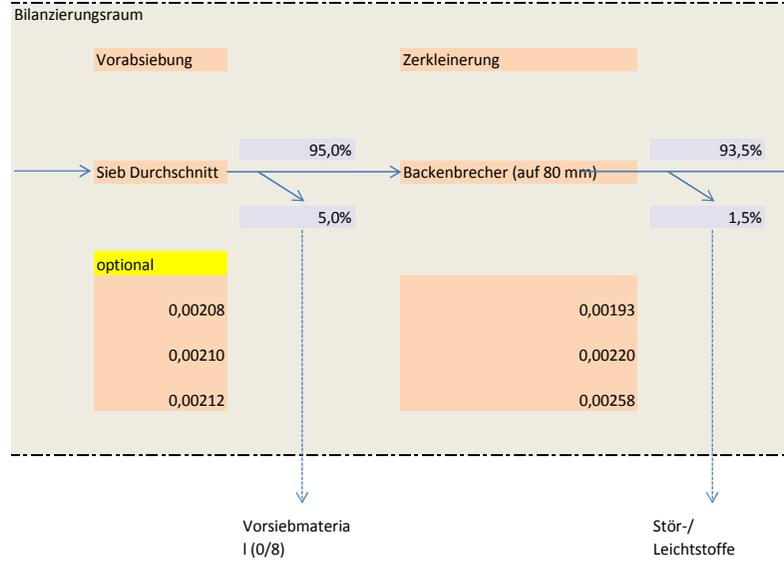
Bauwerk

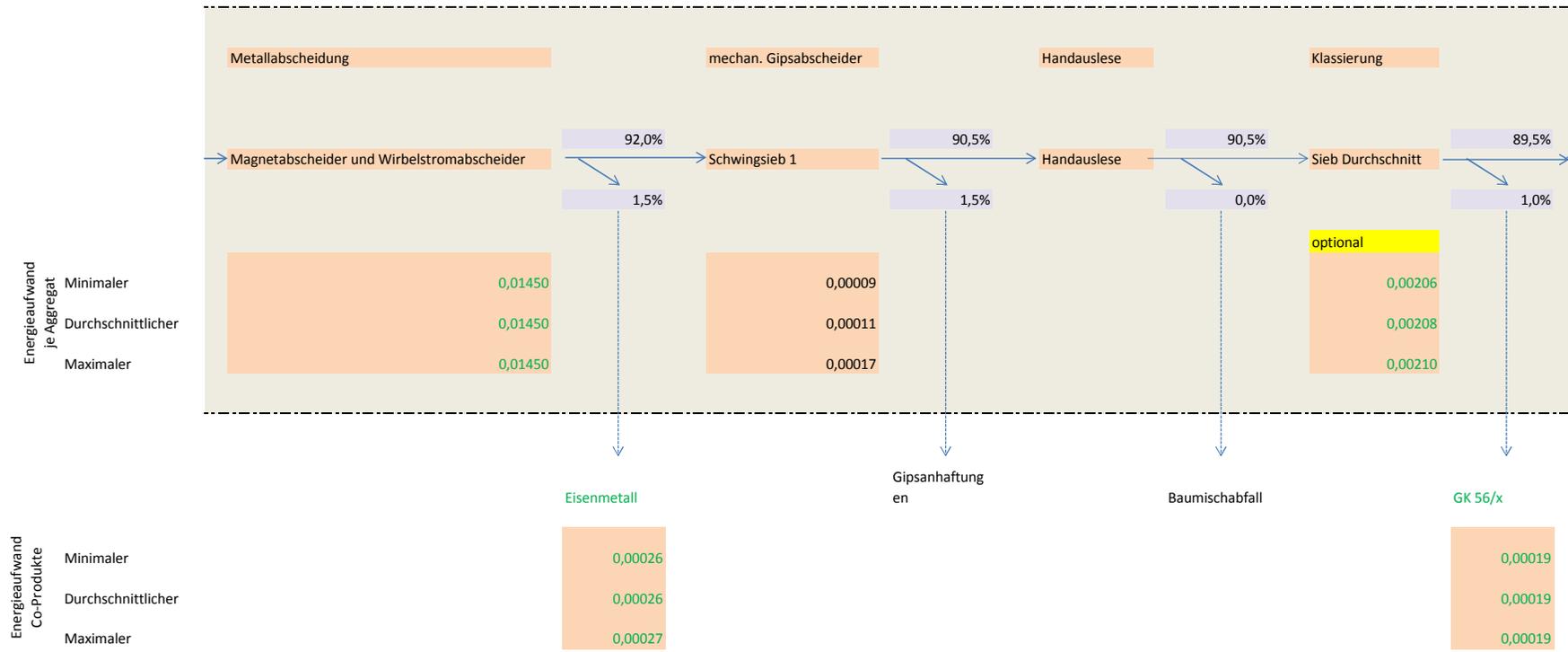
Energieaufwand
je Aggregat

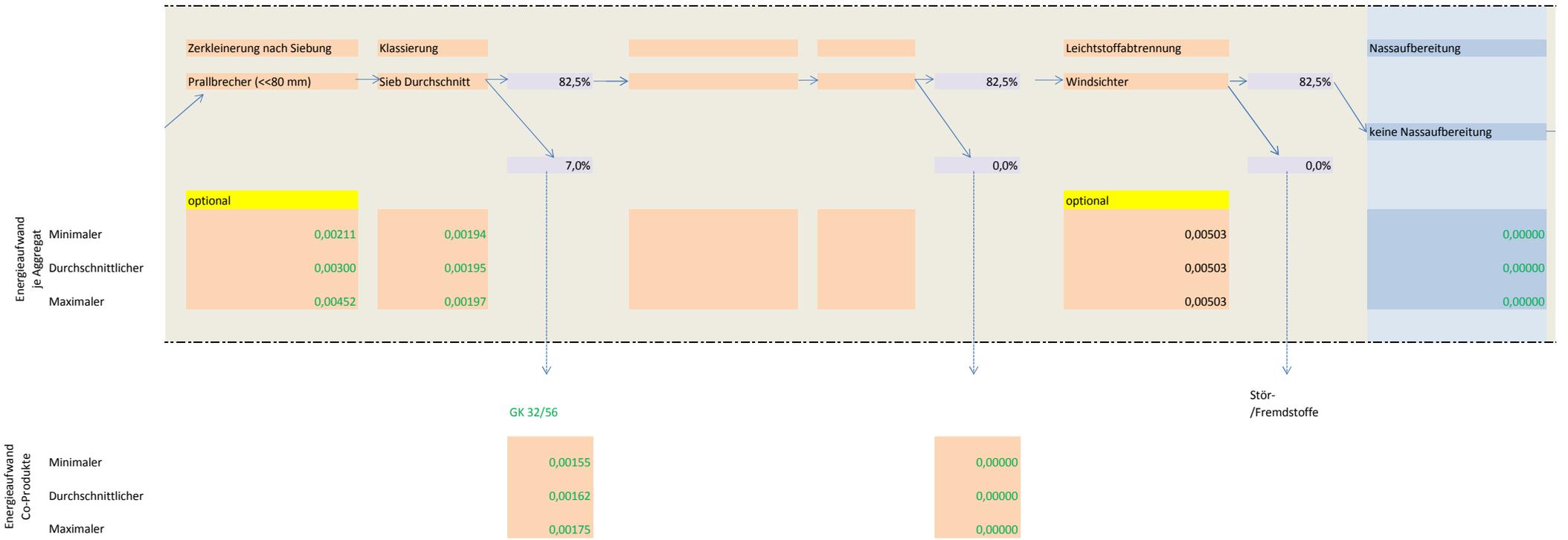
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

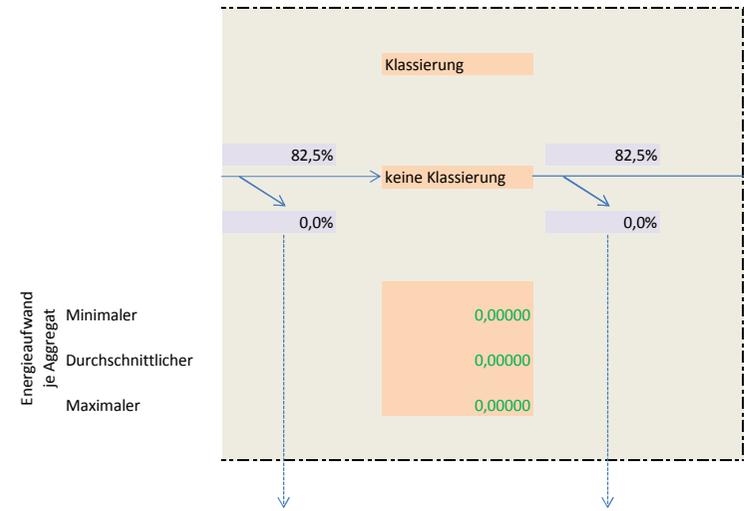
Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler







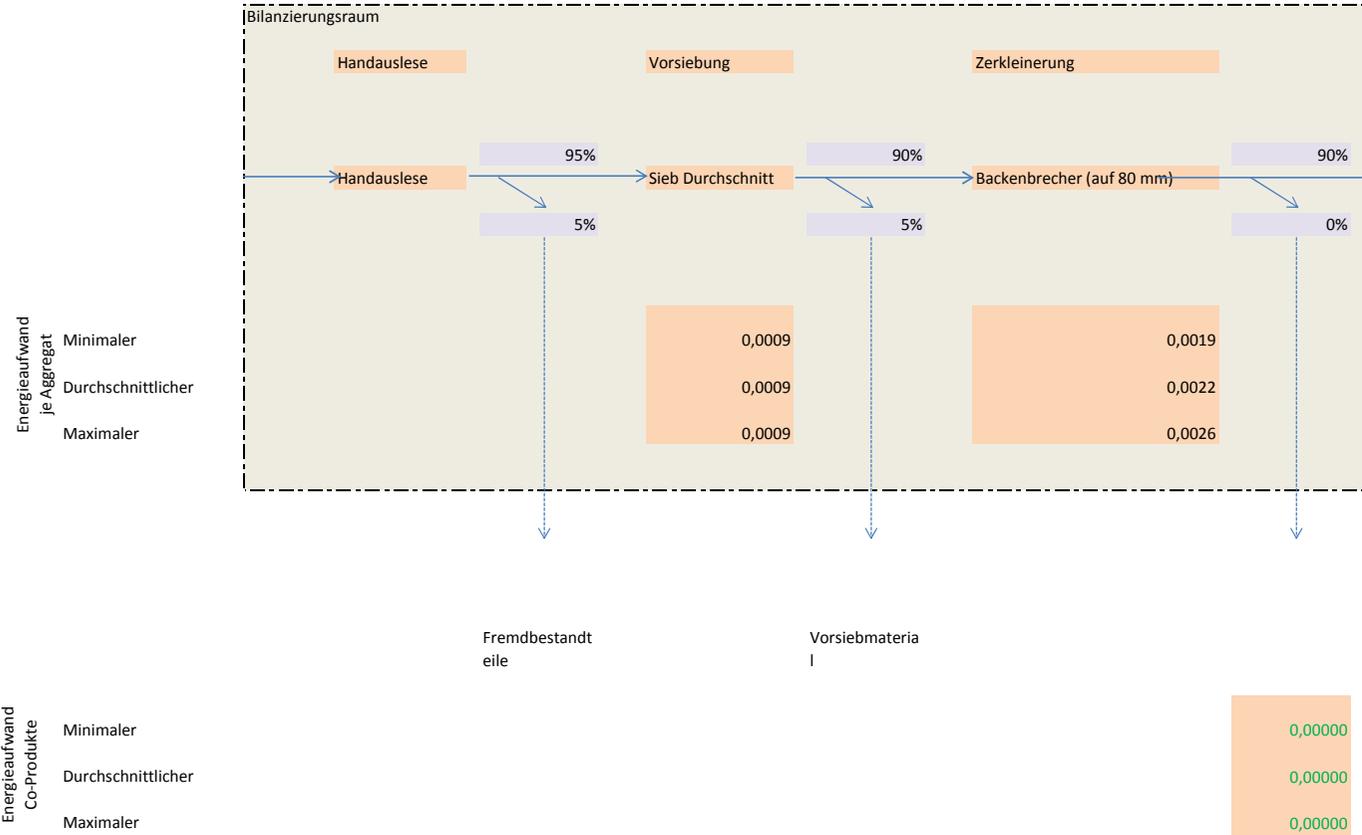
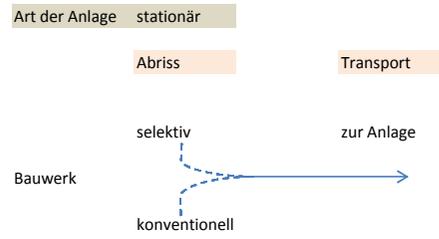


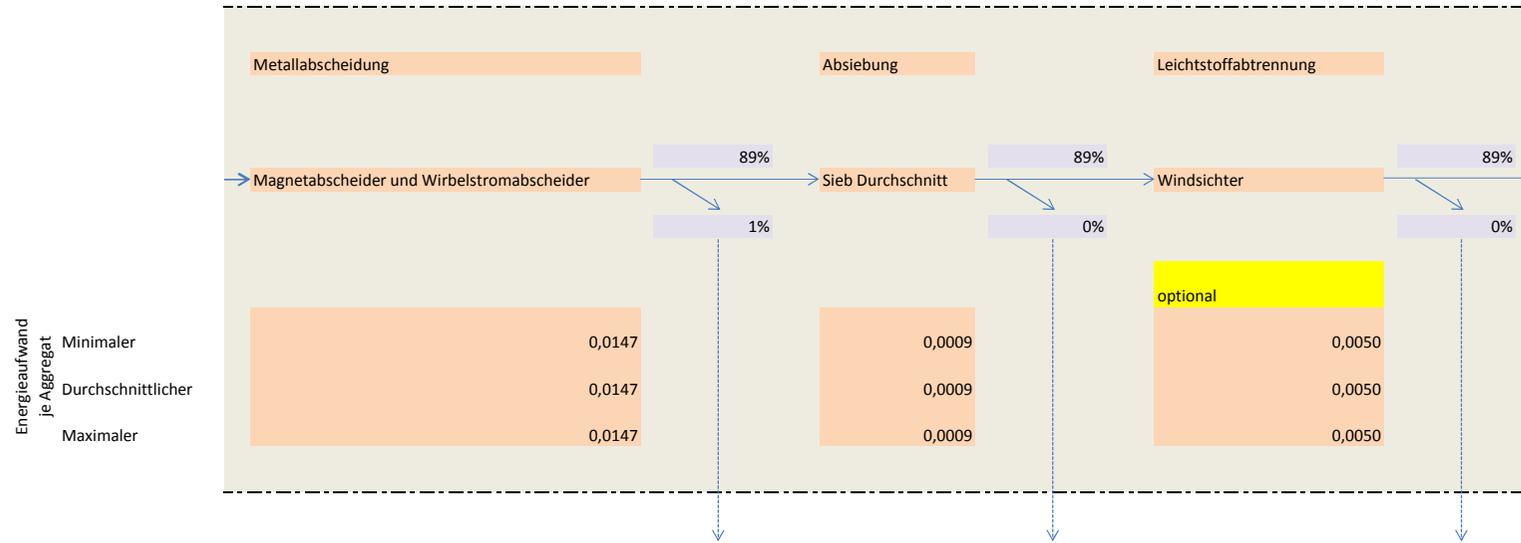
Output
GK 0/22 (56%) + GK 22/32 (31%)

MJ/kg inkl.	MJ/kg ohne optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-	Mittelwert minus Allokation auf
0,0297	0,0184	0,0241	0,0020	0,0221
0,0310	0,0188	0,0249	0,0021	0,0228
0,0330	0,0192	0,0261	0,0022	0,0239

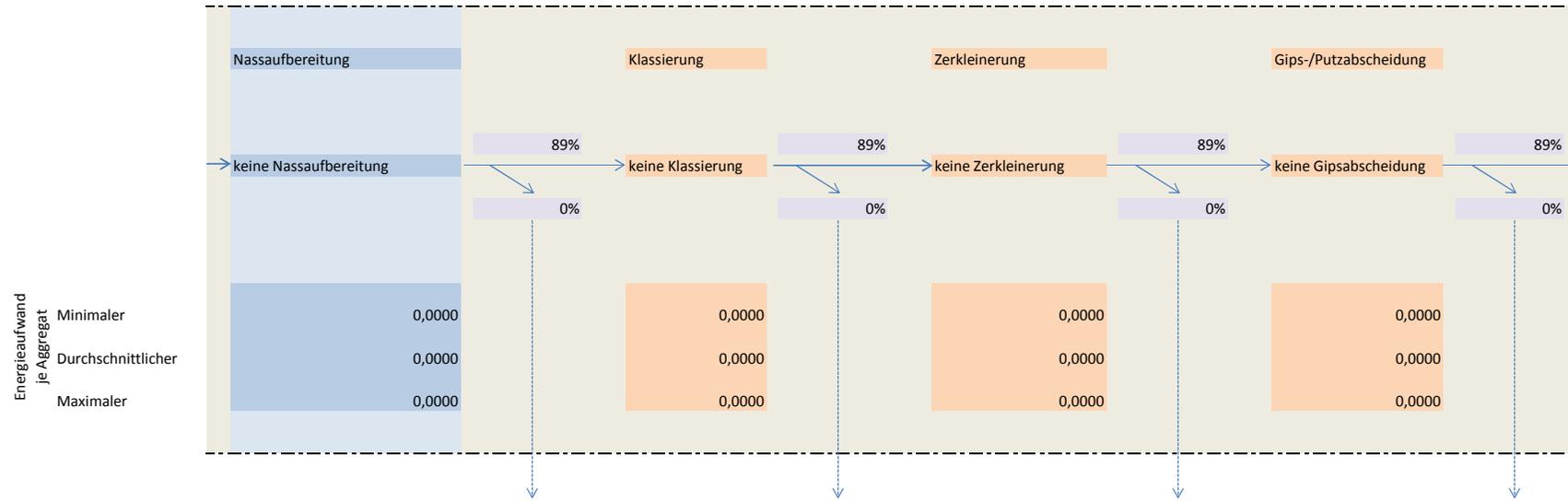
Energieaufwand Co-Produkte	Minimaler	Durchschnittlicher	Maximaler
Minimaler	0,00000	0,00000	0,00000
Durchschnittlicher	0,00000	0,00000	0,00000
Maximaler	0,00000	0,00000	0,00000

Ziegel R1-S1-E1



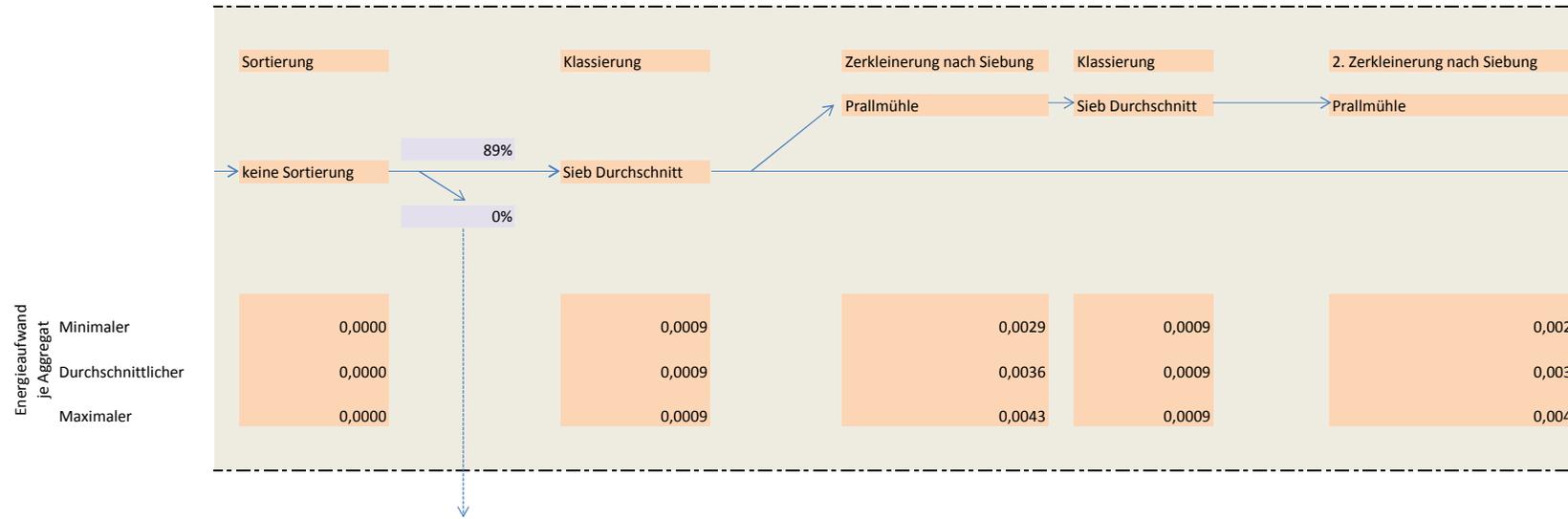


Scenario	Metalle
Minimaler	0,00016
Durchschnittlicher	0,00016
Maximaler	0,00016



Energieaufwand
Co-Produkte

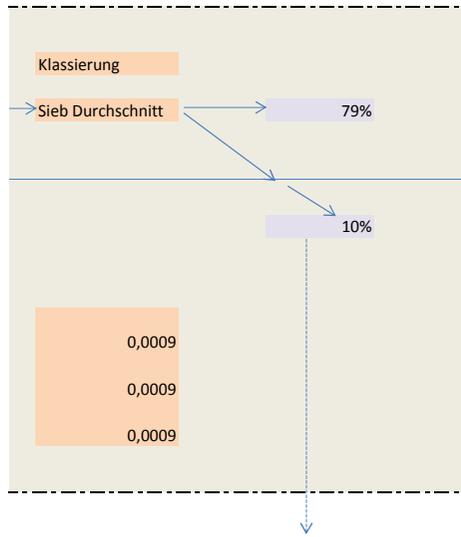
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler



Energieaufwand
Co-Produkte

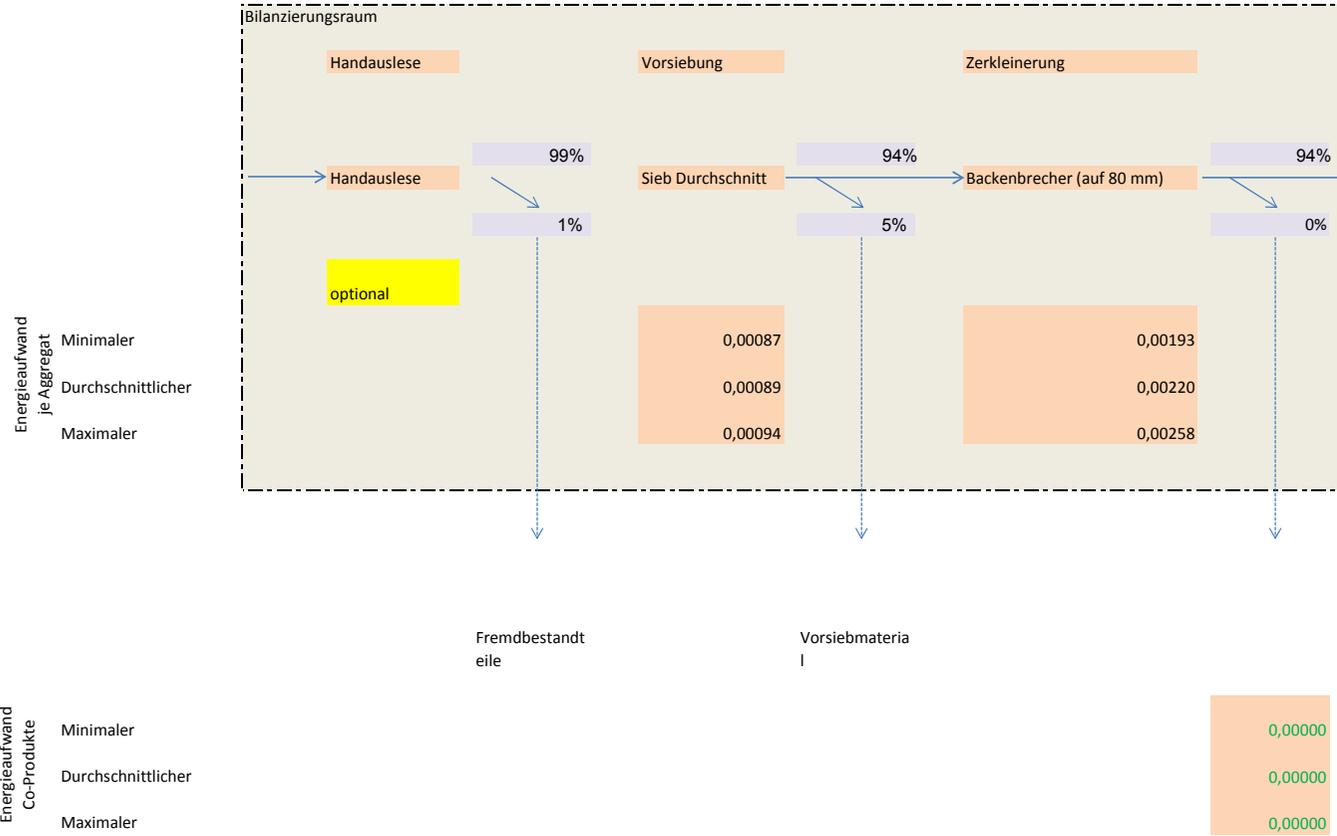
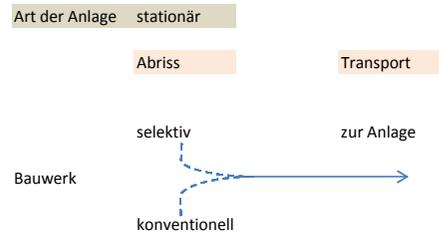
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

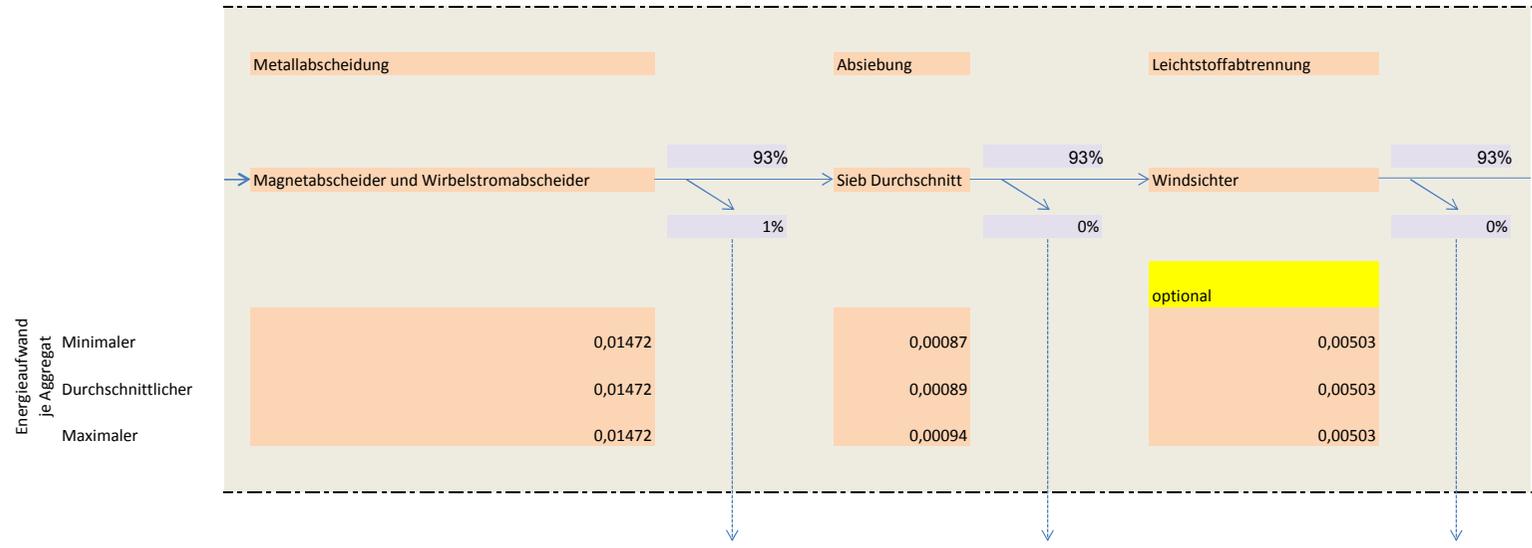
Energieaufwand
je Aggregat



MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,03193	0,02690	0,00503	0,02941	0,00016	0,02926
0,03366	0,02862	0,00503	0,03114	0,00016	0,03098
0,03560	0,03056	0,00503	0,03308	0,00016	0,03292

Ziegel R2-S2-E2

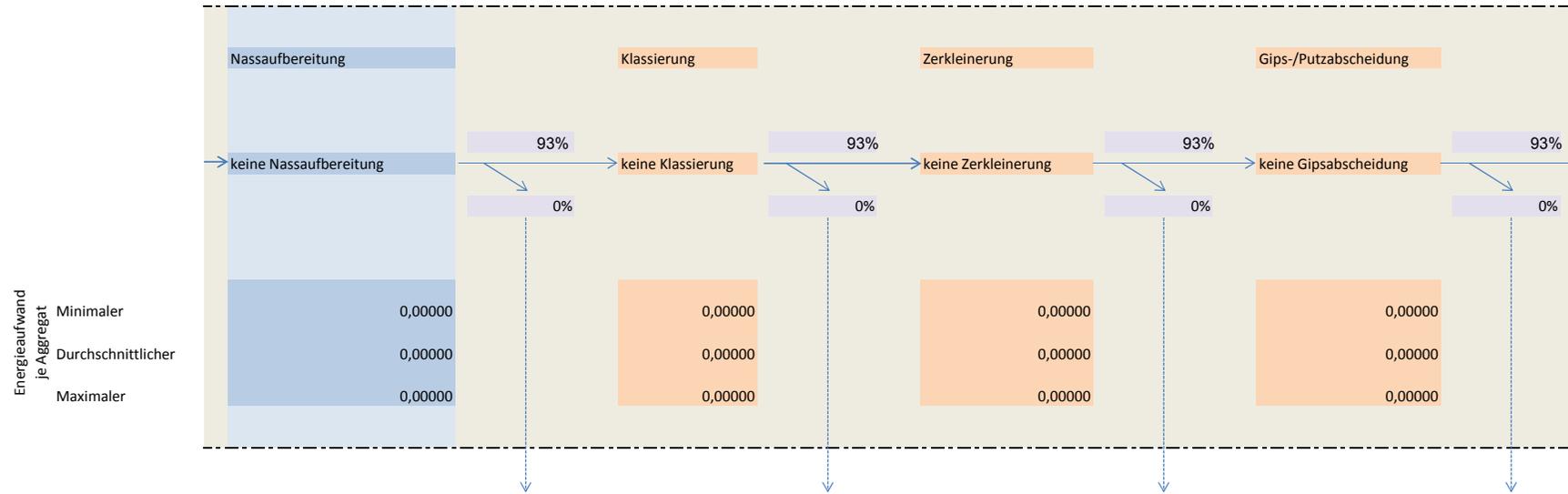




Energieaufwand Co-Produkte

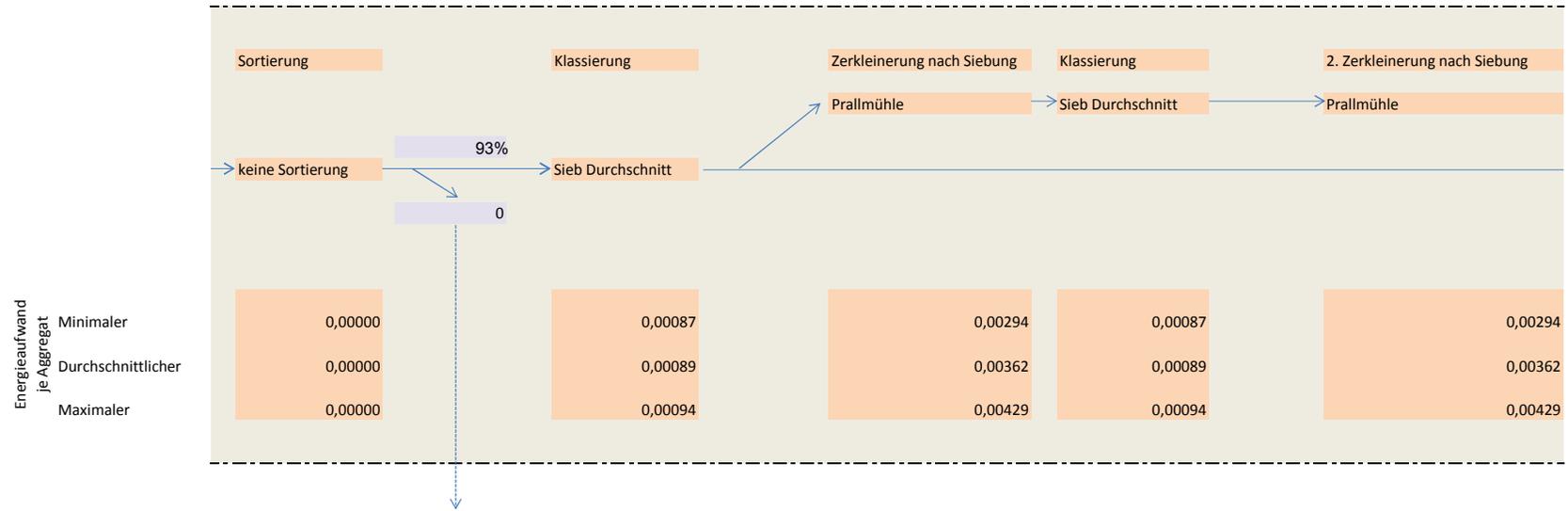
Metalle

Minimaler	0,00017
Durchschnittlicher	0,00017
Maximaler	0,00017



Energieaufwand
Co-Produkte

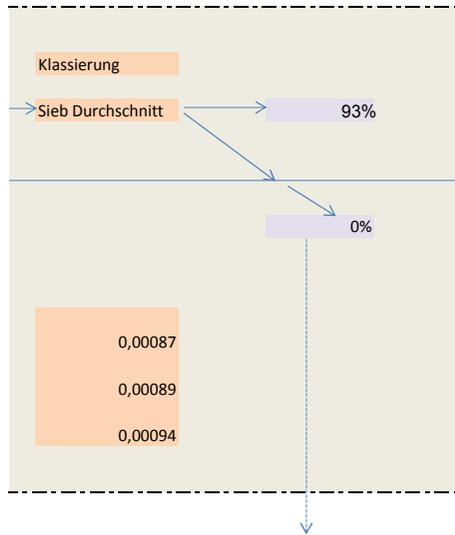
- Minimaler
- Durchschnittlicher
- Maximaler



Energieaufwand
Co-Produkte

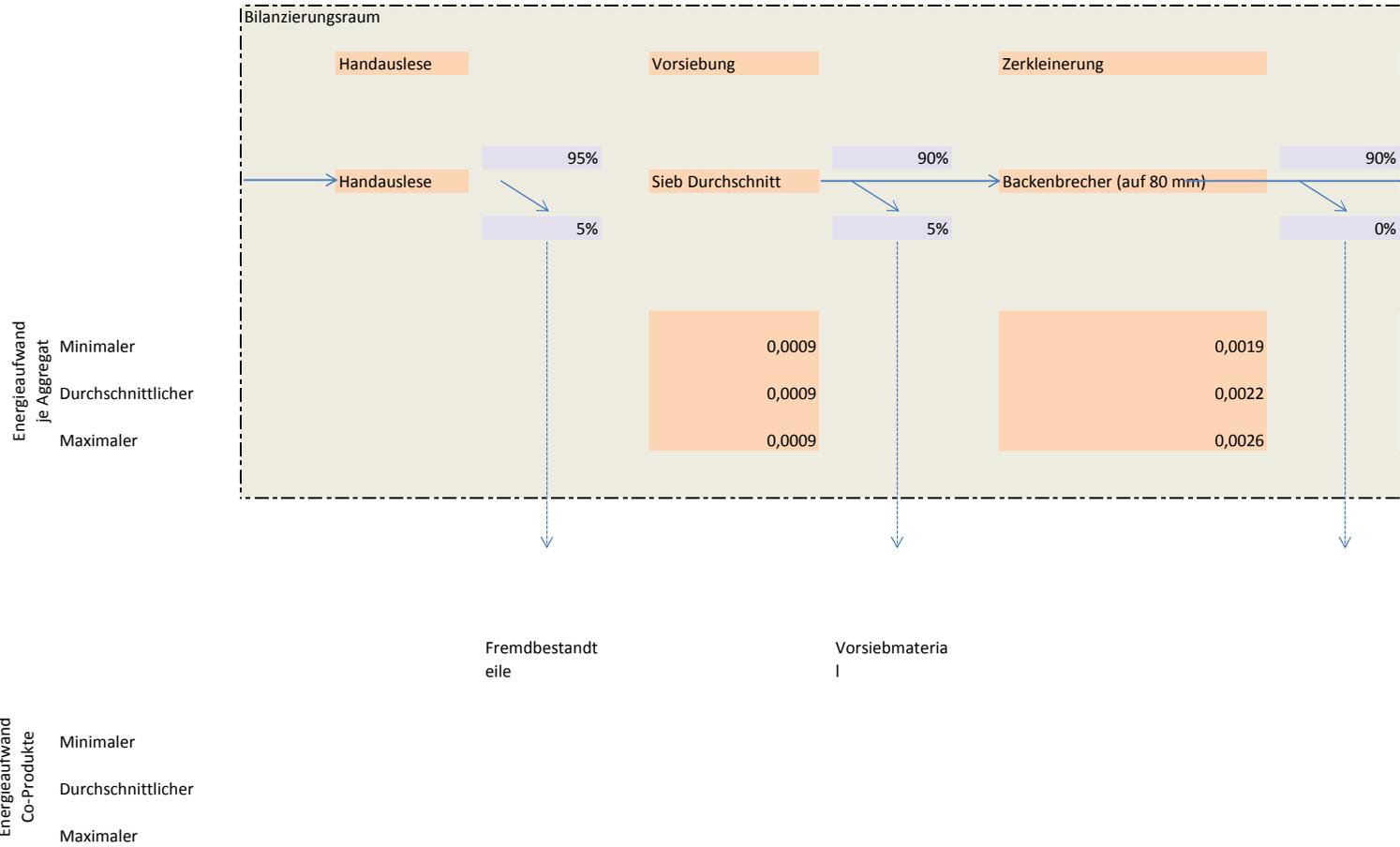
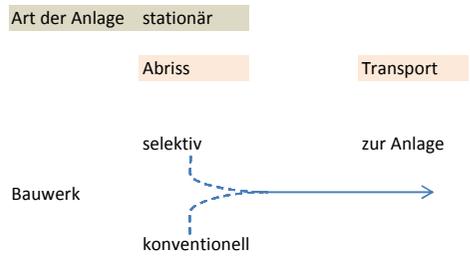
- Minimaler
- Durchschnittlicher
- Maximaler

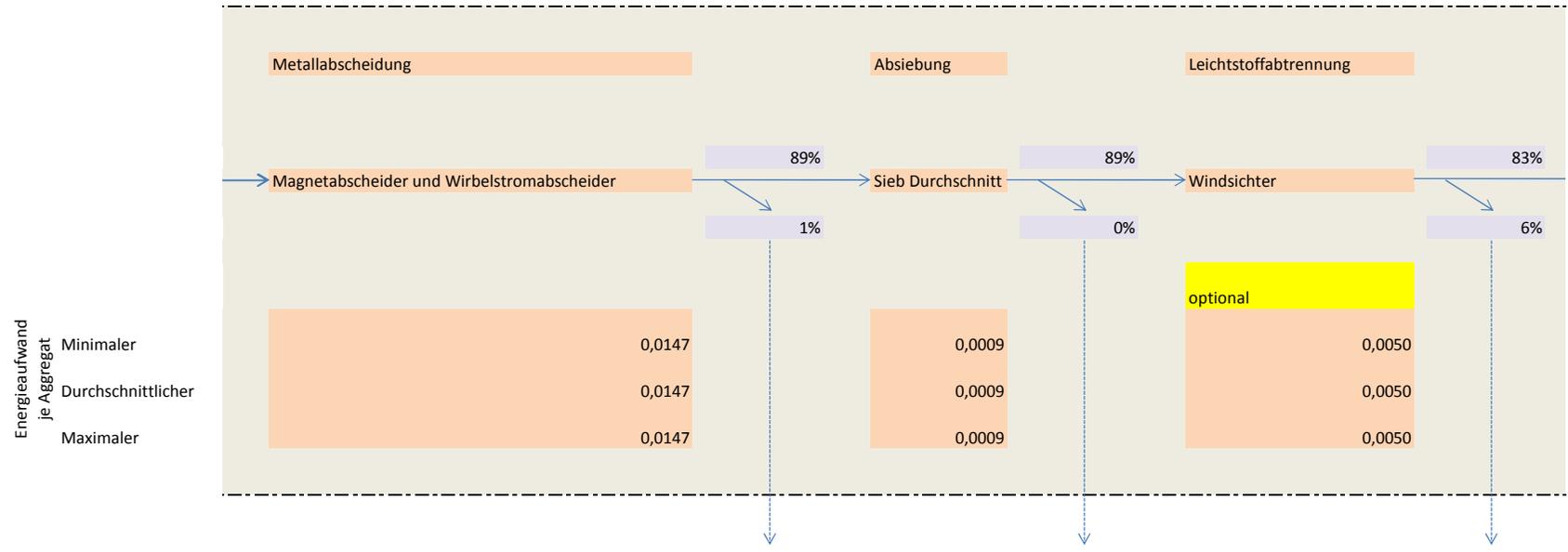
Energieaufwand
je Aggregat



MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,03193	0,02690	0,00503	0,02941	0,00017	0,02925
0,03366	0,02862	0,00503	0,03114	0,00017	0,03097
0,03560	0,03056	0,00503	0,03308	0,00017	0,03291

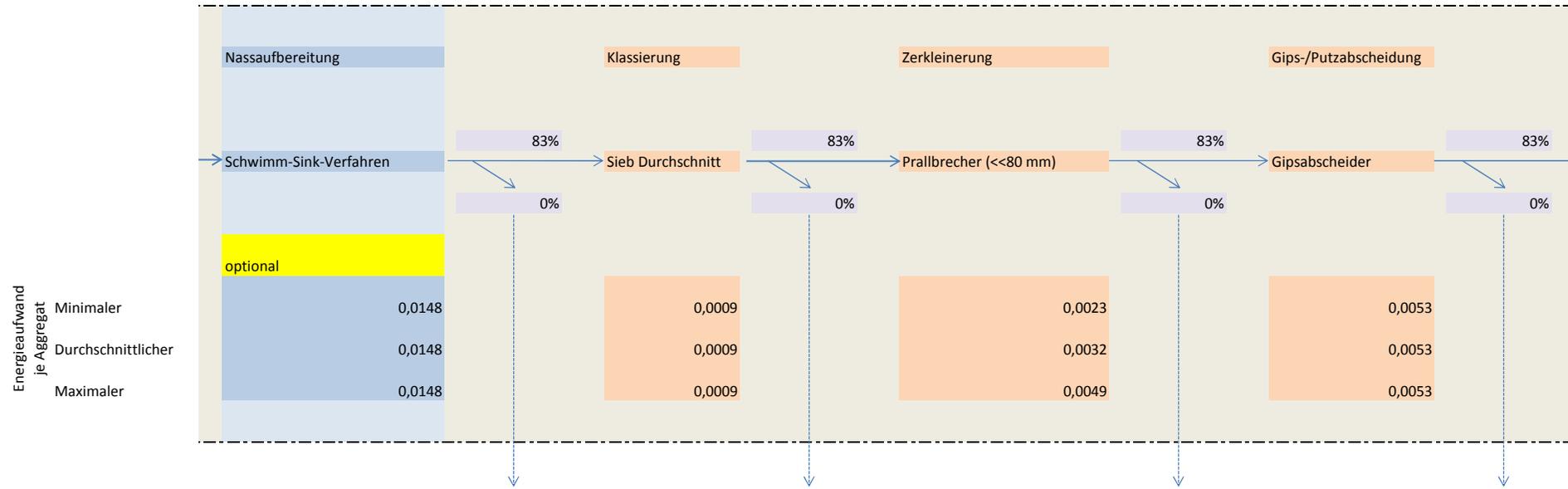
ZiegelR3-S3-E3





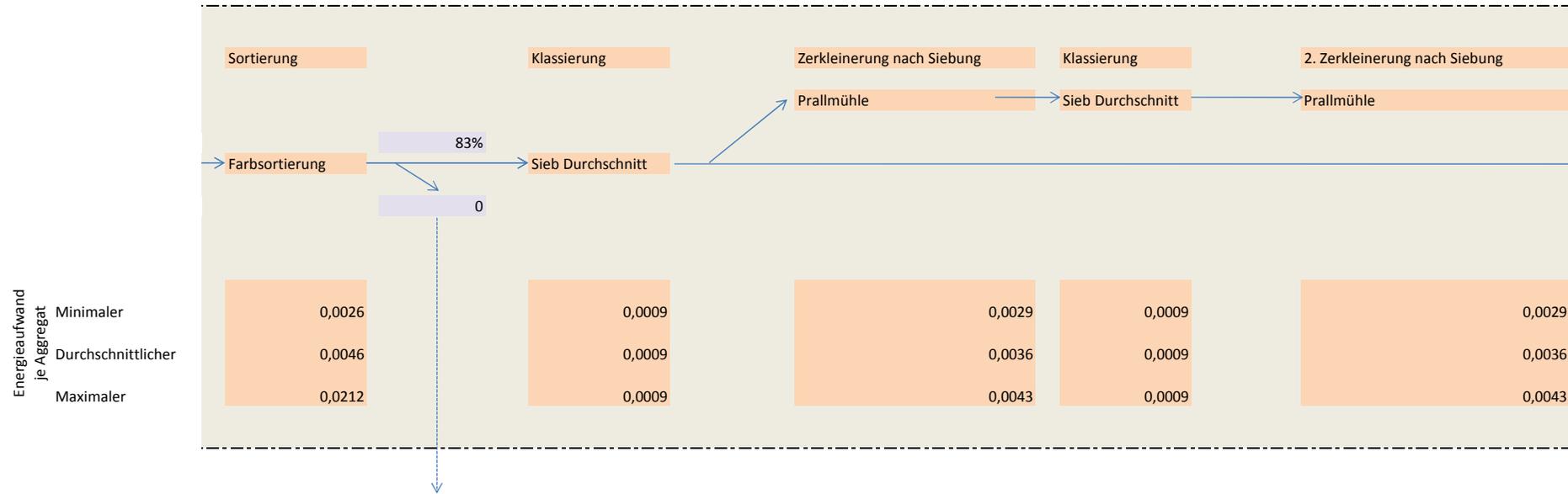
Energieaufwand Co-Produkte

Category	Minimaler	Durchschnittlicher	Maximaler
Metalle	0,00016	0,00016	0,00016
Dämmstoffe	0,00125	0,00127	0,00129



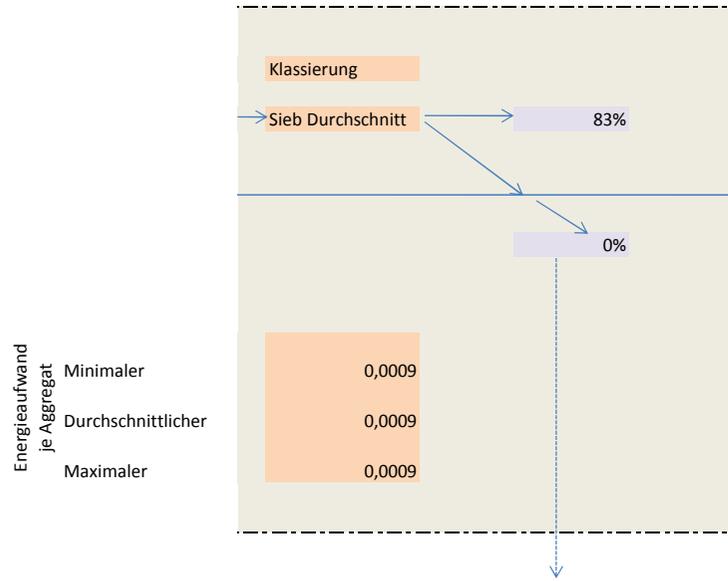
Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler



Energieaufwand
Co-Produkte

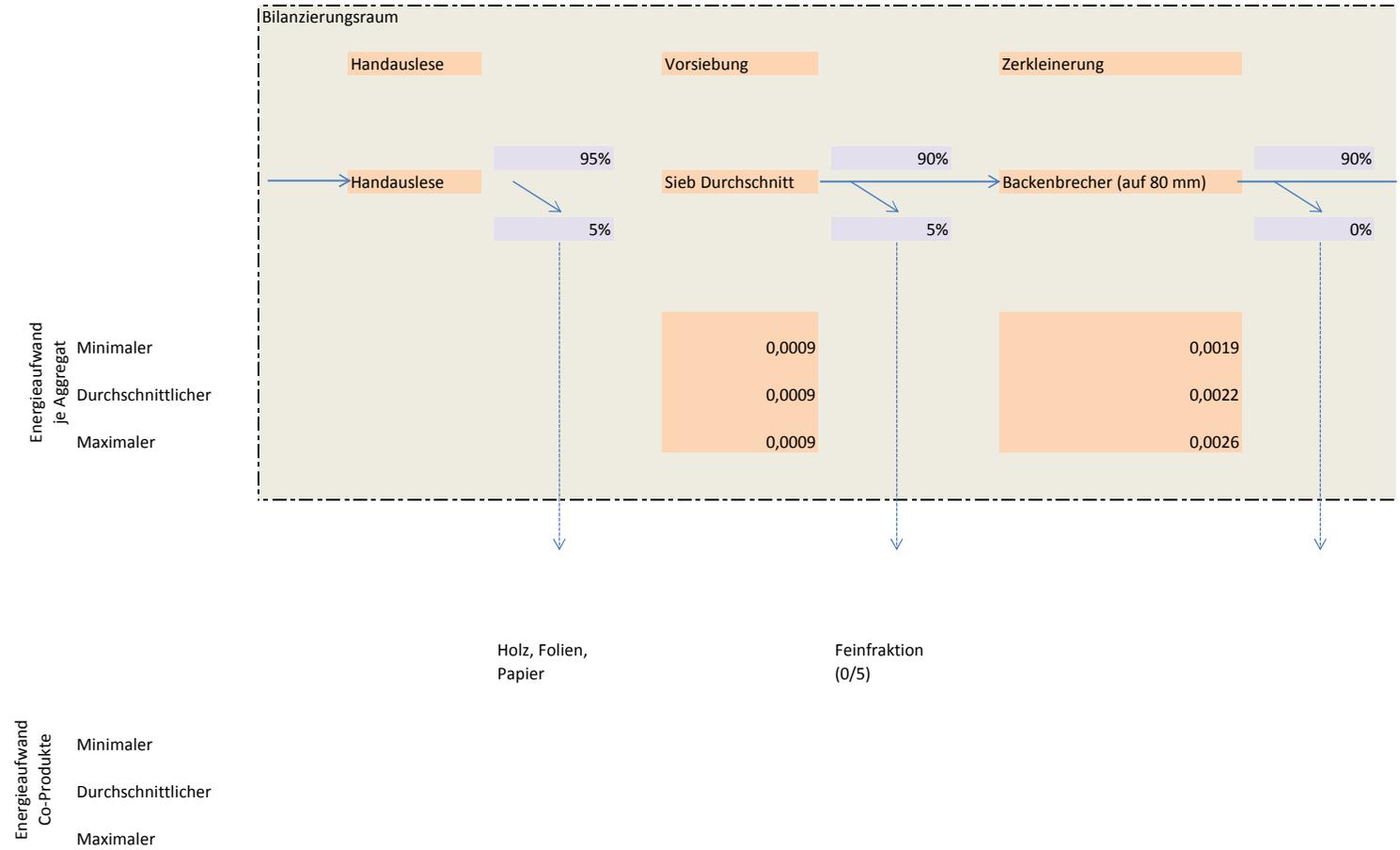
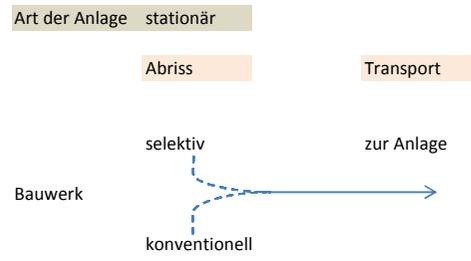
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

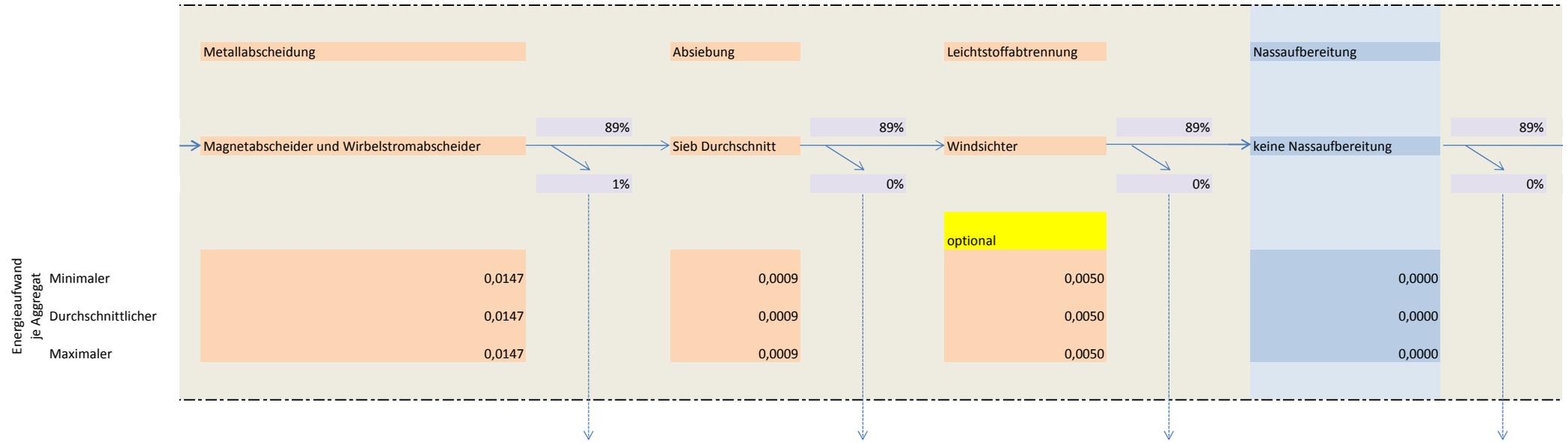


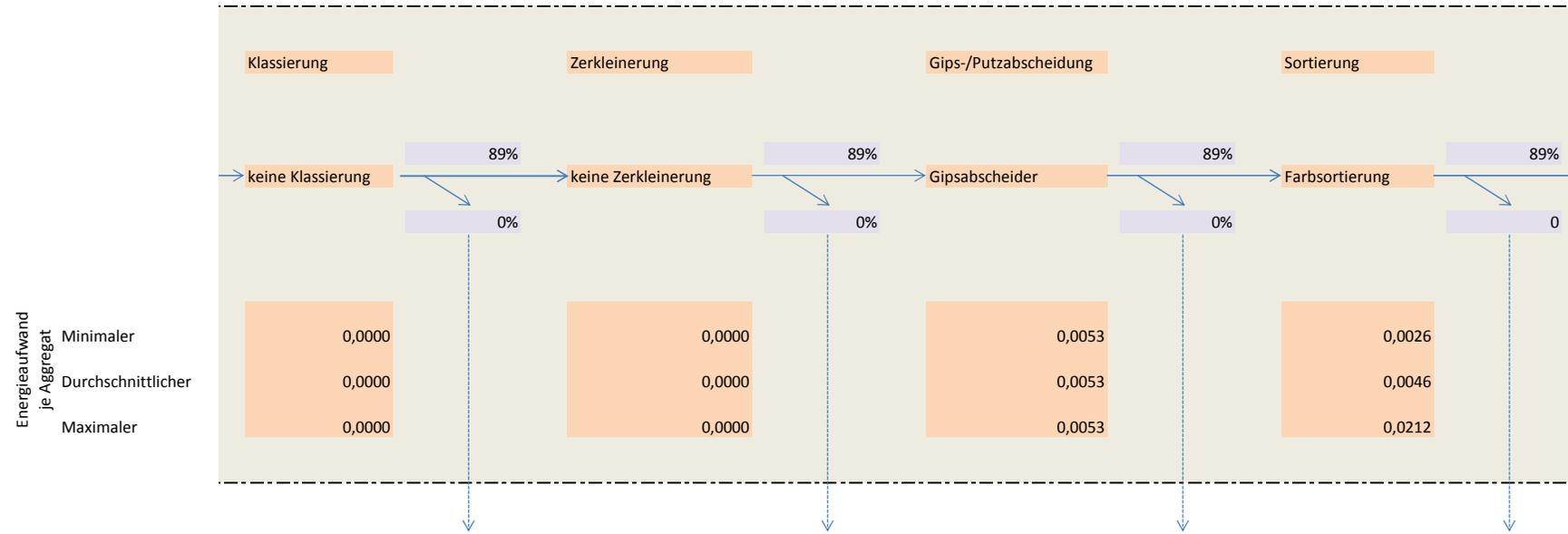
Output
Fraktion 0/32

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,0578	0,0379	0,0199	0,04787	0,00141	0,04646
0,0625	0,0426	0,0199	0,05252	0,00143	0,05110
0,0827	0,0629	0,0199	0,07281	0,00146	0,07135

Ziegel R4-S4-E4

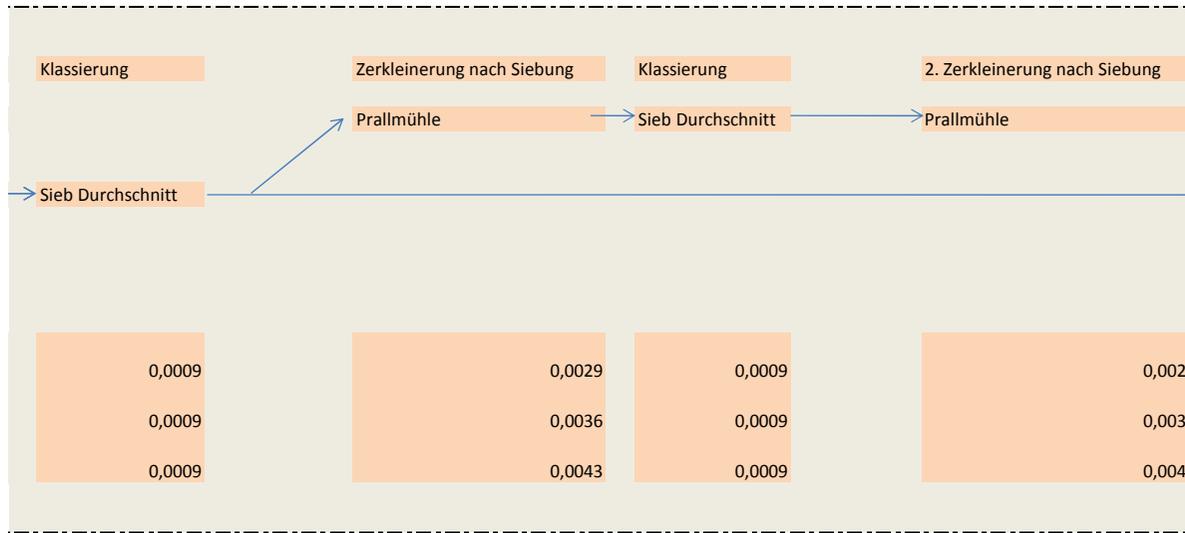






Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler



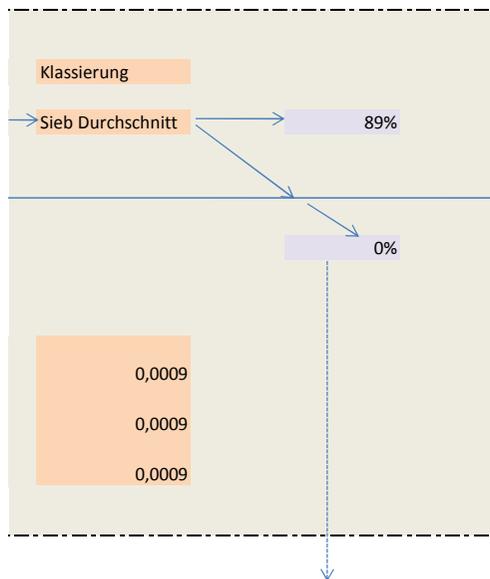
Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler

Durchschnittlicher

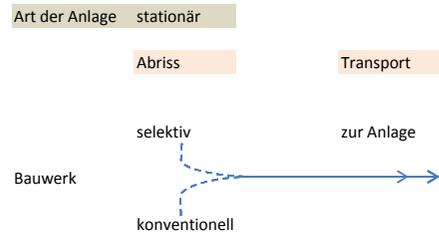
Maximaler

Energieaufwand
je Aggregat



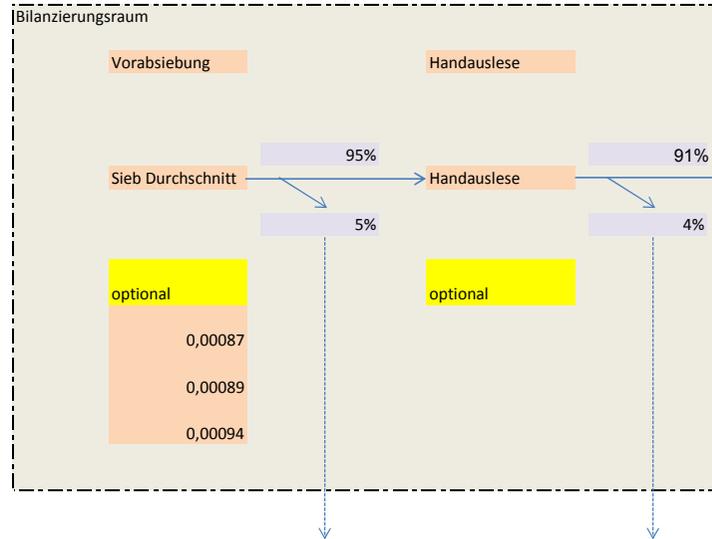
MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,03983	0,03479	0,00503	0,03731	0,00016	0,03715
0,04350	0,03847	0,00503	0,04099	0,00016	0,04083
0,06212	0,05708	0,00503	0,05960	0,00016	0,05944

Kalksandstein R1-S1-E1



Energieaufwand
je Aggregat

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

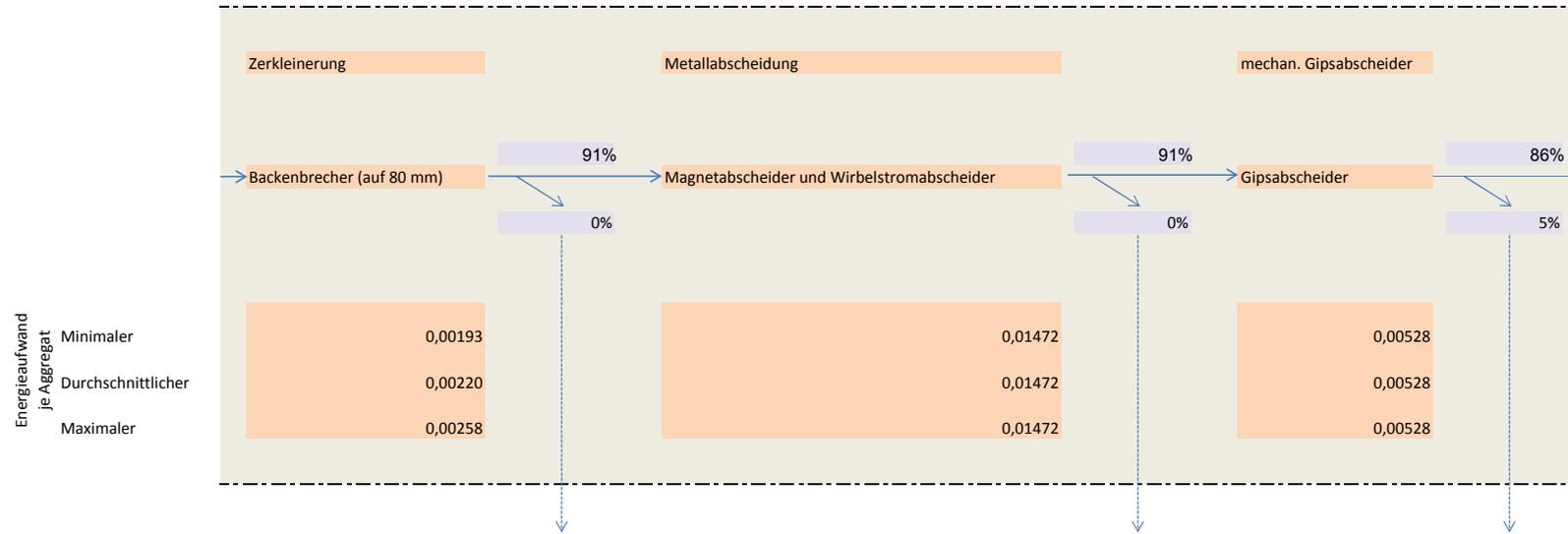


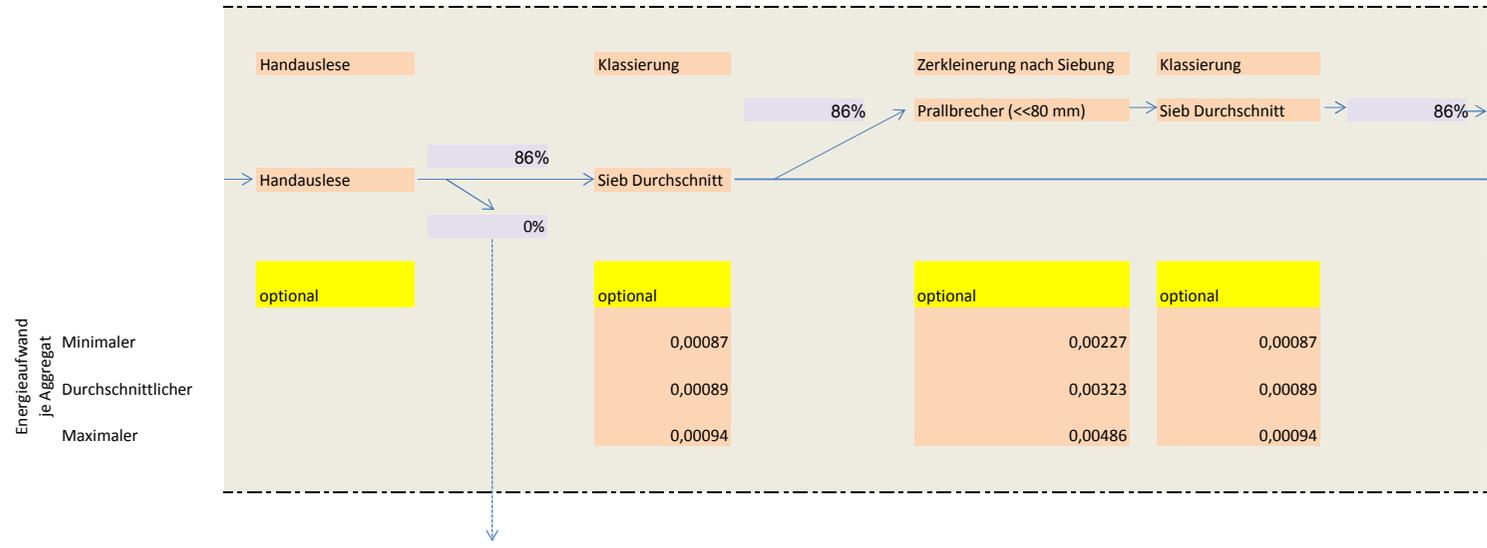
Vorsiebmaterial

Stör-
/Fremdstoffe

Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

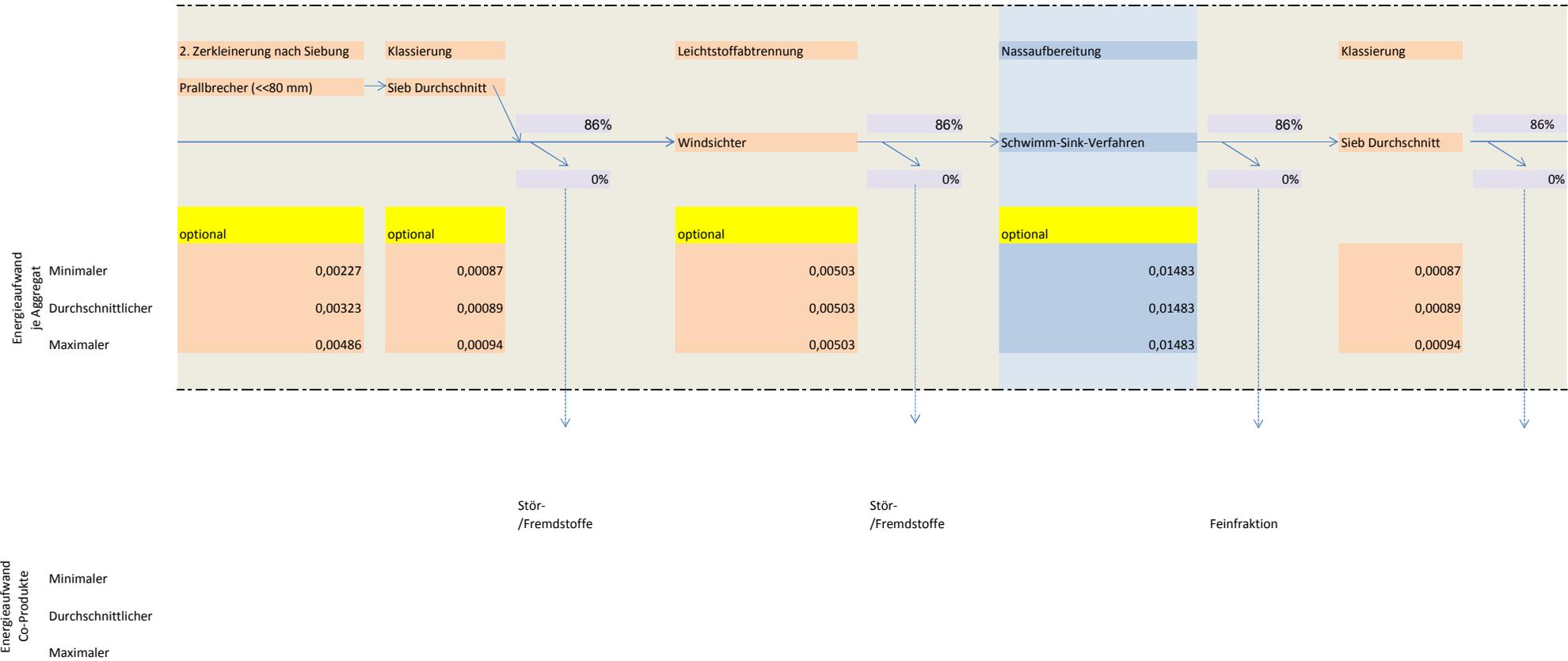




Stör-/Fremdstoffe

Energy consumption per co-product (Energieaufwand Co-Produkte) is shown for the following scenarios:

- Minimaler
- Durchschnittlicher
- Maximaler



Energieaufwand
je Aggregat

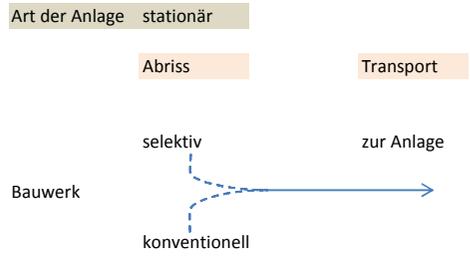
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler



→ Output
Granulat (0/8)

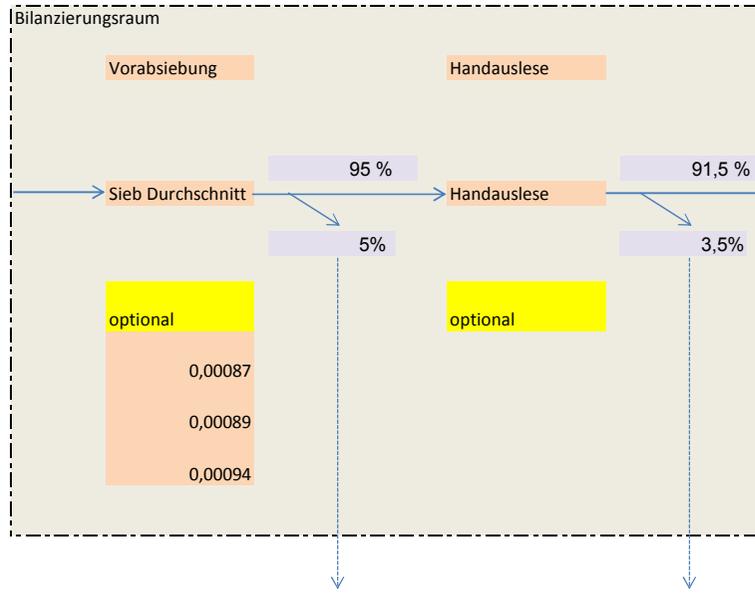
MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,0507	0,0228	0,0279	0,03675	0,00000	0,03675
0,0530	0,0231	0,0299	0,03804	0,00000	0,03804
0,0569	0,0235	0,0333	0,04018	0,00000	0,04018

Kalksandstein R2-S2-E2



Energieaufwand je
Aggregat

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

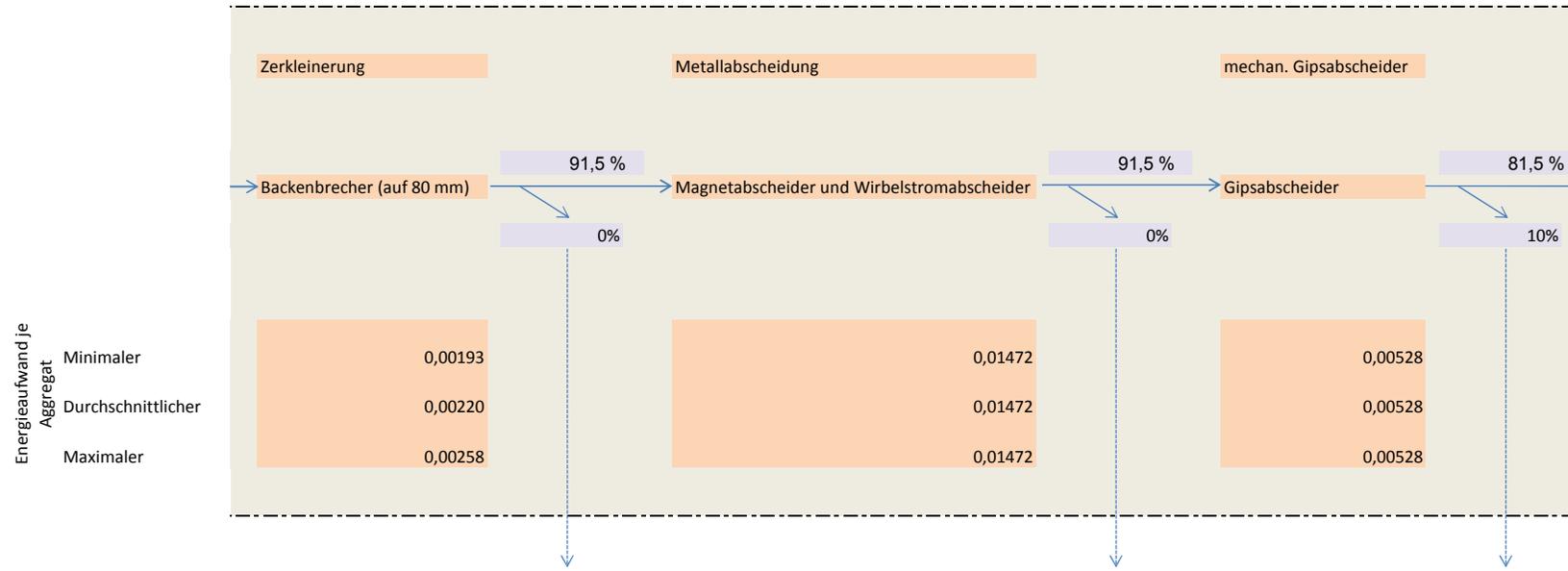


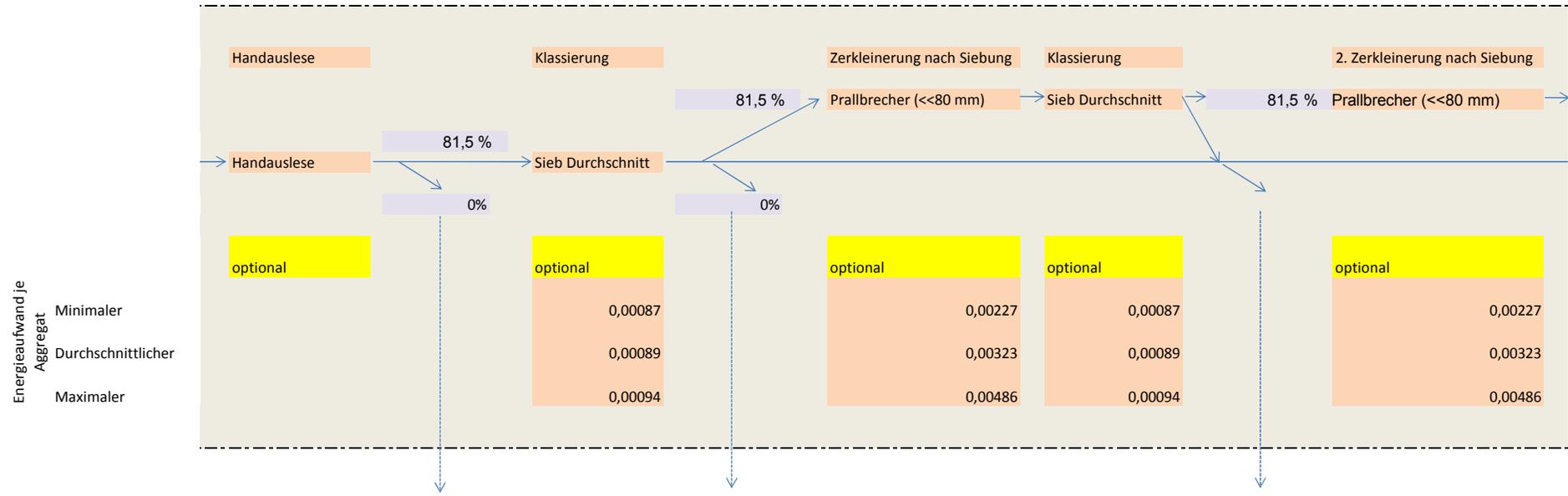
Vorsiebmaterial
I

Stör-
/Fremdstoffe

Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

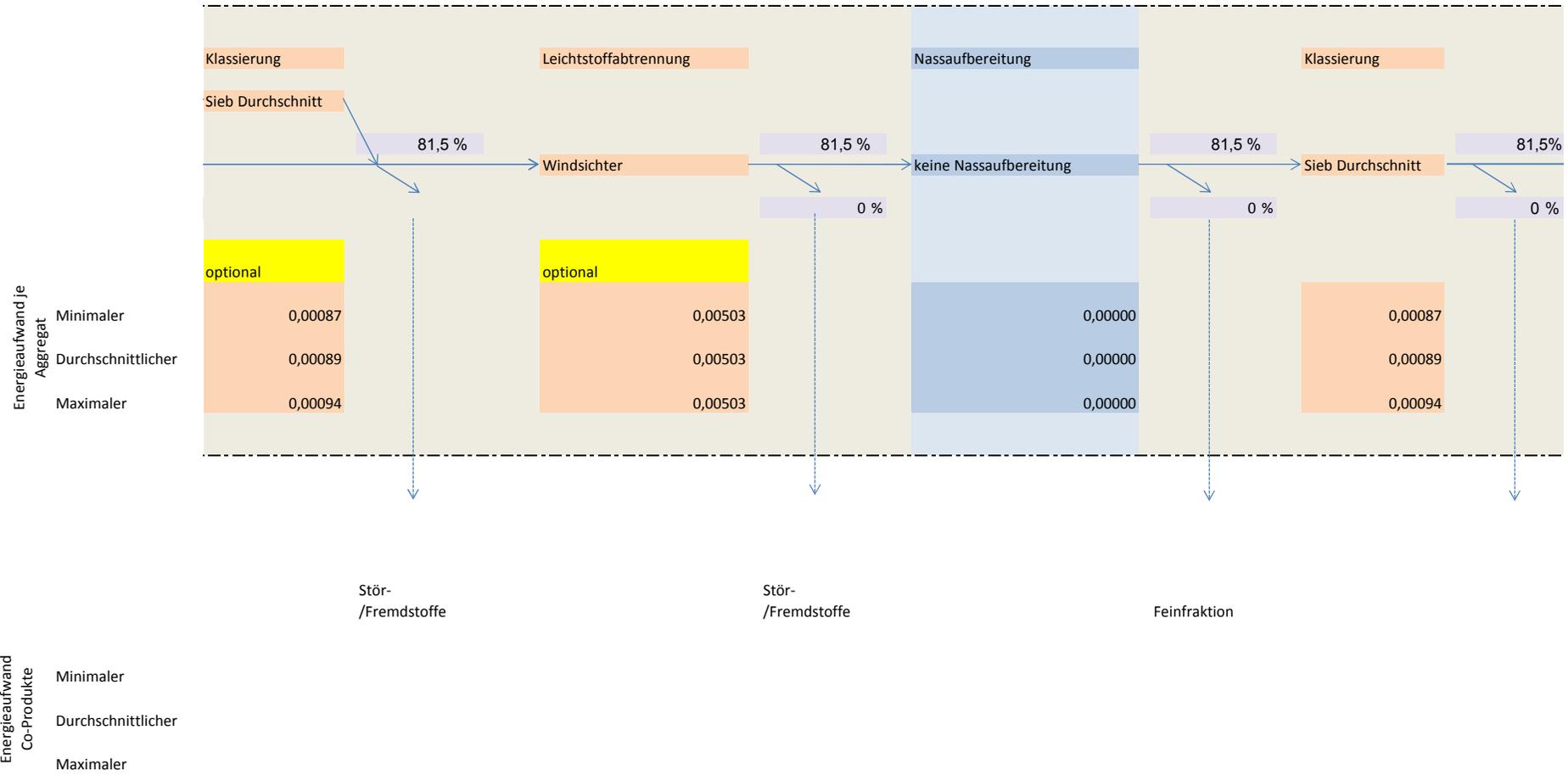




Stör-
/Fremdstoffe

Energieaufwand
Co-Produkte

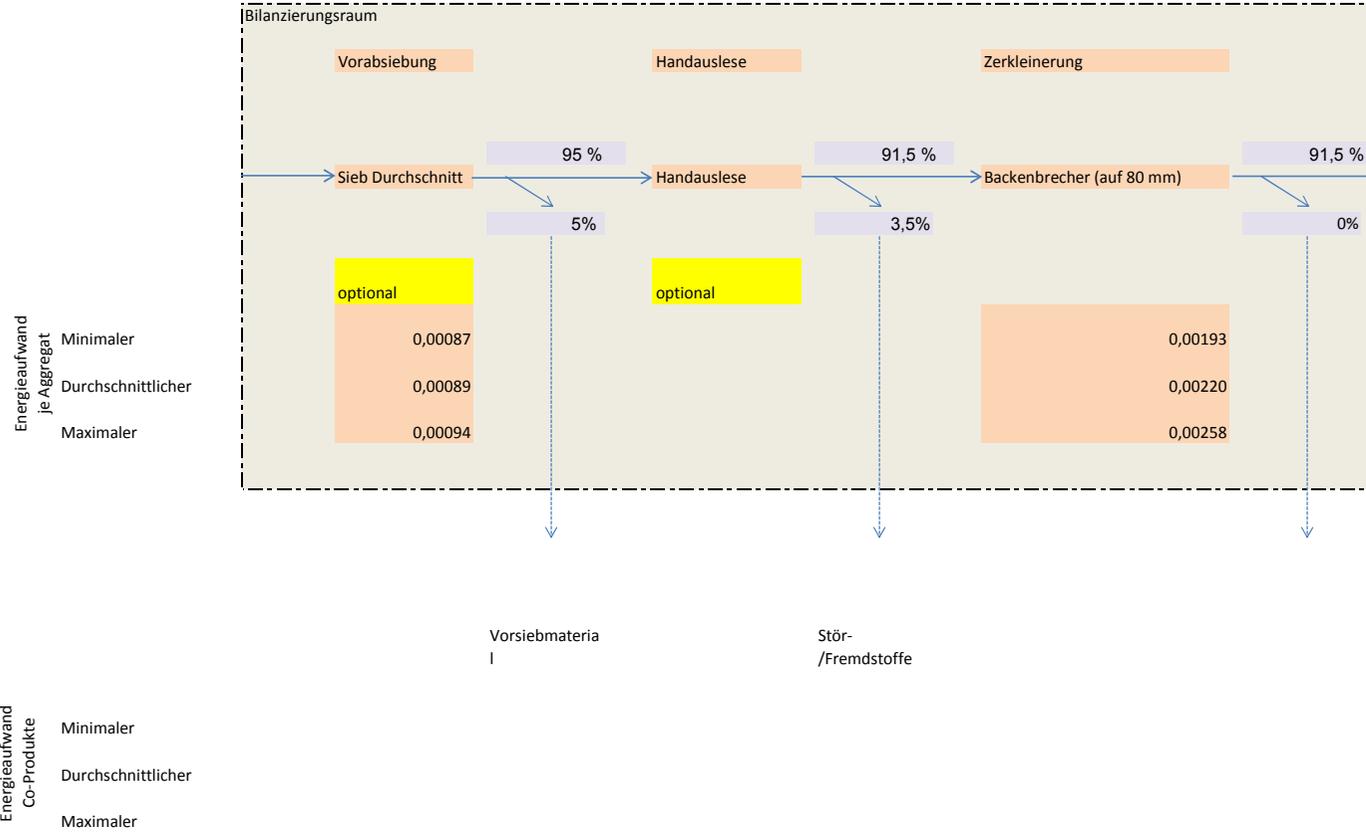
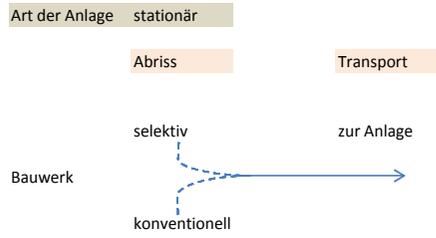
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

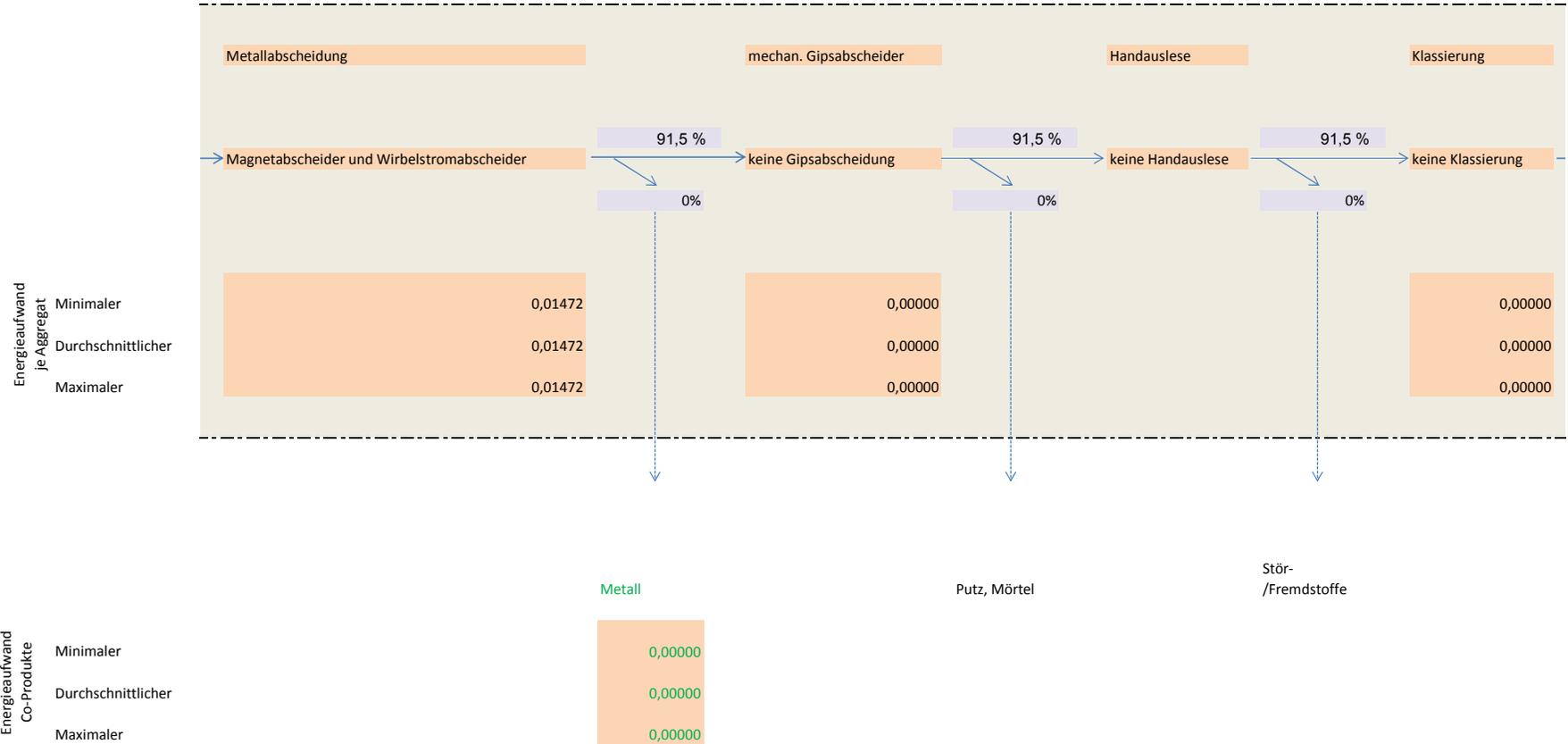


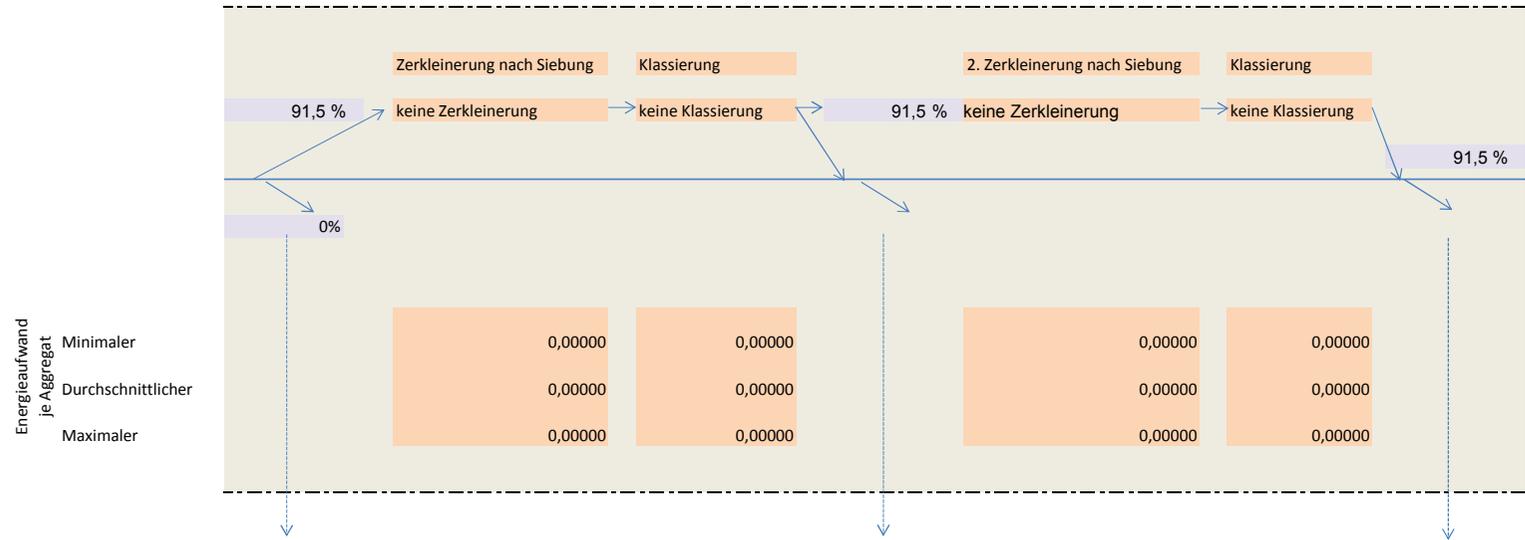
Energieaufwand je Aggregat		MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co- Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
Minimaler		0,0359	0,0228	0,0131	0,02933	0,00000	0,02933
Durchschnittlicher		0,0382	0,0231	0,0151	0,03063	0,00000	0,03063
Maximaler		0,0420	0,0235	0,0185	0,03277	0,00000	0,03277

→ Output
Granulat (0/32)

Kalksandstein R2-S3-E3



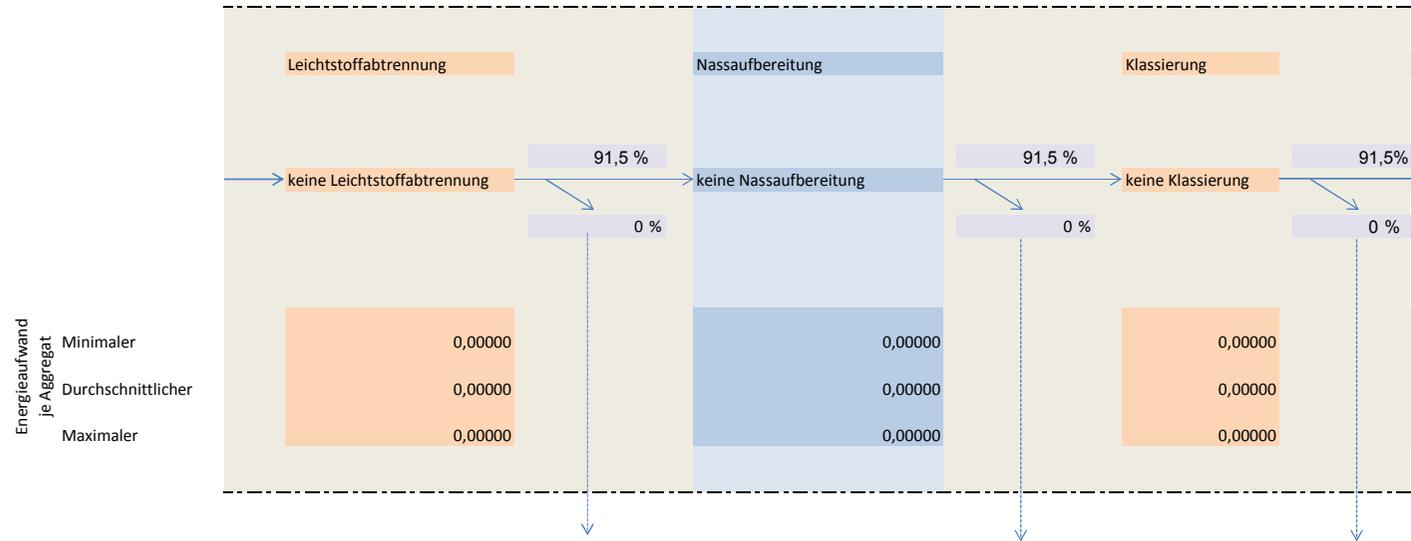




Stör-
/Fremdstoffe

Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler



Stör-
/Fremdstoffe

Feinfraktion

Energieaufwand
Co-Produkte
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

Energieaufwand
je Aggregat

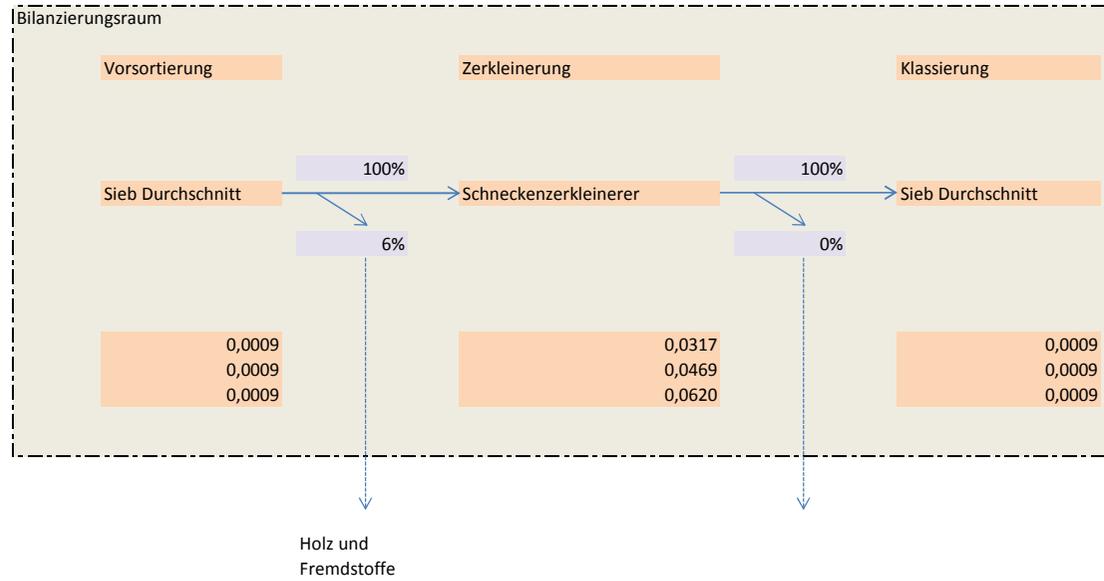
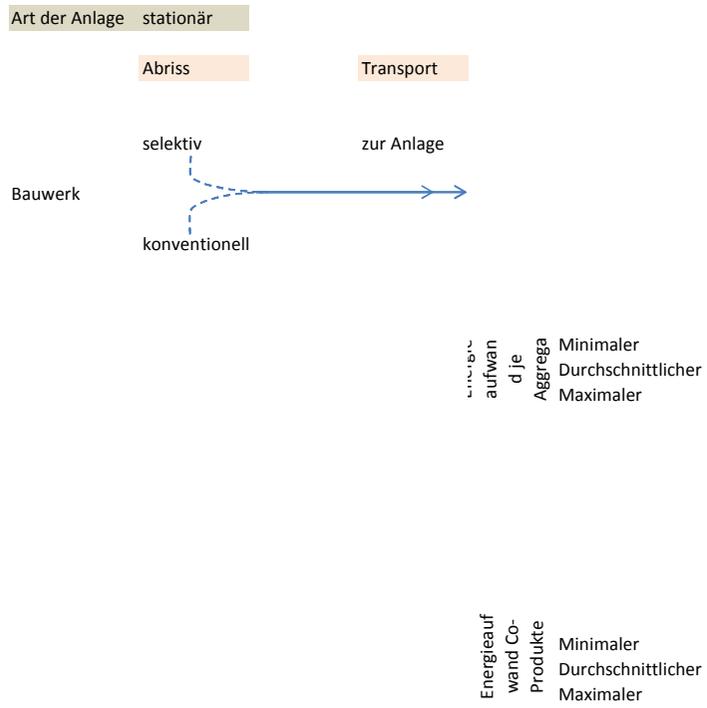
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

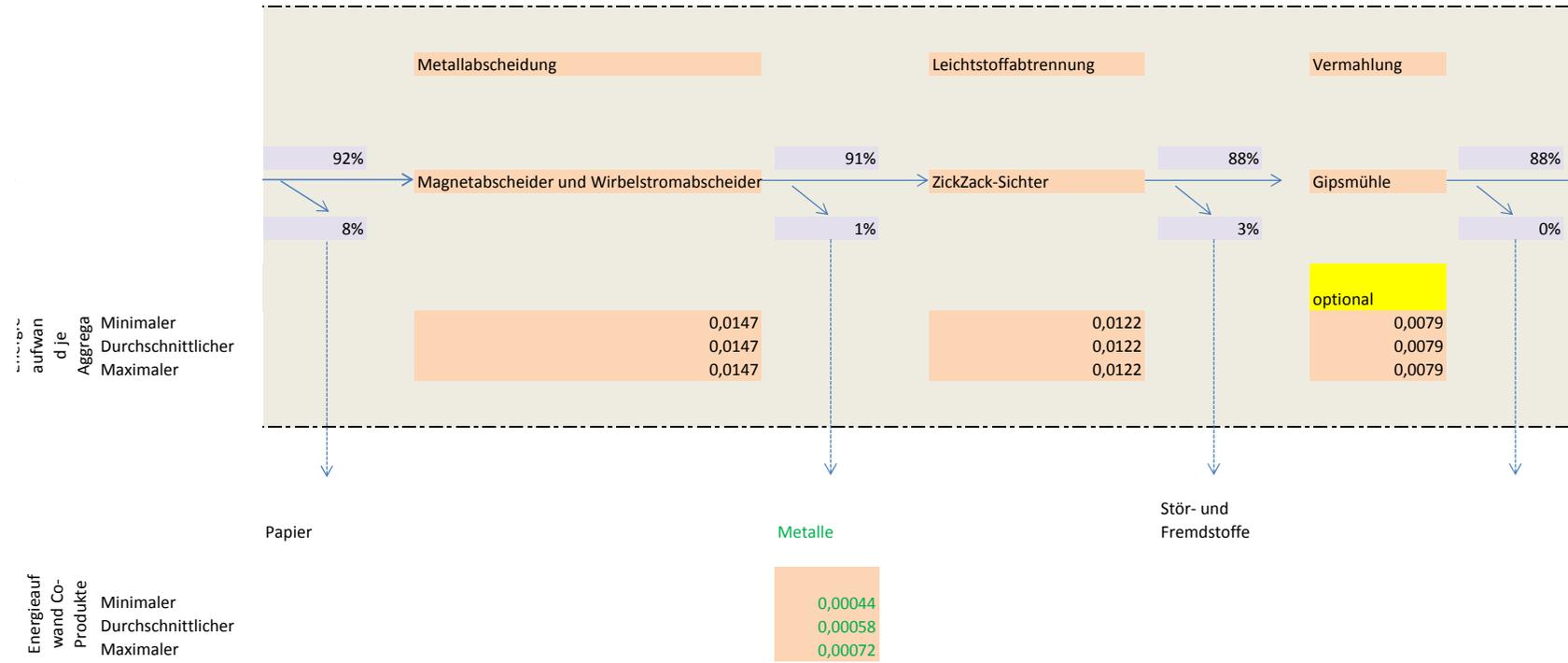


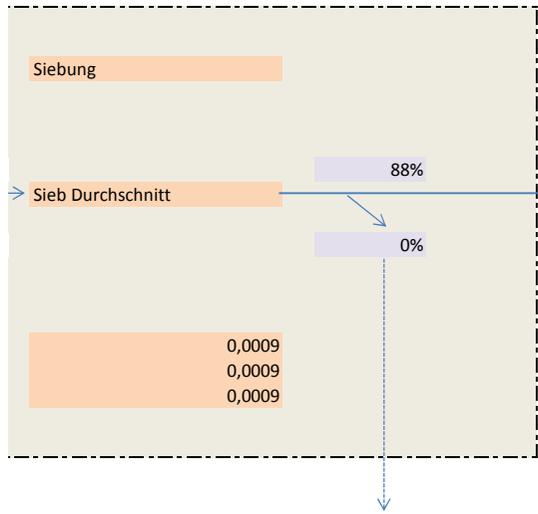
→ Output
Granulat <64mm

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,0175	0,0166	0,0009	0,01708	0,00000	0,01708
0,0178	0,0169	0,0009	0,01736	0,00000	0,01736
0,0182	0,0173	0,0009	0,01777	0,00000	0,01777

Gips R1-S1-E1







aufwand
 je
 Aggregat
 Minimaler
 Durchschnittlicher
 Maximaler

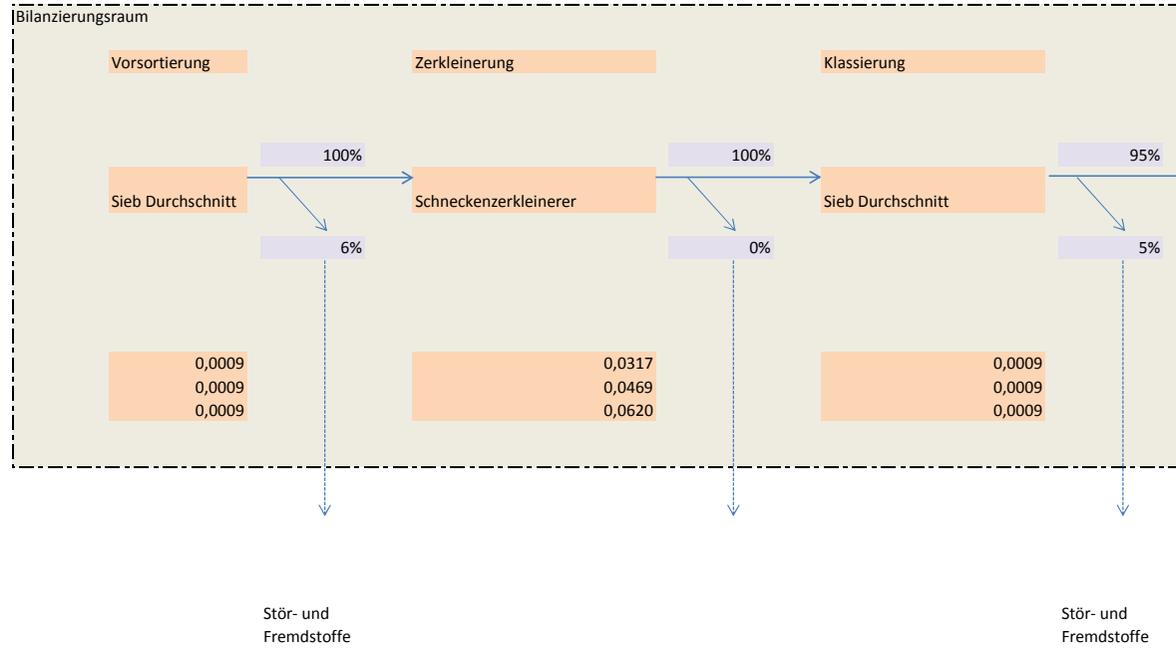
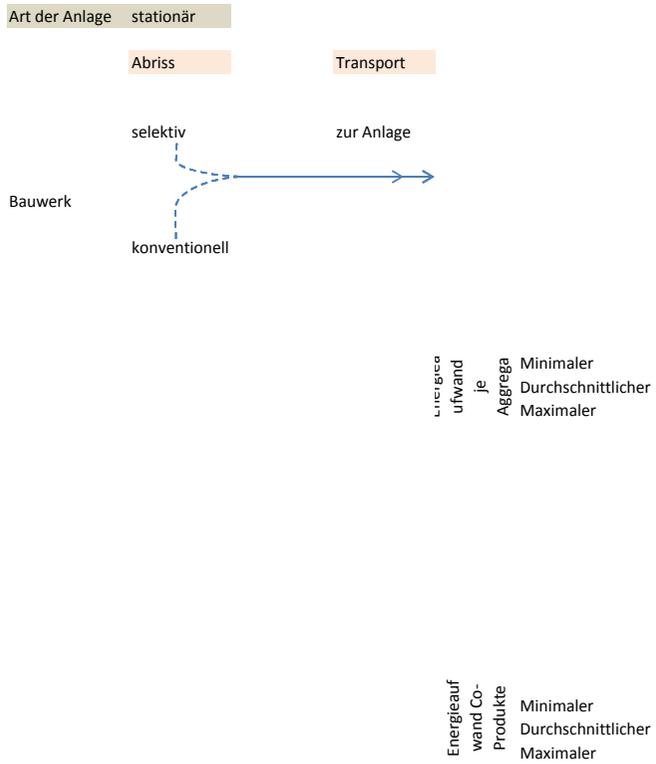
0,0009
 0,0009
 0,0009

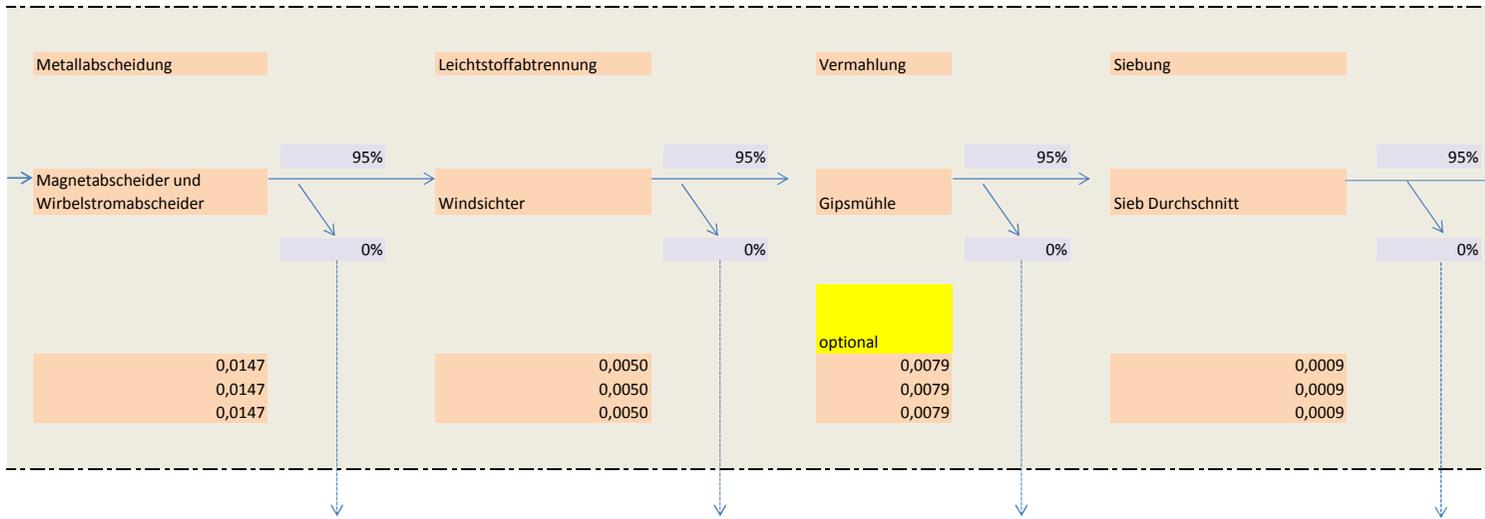
Output
 RC-Gips

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional
0,0691	0,0612	0,0079
0,0843	0,0764	0,0079
0,0996	0,0996	0,0079

Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,06513	0,00044	0,06469
0,08037	0,00058	0,07979
0,09964	0,00072	0,09892

Gips R2-S1-E2





Aufwand
 je
 Aggregate
 Minimaler
 Durchschnittlicher
 Maximaler

Energieauf
 wand Co-
 Produkte
 Minimaler
 Durchschnittlicher
 Maximaler

Metalle

0,00000
 0,00000
 0,00000

Verbrauch

aufwand

je

Aggregat

Minimaler

Durchschnittlicher

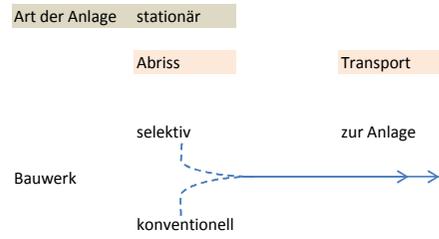
Maximaler



Output
RC-Gips

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Einfluss Anlagenart	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,0620	0,0541	0,0079	0,0000	0,05801	0,00000	0,05801
0,0772	0,0693	0,0079	0,0000	0,07325	0,00000	0,07325
0,0925	0,0925	0,0079	0,0000	0,09252	0,00000	0,09252

FlachglasR1-S1-E1/E2

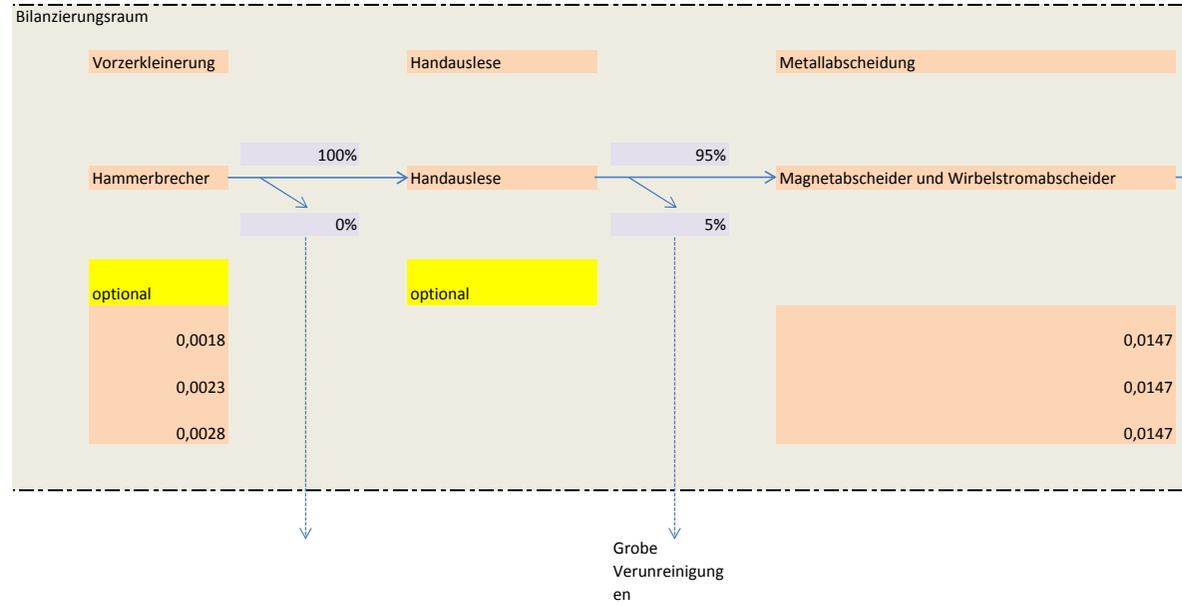


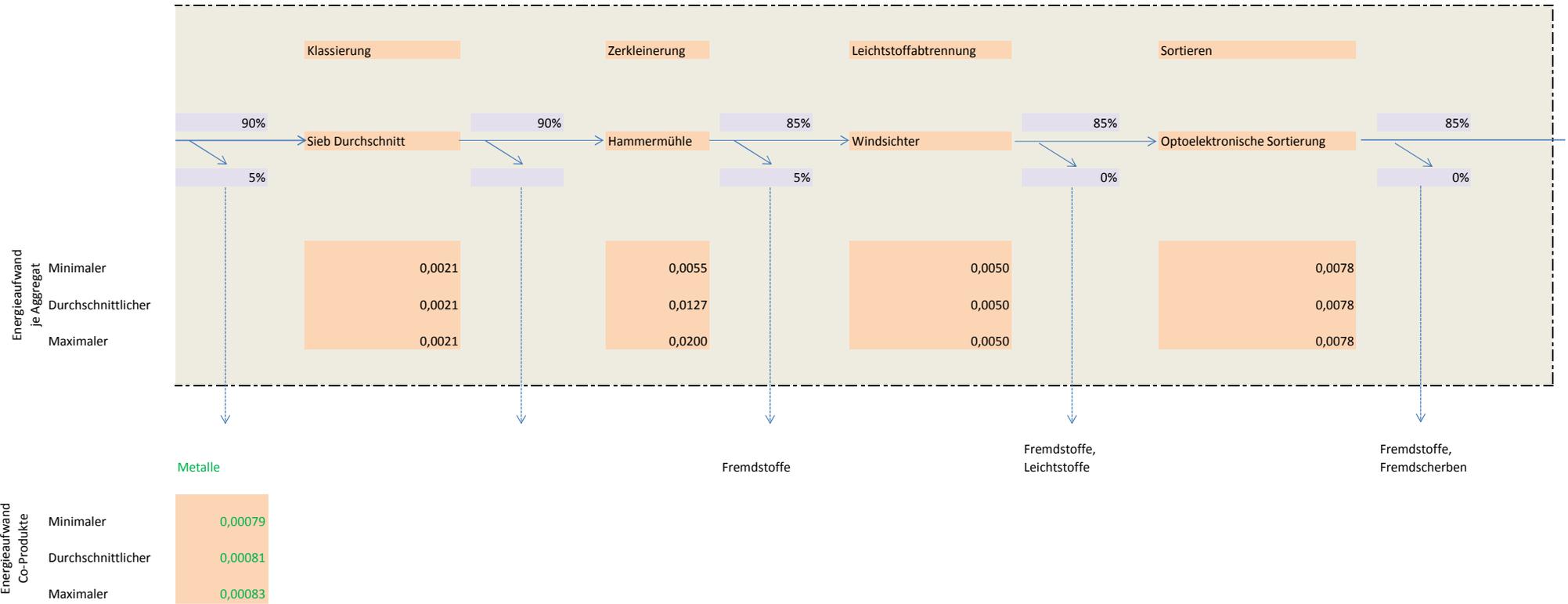
Energieaufwand
je Aggregat

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler

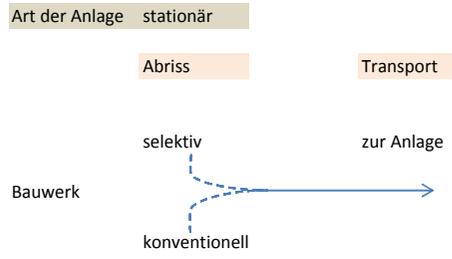




→ Output
RC-Scherben

Energieaufwand je Aggregat	MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co- Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
	Minimaler	0,0370	0,0351	0,0018	0,03604	0,00079
Durchschnittlicher	0,0447	0,0423	0,0023	0,04351	0,00081	0,04270
Maximaler	0,0524	0,0496	0,0028	0,05099	0,00083	0,05016

Mineralische Dämmung (Steinwolle) R1-S1-E1



Energieaufwand
je Aggregat

Minimaler 0,0000

Durchschnittlicher 0,0000

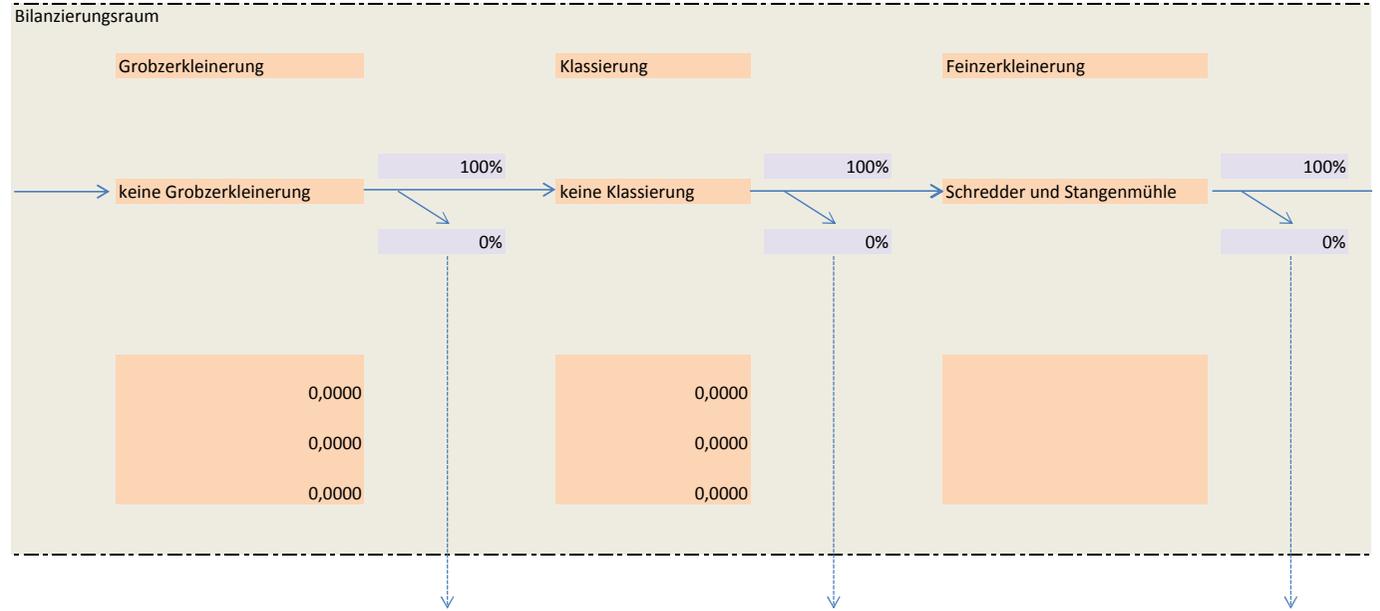
Maximaler 0,0000

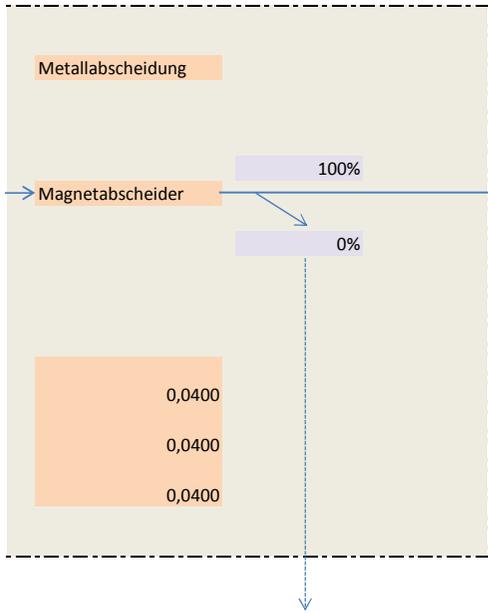
Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler

Durchschnittlicher

Maximaler





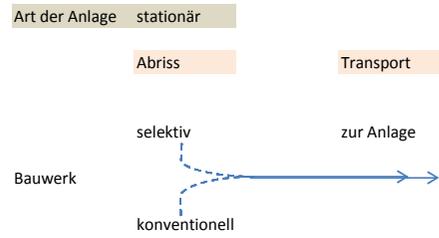
Output
Steinwolle-Mehl

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,0400	0,0400	0,0000	0,04000	0,00000	0,04000
0,0400	0,0400	0,0000	0,04000	0,00000	0,04000
0,0400	0,0400	0,0000	0,04000	0,00000	0,04000

Metalle

0,00000
0,00000
0,00000

Mineralische Dämmung (Steinwolle) R2-S2-E1



Energieaufwand
je Aggregat

Minimaler 0,0019

Durchschnittlicher 0,0022

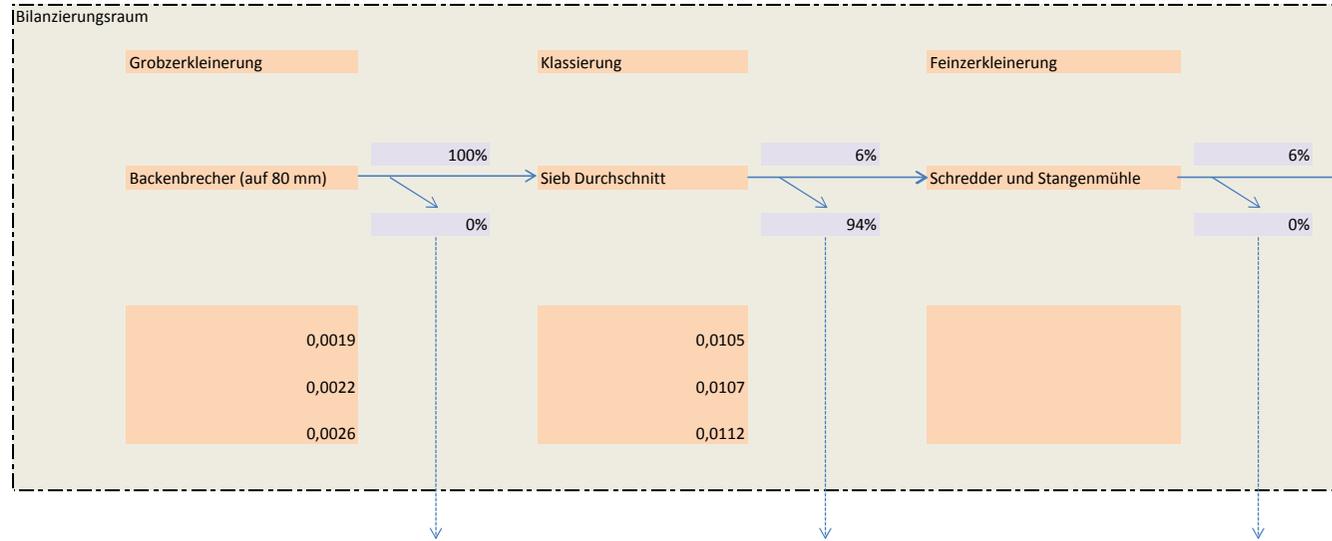
Maximaler 0,0026

Energieaufwand
Co-Produkte

Minimaler 0,01166

Durchschnittlicher 0,01216

Maximaler 0,01300

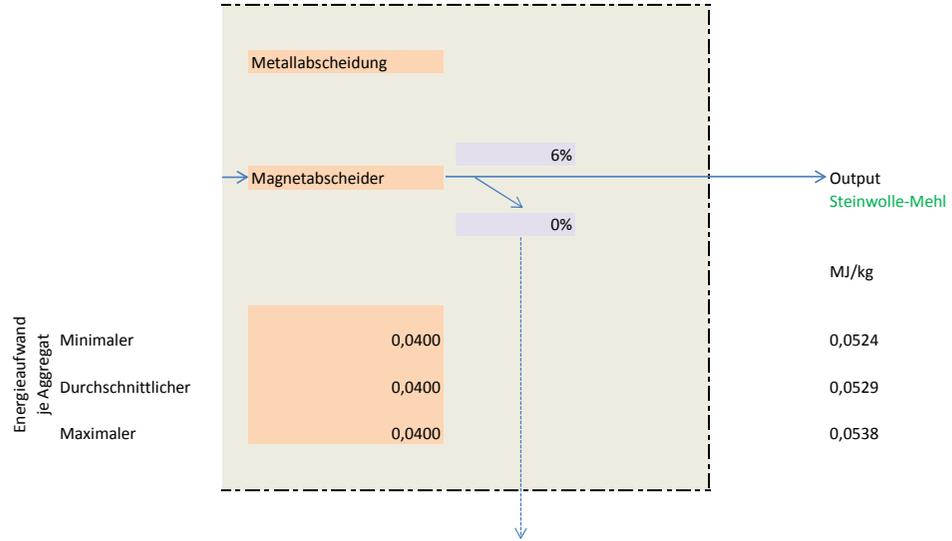


Ziegelmaterial

0,01166

0,01216

0,01300



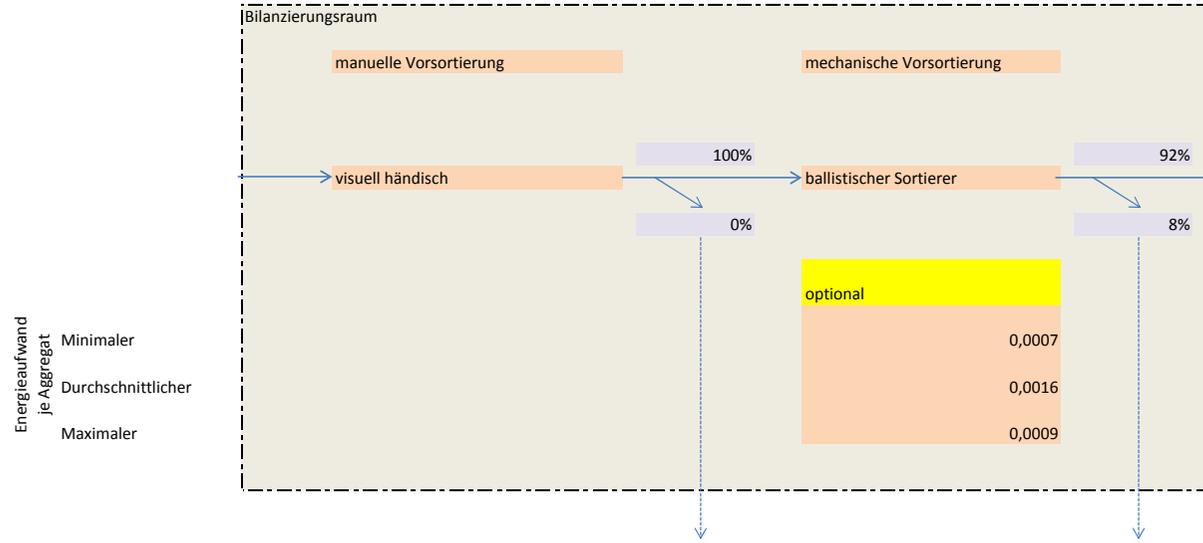
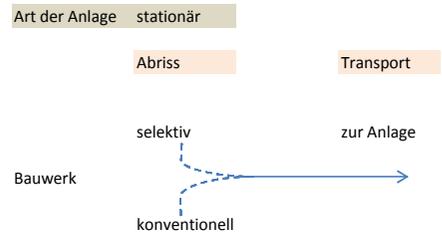
Output
Steinwolle-Mehl

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,0524	0,0524	0,0000	0,05240	0,01166	0,04074
0,0529	0,0529	0,0000	0,05293	0,01216	0,04078
0,0538	0,0538	0,0000	0,05383	0,01300	0,04083

Metalle

Minimaler	0,00000
Durchschnittlicher	0,00000
Maximaler	0,00000

Kunststoffprofile (PVC) R1-S1-E1/E2



Energieaufwand je Aggregat

Minimaler

Durchschnittlicher

Maximaler

Energieaufwand Co-Produkte

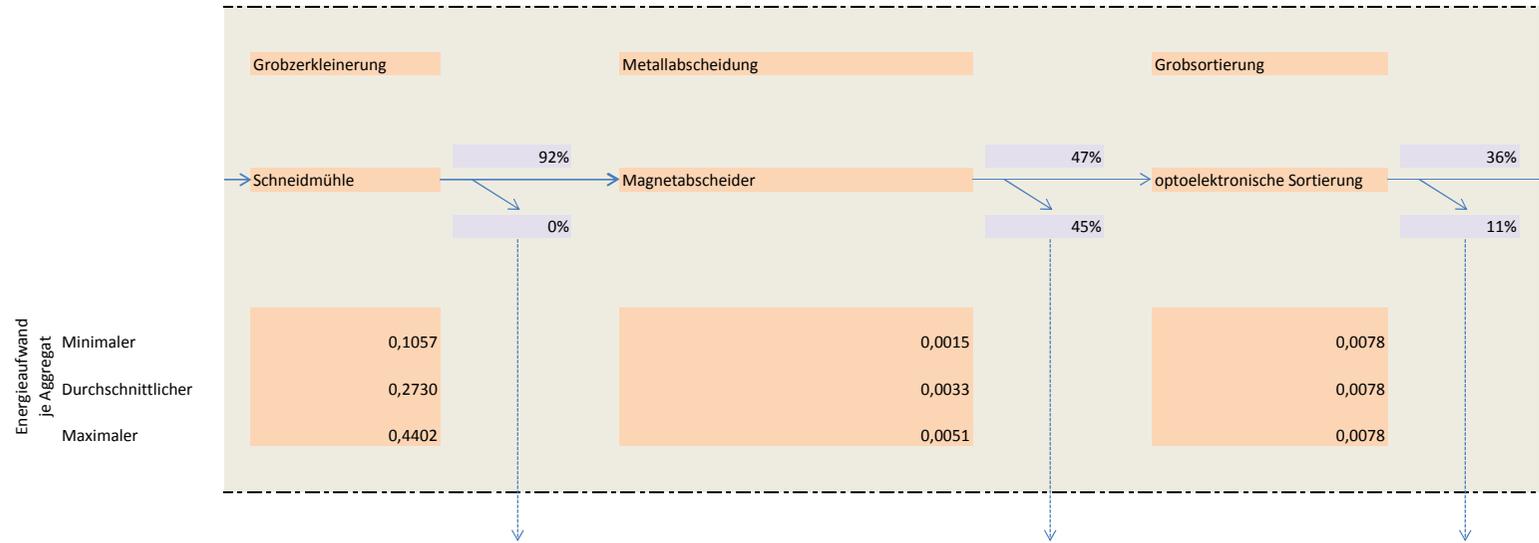
Minimaler

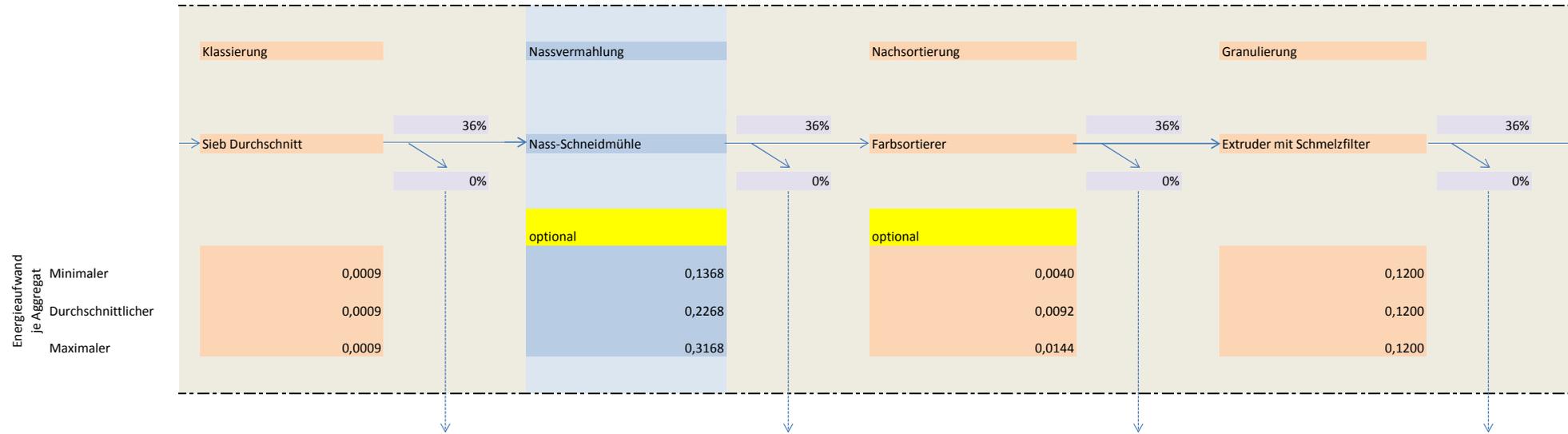
Durchschnittlicher

Maximaler

Glasreste

0,00005
0,00013
0,00007





Energieaufwand Co-Produkte

- Minimaler
- Durchschnittlicher
- Maximaler

Energieaufwand
je Aggregat

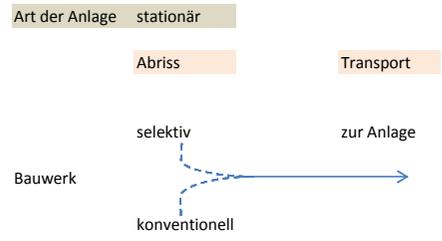
Minimaler
Durchschnittlicher
Maximaler



Output
PVC Granulat

MJ/kg	MJ/kg ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
0,3772	0,2358	0,1414	0,30652	0,04470	0,26182
0,6425	0,4049	0,2376	0,52368	0,11515	0,40853
0,9061	0,5740	0,3321	0,74007	0,18481	0,55526

PVC-Bodenbeläge R1-S1-E1/E2



Energieaufwand
je Aggregat

Minimaler

Durchschnittlicher

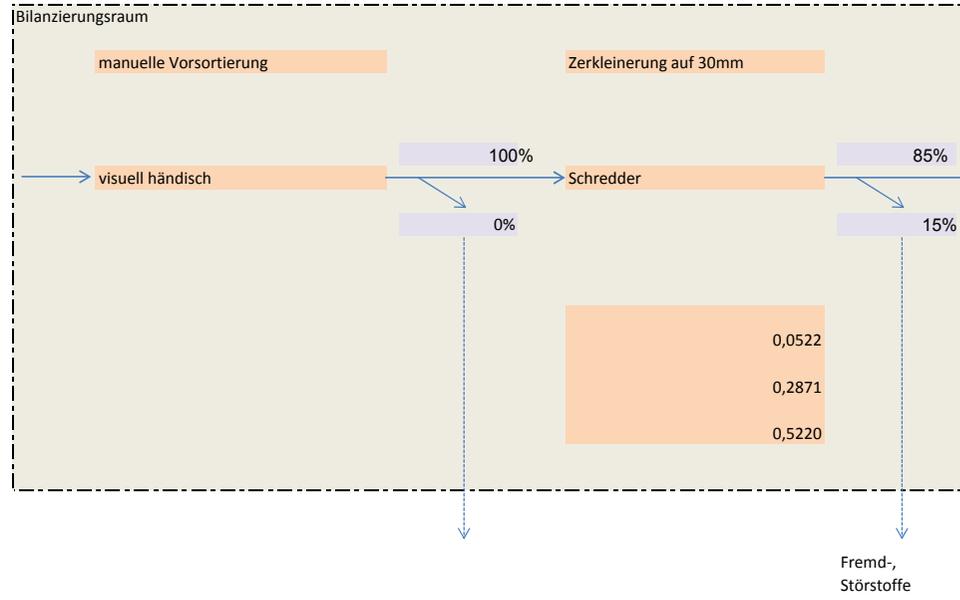
Maximaler

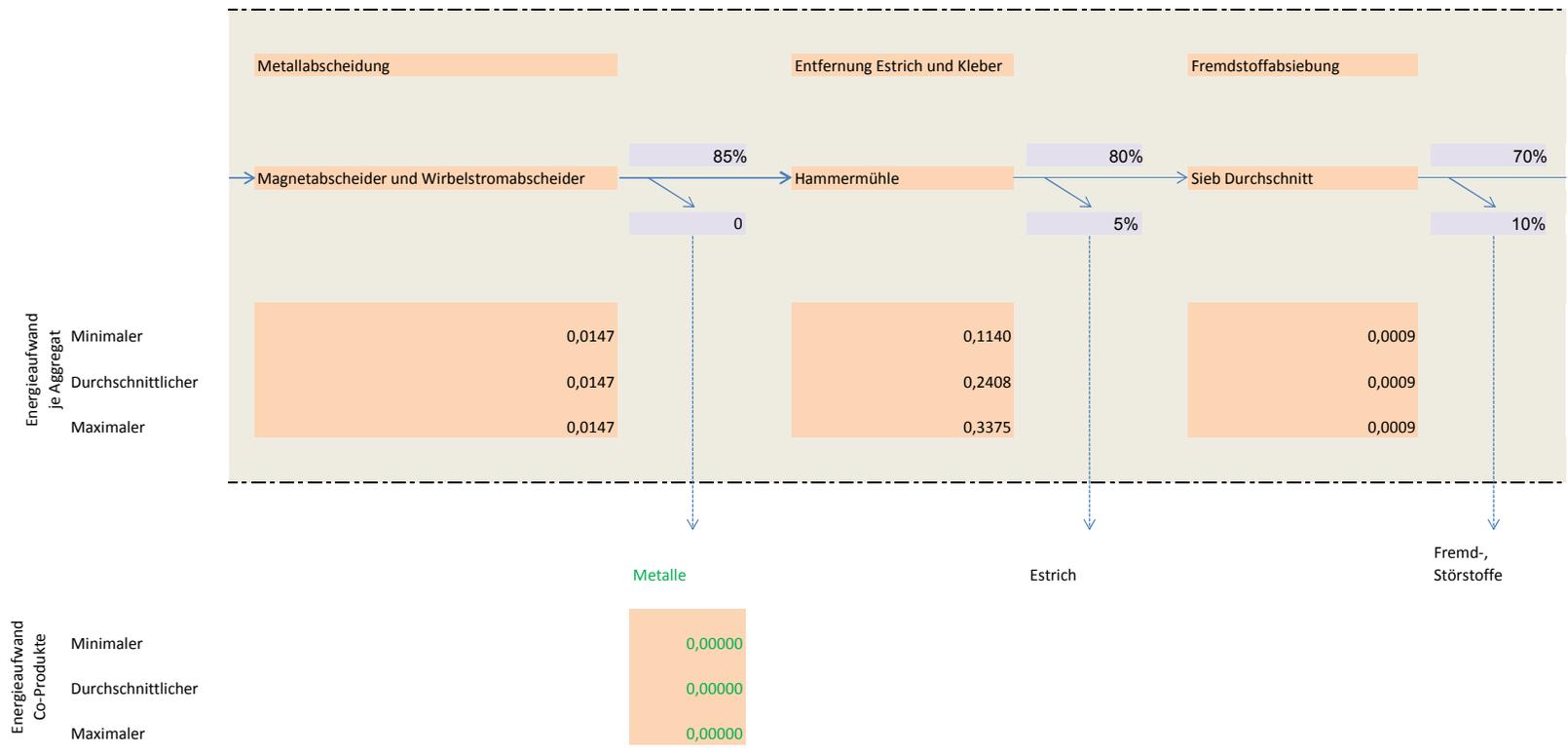
Energieaufwand
Co-Produkte

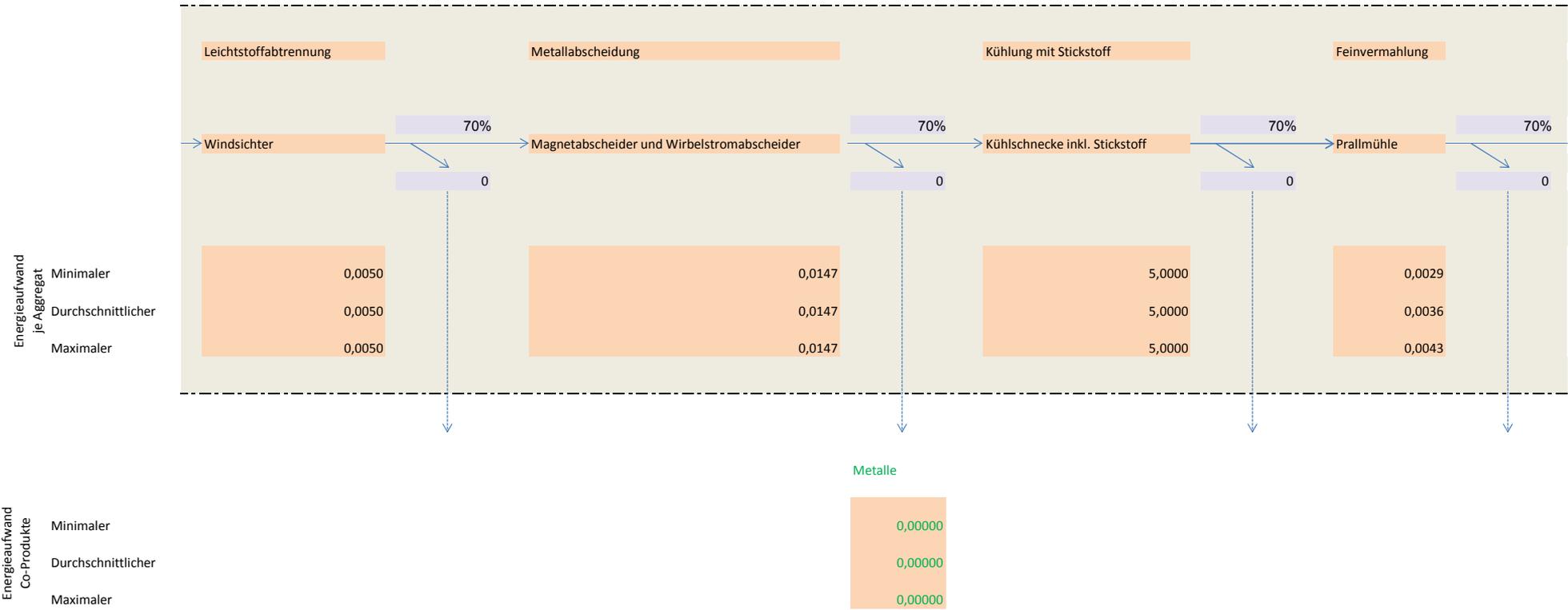
Minimaler

Durchschnittlicher

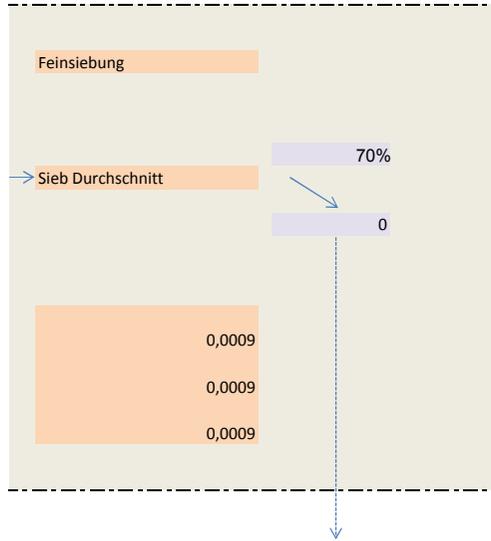
Maximaler







Energieaufwand
je Aggregat



→ Output
Weich PVC-Feinmahlgut < 400 µm

MJ/t	MJ/t ohne optional	optional	Mittelwert	Allokation auf verwertbare Co-Produkte	Mittelwert minus Allokation auf verwertbare Co-Produkte
5,2054	5,2054	0,0000	5,20536	0,00000	5,20536
5,5677	5,5677	0,0000	5,56772	0,00000	5,56772
5,9001	5,9001	0,0000	5,90013	0,00000	5,90013

7.2 Berechnungsgrundlagen der Energiekennwerte zur Herstellung von Primärstoffen

7.2.1 Beton

Technische Beschreibung (inklusive der Hintergrundsysteme) und Energiekennwerte

Sand 0/2 (oekobau.dat: 1.2.01 Mineralische Baustoffe / Zuschläge / Sand und Kies)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=61655387-edd4-4800-ba3e-67bc15f2f096&stock=OBD_2019_I&lang=de

Die Aufbereitung der Rohstoffe beginnt mit dem Waschen der Gesteinskörner, die aus dem Tagebau gewonnen wurden. Durch die Zugabe von sauberem Wasser wird das Rohmaterial in verschiedenen Waschstufen von abschlämmbaren Substanzen (Lehm und Ton) und von Fremdstoffen (Holz, Kaolin, Kohle, Metalle etc.) befreit. Anschließend erfolgt eine Sortierung mit Hilfe von Vibrationssieben und/oder einer vorgeschalteten Sortiermaschine. Sand und Kies mit einem SiO₂-Gehalt größer als 96 % sind bekannt als Quarzsand oder Quarzkies. Es folgt die Trocknung. In einem Heiß-Gas-Generator wird Luft mit einem Öl- oder Gasbrenner auf 450 °C erhitzt. Mit der Heißluft erfolgt die Trocknung der Körnung im Trockenofen, bis der Wassergehalt kleiner als 0,2 %. Anschließend wird die Körnung mit Hilfe von Sieben klassifiziert nach Korngruppen.

Die Lebenszyklusanalyse von Sand umfasst den Prozess der Rohkies-Gewinnung und die Aufbereitung im Kieswerk. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Sand 0/2 am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden.

Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert.

Die landesspezifische Analyse beinhaltet:

- 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermixe modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein.
- 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt.
- 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt.
- 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische

Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert.

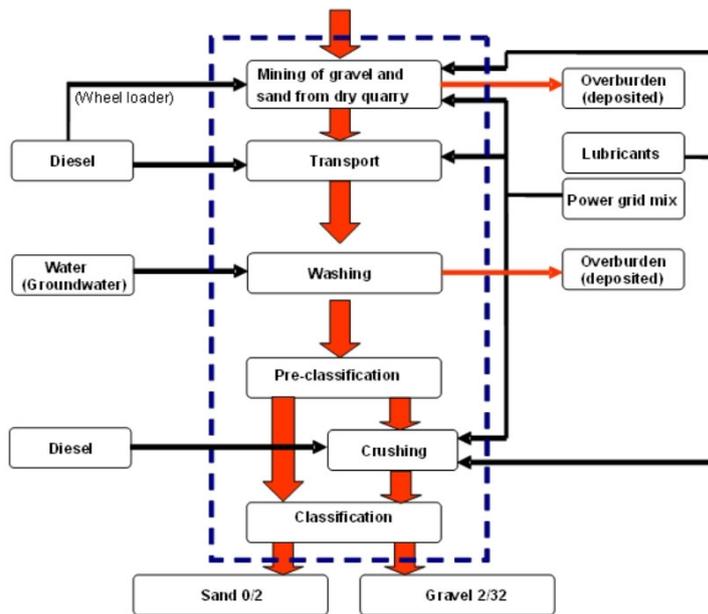


Figure: Production of sand and gravel from dry quarry - flowchart

Kies 2/32 (oekobau.dat: 1.2.01 Mineralische Baustoffe / Zuschläge / Sand und Kies)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225&stock=OBD_2019_I&lang=de

Die Aufbereitung der Rohstoffe beginnt mit dem Waschen der Gesteinskörner, die aus dem Tagebau gewonnen wurden. Durch die Zugabe von sauberem Wasser wird das Rohmaterial in verschiedenen Waschstufen von abschlämmbaren Substanzen (Lehm und Ton) und von Fremdstoffen (Holz, Kaolin, Kohle, Metalle etc.) befreit. Anschließend erfolgt eine Sortierung mit Hilfe von Vibrationssieben und/oder einer vorgeschalteten Sortiermaschine. Sand und Kies mit einem SiO₂-Gehalt größer als 96 % sind bekannt als Quarzsand oder Quarzkies. Anschließend wird die Körnung mit Hilfe von Sieben klassifiziert nach Korngruppen.

Die Lebenszyklusanalyse von Kies umfasst den Prozess der Rohkies-Gewinnung und die Aufbereitung im Kieswerk. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Kies 2/32 am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden.

Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermische modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren

(Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert. "

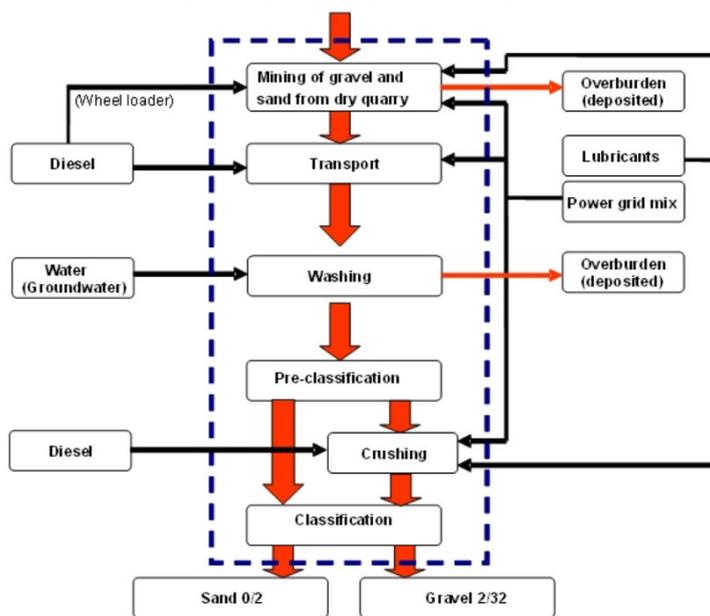


Figure: Production of sand and gravel from dry quarry - flowchart

Energiekennwerte Sand 0/2 & Kies 2/32

Indikator	Richtung	Einheit	Herstellung A1-A3
<u>Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</u>	Input	MJ	0,01067
<u>Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)</u>	Input	MJ	0
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	Input	MJ	0,01067
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)</u>	Input	MJ	0,03817
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)</u>	Input	MJ	0

Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Input	MJ	0,03817
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	Input	kg	0
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	Input	MJ	0
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	Input	MJ	0
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	Input	m ³	0,000007123
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	Output	kg	1,08E-09
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	Output	kg	0,02294
Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	Output	kg	0,000001548
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	Output	kg	0
Stoffe zum Recycling (MFR)	Output	kg	0
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	Output	kg	0
Exportierte elektrische Energie (EEE)	Output	MJ	0
Exportierte thermische Energie (EET)	Output	MJ	0
Primärstoff (PERT+PENRT Herstellung)			0.04884

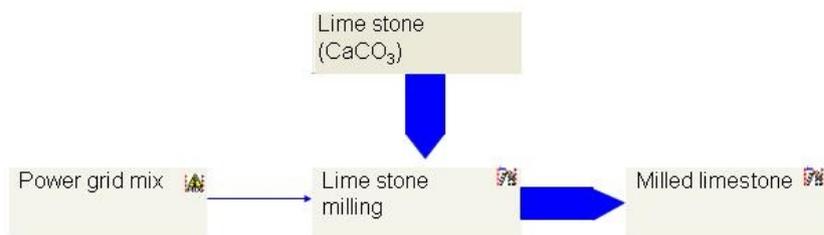
Splitt 2/15 (oekobau.dat: 1.2.02 Mineralische Baustoffe / Zuschläge / Naturstein)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uid=26ad7410-7fcb-42e8-b622-d1ba2edbf10c&stock=OBD_2019_I&lang=de

Die Lebenszyklusanalyse von Splitt umfasst den Prozess der Kalkstein-Gewinnung im Steinbruch, die Reinigung, die Vor- und Nachzerkleinerung sowie die Produktionsverwaltung. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Splitt am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermische modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die

thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert.

Broken and milled limestone



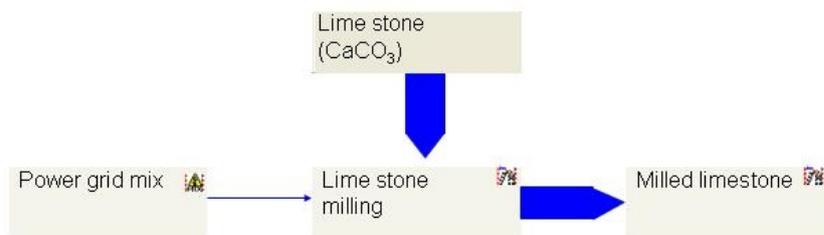
Schotter 16/32 (oekobau.dat: 1.2.02 Mineralische Baustoffe / Zuschläge / Naturstein)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bd6aa879-e6e6-4181-afc5-1374b2f32dd1&stock=OBD_2019_I&lang=de

Die Lebenszyklusanalyse von Schotter umfasst den Prozess der Kalkstein-Gewinnung im Steinbruch, die Reinigung, die Vorzerkleinerung sowie die Produktionsverwaltung. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Schotter am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermische modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen

Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert. "

Broken and milled limestone



Energiekennwerte Splitt 2/15 & Schotter 16/32

Indikator	Richtung	Einheit [MJ/kg]	Herstellung A1-A3
<u>Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,08726</u>
<u>Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,08726</u>
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	0,2004
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	0
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,2004</u>
<u>Einsatz von Sekundärstoffen (SM)</u>	<u>Input</u>	<u>kg</u>	0
<u>Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	0
<u>Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	0
<u>Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)</u>	<u>Input</u>	<u>m3</u>	0,0001051
<u>Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	2,426E-9
<u>Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	0,0001697
<u>Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	0,00001379
<u>Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	0
<u>Stoffe zum Recycling (MFR)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	0
<u>Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	0
<u>Exportierte elektrische Energie (EEE)</u>	<u>Output</u>	<u>MJ</u>	0
<u>Exportierte thermische Energie (EET)</u>	<u>Output</u>	<u>MJ</u>	0
Primärstoff (PERT+PENRT Herstellung)			<u>0,28766</u>

nat. GK rund (4/x) (ecoinvent 3.4)

Herstellungsphase A1-A3:

Die Herstellungsphase beinhaltet generell die Produktionsschritte in den Werken inklusive der Energiebereitstellung mit den dazugehörigen Vorketten, die Herstellung der Rohstoffe und Hilfsstoffe sowie deren Transport ins Werk, die Werksinfrastruktur bzw. -verwaltung (inklusive Trinkwasser- und Heizbedarf) und die Entsorgung der in der Produktion anfallenden Abfälle. Hinsichtlich der Energiebereitstellung wurde für den Elektrizitätsbedarf Strom auf der Mittelspannungsebene (Übertragung von 1 kWh Strom bei Mittelspannung) und für interne Transporte der Verbrauch an Diesel in den Transportgeräten angesetzt. Bei der Herstellung der Gesteinskörnungen fallen Materialverluste an, welche sich in abschlämmbarem Material und weiteren Materialverlustgliedern. Das in Werken verwendete Prozesswasser wird zum größten Teil aus der Natur entnommen (Grundwasser, Fluss, Regenwasser, etc.) und mit Hilfe von Aufbereitungsmassnahmen so oft wie möglich wiederverwendet. In einzelnen Werken wird zum Teil auch Trinkwasser dem Prozesswasserkreislauf zugeführt. Nicht mehr in den Prozesskreislauf rückgeführtes Prozesswasser versickert zum grössten Teil in der Werksanlage bzw. wird zu einem Teil als Feuchtegehalt mit der Gesteinskörnung ausgetragen. Die Wasserversorgung für Verwaltungsgebäude (Toilette, etc.) erfolgt entweder mit Trinkwasser oder mit Wasser aus der Natur. Das in den Werken anfallende Abwasser ist zum Teil auf die Wasserentsorgung für das in Verwaltungsgebäuden anfallende Wasser und zu einem geringeren Teil auf zu entsorgendes Prozesswasser zurückzuführen. Keines der untersuchten Werke konnte Angaben zur Staubentwicklung (Feinstaub) machen. Generell wird jedoch versucht über eine entsprechende Befeuchtung die Staubentwicklung so gering wie möglich zu halten. Eine Sensibilitätsanalyse zeigte, dass Feinstaubemissionen keine Belastungen hinsichtlich der in der EPD angewandten Parameter bewirken.

Datenqualität

Alle wesentlichen Daten wie Energie- und Rohstoffverbrauch, Hilfsstoffe, Abfälle und Infrastruktur innerhalb der Systemgrenze wurden von den analysierten Werken zur Verfügung gestellt. Dazu wurde ein mit dem Auftraggeber abgestimmter Fragebogen verwendet. Die erhobenen Daten wurden in Gesprächen mit den einzelnen Herstellern hinterfragt bzw. diskutiert und anschliessend ausgewertet. Die Daten sind aktuell (Jahresmittel über das Produktionsjahr 2016). Die Kriterien SÜGB-EPD-Programms (siehe Managementsystem-Handbuch [25]) bzw. des Nationalen Anhangs der SN EN 15804 [3] für Datenerhebung, generische Daten und das Abschneiden von Stoff- und Energieflüssen wurden eingehalten. Die Daten sind plausibel. Im Zuge der Aktualisierung der ecoinvent-Datenbank zur Version 3.4 im Jahr 2017 wurden Datensätze ergänzt und enthaltene Datensätze aktualisiert bzw. deren aktuelle Anwendbarkeit überprüft, d.h. Datensätze mit älterem Erhebungszeitpunkt (für EPD >10 Jahre relevant) wurden auf ihre Aktualität überprüft und entsprechend angepasst. Sämtliche angewandten Hintergrunddatensätze erfüllen somit die Kriterien des SÜGB-EPD-Programms (siehe Managementsystem-Handbuch) bzw. der SN EN 15804 [3]. Die EPD bezieht sich auf die Werke der FSKB-Mitglieder, welche die analysierten Gesteinskörnungen produzieren. Gemäss Homepage sind ca. 500 Kieswerke Mitglied beim FSKB. Dies sind deutlich über 95 % der Schweizer Kieswerke.

PERT + PENRT [MJ/kg]: 0,05396 MJ/kg

GK gebrochen (4/x) (ecoinvent 3.4)

Herstellungsphase A1-A3:

Die Herstellungsphase beinhaltet generell die Produktionsschritte in den Werken inklusive der Energiebereitstellung mit den dazugehörigen Vorketten, die Herstellung der Rohstoffe und Hilfsstoffe sowie deren Transport ins Werk, die Werksinfrastruktur bzw. -verwaltung (inklusive Trinkwasser- und Heizbedarf) und die Entsorgung der in der Produktion anfallenden Abfälle. Hinsichtlich der Energiebereitstellung wurde für den Elektrizitätsbedarf Strom auf der Mittelspannungsebene (Übertragung von 1 kWh Strom bei Mittelspannung) und für interne Transporte der Verbrauch an Diesel in den Transportgeräten angesetzt. Bei der Herstellung der Gesteinskörnungen fallen Materialverluste an, welche sich in abschlämmbarem Material und weiteren Materialverlustgliedern. Das in Werken verwendete Prozesswasser wird zum größten Teil aus der Natur entnommen (Grundwasser, Fluss, Regenwasser, etc.) und mit Hilfe von Aufbereitungsmassnahmen so oft wie möglich wiederverwendet. In einzelnen Werken wird zum Teil auch Trinkwasser dem Prozesswasserkreislauf zugeführt. Nicht mehr in den Prozesskreislauf rückgeführtes Prozesswasser versickert zum grössten Teil in der Werksanlage bzw. wird zu einem Teil als Feuchtegehalt mit der Gesteinskörnung ausgetragen. Die Wasserversorgung für Verwaltungsgebäude (Toilette, etc.) erfolgt entweder mit Trinkwasser oder mit Wasser aus der Natur. Das in den Werken anfallende Abwasser ist zum Teil auf die Wasserentsorgung für das in Verwaltungsgebäuden anfallende Wasser und zu einem geringeren Teil auf zu entsorgendes Prozesswasser zurückzuführen. Keines der untersuchten Werke konnte Angaben zur Staubentwicklung (Feinstaub) machen. Generell wird jedoch versucht über eine entsprechende Befeuchtung die Staubentwicklung so gering wie möglich zu halten. Eine Sensibilitätsanalyse zeigte, dass Feinstaubemissionen keine Belastungen hinsichtlich der in der EPD angewandten Parameter bewirken.

Datenqualität

Alle wesentlichen Daten wie Energie- und Rohstoffverbrauch, Hilfsstoffe, Abfälle und Infrastruktur innerhalb der Systemgrenze wurden von den analysierten Werken zur Verfügung gestellt. Dazu wurde ein mit dem Auftraggeber abgestimmter Fragebogen verwendet. Die erhobenen Daten wurden in Gesprächen mit den einzelnen Herstellern hinterfragt bzw. diskutiert und anschliessend ausgewertet. Die Daten sind aktuell (Jahresmittel über das Produktionsjahr 2016). Die Kriterien SÜGB-EPD-Programms (siehe Managementsystem-Handbuch [25]) bzw. des Nationalen Anhangs der SN EN 15804 [3] für Datenerhebung, generische Daten und das Abschneiden von Stoff- und Energieflüssen wurden eingehalten. Die Daten sind plausibel. Im Zuge der Aktualisierung der ecoinvent-Datenbank zur Version 3.4 im Jahr 2017 wurden Datensätze ergänzt und enthaltene Datensätze aktualisiert bzw. deren aktuelle Anwendbarkeit überprüft, d.h. Datensätze mit älterem Erhebungszeitpunkt (für EPD > 10 Jahre relevant) wurden auf ihre Aktualität überprüft und entsprechend angepasst. Sämtliche angewandten Hintergrunddatensätze erfüllen somit die Kriterien des SÜGB-EPD-Programms (siehe Managementsystem-Handbuch) bzw. der SN EN 15804 [3]. Die EPD bezieht sich auf die Werke der FSKB-Mitglieder, welche die analysierten Gesteinskörnungen produzieren. Gemäss Homepage sind ca. 500 Kieswerke Mitglied beim FSKB. Dies sind deutlich über 95 % der Schweizer Kieswerke.

PERT+PENRT [MJ/kg]: 0,06722 MJ/kg

7.2.2 Ziegel

Technische Beschreibung (inklusive der Hintergrundsysteme) und Energiekennwerte

Kies & Schotter (Durchschnitt aus Kies 2/32 nicht getrocknet (0.04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und Schotter 16/32 (0.28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02))

[A78]

siehe Beton

Sand 0/2 (oekobau.dat: 1.2.01 Mineralische Baustoffe / Zuschläge / Sand und Kies)

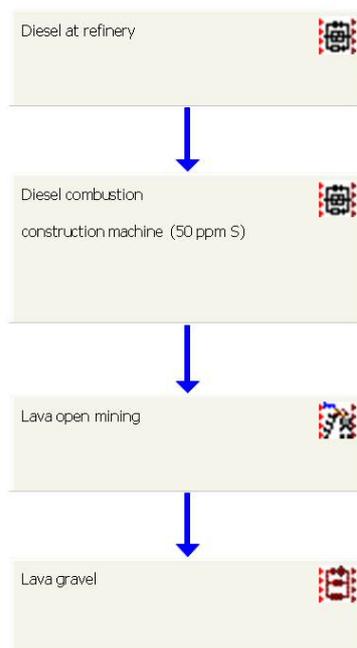
siehe Beton

Lava Körnung (0.056005 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.03)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f8d6bd85-55e0-42d3-982b-b814387b7f58&stock=OBD_2019_l&lang=de

Die Lebenszyklusanalyse von Lava Körnung umfasst den Prozess der Lava-Gewinnung im Tagebau. Zwischen Tagebau und Aufbereitung wird eine mittlere Transportdistanz von 10 km angenommen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Lava-Kies am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden.

Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermixe modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert. "

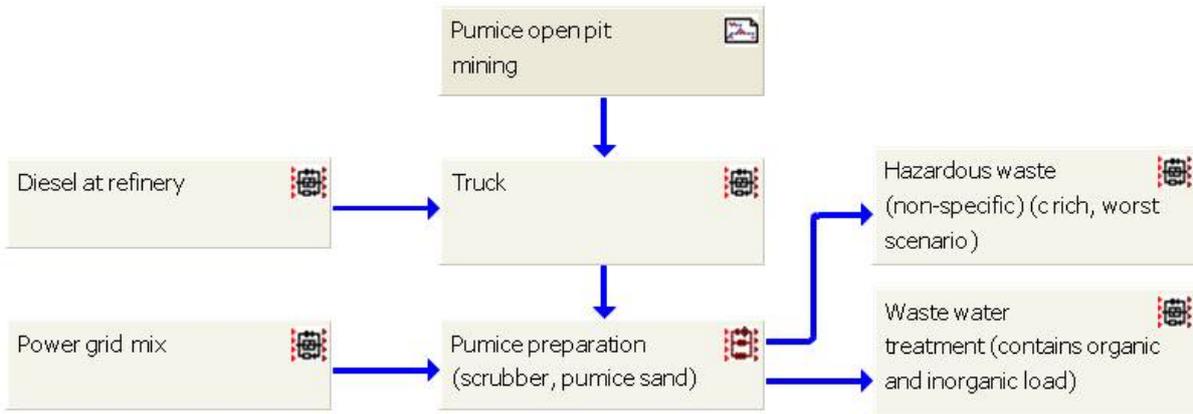


Indikator	Richtung	Einheit	Herstellung
			A1-A3
<u>Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,003465
<u>Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,003465</u>
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,05254
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,05254</u>
<u>Einsatz von Sekundärstoffen (SM)</u>	Input	<u>kg</u>	0
<u>Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
<u>Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
<u>Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)</u>	Input	<u>m3</u>	4E-06
<u>Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)</u>	Output	<u>kg</u>	3,31E-09
<u>Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)</u>	Output	<u>kg</u>	6,04E-08
<u>Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)</u>	Output	<u>kg</u>	6,04E-08
<u>Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)</u>	Output	<u>kg</u>	0
<u>Stoffe zum Recycling (MFR)</u>	Output	<u>kg</u>	0
<u>Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)</u>	Output	<u>kg</u>	0
<u>Exportierte elektrische Energie (EEE)</u>	Output	<u>MJ</u>	0
<u>Exportierte thermische Energie (EET)</u>	Output	<u>MJ</u>	0

Bimssand (0.12459 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.03)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uid=81a76ff5-8928-4f71-8e1f-c7c78b7e5a95&stock=OBD_2019_I&lang=de

Der lockere, kieshaltige Bimsstein wird beim Tagebau extrahiert. Nach dem Abbau unterteilt eine Verarbeitungsmaschine den rohen Bims in verschiedene Mineralgrößen-Klassen. Zunächst entzieht die Maschine alle metallischen Materialien durch Einsatz eines Magneten. Dann unterteilt hauptsächlich ein Sieb den rohen Bimsstein in zwei Gruppen, und jede Gruppe hat ihre eigene Bearbeitungsfolge. Die Körner, die größer als 2 mm sind, gelangen in einem Schüttelsieb, in dem der rohe Bimsstein auf einem impuls-gesteuerten Wasserbett in zwei Qualitätsgrade aufgeteilt. Der leichtere, schwimmende hochwertige Bimsstein wird in einem komplexen, aus 3 Schritten bestehenden Prozess getrennt, in dem die leichten sowie schwereren Teile mit schlechten Dämmeigenschaften entfernt werden. In einer separaten Verarbeitung des Feinmaterials (= 2 mm) kann der Bimsstein mit hohem Reinheitsniveau in diesem Teil von schwererem Sand getrennt werden. Das für diesen Prozess benötigte Wasser gelangt zu seinem eigenen Reservoir, wo es geklärt und wieder in Umlauf gebracht wird. Fremdkörper aus den Separierungsprozessen wie Kies/Grus/Schotter und Sand kann für den Straßenbau oder als Schleif-/Schmirgelmittel verwendet werden. Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermische modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert.



Indikator	Richtung	Einheit	Herstellung
			A1-A3
<u>Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,01439</u>
<u>Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	Input	MJ	0,01439
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0,1102</u>
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Input	MJ	0,1102
<u>Einsatz von Sekundärstoffen (SM)</u>	<u>Input</u>	<u>kg</u>	<u>0</u>
<u>Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
<u>Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
<u>Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)</u>	<u>Input</u>	<u>m3</u>	<u>0,0000143</u>
<u>Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	<u>6,00E-09</u>
<u>Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	<u>0,0001101</u>
<u>Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	<u>0,000001423</u>
<u>Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	<u>0</u>
<u>Stoffe zum Recycling (MFR)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	<u>0</u>
<u>Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)</u>	<u>Output</u>	<u>kg</u>	<u>0</u>
<u>Exportierte elektrische Energie (EEE)</u>	<u>Output</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
<u>Exportierte thermische Energie (EET)</u>	<u>Output</u>	<u>MJ</u>	<u>0</u>
Primärstoff PERT+PENRT Herstellung (MJ)			0,12459

Grüner Diabas (Grünstein) 0/1; 0/1,6; 0/2; 0/3

kein Datensatz zu Grünem Diabas verfügbar; aufgrund eines vergleichbaren Herstellungsaufwandes, Verwendung des Datensatzes "GaBi Basaltherstellung (gewaschen) GUID: {D37B2202-A7C9-4B80-AF67-C35C37689FE0}"

7.2.3 Kalksandstein

Technische Beschreibung (inklusive der Hintergrundsysteme) und Energiekennwerte

Sand 0/2 & Kies 2/32 (gem. ökobaudat 1.2.01: Sand 0/2 und Kies 2/32 nicht getrocknet)

siehe Beton

Kies 2/32 & Schotter 16/32 (Durchschnitt aus Kies 2/32 nicht getrocknet (0.04884 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.01) und Schotter 16/32 (0.28766 MJ/kg gem. ökobaudat 1.2.02))

siehe Beton

7.2.4 Flachglas

Technische Beschreibung (inklusive der Hintergrundsysteme) und Energiekennwerte

Sand 0/2 (oekobau.dat: 1.2.01 Mineralische Baustoffe / Zuschläge / Sand und Kies)

siehe Beton

7.2.5 Gips

Technische Beschreibung (inklusive der Hintergrundsysteme) und Energiekennwerte

Gipsstein (CaSO₄-Dihydrat) (oekobau.dat: 1.1.03 Mineralische Baustoffe / Bindemittel / Gips)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=fbd76e49-0fb1-47e0-abba-903ce1272684&stock=OBD_2019_III&lang=de

In Deutschland wird das natürliche dehydrierte Kalziumsulfat durch Tagebau produziert. Herkömmliche Extrahierungsverfahren wie das Bohren mit dieselbetriebenen Baumaschinen und die Sprechung mit Ammoniumnitrat/ANFO-Sprengstoffen werden angewendet. Der Gipsstein wird zerkleinert, gerieben, getrocknet und gereinigt. Der Transportweg zwischen Mine und Reinigungsanlage ist sehr kurz und wird über Förderbänder durchgeführt. Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermische modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert.

Indikator	Richtung	Einheit	Herstellung A1-A3
<u>Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</u>	Input	<u>MJ</u>	0.008807
<u>Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
<u>Total erneuerbare Primärenergie (PERT)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0.008807</u>

<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)</u>	Input	<u>MJ</u>	0.0312
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
<u>Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	<u>0.0312</u>
<u>Einsatz von Sekundärstoffen (SM)</u>	Input	<u>kg</u>	0
<u>Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
<u>Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)</u>	Input	<u>MJ</u>	0
<u>Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)</u>	Input	<u>m3</u>	0.000005245
<u>Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)</u>	Output	<u>kg</u>	9.073E-10
<u>Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)</u>	Output	<u>kg</u>	0.00001469
<u>Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)</u>	Output	<u>kg</u>	0.000001121
<u>Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)</u>	Output	<u>kg</u>	0
<u>Stoffe zum Recycling (MFR)</u>	Output	<u>kg</u>	0
<u>Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)</u>	Output	<u>kg</u>	0
<u>Exportierte elektrische Energie (EEE)</u>	Output	<u>MJ</u>	0
<u>Exportierte thermische Energie (EET)</u>	Output	<u>MJ</u>	0

<u>Primärstoff (PERT+PENRT Herstellung)</u>			<u>0,040007</u>
--	--	--	------------------------

Anhydrit Mix (oekobau.dat: 1.1.03 Mineralische Baustoffe / Bindemittel / Gips)

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=839771be-ab23-4873-8b14-b2aa0f6ce9d9&stock=OBD_2019_I&lang=de

Die Zusammensetzung der Anhydrit-Mischung besteht jeweils zu einem Drittel aus natürlichem Anhydrit aus Tagebau und Untertagebau, thermischem Anhydrit, das als Nebenprodukt aus der Flusssäure-Synthese entsteht (zwei Moleküle binden chemisch Wasser pro Kalziumsulfat-Molekül zu einer anhydrischen/wasserfreien Form von Kalziumsulfat). Das für den Kalzinierungsprozess verwendete dehydrierte Kalziumsulfat entsteht während der Rauchgasentschwefelung in Steinkohle-Kraftwerken. Ein Drittel des dehydrierten Kalziumsulfats aus Kraftwerken wird mit Zügen über längere Strecken transportiert. Um die Folgen der Herstellung dehydrierten Kalziumsulfats aus Kraftwerken einzuschätzen, wird der tatsächliche Stromverbrauch für die Dehydrierung und Reinigung des Gipsschlammes berücksichtigt. Das Anhydrit aus der Flusssäure-/Fluorwasserstoffsäure-Synthese wird über eine aktuelle Marktwert verwendende Zuordnung bewertet. Hintergrundsystem: Strom: Die Stromerzeugung wird entsprechend der länderspezifischen Randbedingungen modelliert. Die landesspezifische Analyse beinhaltet: 1.: Spezifische Kraftwerke der verschiedenen fossilen Energieträger und der Einsatz erneuerbarer Energien sind entsprechend der länderspezifischen Energieträgermixe modelliert. Die Analyse bezieht Stromimporte aus den Nachbarländern, Transmissions- und Verteilungsverluste und den Eigenverbrauch im Kraftwerk und bei der Verteilung bzw. Speicherung, z. B. durch Pumpspeicherwerke, ein. 2.: Die landes-/regionalspezifischen Technologiestandards sowie die Erzeugung in Elektrizitätskraftwerken und/oder in speziellen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sind berücksichtigt. 3.: Die länderspezifische

Energieträgerbereitstellung (mit Anteil der Importe und/oder Eigenversorgung) einschließlich der Energieträger-Eigenschaften (z. B. Elementar- und Energiegehalte) werden berücksichtigt. 4.: Die Förderung, Produktion, Verarbeitung und Transportprozesse werden entsprechend der Situation im jeweiligen Stromerzeugerland modelliert. Die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsverfahren (Emissionen und Wirkungsgrade) in den verschiedenen Energieerzeugerländern werden einbezogen, z. B. Rohöl-Veredelungsverfahren oder Abfackel-Raten an den Ölplattformen. Thermische Energie, Prozessdampf: Die Erzeugung von Dampf und thermischer Energie in Heizkraftwerken wird entsprechend der landesspezifischen Situation (Emissionsgrenzwerte, Energieträgerbasis) modelliert. Der Wirkungsgrad für die thermische Energieerzeugung beträgt per Definition 100% des Energieträgereinsatzes. Für Prozessdampf liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 85-95%. Die zur Heizenergie-Erzeugung verwendeten Energieträger werden entsprechend der nationalen Situation modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Transporte: Alle relevanten und bekannten Transportprozesse in Form von See- und Binnenschiffsverkehr sowie Bahn-, Lkw- und der Leitungstransport sind enthalten. Energieträger: Die Energieträger werden entsprechend der spezifischen Versorgungslage modelliert (siehe Kapitel Strom oben). Raffinerieprodukte: Diesel, Benzin, technische Gase, Heizöl, Schmierstoffe und Rückstände, wie Bitumen, werden mit einem parametrisierten länderspezifische Raffineriemodell modelliert. Das Raffinerie-Modell bezieht die länderspezifischen Veredelungsverfahren (z. B. Emissionspegel, interner Energieverbrauch etc.) und das länderspezifische Produktspektrum ein, das sich je nach Land stark unterscheiden kann. Die Rohöl-Förderung wird gemäß der länderspezifischen Situation mit den jeweiligen Energieträger-Eigenschaften modelliert. "

Indikator	Richtung	Einheit	Herstellung A1-A3
<u>Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,1312
<u>Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,0000
<u>Total erneuerbare Primärenergie (PERT)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	0,1312
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)</u>	Input	<u>MJ</u>	1,7270
<u>Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,0000
<u>Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)</u>	<u>Input</u>	<u>MJ</u>	1,7270
<u>Einsatz von Sekundärstoffen (SM)</u>	Input	<u>kg</u>	0,0000
<u>Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,00
<u>Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)</u>	Input	<u>MJ</u>	0,00
<u>Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)</u>	Input	<u>m³</u>	0,0002259
<u>Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)</u>	Output	<u>kg</u>	1,24E-09
<u>Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)</u>	Output	<u>kg</u>	0,00054340
<u>Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)</u>	Output	<u>kg</u>	0,00002389
<u>Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)</u>	Output	<u>kg</u>	0,00
<u>Stoffe zum Recycling (MFR)</u>	Output	<u>kg</u>	0,00
<u>Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)</u>	Output	<u>kg</u>	0,00

Exportierte elektrische Energie (EEE)	Output	<u>MJ</u>	0,00
Exportierte thermische Energie (EET)	Output	<u>MJ</u>	0,00

<u>Primärstoff (PERT+PENRT Herstellung)</u>			<u>1,85820</u>
---	--	--	----------------

7.2.6 PVC

Technische Beschreibung (inklusive der Hintergrundsysteme) und Energiekennwerte

PVC-Granulat oder PVC-Pulvermischung (Dryblend) gem. EPD of the European Plastics Manufacturers; PVC Suspension polymerisation

https://pvc4pipes.com/wp-content/uploads/2018/02/PlasticsEurope_Eco-profile_VCM_PVC_2015-05.pdf

Kein Datensatz in der Ökobaudat vorhanden.

Beschreibung des Produkts und des Produktionsprozesses

Dieses Öko-Profil und die EPD stellen die durchschnittliche industrielle Produktion von Vinylchloridmonomer (VCM) und Polyvinylchlorid (PVC) von der Wiege bis zum Gate dar. Das Öko-Profil behandelt die beiden wichtigsten Produktionsprozesse für PVC getrennt: S-PVC aus Suspensionspolymerisation und E-PVC aus Emulsionspolymerisation. Der Produktionsprozess Polyvinylchlorid (PVC) wird durch Polymerisation von Vinylchloridmonomer (VCM) hergestellt, das in Europa durch das thermische Cracken von Ethylendichlorid (EDC) hergestellt wird. In Europa (EU27+NO+CH) wird das meiste Ethylen zur Herstellung von EDC verwendet, das durch Steamcracken von Naphtha hergestellt wird. Chlor wird durch Elektrolyse von Natriumchlorid (NaCl) hergestellt. Das Modell dieses Ökoprototyps umfasst die Gewinnung und Raffinerie von Rohöl für die Ethylenproduktion, Salzurückgewinnung und Chlorelektrolyse sowie die Herstellung von EDC und die endgültige Polymerisation von VCM zu PVC. Das Modell des Polymerherstellungsprozesses stellt die wichtigsten kommerziellen PVC-Produktionstechnologien dar, die Suspensionsprozess (S-PVC) und Emulsionsprozess (E-PVC) sind. Auswirkungen im Zusammenhang mit anormalen Prozessbedingungen (z. B. Unfälle) werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Datenquellen und Allokation Ethylenproduktion wird basierend auf dem Öko-Profil und der EPD für Ethylen [PLASTICSEUROPE 2012A] modelliert, und die Chlorproduktion basiert auf dem Öko-Profil und der EPD für Chlor [EUROCHLOR 2013]. Die Herstellung des Ausgangsstoffs Ethylendichlorid (EDC), des Monomers Vinylchlorid (VCM) und des Polymerherstellungsprozesses selbst basiert auf vertraulichen Prozess- und Emissionsdaten, die von den beteiligten Produktionsstätten gesammelt wurden (Primärdaten).

Die folgenden Tabellen zeigen die Umweltleistungsindikatoren, die mit der Herstellung von 1 kg Suspensions-PVC-Polymer (S-PVC, ohne Additive) verbunden sind.

Input parameters

Indicator	Unit	Value
Non-renewable materials		
• Minerals	g	643
• Fossil fuels	g	1,150
• Uranium	g	0.013
Renewable materials (biomass)	g	0.343
Water use ¹⁾	g	10,000
Non-renewable energy resources ²⁾		
• for energy	MJ	28.61
• for feedstock	MJ	26.85
Renewable energy resources (biomass) ²⁾		
• for energy	MJ	1.27
• for feedstock	MJ	0
¹⁾ This indicator comprises only process water. Cooling water is not included.		
²⁾ Calculated as upper heating value (UHV).		

Output parameters

Indicator	Unit	Value
GWP ³⁾	kg CO ₂ eq	1.900
ODP ⁴⁾	g CFC-11 eq	n/a ⁵⁾
AP ⁴⁾	g SO ₂ eq	5.300
POCP ⁴⁾	g Ethene eq	0.420
NP ⁴⁾	g PO ₄ eq	0.620
Dust/particulate matter	g PM ₁₀	0.430
Total particulate matter	g	0.486
Waste		
• Non-hazardous	kg	0.142
• Hazardous	kg	0.008
³⁾ IPCC 2004 ⁴⁾ CML 2002		
⁵⁾ Relevant LCI entries are below quantification limit.		

$$26.61 + 28.85 + 1.27 = 56,73 \text{ MJ/kg}$$

7.2.7 Steinwolle

Vulkanische Gesteine wie Diabas oder Basalt gem. GaBi Basaltherstellung (gewaschen) GUID: {D37B2202-A7C9-4B80-AF67-C35C37689FE0}

Inputs/Outputs	DE: Basaltherstellung (gewaschen) ts	DE: Kalkstein (CaCO ₃ , Reinstein gewaschen) ts
Größen		
SoFi Größen		
Technische Größen		
Umweltliche Größen		
AADP, TU Berlin		
Auswirkungen ILCD / PEF Empfehlung v1.09		
CML2001 - Jan. 2016		
EDIP 2003		
EF 1.8		
EPD EN 15804		
EPS 2015d - inkl. Auswirkungen von Sekundärpartikeln		
EPS 2015dx - Exkl. Auswirkungen von Sekundärteilchen		
Frühere Versionen der Methoden		
Geruch		
Impact 2002+		
IPCC AR5		
Landnutzung LANCA v2.3 2016		
NF EN 15804		
Primärenergie		
Primärenergiebedarf aus nicht reg. Ressourcen (oberer Heizwert) [MJ]	0,0974	0,067
Primärenergiebedarf aus nicht reg. Ressourcen (unterer Heizwert) [MJ]	0,0906	0,0624
Primärenergiebedarf aus reg. Ressourcen (oberer Heizwert) [MJ]	0,0179	0,0172
Primärenergiebedarf aus reg. Ressourcen (unterer Heizwert) [MJ]	0,0179	0,0172
Primärenergiebedarf aus reg. und nicht reg. Ressourcen (oberer Heizwert) [MJ]	0,115	0,0842
Primärenergiebedarf aus reg. und nicht reg. Ressourcen (unterer Heizwert) [MJ]	0,109	0,0796

PERT+PENRT: 0.109 MJ/kg (unterer Heizwert)

Basalt gem. ecoinvent 3.5

The module is designed for the use as raw-material for rockwool.;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] The module includes a mining step and a subsequent beneficiation step comprising crushing, washing and classification.

Ort der Datenerhebung: Data for one german quarry used as proxy for whole European situation.

PERT+PENRT: 0,13475 MJ/kg