

Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen)

Untersuchungsergebnisse der Prozessanalysen:

- Herstellung der RC-Gesteinskörnung
- Herstellung des RC-Betons
- Herstellung von Normalbeton

zum Forschungsprojekt:

Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung

(gefördert von der DBU; FKZ: AZ 26101-23)

Brandenburgische Technische Universität Cottbus,
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik,
Lehrstuhl Altlasten
Fachgruppe Bauliches Recycling

Lehrstuhlinhaber:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Spyra
Projektleiterin:	Dr.-Ing. Angelika Mettke Fachgruppenleiterin Bauliches Recycling Tel.: 0355-69-2270, Fax: 0355-69-3171 E-Mail: mettke@tu-cottbus.de
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Sören Heyn Dr.-Ing. Angelika Mettke

Inhalt

Inhalt	1
0 Einleitende Bemerkungen	3
1 Festlegung der Systemgrenzen; vergleichbare Szenarien	4
2 Stoffflussbetrachtung	7
2.1 Selektiver Abbruch - TP 1	7
2.2 Konventionelle Aufbereitung - TP 1	8
2.3 Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) – TP2	11
2.4 Ausgangsstoffe der Betonherstellung – TP2 und TP3	17
2.5 Herstellung von Transportbeton - TP 2 und TP3	22
2.6 Verarbeitung von Transportbeton - TP 2 und TP3.....	23
2.7 Stofffluss Gesamtprozess	26
3 Energetische Betrachtung	30
3.1 Selektiver Abbruch – TP1	31
3.2 Konventionelle Aufbereitung – TP1	32
3.3 Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) – TP2	36
3.4 Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Betonherstellung – TP2 und TP3	41
3.5 Herstellung von Transportbeton – TP 2 und TP 3	49
3.6 Verarbeitung von Ortbeton – TP2 und TP3	50
3.7 Energieverbrauch Gesamtprozess	51
3.8 Fazit - Betrachtungen zum Energieaufwand.....	56
4 Betrachtung des kumulativen Energieaufwandes (KEA) und ausgewählter Emissionen....	58
4.1 Selektiver Abbruch – TP1	59
4.2 Konventionelle Aufbereitung – TP1	60
4.3 Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) – TP2	61
4.4 Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Betonherstellung – TP2 und TP3	63
4.5 Herstellung von Transportbeton – TP2 und TP3	67
4.6 Verarbeitung von Ortbeton– TP2 und TP3	68
4.7 Emissionen Gesamtprozess	68
4.8 Fazit – Betrachtungen zum KEA und ausgewählten Emissionen.....	71

5	Schlussfolgerungen	79
6	Ausblick	79
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	83
	Quellenangaben	85

0 Einleitende Bemerkungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung am Beispiel einer Wohnbebauung an der Rheinallee in Ludwigshafen“ wurden die Prozesse zur Herstellung der RC-Gesteinskörnungen 2/8 mm und 8/16 mm (Betonspalt) und der (entwickelten) RC-Betonrezeptur C 30/37 untersucht. Der RC-Beton der Betondruckfestigkeitsklasse C 30/37 wurde im Haus Nummer 3 der neuen Rheinuferbebauung Ludwigshafen eingesetzt.

Die Untersuchungen erfolgten durch die Fachgruppe Bauliches Recycling in Kooperation mit:

- Scherer und Kohl GmbH & Co.KG als Hersteller der RC-Gesteinskörnungen,
- TBS Transportbeton-Service GmbH als Transportbetonhersteller,
- weisenburger bau GmbH als Rohbau ausführendes Unternehmen.

Mit dem Rohbau des Pilotprojektes wurde im September 2009 begonnen; im Dezember 2009 war die Fertigstellung. Die Menge des eingesetzten RC-Betons beträgt ~ 500 m³ für alle aufgehenden Wände, Stützen und Geschossdecken ab Decke Erdgeschoss sowie für Fahrstuhlschächte in Sichtbetonausführung (Expositionsklasse XC1 – Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte).

Die Prozessuntersuchungen erfolgten anhand ermittelter Daten bei den beteiligten Firmen – wie zuvor genannt.

Bei der folgenden ökologischen Betrachtung werden die Prozessketten des Betoneinsatzes mit und ohne Nutzung von RC-Gesteinskörnungen – Herstellung von RC-Beton im Vergleich zum Normalbeton - untersucht und gegenübergestellt. Zur Untersuchung des Ressourcenbedarfs und der Emissionsbelastung, speziell der atmosphärisch relevanten Schadstoffe aus dem Energieerzeugungsprozess (CO₂, SO₂, NO_x) und der Abfallproblematik, erfolgten nachstehende Einzeluntersuchungen:

- Analyse des Stoffflusses auf der Grundlage der Materialbilanzierung im Aufbereitungsprozess zur Ermittlung des Rohstoffbedarfs,
- Ermittlung des Energie- und somit des Energieträgerverbrauchs durch Energiebilanzierung der eingesetzten Maschinen und Geräte,
- Bestimmung des atmosphärischen Schadstoffpotenzials auf Basis des Energieverbrauchs.

Lärm-, Erschütterungs- und Staubemissionen sind nicht erfasst worden. Die Produktionsanlagen sind nach BImSchV genehmigt.

1 Festlegung der Systemgrenzen; vergleichbare Szenarien

Der Gesamtprozess der Herstellung und Verwendung von RC- und Normalbeton sowie der Systemgrenzen der gewählten Szenarien ist in Abb. 1 dargestellt.

Gegenübergestellt werden zwei Szenarien (vgl. Tab. 1):

- **Szenario 1:**
(Nachhaltigkeits-
szenario) Abbruch und sortenreine Aufbereitung des anfallenden Bauschutts resp. Betonbruchs und Verwertung des Betonsplitts zur Herstellung von RC-Beton
- **Szenario 2:**
(Vergleichs-
szenario) Abbruch und Aufbereitung des anfallenden Bauschutts resp. Betonbruchs und Verwertung des Betonsplitts im Straßen-, Tief- und Erdbau und Herstellung von Normalbeton

Die Szenarien werden in Teilprozesse (TP) unterteilt (entspr. Festlegung der Systemgrenzen, s. Abb. 1):

- TP 1: Abbruch + Aufbereitung (Systemgrenze blau markiert),
- TP 2: Herstellung von RC-Beton (Systemgrenze grün markiert),
- TP 3: Herstellung von Normalbeton (Systemgrenze rot markiert).

Ausgangspunkt für beide Szenarien ist der Gebäudeabbruch. Da Gebäude nicht zur Gewinnung von RC-Gesteinskörnungen abgerissen werden, sondern aufgrund der Beendigung der Nutzungsdauer bspw. durch fehlende Nutzungsalternativen oder aufgrund des Endes ihrer Lebensdauer erfolgt, ist der TP 1 auch im Szenario 2 zu berücksichtigen. Der Abbruch der Baukonstruktion findet - unabhängig des Verbleibs des anfallenden Bauschutts – so oder so statt. Das Ziel beider Szenarien besteht darin, ein Gebäude aus Beton zu errichten. Damit haben Szenario 1 wie 2 den gleichen Ausgangs- und Endpunkt; sie sind somit vergleichbar.

Voraussetzung für die Herstellung von RC-Gesteinskörnungen zur Betonproduktion ist der Anfall von Betonabbruchschutt (Betonbruch). Die daraus gewonnenen Gesteinskörnungen 2/8 mm und 8/16 mm werden anteilig bei der RC-Betonherstellung verwendet (vgl. Bericht: Untersuchungsergebnisse zu den Eigenschaften der entwickelten Betonrezepturen, vom 30.11.2009).

Da im Zuge der Aufbereitung neben den zu verwendenden Gesteinskörnungen 2/8 mm und 8/16 mm vom Liefertyp 1 weitere Gesteinskörnungen (22/32 mm, 32/56 mm und 56/x mm; vgl. Abb. 11 ff.) erzeugt werden, erfolgt die Verwertung dieser sowie der anderen mit anfallenden Abbruchmaterialien (Estrich, Mauerwerk, Stahlschrott,...; vgl. Abb. 2) traditionell.

Für Szenario 2 gilt insgesamt eine konventionelle Aufbereitung und traditionelle Verwertung. Szenario 2 bildet somit den derzeit üblichen Prozess nach Ende der Nutzungsdauer oder Lebensdauer eines Gebäudes ab. Szenario 1 entspricht der Zielstellung im „Leuchtturmprojekt“: die hochwertige Nutzung des Betonabbruchschutts als Rohstoffressource zur Herstellung von Konstruktionsbeton.

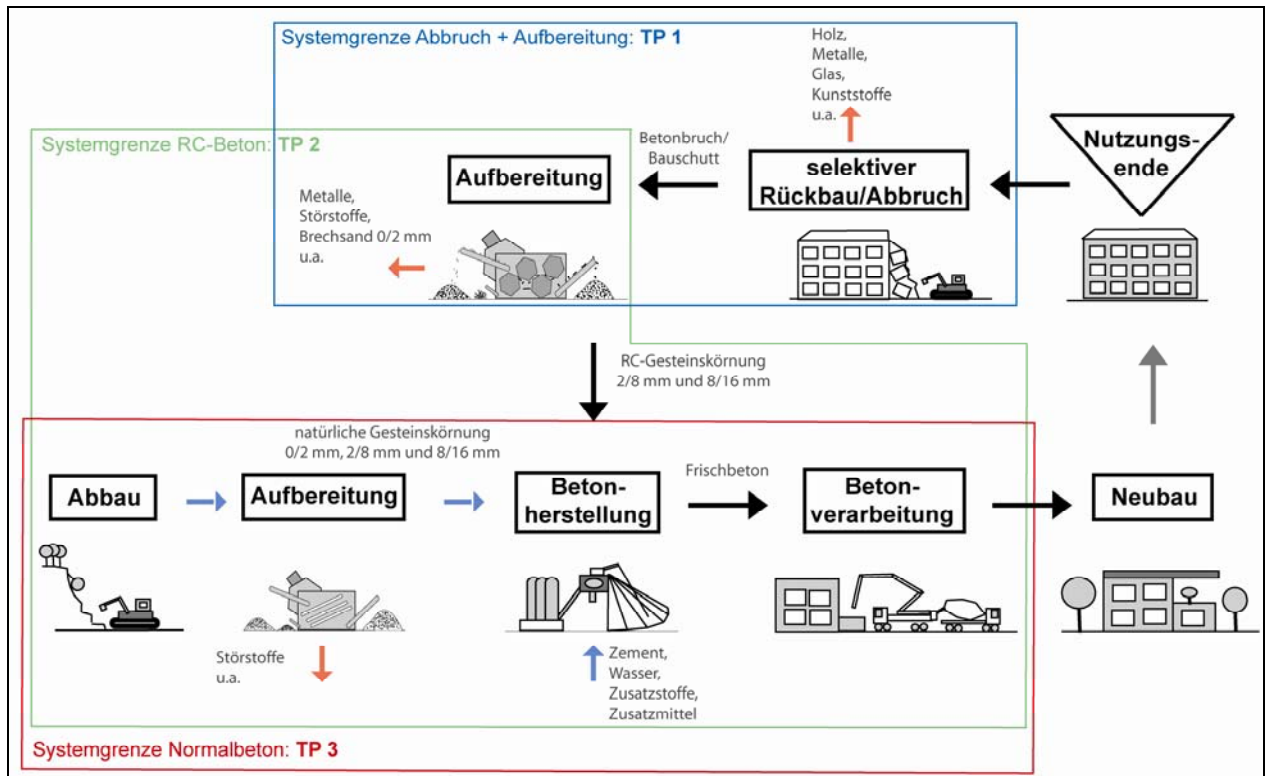


Abb. 1: Gesamtprozess und Systemgrenzen der Herstellung von RC-/Normalbeton

Die zu untersuchenden Teilprozesse der Szenarien 1 und 2 sind in nachfolgender Tab. 1 gegenübergestellt.

Tab. 1: Gegenüberstellung Szenario 1 - RC-Beton“ und Szenario 2 - Normalbeton

	Szenario 1: Abbruch und hochwertige Verwertung	Szenario 2: Abbruch und traditionelle Verwertung
	Herstellung von RC-Beton	Herstellung von Normalbeton
	Teilprozesse	
Qualitätssicherung / Überwachung	Selektiver Abbruch	Selektiver Abbruch
	Aufbereitung / Herstellung Betonsplitt / RC-Material	Aufbereitung / Herstellung RC-Material
	Gewinnung / Herstellung natürlicher Gesteinskörnung, Zement, ...	Gewinnung / Herstellung natürlicher Gesteinskörnung, Zement, ...
	Herstellung RC-Beton	Herstellung Normalbeton
	Verarbeitung RC-Beton	Verarbeitung Normalbeton
	Transporte	Transporte

Der Vergleich der erstellten Szenarien kann über die in Tab. 2 dargestellte Berechnungsbasis erfolgen.

Tab. 2: Berechnungsgrundlage zum Szenarienvergleich

Szenario 1:	Szenario 2:
Abbruch + Aufbereitung + RC-Beton	Abbruch + Aufbereitung + Normalbeton
TP 1.1: Abbruch + Transport des Betonbruchs ¹⁾ zur RC-Anlage $P_{TP1.1} = P_{Abbr.} + P_{Trans.Betonbruch}$	TP 1.2: Abbruch + Transport des Betonbruchs ¹⁾ + konventionelle Aufbereitung des Beton- bruchs ²⁾ $P_{TP1.2} = P_{Abbr.} + P_{Trans.Betonbruch} +$ $P_{konv.Aufb.}$
TP 2: Herstellung Betonsplitt (RC-GK) + Transport Betonsplitt zur Betonmischanlage + Bereitstellung (Gewinnung/Herstellung, Trans- port) weiterer Ausgangsstoffe RC-Beton + Herstellung RC-Beton + Transport RC-Beton + Verarbeitung RC-Beton $P_{TP2} = P_{Herst.RC-GK} + P_{Trans.RC-GK} +$ $P_{Herst.RC-Ausg.} + P_{Trans.RC-Ausg.} +$ $P_{Herst.RC-Beton} + P_{Trans.RC-Beton} +$ $P_{Verarb.RC-Beton}$	TP 3: Bereitstellung (Gewinnung/Herstellung, Transport) Ausgangsstoffe Normalbeton + Herstellung Normalbeton + Transport Normalbeton + Verarbeitung Normalbeton $P_{TP3} = P_{Herst.Ausg.} + P_{Trans.Ausg.} +$ $P_{Herst.Beton} + P_{Trans.Beton} + P_{Verarb.Beton}$
$P_{ges.RC-Beton} = P_{TP1.1} + P_{TP2}$	$P_{ges.Beton} = P_{TP1.2} + P_{TP3}$

Der angegebene Parameter P kann im Weiteren durch die relevanten Parameter Energieaufwand E oder Emissionen EM ersetzt werden.

¹⁾ Die Betrachtung der Verwertung/Entsorgung der Restmassen aus dem Abbruch entfällt in beiden Szenarien.

²⁾ Die Menge des konventionell aufzubereitenden Betonbruchs entspricht der erforderlichen Betonbruchmenge in Szenario 1.

2 Stoffflussbetrachtung

Die ökologischen Betrachtungen erfordern eine detaillierte Analyse der einzelnen Teilprozesse hinsichtlich des vorhandenen Stoffflusses, um anhand der notwendigen Massenbewegungen und Verarbeitungsprozesse die erforderlichen Geräteeinsätze, Energieaufwände und resultierenden klimarelevanten Emissionen ableiten zu können.

2.1 Selektiver Abbruch - TP 1

Der Abbruch von Gebäuden erfolgt nicht auf Grund der Gewinnung sekundärer Ressourcen sondern bspw. in Hinblick auf den Abbau von Leerständen, der Beseitigung von Gefahrenquellen und der Freimachung von Bauflächen. In Abbrüchen wird daher in der Praxis die möglichst kostengünstige Beseitigung von Bauwerken gesehen. Doch die DIN 18007, Anhang B fordert: „ Durch die Vorgaben der Kreislaufwirtschaft sind für die umweltgerechte und gesamtwirtschaftliche Lösung von Abbruchaufgaben geeignete, objektspezifische Verfahrenskombinationen auszuwählen, welche insbesondere die Umweltaspekte wie Separierung, Sortenreinheit und Getrennthaltung der anfallenden Materialien im Hinblick auf eine mögliche Kontaminierung mit Schadstoffen und vorhandene Verwertungs- bzw. Beseitigungsmöglichkeiten in angemessener Weise berücksichtigen.“

Allgemein gilt also für den Abbruch, eine möglichst sortenreine Gewinnung der verschiedenen verbauten Materialien zu erzielen. Durch diese Separierung lassen sich zum einen über den Verkauf, bspw. von Metallschrott, Erlöse erzielen. Zum anderen können Annahmekosten an RC-Anlagen und bei Entsorgung gesenkt werden. Aus sortenreinen Materiallieferungen resultieren geringere Aufbereitungsaufwände für die RC-Unternehmen, um höhere Produktqualitäten zu erzielen.

Störstoffe lassen sich in der Beräumungs- und Entkernungsphase (vor dem eigentlichen Abbruchprozess) zielgerichtet und deutlich effizienter entnehmen als aus einem heterogenem Materialgemisch in der RC-Anlage. Schadstoffbelastete Materialien werden in RC-Anlagen abgewiesen.

Die Separierung der Abbruchmaterialien vor und beim Abbruch wird allerdings immer nur soweit betrieben werden, wie sich die erforderlichen Aufwendungen durch die Verringerung der Verwertungs- und Entsorgungskosten decken lassen. Für den Abbruchunternehmer ist es dabei irrelevant, welche Verwertungswege durch das anfallende Abbruchmaterial genutzt werden können. Ihn interessieren (derzeit) die Höhe der Annahmegebühren und der für ihn dafür erforderliche Aufwand.

Mit Bezug auf die Abschätzung des Einflusses des Abbruchprozesses hinsichtlich der Bilanzierung der RC-Gesteinskörnungs-/Betonproduktion bedeutet dies: Egal ob das Abbruchmaterial (Betonbruch) als RC-Gesteinskörnung im Betonbau oder als Schottertragschicht im Straßenbau oder anders eingesetzt wird, der Abbruchprozess unterscheidet sich nicht auf Grund des weiteren Verwertungsweges. Der Abbruchprozess ist für beide Verwertungsvarianten gleich.

An dieser Stelle soll gezeigt werden, dass bspw. das anfallende Material aus dem Abbruch eines Plattenbaugebäudes (Stahlbetonmontagebau) nicht von vornherein dem Liefertyp 1 der Gesteinskörnung nach DIN 4226-100 entspricht. Die Zusammensetzung der anfallenden Materialien ist in Abb. 2 aufgezeigt: gewonnene Abbruchmaterialien und deren Mengen resp. Anteile bezogen auf die Gewinnung

1 t Betonbruch. Die Untersuchungen führte die Fachgruppe Bauliches Recycling durch. Zugrunde gelegt wurde der Abbruch eines 6-geschossigen Wohngebäudes über 4 Segmente in industrieller Bauweise (Plattenbau, WBS 70) nach erfolgter Beräumung, Entkernung und Schadstoffentfrachtung.

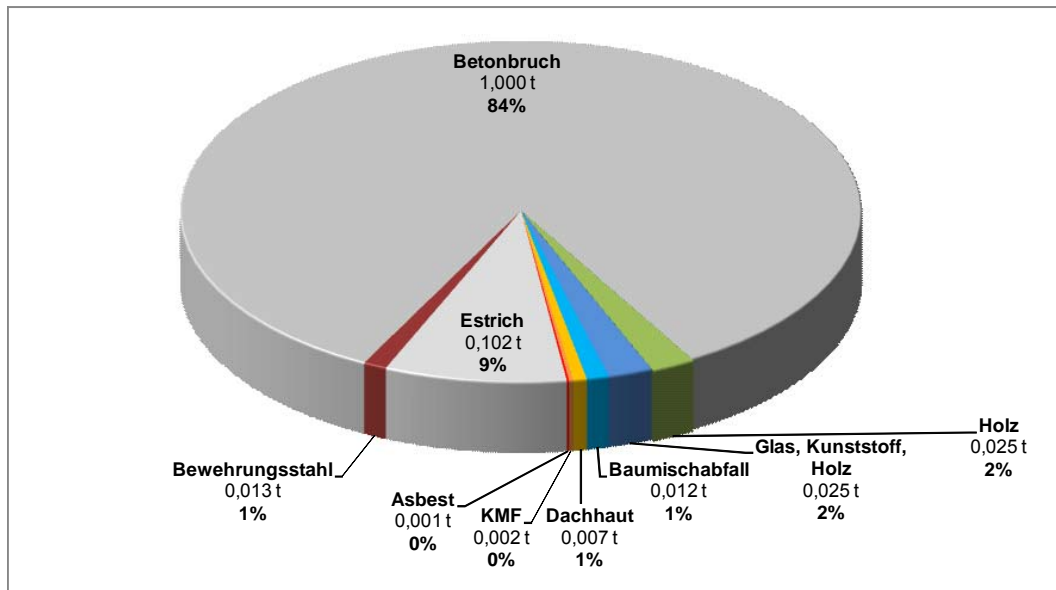


Abb. 2: Massen und Anteile der anfallende Materialien und Stoffe für die Gewinnung 1 t Betonbruchs beim Abbruch eines Stahlbeton-Wohngebäudes³

Bei der Gewinnung von 1 t Betonbruch aus dem Abbruch von Plattenbauten fallen ca. 187 kg verschiedene andere Abbruchmaterialien an. Die gesamte abzubrechende Menge beträgt somit ca. 1,2 t pro 1 t Betonbruch.

2.2 Konventionelle Aufbereitung - TP 1

Das RC-Unternehmen kann nur mit möglichst sortenreinen Materialien hohe Produktqualitäten erzielen. Dies gilt für alle RC-Produkte: für RC-Gesteinskörnungen zur Betonherstellung als auch für Frostschutzschichten, Schottertragschichten usw.. Somit ist die Anlieferung von sortenreinem Betonbruch gefragter und kostengünstiger als die Lieferung von gemischten Abbruchmaterialien, im Hinblick auf die höhere Produktqualität und folglich des größeren Produktabsatzes.

Infolge der geplanten Einführung der Ersatzbaustoffverordnung werden sich die umwelttechnischen Anforderungen an RC-Produkte hinsichtlich der Verwendung in technischen Bauwerken (z.B. Straßenbau, Tiefbau) und somit auch an deren Ausgangsstoffe (Sortenreinheit) weiter erhöhen. Nur geeignete, unbedenkliche Ersatzbaustoffe dürfen eingebaut werden. Der zulässige Einbau resp. die schadlose Verwendung mineralischer Ersatzbaustoffe richtet sich u.a. nach Materialwerten, in der Regel Eluatwerten.

Eine qualitative Aufbereitung von Abbruchabfällen ist in stationären Anlagen realisierbar.

³ Nach: Mettke, A.; Heyn, S.: Partiieller Rückbau eines Wohngebäudes der WBS 70 in Gröditz (Block 20), BTU Cottbus, LS Altlasten, FG Bauliches Recycling 2005.

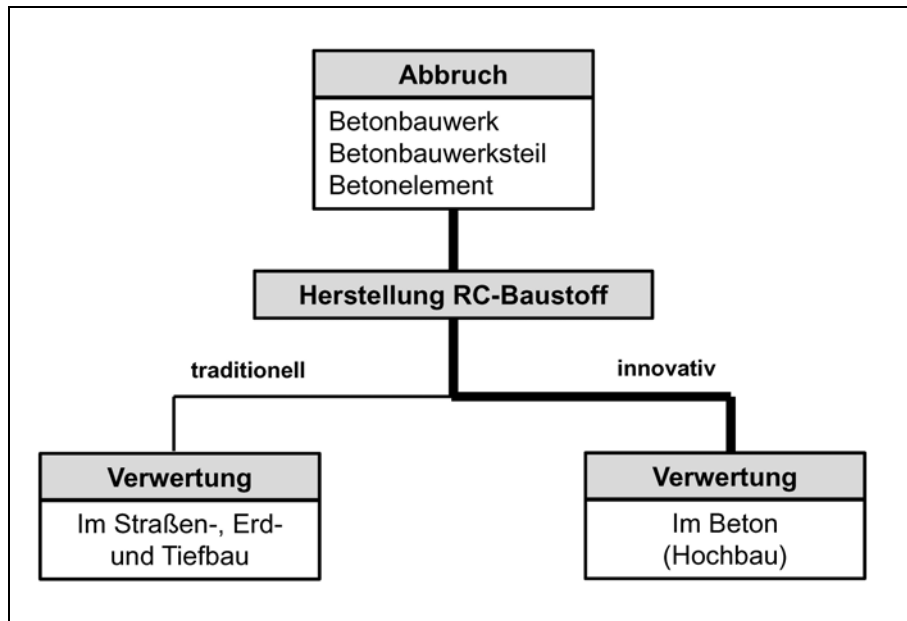


Abb. 3: Traditioneller und innovativer Verwertungsweg

Der Verfahrensablauf der betrachteten stationären Anlage der Fa. Scherer + Kohl für die konventionelle/traditionelle Aufbereitung von Betonbruch ist in Abb. 4 dargestellt. Hergestellt werden so bspw. Materialien für Schottertrag- und Frostschuttschichten im Straßen- und Wegebau.

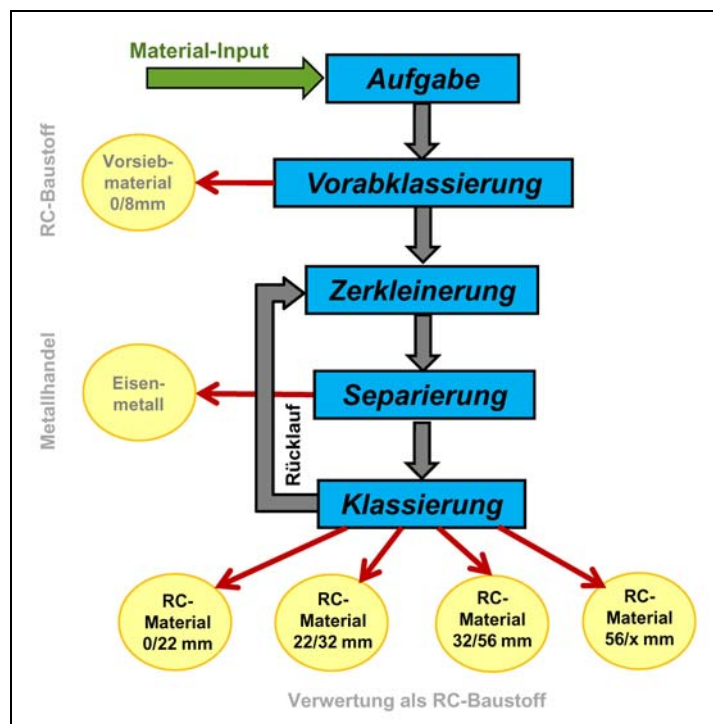


Abb. 4: Verfahrensablauf zur konventionellen Aufbereitung von Betonbruch⁴

Der betrachtete Verfahrensablauf der konventionellen Trockenaufbereitung der Fa. Scherer + Kohl erfolgt in 2 Durchläufen. Im ersten Durchlauf erfolgt nach Vorabsiebung des feineren Materials 0/8 mm der Zerkleinerungsprozess über den Backenbrecher und nachfolgender Separierung und Klassierung

⁴ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

der Gesteinskörnungen. Im 2. Durchlauf wird das Material > 22 mm durch den Prallbrecher erneut zerkleinert, separiert und klassiert (vgl. Abb. 5, Abb. 6).

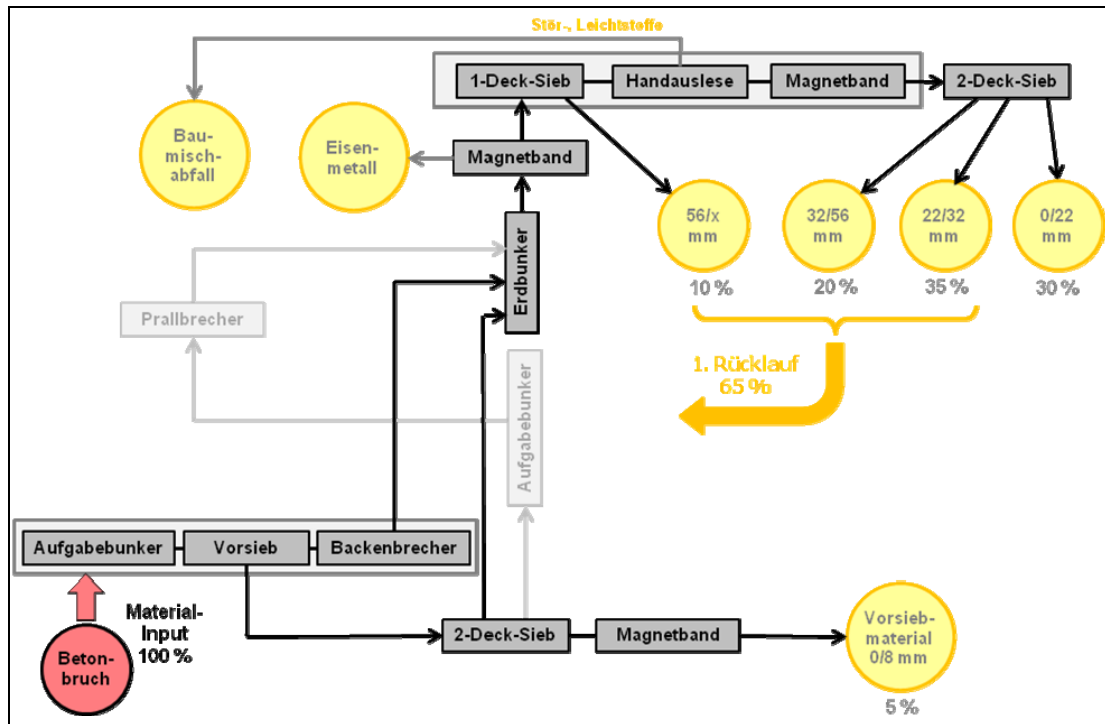


Abb. 5: Prozessübersicht und Massebilanz für den 1. Durchlauf der konventionellen Aufbereitung⁵

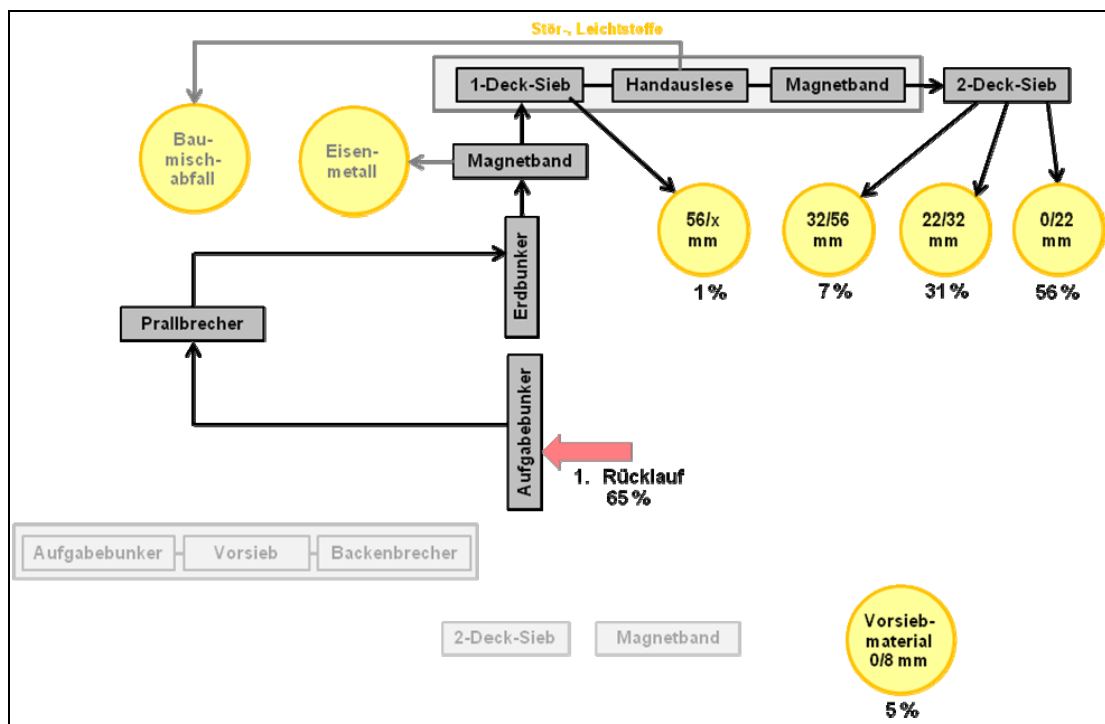


Abb. 6: Prozessübersicht und Massebilanz für den 2. Durchlauf der konventionellen Aufbereitung⁶

⁵ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG
⁶ Ebenda.

Aus beiden Durchläufen resultiert folgende Massebilanz.

Tab. 3: Massebilanz der konventionellen Aufbereitung

Durchläufe	Aufgabe / Rücklauf		Vorsieb 0/8	56/x	32/56	22/32	0/22	Gesamt 0/22
	Material	Anteil	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1. Durchlauf	alle	100,0%	5,0%	10,0%	20,0%	35,0%	30,0%	30,0%
2. Durchlauf	22/32	35,0%				18,8%	16,2%	
	32/56	20,0%			4,7%	8,2%	7,1%	
	56/x	10,0%		1,0%	2,1%	3,7%	3,2%	
	Gesamt	65,0%		1,0%	6,8%	30,7%	26,5%	56,5%
Gesamtprozess		100%	5%	1%	7%	31%		56%

Im 1. Durchlauf werden 100 % der Menge an Betonbruch aufbereitet (mit Backenbrecher). Im 2. Aufbereitungsgang durchlaufen 65 % der Betonbruchmenge des 1. Durchlaufs wiederholt den Teil der Anlage mit Prallbrecher.

Im Ergebnis beider Prozessdurchläufe stehen RC-Materialien (Betonspalte) verschiedener Körnungsgrößen zu folgenden Anteilen der aufbereiteten Betonbruchmenge (100 %) zur Verfügung:

- 5 % 0/8 mm,
- 56 % 0/22 mm,
- 31 % 22/32 mm,
- 7 % 32/56 mm,
- 1 % 56/x mm.

Die erzielten zertifizierten Aufbereitungsprodukte können dem Kunden als RC-Materialien verkauft werden.

2.3 Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonspalt) – TP2

Der Prozess der Herstellung von RC-Gesteinskörnung ist in zwei Teilverfahren gesplittet. Zunächst wird aus dem Betonbruch durch Zerkleinern, Separieren und Klassieren in der Trockenaufbereitung das sogenannte Waschmedium in einer Körnungsgröße 0/22 mm hergestellt. Im Waschprozess der Nassaufbereitung erfolgt dann eine weitere Separierung und Klassierung zur Herstellung der Zielkörnung 2/8 mm und 8/16 mm. Der Verfahrensablauf beider Teilprozesse ist in der Abb. 7 dargestellt.

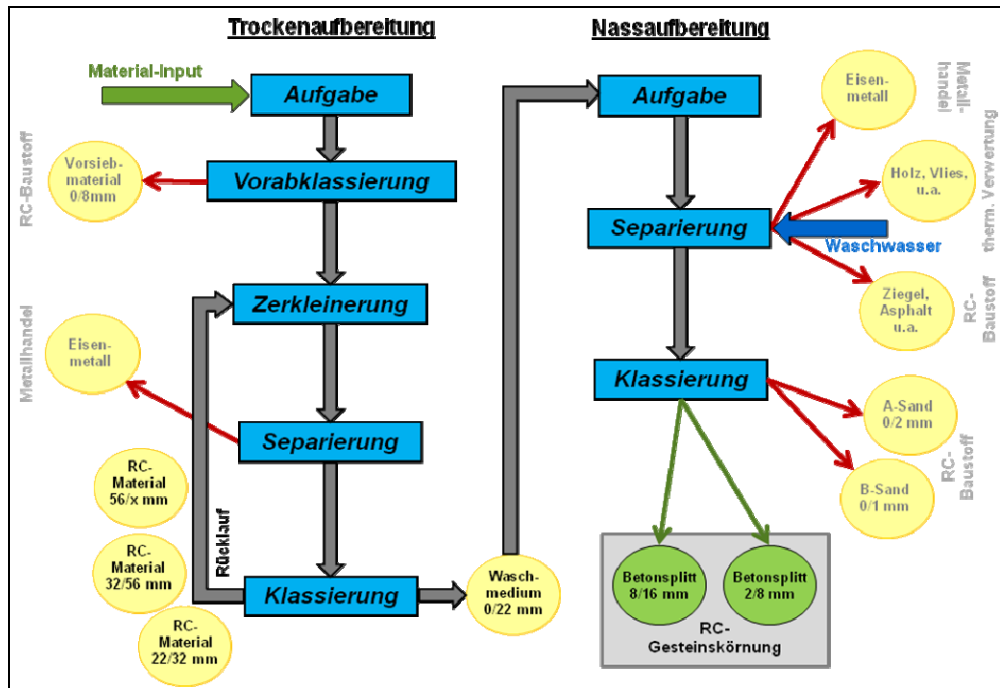


Abb. 7: Verfahrensablauf zur Herstellung von RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt)⁷

Das Verfahren der Trockenaufbereitung entspricht dem der konventionellen Aufbereitung in den ersten beiden Durchläufen (vgl. Abb. 5, Abb. 6). Zusätzlich erfolgt ein 3. Durchlauf, um den Anteil des Zielproduktes Waschmedium 0/22 mm für die Weiterverarbeitung zu erhöhen.

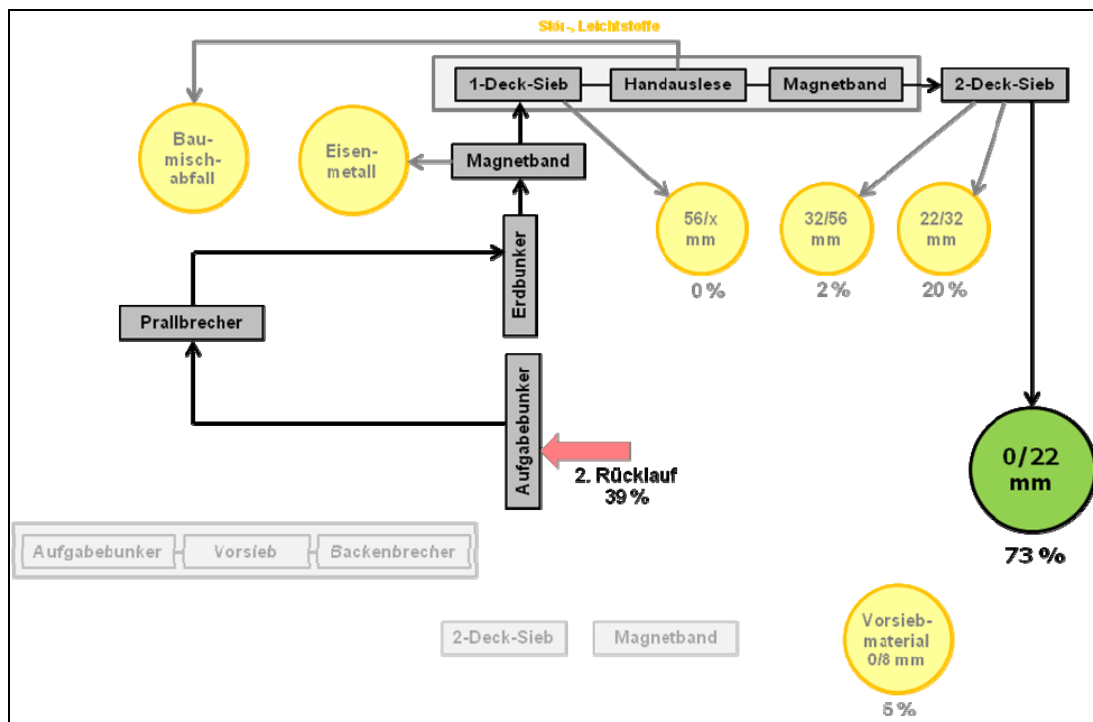


Abb. 8: Prozessübersicht und Massebilanz für den 3. Durchlauf der Trockenaufbereitung⁸

⁷ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

⁸ Ebenda.

Aus den drei Durchläufen der Trockenaufbereitung zur Herstellung des Waschmediums bei der Betonsplittproduktion resultiert folgende Massebilanz:

Tab. 4: Massebilanz der Trockenaufbereitung zur Betonsplitttherstellung

Durchläufe	Aufgabe / Rücklauf		Vorsieb 0/8	56/x	32/56	22/32	0/22	Gesamt 0/22
	Material	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1. Durchlauf	alle	100,0%	5,0%	10,0%	20,0%	35,0%	30,0%	30,0%
2. Durchlauf	22/32	35,0%				18,8%	16,2%	
	32/56	20,0%			4,7%	8,2%	7,1%	
	56/x	10,0%		1,0%	2,1%	3,7%	3,2%	
	Gesamt	65,0%		1,0%	6,8%	30,7%	26,5%	56,5%
3. Durchlauf	22/32	30,7%				16,6%	14,2%	
	32/56	6,8%			1,6%	2,8%	2,4%	
	56/x	1,0%		0,0%	0,2%	0,4%	0,3%	
	Gesamt	38,5 %		0,0%	1,8%	19,8%	16,9%	73,4%
Gesamtprozess		100%	5%	0%	2%	20%		73%

Nach dem 1. Durchlauf des gesamten Betonbruchs (100 %) unter Nutzung des Backenbrechers werden wie bei der konventionellen Aufbereitung die Körnungen > 22 mm (ca. 65 % des eingebrachten Materials) ein zweites Mal unter Nutzung des Prallbrechers nachbereitet. Im 3. Durchgang umfasst der Anteil der Körnungen > 22 mm noch ca. 39 %, welche wiederholt über den Prallbrecher zerkleinert und separiert sowie klassiert werden. Somit durchlaufen 100 % des aufgegeben Betonbruchs den 1. Prozessdurchgang über den Backenbrecher sowie 65 % des 2. und 39 % des 3. Durchlaufs über den Prallbrecher. Somit werden in Summe 104 % der aufzubereitenden Menge an Betonbruch im 2. und 3. Durchlauf nachbereitet.

Im Ergebnis der Trockenaufbereitung stehen neben dem Zielprodukt 0/22 mm RC-Materialien (Betonsplitt) verschiedener Körnungsgrößen zu folgenden Anteilen der aufbereiteten Betonbruchmenge (100 %) zur Verfügung:

- 5 % 0/8 mm,
- 73 % 0/22 mm (Waschmedium),
- 20 % 22/32 mm,
- 2 % 32/56 mm.

Die Nebenprodukte der Trockenaufbereitung können als RC-Materialien stofflich verwertet werden.

Das Waschmedium 0/22 mm wird in der Nassaufbereitung im Waschverfahren weiter separiert und klassiert. Eine Prozessübersicht gibt Abb. 9.

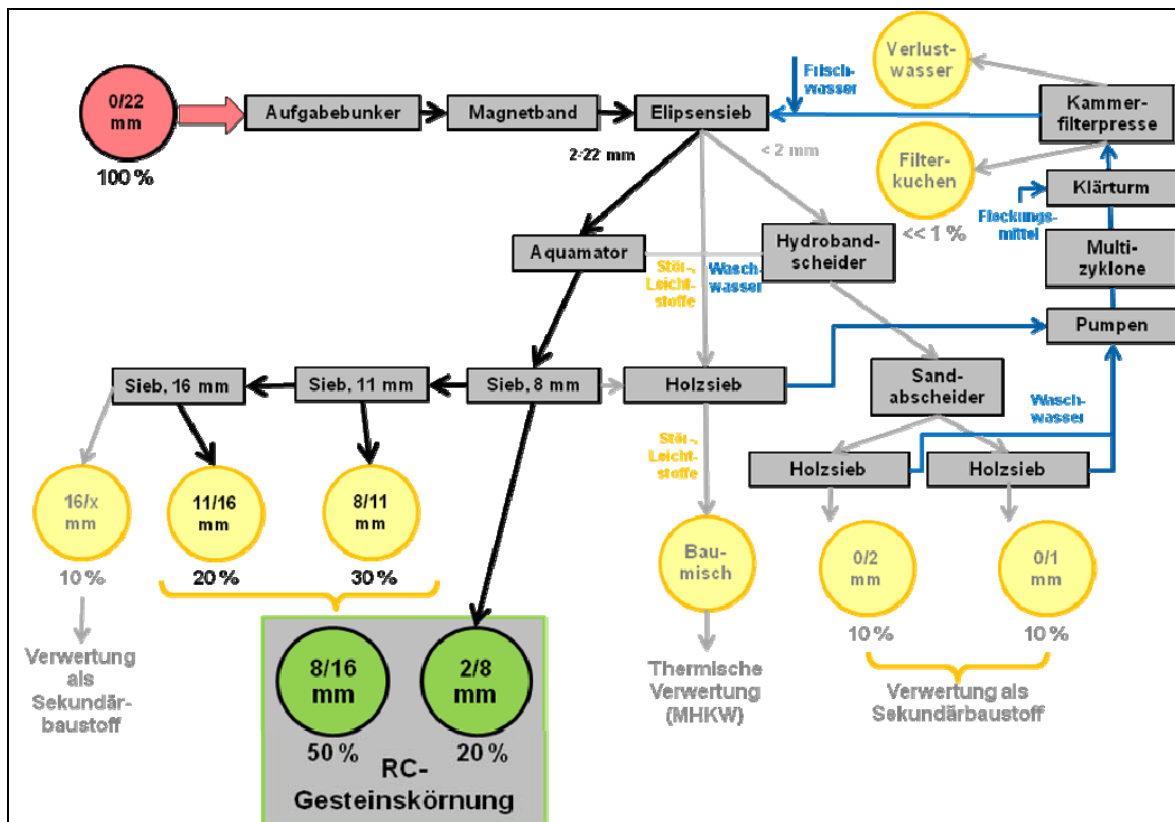


Abb. 9: Prozessübersicht und Massebilanz für die Nassaufbereitung⁹

Der Wasserverbrauch der Nassaufbereitung beträgt $240 \text{ m}^3/\text{h}$.¹⁰ Bei einer Durchsatzleistung von 80 t/h ¹¹ ergeben sich ca. $3 \text{ m}^3/\text{t}$ Gesamtdurchsatz (nass). Für die Herstellung von $1 \text{ t } 2/8 \text{ mm}$ plus $2,5 \text{ t } 8/16 \text{ mm}$ werden $4,94 \text{ t}$ Waschmedium (Betonspalt $0/22 \text{ mm}$) durchgesetzt (vgl. Abb. 10). Daraus folgt ein Wasserverbrauch von $14,82 \text{ m}^3$ für die Herstellung von $1 \text{ t } 2/8 \text{ mm}$ plus $2,5 \text{ t } 8/16 \text{ mm}$.

Davon werden

- 90 % ($13,34 \text{ m}^3$) aufbereitet und dem Prozess wieder zugeführt.
- 10 % ($1,48 \text{ m}^3$) Verlustwasser wird durch Frischwasser (aus dem Rhein) ersetzt.¹²

Im Verhältnis zum Gesamtdurchsatz des Aufbereitungsprozesses für die Herstellung von $1 \text{ t } 2/8 \text{ mm}$ plus $2,5 \text{ t } 8/16 \text{ mm}$ mit $7,14 \text{ t}$ ergibt sich ein Wassereinsatz von

- 186,8 % des Gesamtdurchsatzes an Wasser zur Aufbereitung plus
- 21,0 % des Gesamtdurchsatzes an Frischwasser.

⁹ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

¹⁰ Ebenda

¹¹ Ebenda

¹² Ebenda

Für die Herstellung 1 t Betonsplitt allg. werden somit 4,23 m³ Wasser benötigt (3,81 m³ aufbereitet, 0,42 m³ Frischwasser).

Im gesamten Aufbereitungsprozess (Trocken- und Nassaufbereitung) fallen ca. 5 % Fremd- und Störstoffe, wie Eisen, Leichtstoffe usw. an.¹³

In Abb. 10 wird der Stofffluss für die Herstellung von RC-Gesteinskörnung anhand der prozentualen Anteile resultierender Ziel- und Nebenprodukte dargestellt, ausgehend von der eingesetzten Betonbruchmenge (100 %). Das heißt, dass knapp 50 % des eingesetzten Betonbruchs in die Zielprodukte Betonsplitt 8/16 mm (34,5 %) und 2/8 mm (13,8 %) umgewandelt werden. Dafür ist ein Frischwassereinsatz von 21 % der im Gesamtaufbereitungsprozess eingesetzten Betonbruchmenge notwendig, um die Wasserverluste durch Verdunstung sowie Oberflächenanhaftungen an der Körnung auszugleichen. Eine Wassermenge entsprechend 187 % der eingesetzten Betonbruchmenge wird im Wasserkreislauf geführt.

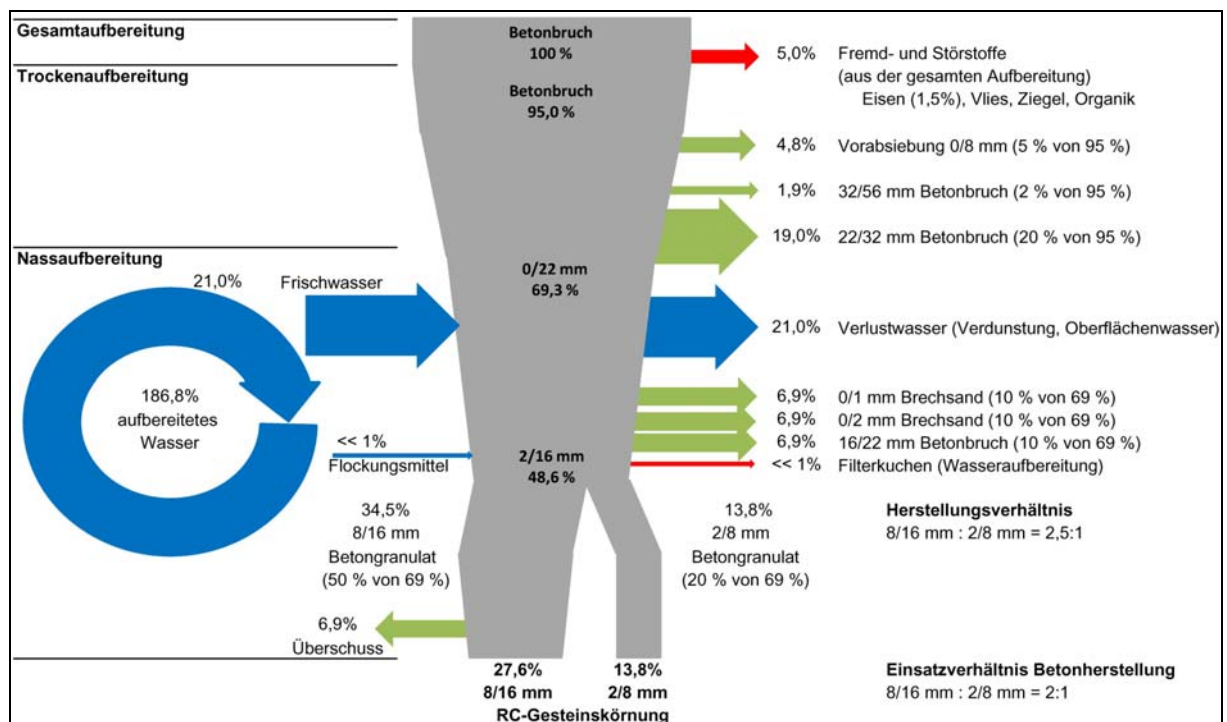


Abb. 10: Massebilanz des Gesamtprozesses der Betonsplittherstellung (prozentual)

Das Herstellungsverhältnis von Betonsplitt der Körnung 8/16 mm zur Körnung 2/8 mm beträgt somit effektiv 2,5 : 1. Das Einsatzverhältnis bei der RC-Betonherstellung für den Transportbeton C 30/37 der Fa. TBS (vgl. Abschn. 2.4) beträgt jedoch nur 2 : 1. Der Überschuss an Betonsplitt 8/16 mm beträgt somit knapp 7 % der eingesetzten Betonbruchmenge.

Resultierend aus den Angaben zu den prozentualen Anteilen des Prozess-In- und -Outputs auf Basis der eingesetzten Betonbruchmenge in der Abb. 9 kann nun im Umkehrschluss die notwendigen Menge an Betonbruch für die Herstellung einer definierten Menge des Zielproduktes Betonsplitt ermittelt werden. Für die Herstellung 1 t Betonsplitt der Körnung 2/8 mm und 2 t der Körnung 8/16 mm ergibt sich somit folgendes Bild:

¹³ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG.

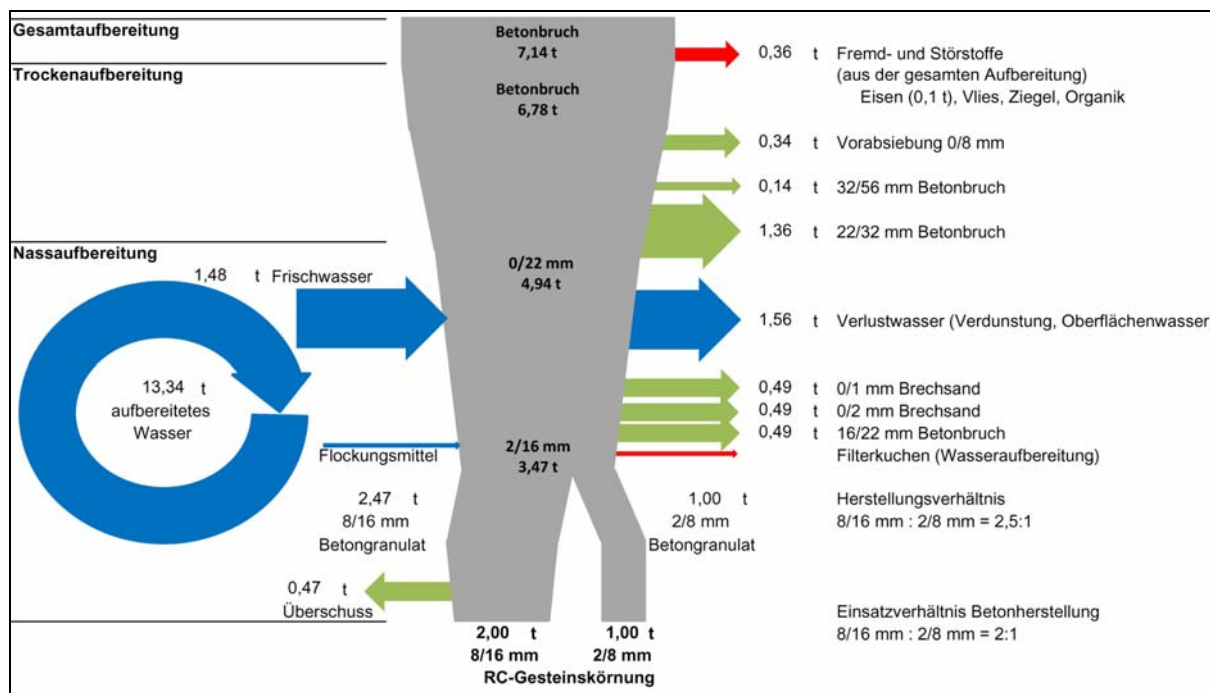


Abb. 11: Massebilanz des Gesamtprozesses der Betonsplitttherstellung von 1 t 2/8 mm

Für die Herstellung von 1 t gewaschenem Betonsplitt der Körnung 2/8 mm und 2,5 t gewaschene Körnung 8/16 mm müssen 7,14 t Betonbruch und 1,48 t Frischwasser eingesetzt werden.

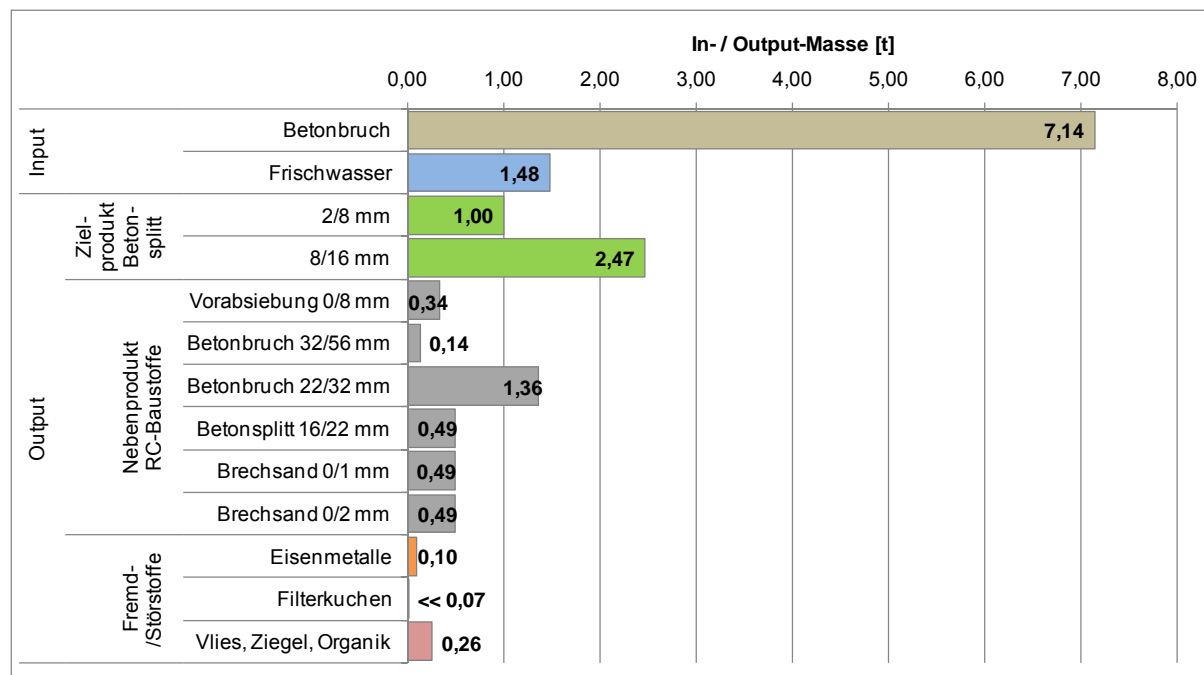


Abb. 12: Massebilanz des Gesamtprozesses der Betonsplitttherstellung; Zielgröße 1 t 2/8 mm

Eine Gegenüberstellung des Prozess-Inputs und des –Outputs zeigt Abb. 13.

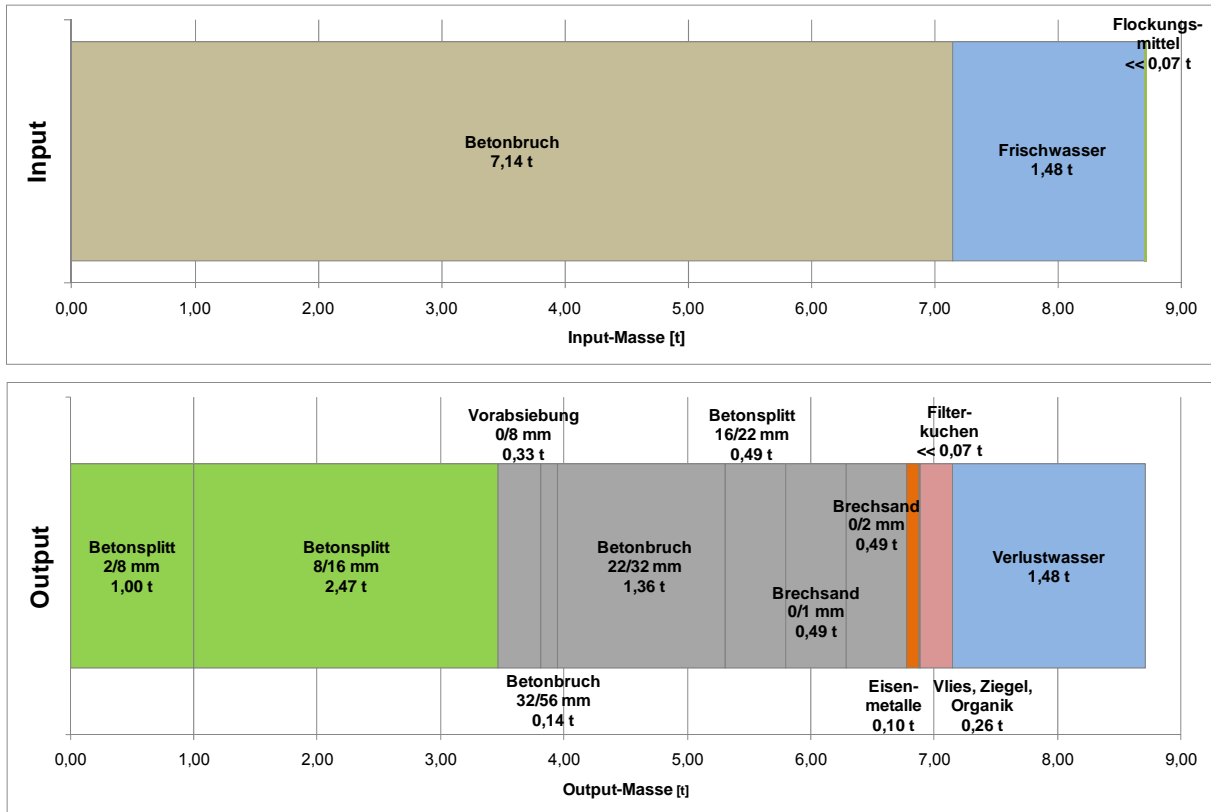


Abb. 13: Gegenüberstellung des In- und Outputs der Betonsplitttherstellung von 1 t 2/8 mm

2.4 Ausgangsstoffe der Betonherstellung – TP2 und TP3

Die Herstellung des RC-Betons C 30/37 (Szenario 1, TP2) erfolgt nach folgender Rezeptur:

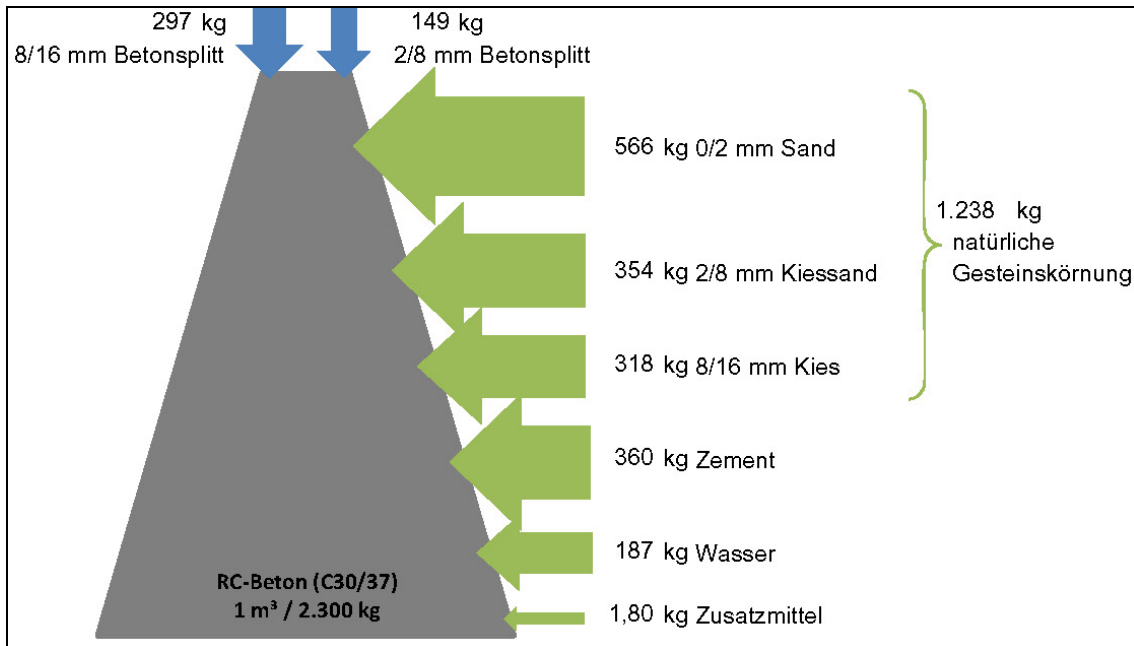


Abb. 14: Materialbilanz (Betonrezeptur) RC-Beton C 30/37¹⁴

¹⁴ Nach Angaben der Fa. TBS

Pro Kubikmeter RC-Beton C 30/37 werden 0.446 t RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) eingesetzt. Die Gesamtmasse der eingesetzten natürlichen Gesteinskörnung beträgt 1,238 t. Der Zementanteil beträgt 0,360 t CEM II/B-V42,5R mit einem Flugascheanteil von 21 – 35 %. Aus dem Wasseranteil von 0.187 t resultiert ein Wasserzementwert von 0,52. Um eine entsprechende Verarbeitbarkeit sicherzustellen, wird die Konsistenzklasse F3 über den Einsatz von 1,80 kg Fließmittel MC Powerflow 2240 eingestellt. Somit beträgt der Gesamtanteil der RC-Gesteinskörnung an den Ausgangsstoffen zur Herstellung von 1 m³ RC-Beton C 30/37 ca. 20 M.-%.

Die Vergleichsrezeptur der Fa. TBS für einen Normalbeton C 30/37 (TP3) stellt sich folgend dar:

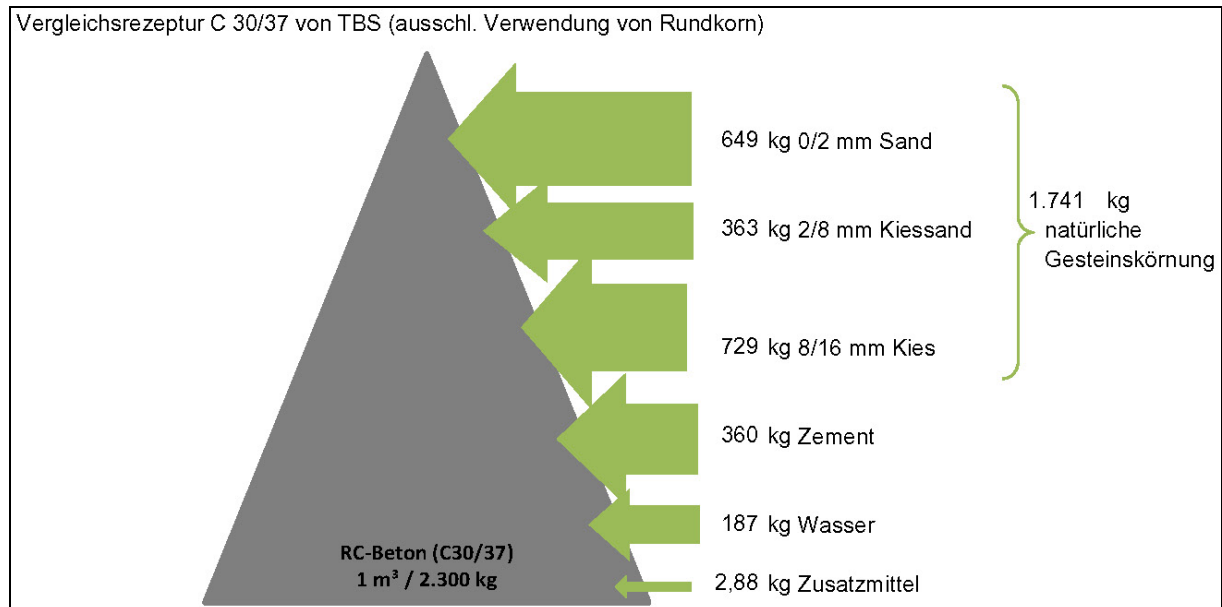


Abb. 15: Materialbilanz (Betonrezeptur) Normalbeton C 30/37 (Vergleichsrezeptur)¹⁵

Neben 1,741 t natürlicher Gesteinskörnung (ausschließlich Rundkorn) werden auch hier 360 kg CEM II/B-V42,5R eingesetzt. Der Wasseranteil wie auch der Wasserzementwert sind gleich der RC-Betonrezeptur. Als Fließmittel werden in diesem Fall 2,88 kg HA-PE BV 45 verwendet (Konsistenzklasse des Normalbetons: F3).

Eine direkte Gegenüberstellung der eingesetzten Ausgangsstoffe für den RC-Beton C 30/37 und dem Normalbeton C 30/37 der Fa. TBS zeigt Abb. 16. Gleichzeitig ist hier die Zusammensetzung des verwendeten Zementes CEM II/B-V42,5R nach DIN EN 197-1:2004-08 aufgeführt.

¹⁵ Nach Angaben der Fa. TBS

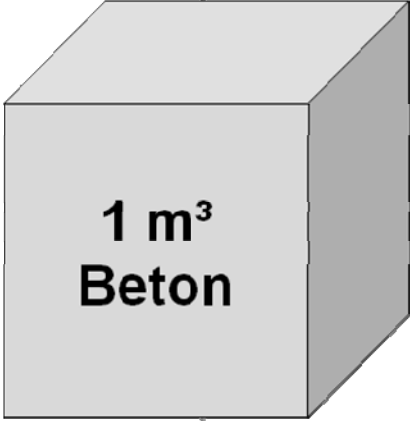
RC-Beton C30/37 Leuchtturm-Projekt:	Normalbeton C 30/37 (Vergleichsbeton TBS):								
Gesteinskörnung gesamt: 1.684 kg	Gesteinskörnung gesamt: 1.741 kg								
Natürliche Gesteinskörnung: 1.238 kg	Natürliche Gesteinskörnung: 1.741 kg								
Sand 0/2 mm: 566 kg	Sand 0/2 mm: 649 kg								
Kiessand 2/8 mm: 354 kg	Kiessand 2/8 mm: 363 kg								
Kies 8/16 mm: 318 kg	Kies 8/16 mm: 729 kg								
RC-Gesteinskörnung: 446 kg									
Betonsplitt 2/8 mm: 145 kg									
Betonsplitt 8/16 mm: 297 kg									
Bindemittel gesamt: 360 kg	Bindemittel gesamt: 360 kg								
Zement:	Zement:								
CEM II/B-V42,5R*: 360 kg	CEM II/B-V42,5R*: 360 kg								
Wasser: 187 kg	Wasser: 187 kg								
Zusatzmittel: 1,80 kg	Zusatzmittel: 2,88 kg								
Fließmittel:	Betonverflüssiger:								
MC Powerflow 2240: 1,80 kg	HA-PE BV 45: 2,88 kg								
 <p>1 m³ Beton</p>									
<p>* Zusammensetzung CEM II/B-V:</p> <table border="0"> <tr> <td>gesamt</td> <td>360 kg</td> </tr> <tr> <td>• 65 - 79 % Portlandzementklinker</td> <td>entspr. 211 - 284 kg</td> </tr> <tr> <td>• 21 - 35 % kieselsäurereiche Flugasche</td> <td>entspr. 76 - 126 kg</td> </tr> <tr> <td>• 0 - 5 % Nebenbestandteile</td> <td>entspr. 0 - 18 kg</td> </tr> </table>		gesamt	360 kg	• 65 - 79 % Portlandzementklinker	entspr. 211 - 284 kg	• 21 - 35 % kieselsäurereiche Flugasche	entspr. 76 - 126 kg	• 0 - 5 % Nebenbestandteile	entspr. 0 - 18 kg
gesamt	360 kg								
• 65 - 79 % Portlandzementklinker	entspr. 211 - 284 kg								
• 21 - 35 % kieselsäurereiche Flugasche	entspr. 76 - 126 kg								
• 0 - 5 % Nebenbestandteile	entspr. 0 - 18 kg								

Abb. 16: Gegenüberstellung Ausgangsstoffe RC-Beton / Normalbeton C 30/37 der Fa. TBS¹⁶

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bietet sich in der Gegenüberstellung des RC-Betons C 30/37 mit einem Standardbeton C 30/37 (TP3), welcher bei einer ökobilanziellen Erhebung des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) zugrunde gelegt wurde.

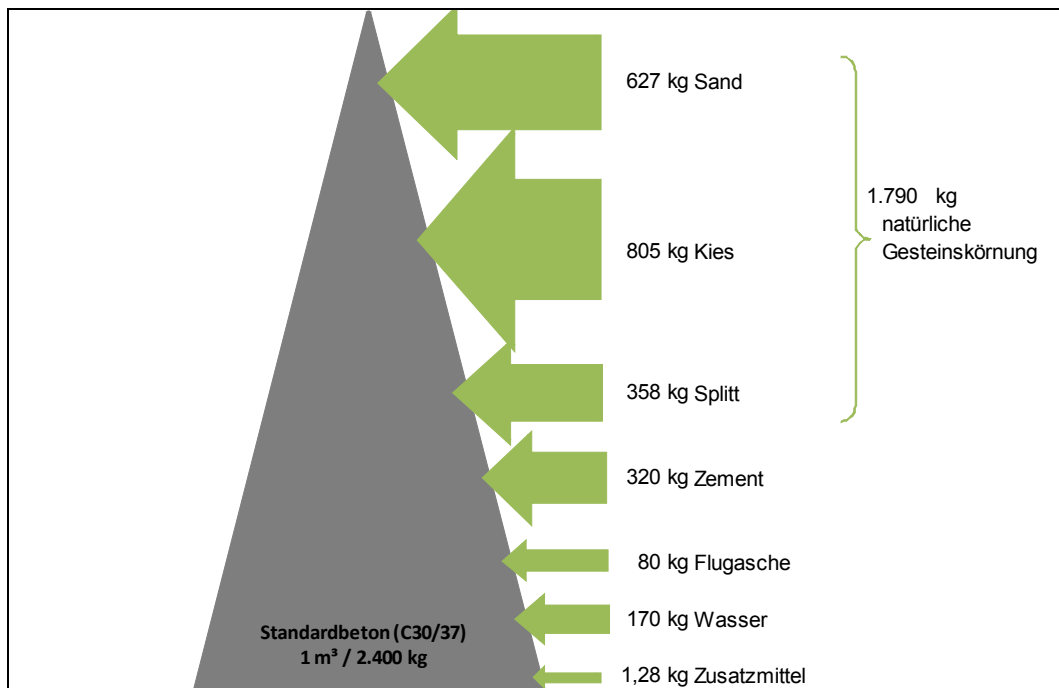


Abb. 17: Materialbilanz (Betonrezeptur) Standardbeton C 30/37 (BTB)¹⁷

¹⁶ Nach Angaben der Fa. TBS

¹⁷ Nach Hauer, Bruno: Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, Hrsg. BTB, Nov. 2007, S. 6.

Die natürliche Gesteinskörnung mit einem Anteil von 1,790 t/m³ umfasst bei dieser Rezeptur nicht nur Rundkorn sondern auch einen Splittanteil mit 0,358 t/m³. Zudem wurde hier ein Durchschnittszement¹⁸ mit 0,320 t/m³ angesetzt. Dieser enthält keinen Flugascheanteil (vgl. Abb. 18 und Abb. 20). Die Flugasche wird dem Standardbeton gesondert zugegeben (0,080 t/m³). Somit enthält der Standardbeton einen Bindemittelanteil (Zement + Flugasche) von 0,400 t/m³.

Eine direkte Gegenüberstellung der eingesetzten Ausgangsstoffe für den RC-Beton C 30/37 und den Standardbeton C 30/37 der (BTB) ist in Abb. 18 aufgeführt.

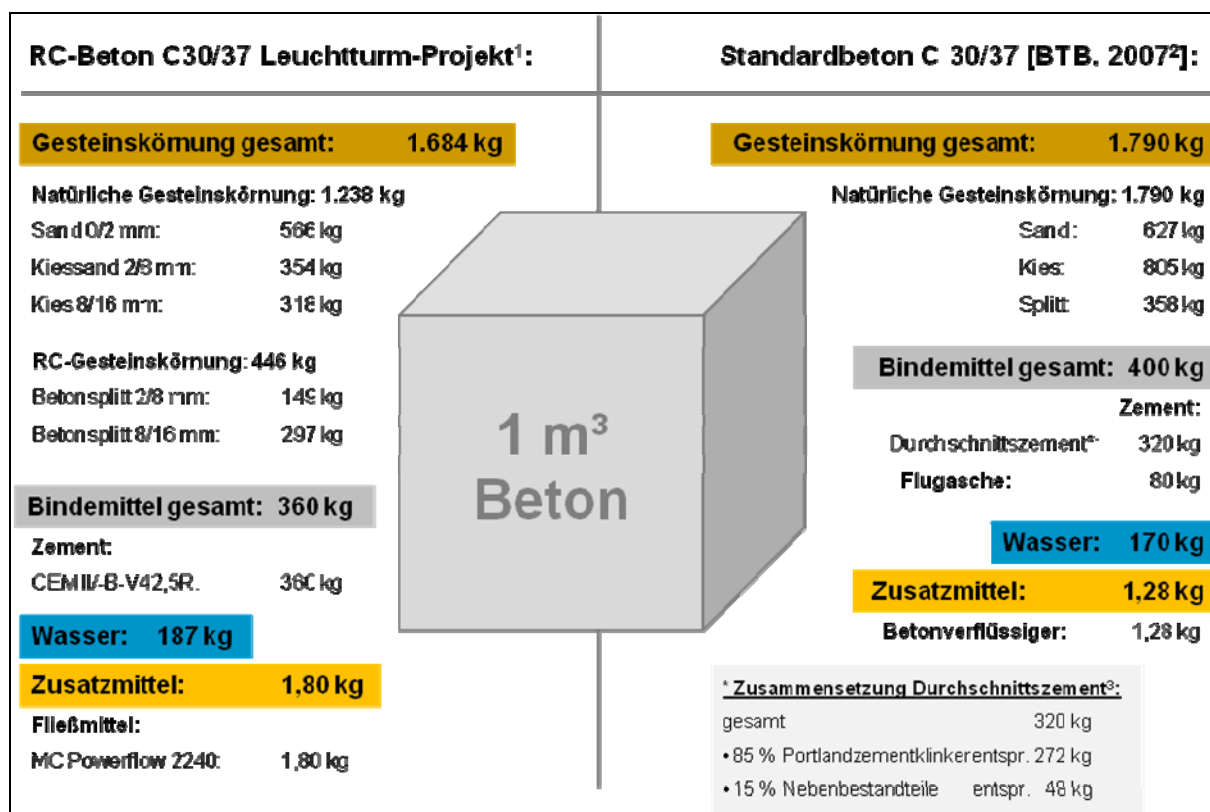


Abb. 18: Gegenüberstellung Ausgangsstoffe RC-Beton / Standardbeton C 30/37 (BTB)¹⁹

In Abb. 19 ist die Zusammensetzung des RC-Betons C 30/37 dem Vergleichsbeton C 30/37 der Fa. TBS sowie dem Standardbeton C 30/37 BTB grafisch gegenübergestellt.

Nachfolgend erfolgt in Abb. 20 der Vergleich der Bindemittelzusammensetzung. Dabei ist im oberen Diagramm der maximale Portlandzementklinkeranteil des CEM II/B-V42,5R und im mittleren der minimale Portlandzementklinkeranteil nach DIN EN 197-1:2004-08 dargestellt. Der Flugascheanteil in diesem Portlandflugaschezement beträgt 21 – 35 %. Der Portlandzementklinkeranteil des Durchschnittszementes entspricht einem CEM II/A (80 – 94 %) nach DIN EN 197-1:2004-08, wobei die Nebenbestandteile u.a. Silicastaub, Puzzolan, Flugasche, gebrannter Schiefer oder Kalkstein sein können.

¹⁸ Eyerer, Peter; Reinhardt, Hans-Wolf: Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, 2000.

¹⁹ Nach Hauer, Bruno: Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, Hrsg. BTB, Nov. 2007, S. 6.

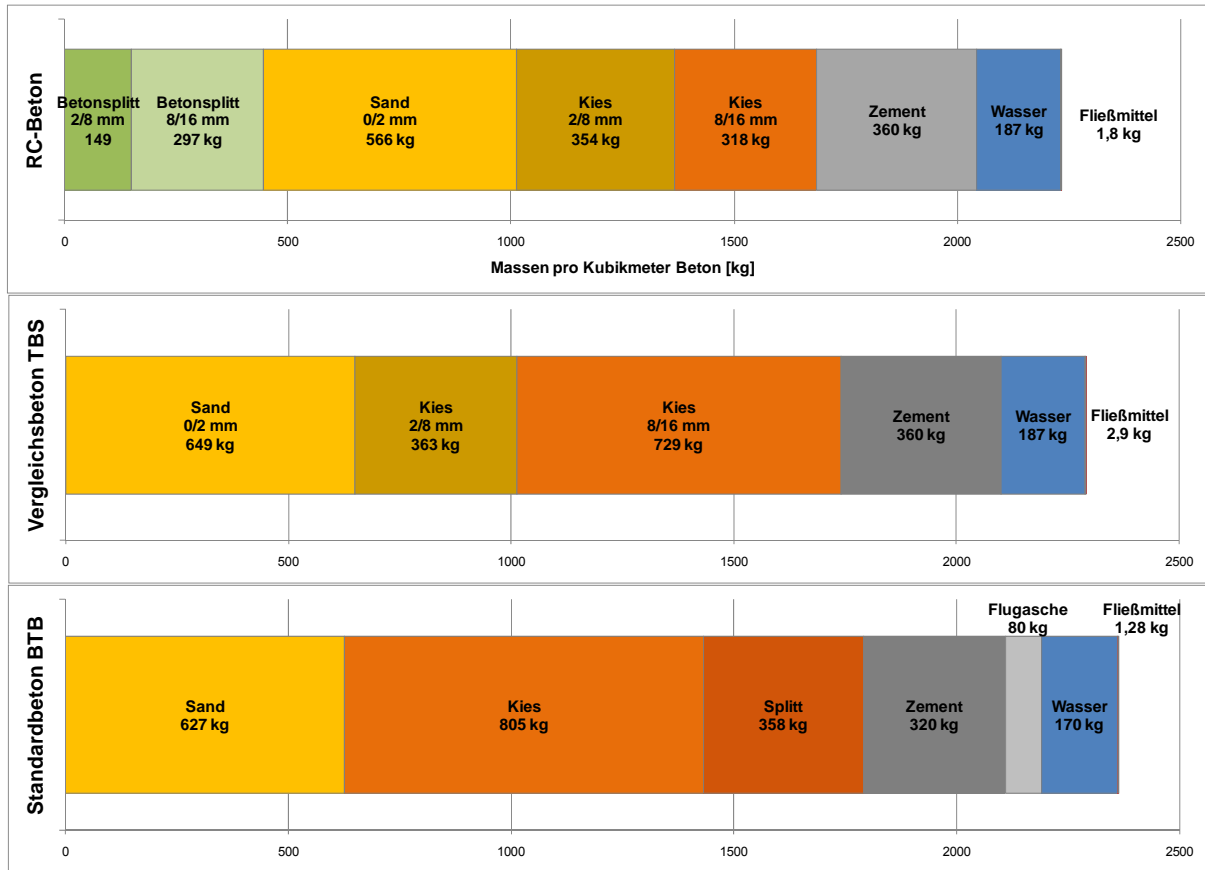


Abb. 19: Synopse der Betonzusammensetzung von RC-Beton C 30/37, Vergleichsbeton C 30/37 (TBS) und Standardbeton C 30/37 (BTB)

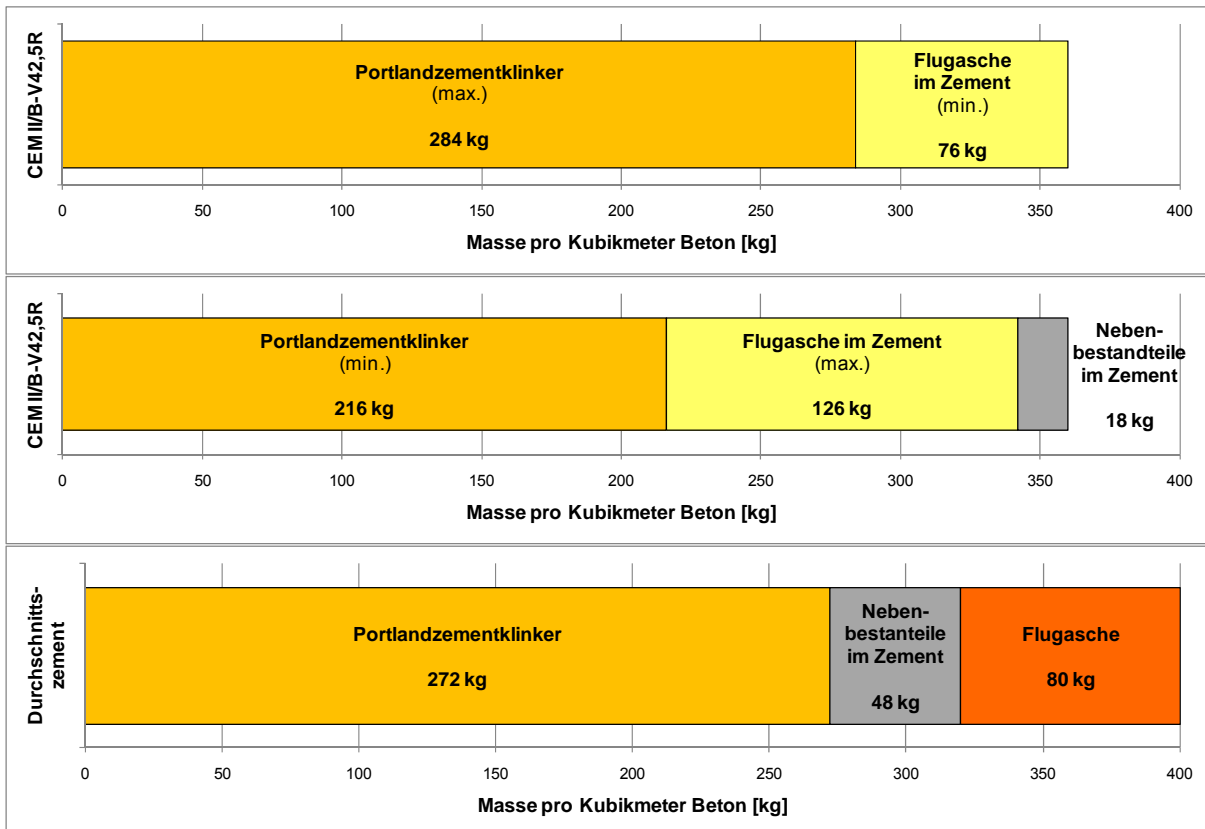


Abb. 20: Synopse der Bindemittelzusammensetzung von RC-Beton C 30/37, Vergleichsbeton C 30/37 (TBS) – CEM II/B-V42,5R und Standardbeton C 30/37 (BTB) – Durchschnittszement

2.5 Herstellung von Transportbeton - TP 2 und TP3

Der Prozess der Herstellung des Betons stellt sich wie folgt dar:

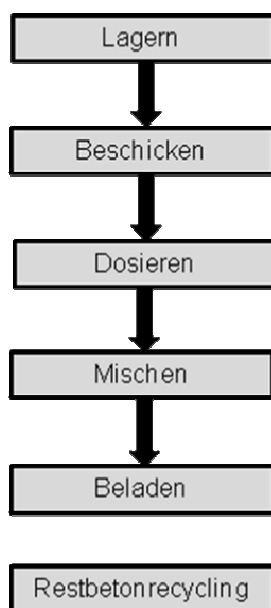


Abb. 21: Verfahrensablauf zur Herstellung von Transportbeton

Der Prozess der Transportbetonherstellung unterteilt sich in 5 aufeinanderfolgende Teilprozesse plus dem Recyclingprozess für den Rückbeton (Reste von Baustellenlieferungen). Die allgemeinen Anforderungen sowie die spezifischen Besonderheiten der Transportbetonproduktion der Fa. TBS sind nachfolgend aufgeführt²⁰:

Lagern:

Die Gesteinskörnungen werden in Vorratsboxen auf abgegrenzten, entwässerten Flächen gelagert. Für die Lagerung der RC-Gesteinskörnungen wurden 2 Lagerflächen für jeweils ca. 100 t Material mit einer Ausdehnung von je 50 – 70 m² angelegt.

Beschicken:

Die Vorratsboxen für Gesteinskörnungen der Mischanlage werden über einen Kran befüllt. Im Normalbetonbetrieb sind die 5 Boxen mit den natürlichen Gesteinskörnungen 0/2, 2/8, 8/16, 16/32 mm und X belegt, d.h. die 5. Box ist frei oder wird für gesonderte Zuschläge verwendet. Im RC-Betonbetrieb werden die Boxen 16/32 mm und X für die RC-Gesteinskörnungen 2/8 und 8/16 mm genutzt.

Die Beschickung des Förderbehälters / Dosiereinrichtung erfolgt im freien Fall, die Beschickung des Mixers über den Schrägaufzug des Förderbehälters. Der Zement wird in Silos gelagert und über Förderschnecken zur Zementwaage gefördert.

Aufgrund der adäquaten Größenordnung an eingesetzten Ausgangsmaterialien insbesondere der Gesteinskörnungen sind die Aufwände für die Herstellung von RC- und Normalbeton gleich.

²⁰ Nach Aufnahmen bei TBS

Dosieren:

Die Ausgangsmaterialien werden über computergesteuerte Waagen mit einer Dosiergenauigkeit von $\pm 3\%$ vollautomatisch dosiert.

Mischen:

Das Mischen des Betons erfolgt über einen Doppelwellenzwangsmischer. Die Mischzeiten für Normalbeton liegen entsprechend des Einsatzes verschiedener Zusatzmittel (und deren Aufschlusszeit) bei 45 – 70 Sekunden. Die Mischzeit des RC-Betons beträgt gemäß Mischprotokoll 60 Sekunden und wird computergesteuert. Der Mischaufwand unterscheidet sich folglich nicht zwischen Normal- und RC-Beton. Die Frischbetonmenge je Mischung liegt zwischen 1,2 und 1,6 m³.

Beladen:

Zur Beladung der Fahrmischer wird die Entladeklappe im unteren Teil des Doppelwellenzwangsmischers nach Ablauf der Mischzeit automatisch geöffnet. Der Transportbeton fällt in den Fahrmischer mit Mischtrommel und wird während der Fahrt weiter bewegt.

Bei der Transportbetonherstellung wird dem Stofffluss kein weiteres Material zugeführt oder entnommen.

2.6 Verarbeitung von Transportbeton - TP 2 und TP3

Der Verarbeitungsprozess von Transportbeton unterteilt sich in folgende Teilprozesse:

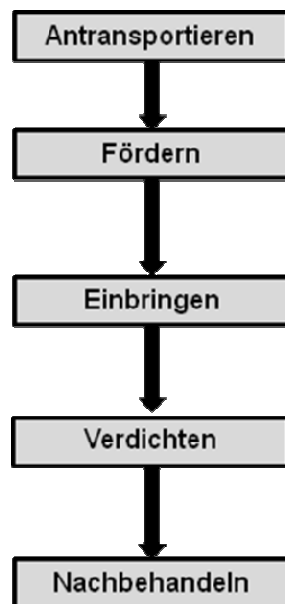


Abb. 22: Verfahrensablauf zur Verarbeitung von Transportbeton

Antransportieren:

Der Transportbeton wird mit Fahrmischern (Fassungsvermögen der Mischtrommel 8 - 10 m³) auf der Baustelle angeliefert und über die Schurren des Transporters in das Fördergerät gegeben.

Fördern:

Der angelieferte Beton kann direkt über die Schurren ins Bauteil eingebracht werden. Zumeist wird er über Betonkübel (1 m³ Fassungsvermögen) oder eine Betonpumpe (Reichweite 34 m, theoretische Förderleistung 164 m³/h) zum Einbauort gefördert. Für die Förderung per Betonpumpe muss eine Mindestkonsistenz F3 gewährleistet sein. Dies ist bei der verwendeten RC-Betonrezeptur gegeben.

Einbringen:

Das Einbringen des Betons erfolgt über die gleichmäßige Verteilung aus dem Betonkübel oder dem Pumpenschlauch. Bei Deckenschüttungen wird der Beton mittels Harken entsprechend der erforderlichen Einbauhöhe gleichmäßig verteilt. Eine gute Verarbeitbarkeit (großes Ausbreitmaß) erleichtert den Einbringprozess.

Verdichten:

Der eingebrachte Beton wird durch den Einsatz von Innenrüttlern (Rüttelflaschen) verdichtet. Bei Deckenschüttungen erfolgt zusätzlich eine oberflächige Verdichtung und Glättung über Oberflächenrüttler (Patschen, Rüttelbohlen). Eine gute Verarbeitbarkeit (hohes Ausbreitmaß) erleichtert den Verdichtungsprozess.

Nachbehandeln:

Zur Nachbehandlung des Betons wird dieser möglichst lange in der Schalung belassen. Deckenschüttungen werden mit Folien abgedeckt oder mit einem Wasserfilm beaufschlagt.

Da der eingesetzte RC-Beton C 30/37 im Vergleich zum Normalbeton gleiche Konsistenzwerte (Ausbreitmaße) aufweist und auch die über die stichpunktartigen Auswertungen der Lieferscheine abgeleiteten Verarbeitungsdauern gleich sind, ist von einem gleichen Verarbeitungsaufwand des RC-Betons auszugehen. Der Einsatz des RC-Betons im Sichtbetonbereich (bspw. der Fahrstuhlchächte und der auf der Baustelle vorgefertigten Stützen) weist außerdem auf eine dafür erforderliche sehr gute Verarbeitbarkeit der eingesetzten Betonrezeptur hin.

Die Auswertung der Konsistenz (Ausbreitmaße) erfolgte anhand der Daten des Betoniertagebuches der bauausführenden Firma weisenburger bau GmbH vom 08.09. bis 11.12.2009 (s. Abb. 23). Der Vergleichsbeton ist der für Wand- und Deckenelemente in den Häusern 1 und 2 der Pilotbaustelle eingesetzte Normalbeton C 30/37 F3 der Fa. CEMEX (Sortenr. 20086334). Die Überschreitungen der Obergrenze der Konsistenzklasse gingen nicht mit Entmischungserscheinungen einher und wurden ausschließlich durch die geregelte Zugabe von Fließmittel realisiert.

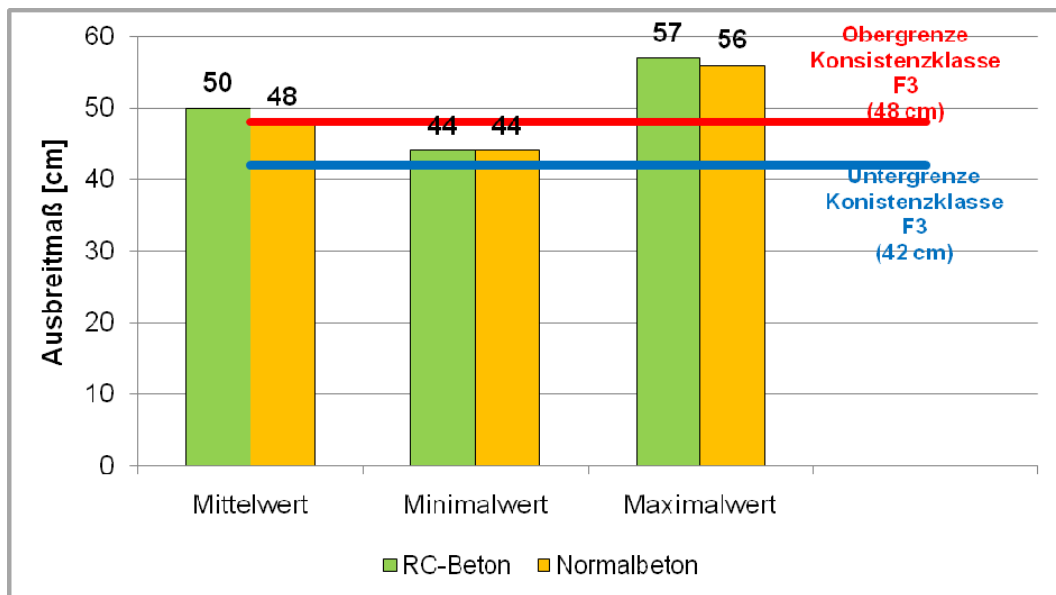


Abb. 23: Konsistenzvergleich RC-Beton C 30/37 (TBS) und Normalbeton C 30/37 Fa. CEMEX

Es zeigt sich trotz der Konsistenzhöhung zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit keine Auswirkung des höheren Ausbreitmaßes auf die Betondruckfestigkeit (s. Abb. 24). Es ist sogar ein leichter Anstieg der Festigkeitswerte zu verzeichnen, welcher auf die bessere Verdichtungsfähigkeit hindeutet.

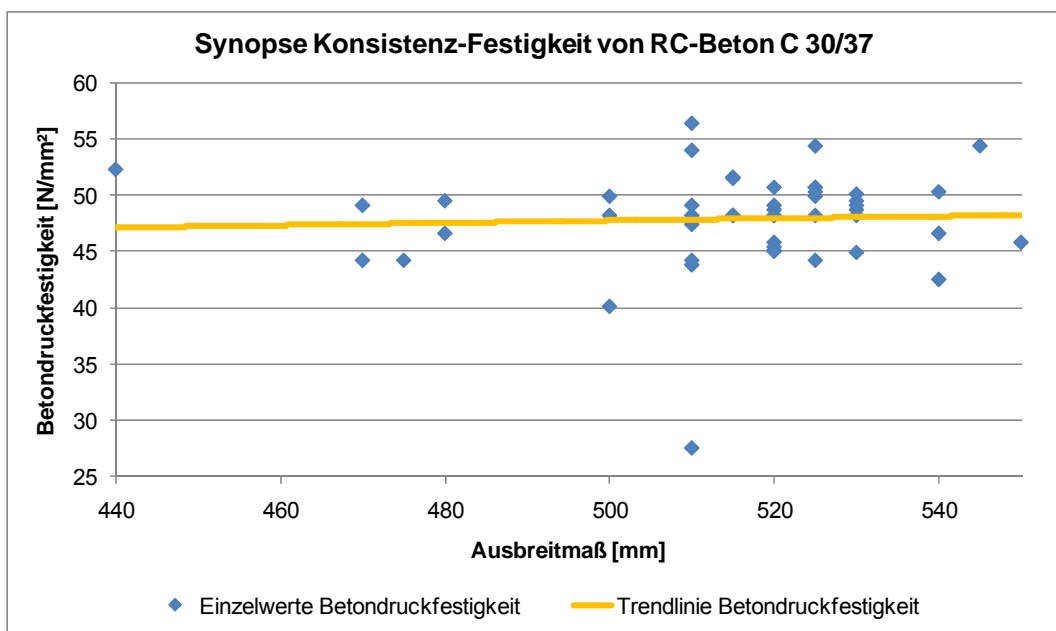


Abb. 24: Synopsis Konsistenz (Ausbreitmaße) und Betondruckfestigkeit des RC-Betons C 30/37

Die Auswertung erfolgte anhand der Daten der Eigenüberwachung des Transportbetonunternehmens TBS für die ermittelten 56-Tage-Festigkeitswerte (Stand 05.03.2010).

Ausgewertet wurden zudem die Lieferscheinangaben der Fahrmischerfahrer bei der Ankunft auf der Baustelle; Beginn und Ende des Entladevorgangs vom 08.09. – 11.12.2009. Dies lässt indirekt Rückschlüsse auf die Verarbeitbarkeit des gelieferten Betons zu, da sich mit einer schlechteren Verarbeitbarkeit die Dauer der Betoneinbringung erhöht und somit auch die Dauer der Entladevorgän-

ge. Unterschieden wurde die Herstellung von Decken und Wänden, da erstere meist mit Unterstützung einer Betonpumpe hergestellt wurden, letztere dagegen auch über Betonkübel geschüttet wurden.

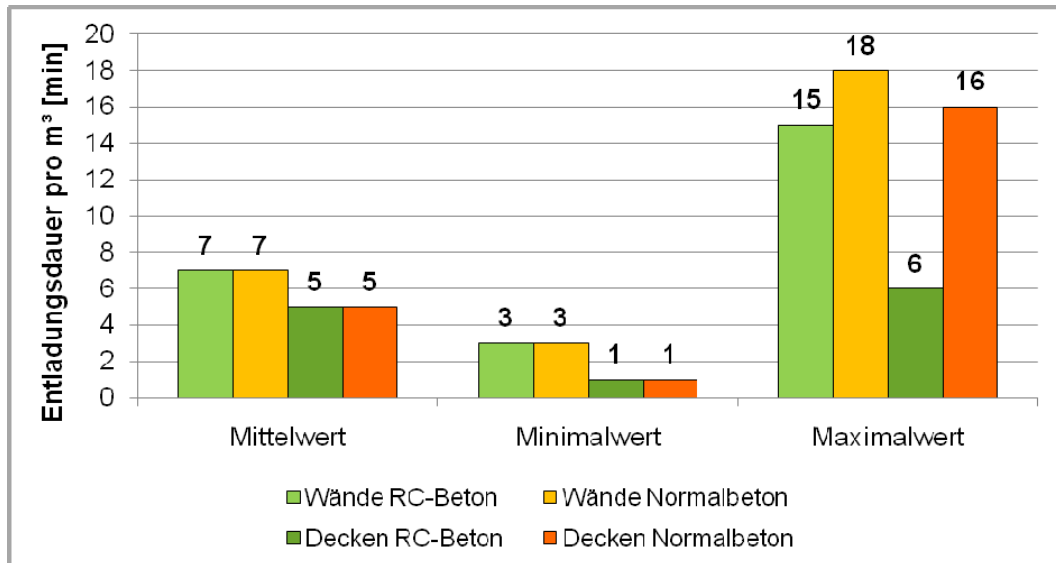


Abb. 25: Vergleich der Entladedauer von RC-Beton C 30/37 (TBS) und Normalbeton C 30/37 Fa. CEMEX. Bei der Verarbeitung werden dem Stofffluss keine weiteren Materialien zugeführt oder entzogen.

2.7 Stofffluss Gesamtprozess

Für die Herstellung von 1 m³ RC-Beton (Szenario 1) ist der Einsatz von 0,446 t RC-Gesteinskörnung erforderlich. Diese werden durch die Trocken- und Nassaufbereitung aus 0,91 t Betonbruch gewonnen. Zur Bereitstellung dieser ist der Abbruch von 1,08 t Betonbauwerk erforderlich.

Dabei fallen 0,634 t Nebenprodukte zur weiteren stofflichen oder thermischen Verwertung inkl. ca. 0,009 t Schadstoffe, wie Asbest, künstliche Mineralfasern (KMF) oder teerbelastete Dachpappe (PAK). Eingesetzt werden für den Nassaufbereitungsprozess 0,19 t Frischwasser aus dem Rhein sowie für den Herstellungsprozess RC-Beton 1,238 t natürliche Gesteinskörnung, 0,360 t Zement, 0,187 t Zugabewasser und 0,002 t Zusatzmittel.

Der Stofffluss über den Gesamtprozess vom Abbruch (TP1.1) über die Herstellung der RC-Gesteinskörnung (Betonbruch), der Bereitstellung der Ausgangsstoffe und der Herstellung des RC-Betons (TP2) ist in Abb. 26 dargestellt.

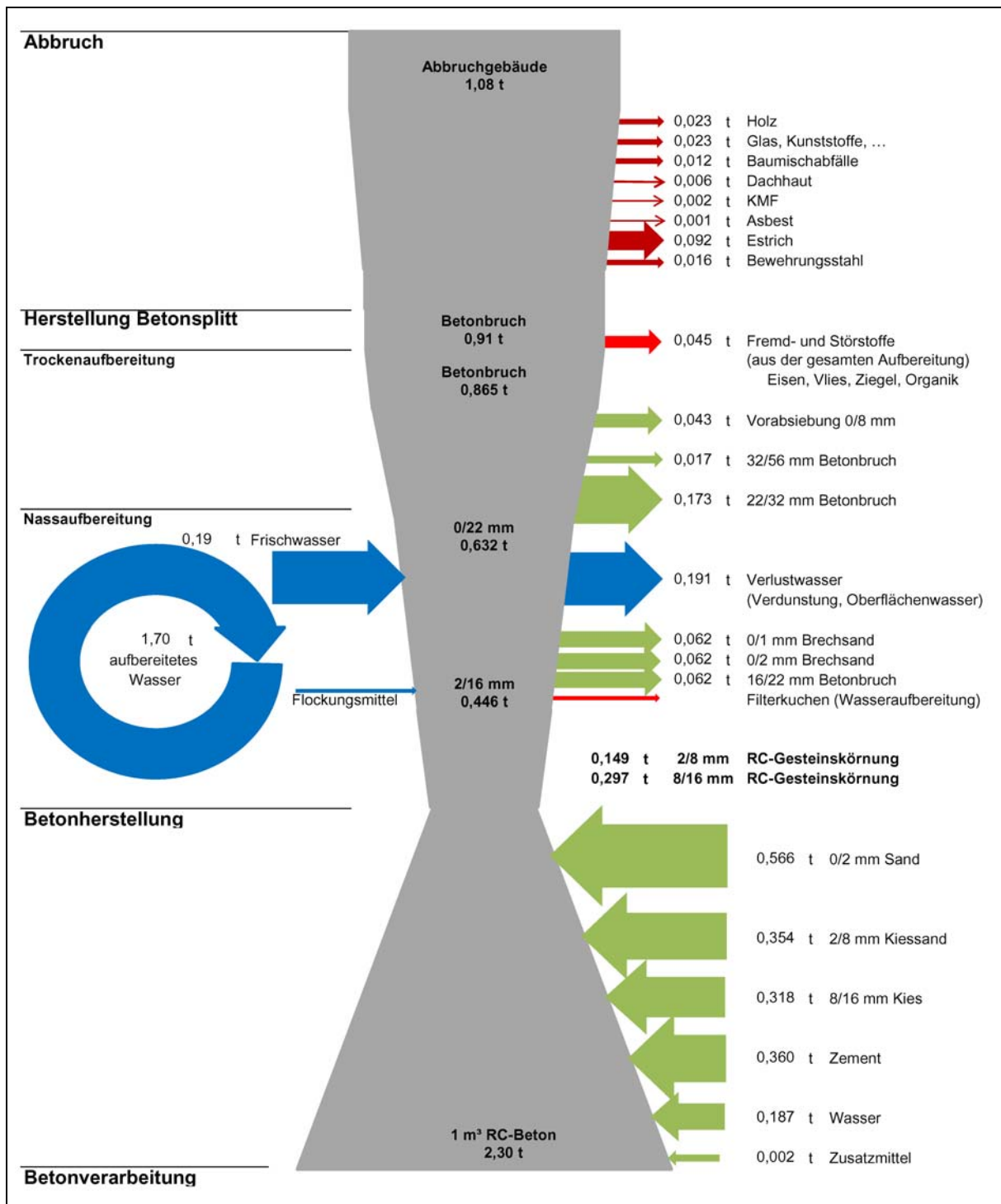


Abb. 26: Stofffluss des Gesamtprozesses der Herstellung von RC-Beton C 30/37 – Szenario 1

Im Vergleich des Stoffflusses zu Szenario 2 müssen zunächst die gleichen Massen für den Abbruch betrachtet werden wie in Szenario 1. Von diesen 1,08 t Abbruchmaterial pro hergestellten Kubikmeter Beton werden 0,91 t Betonbruch konventionell aufbereitet und verwertet. Die Fremd- und Störstoffe aus dem Abbruch mit 0,17 t werden einer stofflichen oder thermischen Verwertung zugeführt bzw. entsorgt (Schadstoffe) (s. Abb. 27).

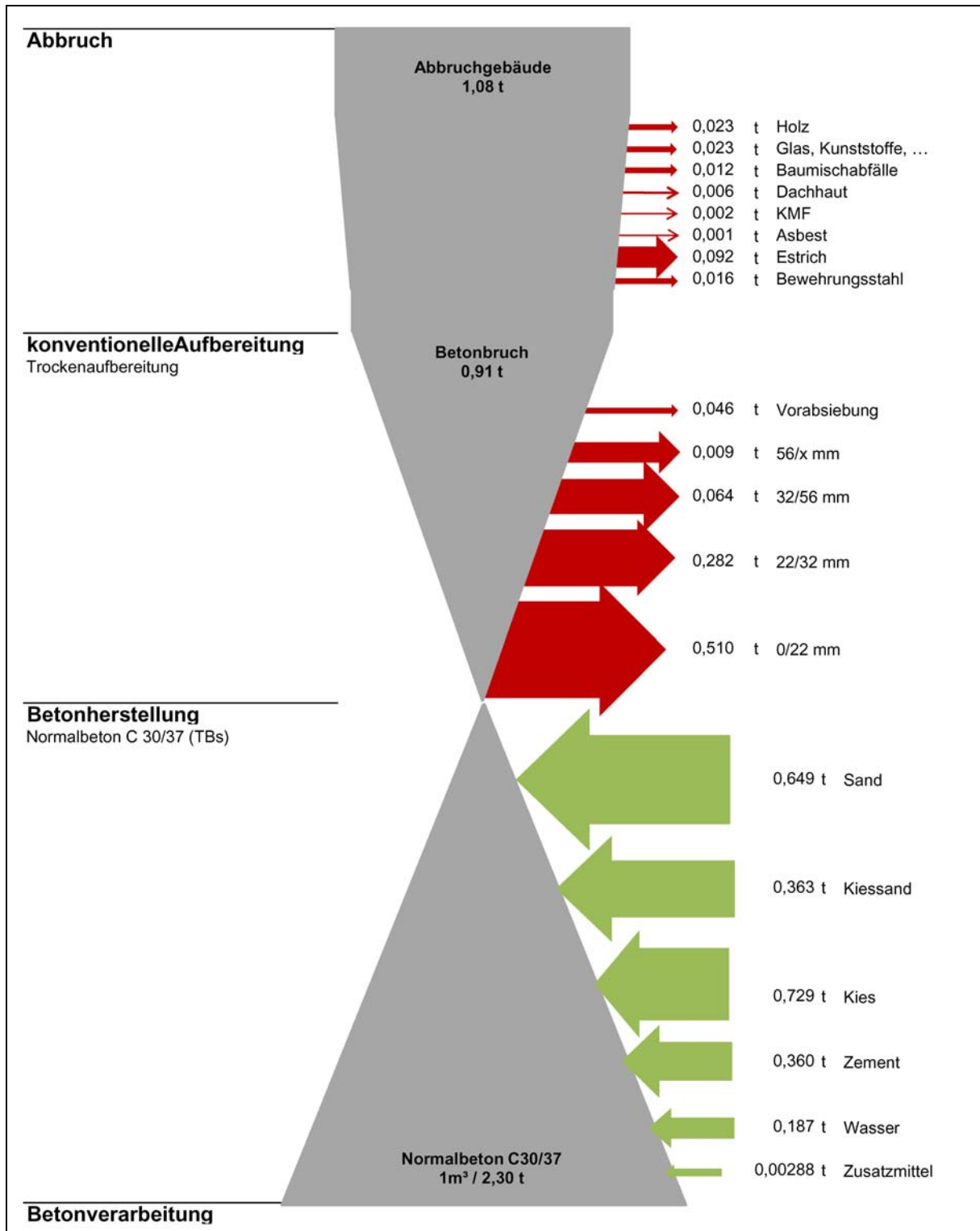


Abb. 27: Stofffluss des Gesamtprozesses der Herstellung von Normalbeton C 30/37 (TBS) – Szenario 2

In den Prozess eingebracht werden im Fall der Herstellung des Vergleichsbetons (Normalbeton C 30/37 der Fa. TBS) 1,741 t natürliche Gesteinskörnung, 0,360 t Zement, 0,187 t Zugabewasser und 0,00288 t Zusatzmittel.

Die Mengen für Zement und Wasser sind somit gleich. Durch den Einsatz der RC-Gesteinskörnung in Szenario 1 kann der Verbrauch natürlicher Gesteinskörnungen um 0,503 t reduziert werden. Dies entspricht ca. 29 M.-% der im Normalbeton eingesetzten Menge. Die Materialmenge zur konventionel-

len Aufbereitung der Abbruchmassen wird um 41 M.-% (0,446 t) reduziert, um im Zuge der Betonsplitttherstellung höherwertig aufbereitet zu werden.

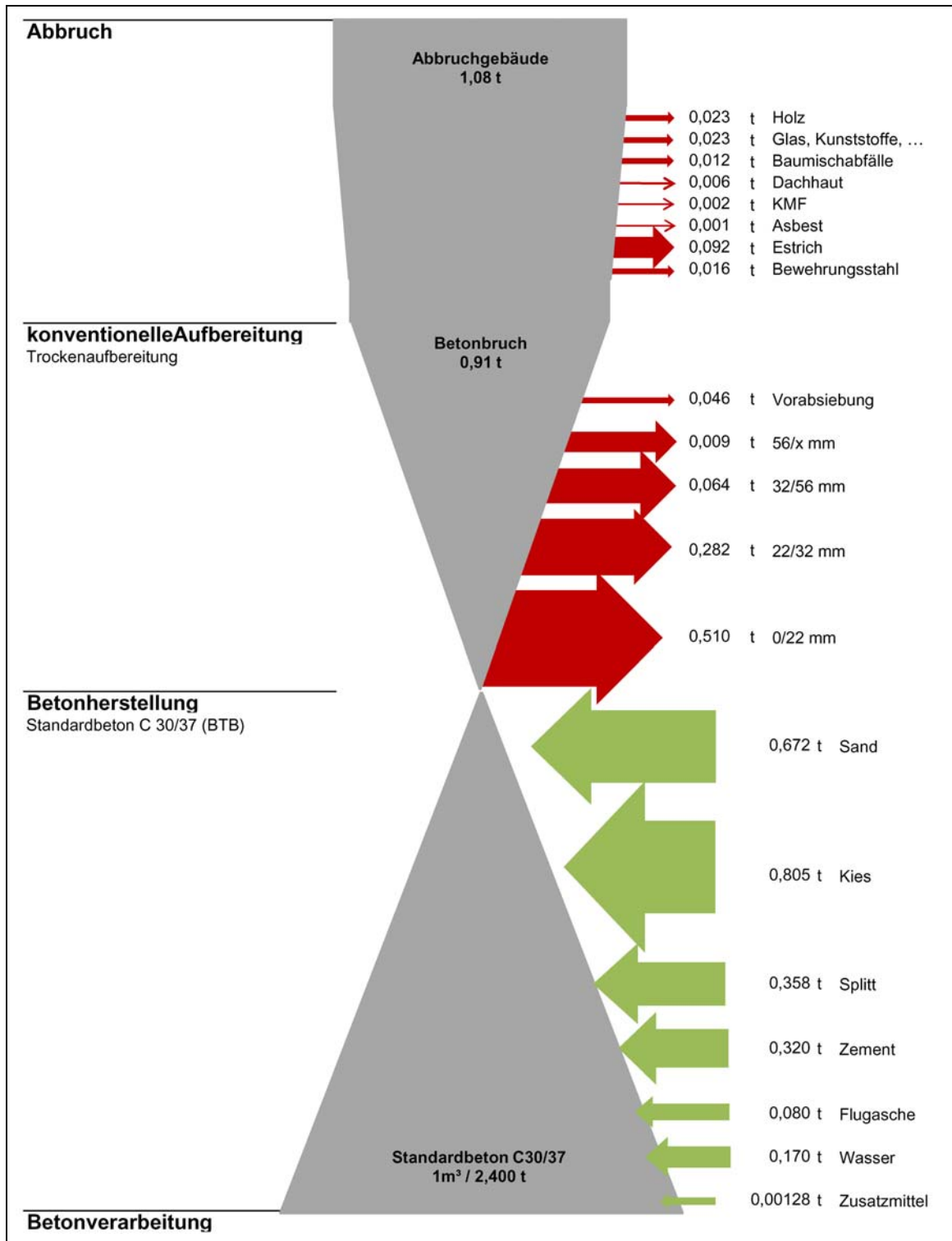


Abb. 28: Stofffluss des Gesamtprozesses der Herstellung von Standardbeton (BTB) – Szenario 2

Im Vergleich zum Standardbeton kann über den Betonsplitteinsatz der Verbrauch an natürlicher Gesteinskörnung um 0,552 t (0,31 M.-%) reduziert werden. Gleichzeitig wird auch der Bindemittelverbrauch (Zement plus Flugasche) um 0,040 t (10 M.-%) reduziert.

3 Energetische Betrachtung

Die energetische Betrachtung der Teilprozesse erfolgt auf Basis der Ermittlungen zu den Leistungsparametern der eingesetzten energieverbrauchenden Geräte, Maschinen und Anlagenteilen, deren Anzahl, Auslastung und Einsatzzeit. Die Berechnungsgrundlage des Gesamtenergieverbrauchs der Verfahren der Szenarien 1 und 2 ist in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tab. 5: Berechnungsgrundlage zum Szenarienvergleich Energieaufwand (E)

<u>Szenario 1:</u>	<u>Szenario 2:</u>
Abbruch + Aufbereitung + RC-Beton	Abbruch + Aufbereitung + Normalbeton
TP 1.1: Abbruch + Transport des Betonbruchs ¹⁾ zur RC-Anlage $E_{TP1.1} = E_{Abbr.} + E_{Trans.Betonbruch}$	TP 1.2: Abbruch + Transport des Betonbruchs ²¹ + konventionelle Aufbereitung des Betonbruchs ²² $E_{TP1.2} = E_{Abbr.} + E_{Trans.Betonbruch} + E_{konv.Aufb.}$
TP 2: Herstellung Betonsplitt (RC-GK) + Transport Betonsplitt zur Betonmischanlage + Bereitstellung (Gewinnung/Herstellung, Transport) weiterer Ausgangsstoffe RC-Beton + Herstellung RC-Beton + Transport RC-Beton + Verarbeitung RC-Beton $E_{TP2} = E_{Herst.RC-GK} + E_{Trans.RC-GK} + E_{Herst.RC-Ausg.} + E_{Trans.RC-Ausg.} + E_{Herst.RC-Beton} + E_{Trans.RC-Beton} + E_{Verarb.RC-Beton}$	TP 3: Bereitstellung (Gewinnung/Herstellung, Transport) Ausgangsstoffe Normalbeton + Herstellung Normalbeton + Transport Normalbeton + Verarbeitung Normalbeton $E_{TP3} = E_{Herst.Ausg.} + E_{Trans.Ausg.} + E_{Herst.Beton} + E_{Trans.Beton} + E_{Verarb.Beton}$
$E_{ges.RC-Beton} = E_{TP1.1} + E_{TP2}$	$E_{ges.Beton} = E_{TP1.2} + E_{TP3}$

Eine weitere Basis der Berechnungen bilden die ermittelten Parameter und Verfahrensabläufe der Stoffflussbetrachtungen (vgl. Abschn. 1).

²¹ Die Betrachtung der Verwertung/Entsorgung der Restmassen aus dem Abbruch entfällt in beiden Szenarien.

²² Die Menge des konventionell aufzubereitenden Betonbruchs entspricht der erforderlichen Betonbruchmenge in Szenario 1.

3.1 Selektiver Abbruch – TP1

Wie bei den Betrachtungen zum Stofffluss erfolgt die Berechnung des erforderlichen Energieaufwandes am Fallbeispiel eines 6-geschossigen Wohngebäudes über 4 Segmente in industrieller Bauweise (WBS 70). Für den Abbruch wurden zwei Bagger (30 t und 40 t) über eine Einsatzzeit von 250 h bei einer geschätzten Auslastung von 50 % eingesetzt. Bei einer Auslastung der Dieselmotoren der Bagger von 50 % ergibt sich ein Dieserverbrauch von 240 g/kWh²³. Bei einer Dichte von 860 g/l beträgt der spezifische Verbrauch nach Auslastung 0,28 l/kWh.

Die Berechnung des Gesamtenergiebedarfs ist Tab. 6 entnehmbar.

Tab. 6: Energiebedarf Abbruch²⁴

Gerät	Leistung $P_{M,i}$	Ener- gie- träger	Einsatz- zeit $t_{M,i}$	Aus- las- tung $f_{M,i}$	realer Ener- gie- bedarf	spez. Verbrauch Auslas- tung $V_{M,i}$	Bedarf	PEI _{ET} $PEI_i + H_{u,i}$	Gesamt- energie- bedarf E_G
	[kW]		[h]	[%]	[kWh]	[l/kWh]	[l]	[MJ/l]	[MJ]
Bagger (30 t)	130	Diesel	250	50	16.250	0,28	4.550	35,5	160.615
Bagger (40 t)	220	Diesel	250	50	27.500	0,28	7.700	35,5	271.810
Gesamtenergiebedarf E_G									432.425 MJ
$E_G = \sum_{i=1}^n P_{M,i} \times t_{M,i} \times V_{M,i} \times (PEI_i + H_{u,i})$									
Gesamtbauteilmasse									4.100 t
Energiebedarf pro Tonne abgebrochenes Stahlbetonbauteil – $E_{Abbr.}$									~ 105 MJ/t

E_G Gesamtenergiebedarf Abbruch [MJ]; Leistungsparameter lt. Geräte- und Maschinenangaben
 PEI_i Primärenergieinhalt spez. Energieträger

Der Energieaufwand für den Abbruch $E_{Abbr.}$ von 1 t Stahlbeton beträgt somit 105 MJ.

Der Transportweg des Abbruchmaterials bis zur RC-Anlage wird mit durchschnittlich 30 km²⁵ veranschlagt. Bei einem Energieaufwand von 1,33 MJ/t*km (nach PROBAS) ergibt sich der Energieaufwand für den Transport von 1 t Abbruchmaterial (Betonbruch) zur RC-Anlage: - $E_{Trans.Betonbruch}$ 40 MJ.

²³ Heuer, 1994, S. 81

²⁴ Aus: Mettke, A.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil 1: Krangeführter Rückbau, BTU Cottbus, LS Altlasten, FG Bauliches Recycling 2008, S. 279.

²⁵ Ebenda.

3.2 Konventionelle Aufbereitung – TP1

Die energetische Betrachtung der konventionellen Aufbereitung des Betonbruchs erfolgt am Beispiel der stationären Anlage der Fa. Scherer + Kohl im Kaiserwörthhafen Ludwigshafen. Der Verfahrensablauf ist im Abschn. 2.2 dargestellt und der Stofffluss beschrieben.

In Abb. 29 ist der Verfahrensablauf unter Einbeziehung der einzelnen Anlagenteile abgebildet.

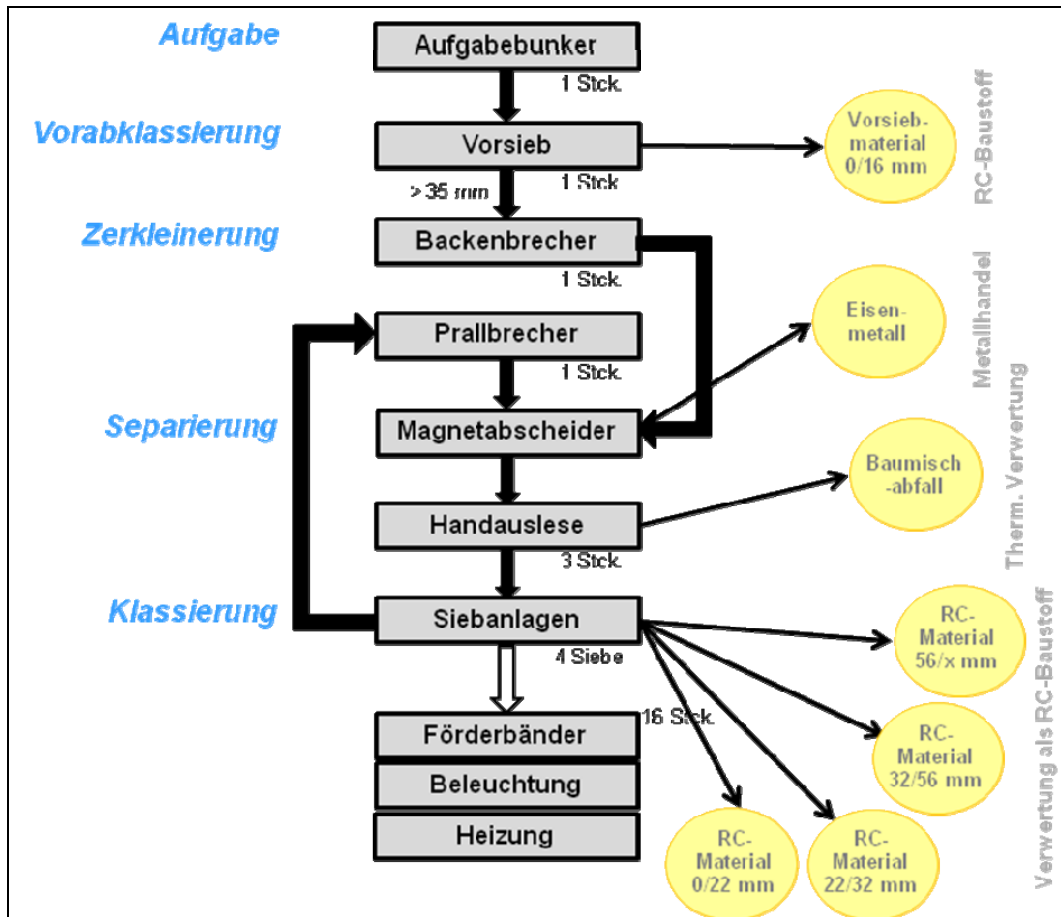


Abb. 29: Prozessübersicht Trockenaufbereitung²⁶

Der Tagesdurchsatz der Trockenaufbereitung beträgt 1.200 t (1.200 t/d). Bei einer täglichen Laufzeit der Anlage von 9 h ergibt sich ein Stundendurchsatz von 133 t (133 t/h).²⁷

In Vorbereitung dieses Aufbereitungsprozesses (Trockenaufbereitung) wird der Betonbruch einer Vorzerkleinerung mit Hilfe eines Baggers mit Betonbeißer unterzogen. Die Beschickung der Anlage im ersten wie im zweiten Durchlauf als auch die Transportvorgänge zur Zwischenlagerung in Lagerboxen erfolgt mittels Radlader. Für beide Geräte wird dabei eine Auslastung von 50 %²⁸ angenommen. Aufgrund der 50 %-igen Auslastung der Dieselmotoren ergibt sich ein spezifischer Verbrauch von 0,28 l/kWh (vgl. Abschn. 3.1).

Der Energieverbrauch des eingesetzten Baggers und Radladers stellt sich somit wie folgt dar:

²⁶Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

²⁷Ebenda

²⁸Ebenda

Tab. 7: Energieverbrauch des eingesetzten Baggers und Radladers bei der Aufbereitung des Betonbruchs

Gerät	Typ	Leistung	Energie-träger	spez. Ver- brauch 50 % Auslastung	Bedarf	PEI _{ET}	E _G	Durch- satz	E _G
		[kW]		[l/kWh]	[l/h]	[MJ/l]	[MJ/h]	[t/h]	[MJ/t]
Bagger	Volvo 240 (30 t)	130	Diesel	0,28	18 ²⁾	35,3	635	133	4,78
Radlader	Volvo L180F	235	Diesel	0,28	33 ³⁾	35,3	1.165	133	8,76

Die Nutzung des Radladers für die Transportarbeiten wird mit 80 % angegeben. (Beschickung Aufgabebunker, Beschickung, Rücklauf, Zwischenlagerung der Produkte). Die weiteren 20 % der Nutzung erfolgen prozesseextern. Der Baggereinsatz zur Vorzerkleinerung ist für ca. 50 % des angelieferten Betonbruchs erforderlich.²⁹

Beim Prozess der Trockenaufbereitung kommen im 1. Durchlauf wie auch im Rücklauf nicht alle Anlagenteile zum Einsatz. Daher erfolgt eine prozentuale Aufschlüsselung der Nutzung der Anlagenteile für die Teilprozesse 1. Durchlauf und Rücklauf.

Tab. 8: Stromverbrauch bei Vollast, Anzahl und Nutzung der einzelnen Anlagenteile der Trockenaufbereitung in den beiden Durchläufen³⁰

Anlagenteil	Energie-träger	Anzahl der Anlagen-teile	Gesamt-strom-verbrauch	Einzel-strom-verbrauch	Anzahl der genutzten Anlagenteile		Prozentuale Nutzung der Anlagenteile	
					1. Durch-lauf	Rück-lauf	1. Durch-lauf	Rück-lauf
			[kWh/h]	[kWh/h]				
Backenbrecher	Strom	1	90	90,0	1	0	100%	0%
Prallbrecher	Strom	1	90	90,0	0	1	0%	100%
Förderbänder	Strom	16	84	13 x 5,0; 2 x 7,5; 1 x 4,0	12	11	75%	69%
Siebe	Strom	4	59	18,0 + 15,0 + 11,0 + 15,0	4	2	100%	50%
Schubwagen	Strom	1	30	30,0	1	0	100%	0%
Rüttler unter Brecher	Strom	4	6	2 x 1,5 + 2 x 1,5	2	2	50%	50%
Rüttler Aufgabebunker	Strom	2	4	2 x 2,0	1	1	50%	50%
Magnetband	Strom	3	11	3,0 + 4,0 + 4,0	3	2	100%	67%
Heizung	Strom	4	6	3,0 + 1,0 + 1,0 + 1,0	4	0	100%	0%
Beleuchtung	Strom	1	1,5	1,5	1	0	100%	0%

Gesamtstromverbrauch: Angaben Scherer+Kohl (interne Daten)

²⁹ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

³⁰ Ebenda

In nachfolgender Tabelle werden die Daten des Stromverbrauchs der einzelnen Anlagenteile auf den Durchsatz umgerechnet. (1 kWh = 3,6 MJ; Stundendurchsatz 133 t/h)

Tab. 9: Berechnung der Energieaufwände der Anlagenteile der Trockenaufbereitung in MJ/t Durchsatz bei Vollast

Anlagenteil	Energie- träger	Strom- verbrauch		Durchsatz Trocken- anlage [t/h]	Energie- aufwand [MJ/t]
		[kWh/h]	[MJ/h]		
Backenbrecher	Strom	90	324	133	2,44
Prallbrecher	Strom	90	324	133	2,44
Förderbänder	Strom	84	302,4	133	2,27
Siebe	Strom	59	212,4	133	1,60
Schubwagen	Strom	30	108	133	0,81
Rüttler unter Brecher	Strom	6	21,6	133	0,16
Rüttler Aufgabebunker	Strom	4	14,4	133	0,11
Magnetband	Strom	11	39,6	133	0,30
Heizung	Strom	6	21,6	133	0,16
Beleuchtung	Strom	1,5	5,4	133	0,04

Die Berechnung des Energieaufwandes der Trockenaufbereitung pro Tonne durchgesetzten Betonbruchs unter Berücksichtigung der Auslastung und der Nutzung sowie des durchgesetzten Stoffstroms der Teilprozesse wird entsprechender Formel durchgeführt.

Energieaufwand gesamt =

**Energieverbrauch max. x Auslastung x (Nutzung 1. Durchlauf x Anteil Stoffstrom 1. Durchlauf +
Nutzung Rücklauf x Anteil Stoffstrom Rücklauf)**

Im 1. Durchlauf werden 100 % des aufzubereitenden Betonbruchs durchgesetzt. Im 2. Durchlauf (Rücklauf) werden die Massen mit einer Korngröße > 22 mm wiederholt aufbereitet (Anteil Stoffstrom). Der 1. Durchlauf erfolgt unter Nutzung des Backenbrechers, der Rücklauf unter Nutzung des Prallbrechers mit der entsprechenden Materialführung über verschiedene Förderbänder, Magnetbänder und Siebe (vgl. Abschn. 2.2). Die Auslastung der Anlage beträgt durchschnittlich 75 %³¹. Ausgenommen die Magnetbänder mit 100 %, da die enthaltenen Induktionsspulen lastunabhängig arbeiten, sowie Beleuchtung und Heizung mit 25 %, da diese nur bei Bedarf (Kälte, Dunkelheit) gebraucht werden.

³¹ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

Tab. 10: Berechnung des Energieaufwandes der konventionellen Aufbereitung

Anlagenteil	Energie träger	Strom-	Energie-	Aus- lastung	Nutzung Anlagenteile		Anteil Stoffstrom		Energie- aufwand gesamt
		ver- brauch max.	Ver- brauch max.		1. Durch- lauf	Rück- lauf	1. Durch- lauf	Rück lauf	
		[kWh]	[MJ/t]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/t]
Backenbrecher	Strom	90	2,44	75%	100%	0%	100%	65%	1,83
Prallbrecher	Strom	90	2,44	75%	0%	100%	100%	65%	1,19
Förderbänder	Strom	84	2,27	75%	75%	69%	100%	65%	2,04
Siebe	Strom	59	1,60	75%	100%	50%	100%	65%	1,59
Schubwagen	Strom	30	0,81	75%	100%	100%	100%	65%	1,00
Rüttler unter Bre- cher	Strom	6	0,16	75%	50%	50%	100%	65%	0,10
Rüttler Aufgabe- bunker	Strom	4	0,11	75%	50%	50%	100%	65%	0,07
Magnetband	Strom	11	0,30	100%	100%	67%	100%	65%	0,43
Heizung	Strom	6	0,16	25%	100%	0%	100%	65%	0,04
Beleuchtung	Strom	1,5	0,04	25%	100%	0%	100%	65%	0,01
Gesamtanlage									8,30
Vorzerkleinerung, Bagger	Diesel		4,78	50%	100%	0%	50%	0%	2,39
Radlader	Diesel		8,76	50%	80%	0%	100%	65%	7,01
Gesamtaufbereitung Trocken - E_{Aufb.}									17,7

Der Energieaufwand für die konventionelle Aufbereitung des Betonbruchs $E_{\text{Aufb.}}$ beträgt 17,7 MJ/t.

3.3 Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) – TP2

Der Verfahrensablauf der beiden Teilprozesse (Trocken- und Nassaufbereitung) zur Herstellung von RC-Gesteinskörnung in der stationären Anlage der Fa. Scherer + Kohl GmbH & Co. KG wurde im Abschn. 2.3 beschrieben und dargestellt.

Der Teilprozess der Trockenaufbereitung unterscheidet sich nur in dem Punkt von der konventionellen Aufbereitung, dass ein weiterer Durchlauf für das Material > 22 mm erfolgt. In diesem 3. Durchlauf werden ca. 39 % der im 1. Durchlauf aufgegebenen Betonbruchmenge wiederholt der Anlage unter Nutzung des Prallbrechers zugeführt. Die Durchsatzmengen des 2. Durchlaufs von 65 % und des 3. Durchlaufs von 39 % durchlaufen quasi den gleichen Prozess und summieren sich somit auf 104 % der im 1. Durchlauf aufgegebenen Betonbruchmenge (Anteil Stoffstrom Rücklauf).

Für die Auslastungs- und Nutzungsparameter gelten die gleichen Werte wie bei der konventionellen Aufbereitung. Dies gilt auch für den Bagger- und Radladereinsatz.

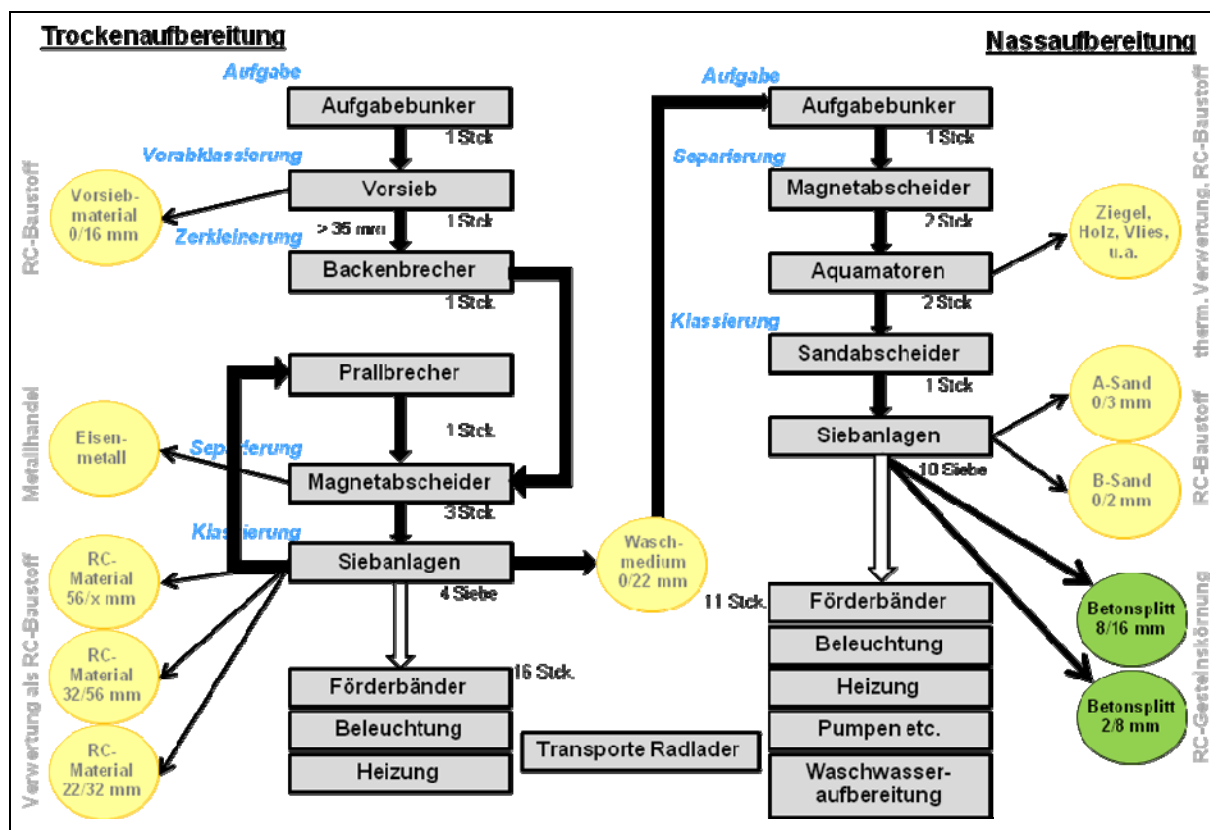


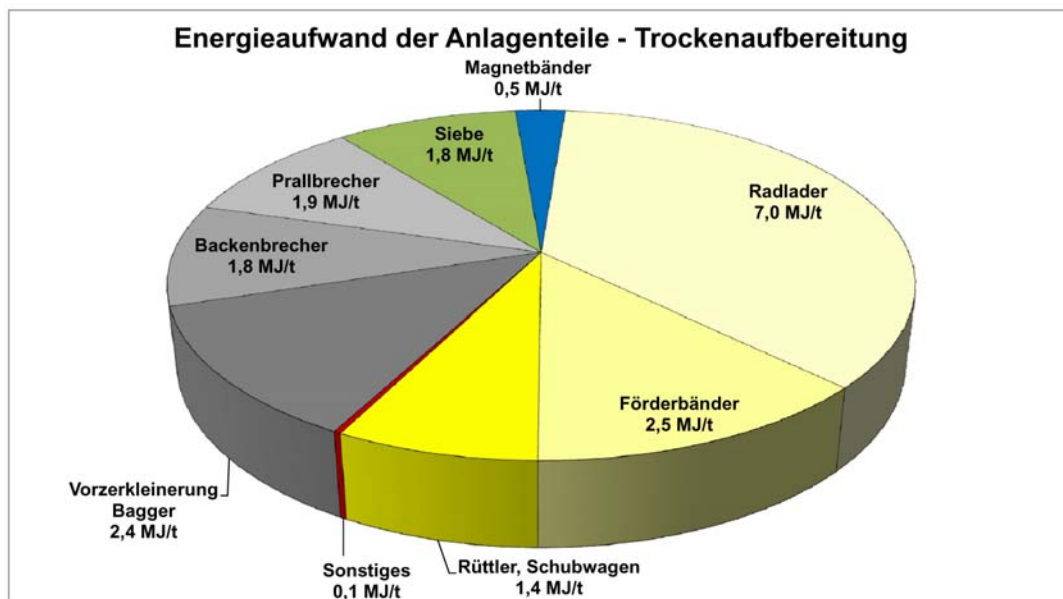
Abb. 30: Prozessübersicht Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt), gewaschen³²

³² Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

Tab. 11: Berechnung des Energieaufwandes der Trockenaufbereitung zur Betonsplitttherstellung

Anlagenteil	Energie-träger	Strom-verbrauch	Energie-verbrauch	Aus-lastung	Nutzung Anlagenteile		Anteil Stoffstrom		Energie-aufwand gesamt
		max.	max.		1. Durch-lauf	Rück-lauf	1. Durch-lauf	Rück-lauf	
		[kWh/h]	[MJ/t]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/t]
Backenbrecher	Strom	90	2,44	75%	100%	0%	100%	104%	1,83
Prallbrecher	Strom	90	2,44	75%	0%	100%	100%	104%	1,90
Förderbänder	Strom	84	2,27	75%	75%	69%	100%	104%	2,50
Siebe	Strom	59	1,60	75%	100%	50%	100%	104%	1,82
Schubwagen	Strom	30	0,81	75%	100%	100%	100%	104%	1,24
Rüttler unter Bre-cher	Strom	6	0,16	75%	50%	50%	100%	104%	0,12
Rüttler Aufgabe-bunker	Strom	4	0,11	75%	50%	50%	100%	104%	0,08
Magnetband	Strom	11	0,30	100%	100%	67%	100%	104%	0,51
Heizung	Strom	6	0,16	25%	100%	0%	100%	104%	0,04
Beleuchtung	Strom	1,5	0,04	25%	100%	0%	100%	104%	0,01
Gesamtanlage									10,06
Vorzerkleinerung, Bagger	Diesel		4,78	50%	100%	0%	50%	0%	2,39
Radlader	Diesel		8,76	50%	80%	0%	100%	65%	7,01
Gesamtaufbereitung Trocken:									19,5

Die Anteile am Energieverbrauch der einzelnen Anlagenteile der Trockenaufbereitung stellen sich wie folgt dar:


Abb. 31: Energieaufwände der Anlagenteile der Trockenaufbereitung

Energieaufwände nach Prozessen:

Zerkleinern (Brecher)	6,1 MJ/t	(31 %)
Klassieren (Siebe)	1,8 MJ/t	(9 %)
Separieren (Magnetbänder)	0,5 MJ/t	(3 %)
Transportieren (Transportbänder)	10,9 MJ/t	(56 %)

Die Nassaufbereitung des Waschmediums (Körnung 0/22 mm aus der Trockenaufbereitung) umfasst einen Durchlauf, wobei alle Anlagenteile voll genutzt werden (vgl. Abschn. 2.3). Die Auslastung der Aggregate beträgt durchschnittlich 75 %, ausgenommen das Magnetband (100 %) sowie Beleuchtung und Heizung (25 %). Zur Beschickung und zur Zwischenlagerung ist ein Radlader im Einsatz. Der Tagesdurchsatz der Nassaufbereitung beträgt 720 t/h. Bei einer täglichen Laufzeit von 9 h ergibt sich ein Stundendurchsatz von 80 t/h.³³

Tab. 12: Berechnung des Energieaufwandes der Nassaufbereitung zur Betonsplittherstellung³⁴

Anlagenteil	Energie- träger	Strom- verbrauch	Energieaufwand pro Durchlauf	Anlagenteile		Energieaufwand gesamt
				Nutzung	Auslastung	
		[kWh]	[MJ/t]	[%]	[%]	[MJ/t]
Pumpen	Strom	230,5	10,37	100%	75%	7,8
Bänder	Strom	53,0	2,39	100%	75%	1,8
Kompressor	Strom	11,5	0,52	100%	75%	0,4
Siebe	Strom	71,7	3,23	100%	75%	2,4
Aquamotoren	Strom	19,0	0,86	100%	75%	0,6
Magnetband	Strom	6,0	0,27	100%	100%	0,3
Aufgabebunker	Strom	11,5	0,52	100%	75%	0,4
Beleuchtung	Strom	3,0	0,14	100%	25%	0,0
Heizung	Strom	10,0	0,45	100%	25%	0,1
Sonstiges	Strom	11,5	0,52	100%	50%	0,3
Gesamtanlage						14,1
Radlader (2 x)	Diesel		8,76	80%	50%	7,0
Gesamtaufbereitung Nass:						21,1

Die Anteile am Energieverbrauch der einzelnen Anlagenteile der Nassaufbereitung stellen sich wie folgt dar:

³³ Nach Aufnahmen bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG

³⁴ Ebenda

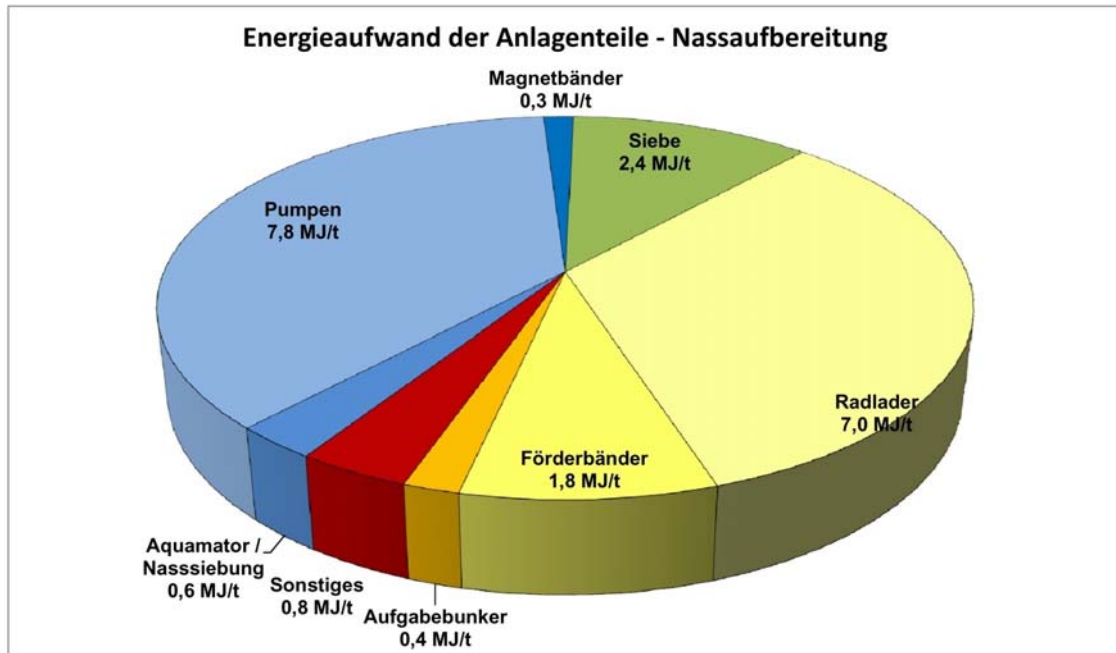


Abb. 32: Energieaufwand der Anlagenteile der Trockenaufbereitung

Energieaufwände nach Prozessen:

Klassieren (Siebe):	2,4 MJ/t	(11 %)
Separieren (Magnetband, Aquamator):	8,7 MJ/t	(41 %)
Transportieren (Transportbänder):	9,2 MJ/t	(44 %)

Beim Prozess der Herstellung von RC-Gesteinskörnung werden Betonsplitt der Körnung 2/8 mm und 8/16 mm im Verhältnis 1 : 2,5 erzeugt. Bei der Gewinnung von 1 t Betonsplitt 2/8 mm fallen somit 2,5 t Betonsplitt 8/16 mm an. Für die Herstellung 1 t Betonsplitt 2/8 mm plus 2,5 t 8/16 mm ist der Einsatz von ca. 7,14 t Betonbruch in der Trockenaufbereitung und die Weiterverarbeitung der so erzeugten 4,94 t RC-Gesteinskörnung (RC-GK) 0/22 mm in der Nassaufbereitung erforderlich (vgl. Abb. 11). Somit ergeben sich dafür folgende Energieaufwände:

- Trockenaufbereitung:

$$7,14 \text{ t Betonbruch} \quad \times \quad 19,5 \text{ MJ/t}_{\text{Durchsatz}} \quad = \quad \mathbf{139 \text{ MJ/t}}$$

- Nassaufbereitung:

$$4,94 \text{ t RC-GK } 0/22 \text{ mm} \quad \times \quad 21,1 \text{ MJ/t}_{\text{Durchsatz}} \quad = \quad \mathbf{104 \text{ MJ/t}}$$

- Gesamtaufbereitung:

$$= \quad \mathbf{243 \text{ MJ/t}_{\text{Betonsplitt } 2/8\text{mm}}}$$

Betrachtet man nur die Herstellung der Körnung 8/16 mm, ergibt sich ein Energieaufwand von:

$$\mathbf{97 \text{ MJ/t}_{\text{Betonsplitt } 8/16\text{mm}}}$$

Lässt man die Körnungsgröße außer Acht und berücksichtigt nur die 3,5 t produzierten Betonsplitts, ergibt sich Energieaufwand von:

$$\mathbf{E_{\text{Herst. Betonsplitt}} = 69 \text{ MJ/t}_{\text{Betonsplitt allg.}}}$$

Die Berechnung der Anteile der Anlagenteile für den Gesamtprozess der Betonsplittproduktion zeigt Tab. 13 und deren grafische Darstellung Abb. 33.

Tab. 13: Berechnung des Energieaufwandes der Anlagenteile bei der Betonsplittherstellung

Anlagenteil	Trocken- aufbereitung	Nass- aufbereitung	Trocken- aufbereitung	Nass- aufbereitung	Gesamt- prozess
Durchsatz [t]	pro	pro	für	für	Herstellung
Energieaufwand [MJ]	1 t	1 t	7,14 t	4,94 t	1 t 2/8 mm
Vorzerkleinerung Bagger	2,4		17,1	0,0	17,1
Backenbrecher	1,8		12,9	0,0	12,9
Prallbrecher	1,9		13,6	0,0	13,6
Magnetbänder	0,5	0,3	3,6	1,5	5,1
Aquamatoren		0,6	0,0	3,0	3,0
Pumpen		7,8	0,0	38,5	38,5
Siebe	1,8	2,4	12,9	11,9	24,7
Radlader	7	7	50,0	34,6	84,6
Förderbänder	2,5	1,8	17,9	8,9	26,7
Rüttler, Schubwagen	1,4	0,4	10,0	2,0	12,0
Sonstiges	0,1	0,8	0,7	4,0	4,7
Summe			139	104	243

Anteile der Energieaufwände nach Prozessen:

Zerkleinern 43,6 MJ/t_{2/8mm} (18 %)

Klassieren: 24,7 MJ/t_{2/8mm} (10 %)

Separieren: 46,5 MJ/t_{2/8mm} (19 %)

Transportieren: 123,3 MJ/t_{2/8mm} (51 %)

Deutlich zeigt sich der erhebliche Anteil der Transportaufwendungen, welcher über die Hälfte des Gesamtenergieaufwandes der Betonsplittherstellung ausmacht.

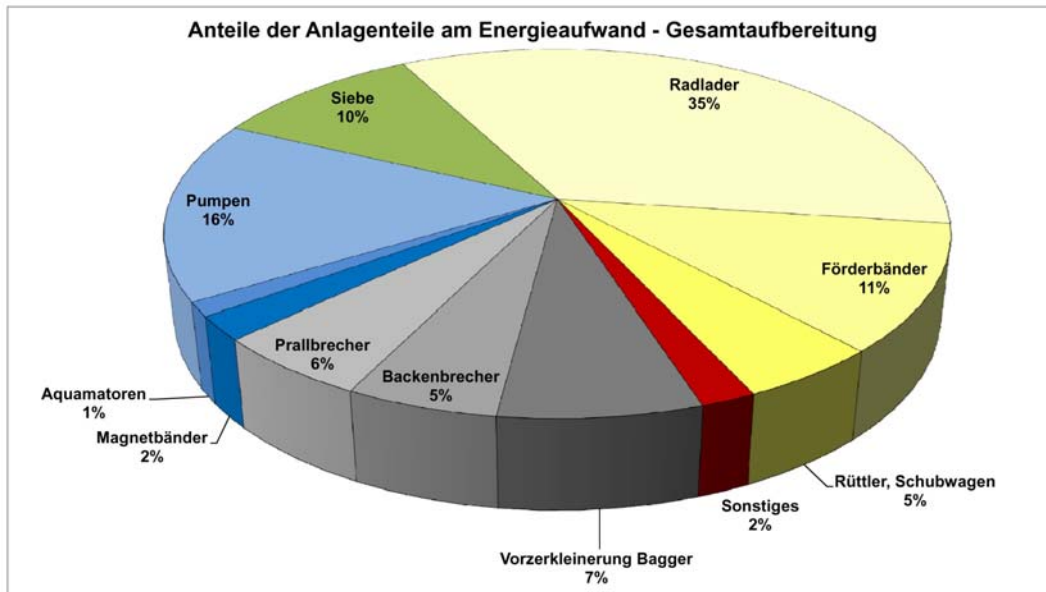


Abb. 33: Anteile am Energieaufwand der Anlagenteile der Betonsplitttherstellung

3.4 Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Betonherstellung – TP2 und TP3

Der Transportweg des Betonsplitts 2/8 mm und 8/16 mm bis zum Betonwerk beträgt ca. 7 km und wird per LKW realisiert. Die natürlichen Gesteinskörnungen (Sand, Kies) werden zu ca. 15 % per LKW und zu 85 % per Binnenschiff angeliefert. Die Transportentfernung der LKW-Lieferung beträgt 18 km. Die Schifflieferungen belaufen sich auf 80 km für den Sand und 200 km für den Kies. Somit ergeben sich folgende Energieaufwände für den Antransport der Gesteinskörnungen:

Tab. 14: Energieaufwände für den Antransport von Gesteinskörnungen (TBS)³⁵

Material	Transportmittel		Transportentfernung [km]	Energieaufwand		
		Anteil		[MJ/t*km]	[MJ/t]	
Betonsplitt	LKW	100%	7	1,33	9,31	9,3
Sand	LKW	15%	18	1,33	3,59	27,4
	Schiff	85%	80	0,35	23,80	
Kies	LKW	15%	18	1,33	3,59	63,1
	Schiff	85%	200	0,35	59,50	

Der durch die Fa. TBS verwendete Zement wird in der firmeneigenen Zementmischanlage auf dem Werksgelände hergestellt. Trotzdem müssen die dafür erforderlichen Ausgangsstoffe wie u.a. Portlandzementklinker und Flugasche geliefert werden. Daher wird für die Zementlieferung auf die Angaben des durchschnittlichen Transportweges des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB) zurückgegriffen.

³⁵ Energieaufwand Transporte: 1,33 MJ/t*km LKW-Transport und 0,35 MJ/t*km Binnenfrachtschiff nach: [www.probas.umweltamt.de/...](http://www.probas.umweltamt.de/) aufgerufen am 27.02.2008.

In Verbindung mit den recherchierten Herstellungsaufwänden für die einzelnen Ausgangsstoffe der TBS ergeben sich folgende Ergebnisse für den Bereitstellungsaufwand (Herstellung plus Antransport) dieser:

Tab. 15: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von RC- und Normalbeton (TBS)

Ausgangsstoff	Herstellungsaufwand $E_{\text{Herst. Ausg.}}$ [MJ/t]	Transportentfernung LKW / Schiff [km]	Transportaufwand $E_{\text{Trans. Ausg.}}$ [MJ/t]	Bereitstellungsaufwand $E_{\text{Bereit. Ausg.}}$ [MJ/t]
RC-Gesteinskörnung ³⁶	69	7 / -	9	78
Sand	35 ³⁷	18 / 80	27	62
Kies	35	18 / 200	63	98
Zement mit 25% Flugasche	3.200 ³⁸	106 ³⁹	141	3.341
Zusatzmittel	0,05 ⁴⁰	100 ⁴¹	133	133
Wasser	0	-	0	0

Ein Vergleich des Bereitstellungsaufwandes der verwendeten natürlichen Gesteinskörnungen von TBS mit dem der RC-Gesteinskörnungen ist in Abb. 34 grafisch dargestellt.

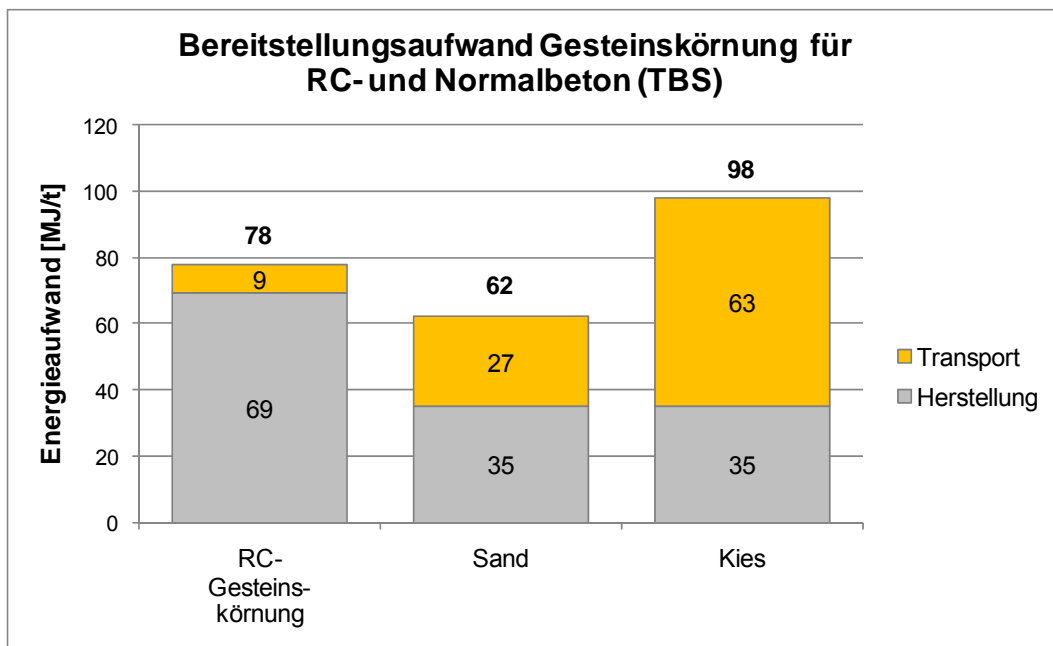


Abb. 34: Vergleich des Bereitstellungsaufwandes für RC- und natürliche Gesteinskörnung (TBS)

³⁶ Es erfolgt keine Unterscheidung der Körnungsgrößen.

³⁷ www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe; aufgerufen am 26.02.2010

³⁸ Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007

³⁹ Ebenda.

⁴⁰ www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe; aufgerufen am 26.02.2010

⁴¹ Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007

Deutlich zeigt sich die Abhängigkeit des Bereitstellungsaufwandes von der Transportentfernung der Gesteinskörnung. Der um die Hälfte günstigere Herstellungsaufwand der natürlichen Gesteinskörnung wird durch den höheren Transportaufwand des Sandes fast aufgebraucht, obwohl der überwiegende Teil der Sandlieferung über den energetisch günstigeren Schiffsweg erfolgt. Bei den Kieslieferungen ist der Transportaufwand sogar noch höher, so dass die Bereitstellung von Betonsplitt energetisch günstiger ist.

In Abb. 35 wird jedoch sehr deutlich, wo die energetische Hauptbelastung liegt; eindeutig in der Zementproduktion.

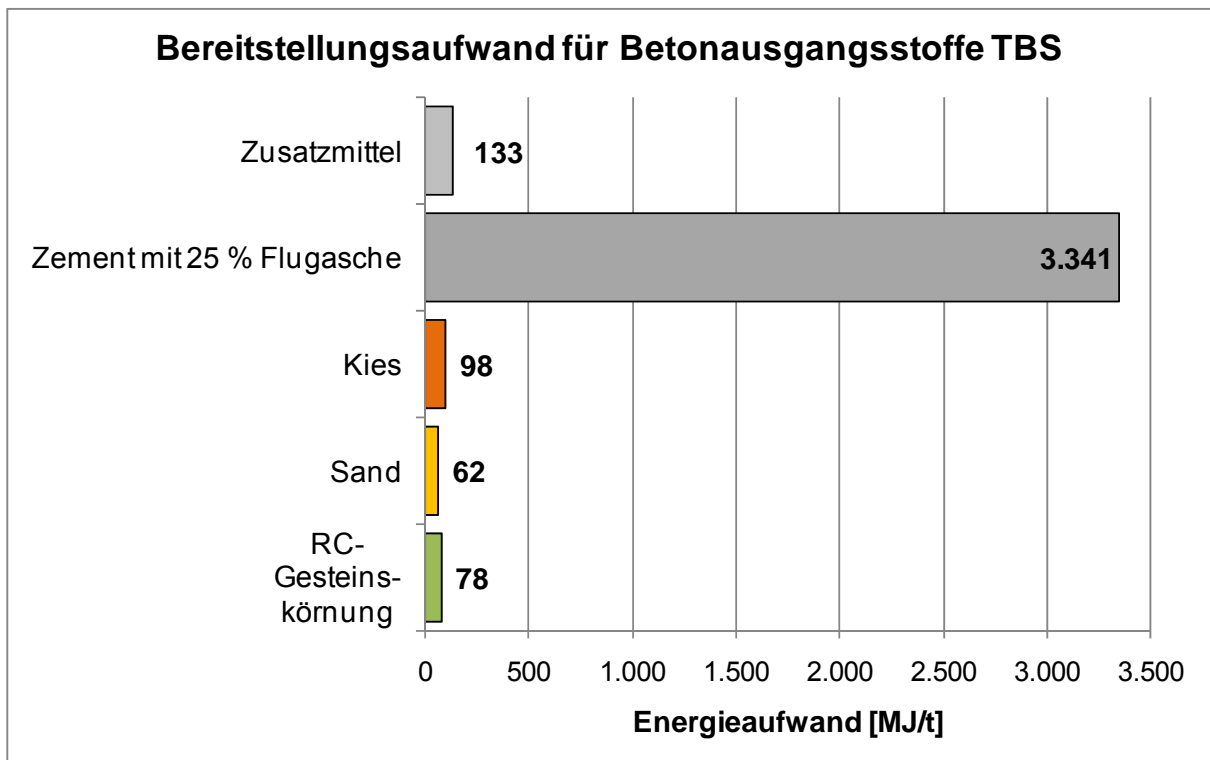


Abb. 35: Energetischer Aufwand zur Bereitstellung der Betonausgangsstoffe (TBS)

Die Angaben für die Transportentfernungen und Anteile der eingesetzten Transportmittel zur Anlieferung von Gesteinskörnungen und Zement für die Herstellung des Standardbetons C 30/37 sind nachfolgend aufgeführt. Die Daten wurden dem Technischen Bericht TB-BTe 2135/2007 des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB)⁴² entnommen.

Die Transportentfernungen für die Anlieferung des Zusatzstoffs Flugasche wie auch der erforderlichen Zusatzmittel (Betonverflüssiger) betragen durchschnittlich 100 km. Der Transport erfolgt ausschließlich über LKW.⁴³

⁴² Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007.

⁴³ Ebenda.

Tab. 16: Energieaufwände für den Antransport von Gesteinskörnungen und Zement (BTB)

Material	Transportmittel ⁴⁴		Transportentfernung ⁴⁵ [km]	Energieaufwand ⁴⁶		
		Anteil		[MJ/t*km]	[MJ/t]	
Gesteinskörnung	LKW	88,0%	39	1,33	45,65	47,3
	Bahn Diesel	1,9%	39	0,33	0,24	
	Schiff	10,1%	39	0,35	1,38	
Zement	LKW	79,9%	106	1,33	112,64	119,9
	Bahn Diesel	8,9%	106	0,33	3,11	
	Schiff	11,2%	106	0,35	4,16	

Die durchschnittlichen Herstellungs- und Transportaufwände für die Ausgangsstoffe zur Herstellung des Standardbetons sind in

⁴⁴ Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007.

⁴⁵ Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007.

⁴⁶ nach: [www.probas.umweltamt.de/...](http://www.probas.umweltamt.de/) aufgerufen am 27.02.2008.

Tab. 16 aufgeführt. Hier zeigt sich, dass der Bereitstellungsaufwand der RC-Gesteinskörnung für TBS im überregionalen Vergleich energetisch günstiger ist als der von Kies und Sand und deutlich günstiger als der von Splitt. Der Energieaufwand für die Splitt Herstellung übersteigt den Transportaufwand für den Splitt um das 2,5-fache.

Deutlich ist auch der höhere Herstellungsaufwand für einen Durchschnittszement gegenüber einem Portlandflugaschezement mit einem Anteil von 25 % Flugasche.

Somit ergeben sich für die Bereitstellung der Ausgangsstoffe zur Herstellung des Standardbetons C 30/37 folgende Aufwände:

Tab. 17: Energieaufwand zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Herstellung des Standardbetons (BTB)

Ausgangsstoff	Herstellungsaufwand ⁴⁷ $E_{\text{Herst. Ausg.}}$ [MJ/t]	Transportentfernung ⁴⁸ [km]	Transportaufwand $E_{\text{Trapo. Ausg.}}$ [MJ/t]	Bereitstellungsaufwand $E_{\text{Bereit. Ausg.}}$ [MJ/t]
Splitt	116 ⁴⁹	39	47	163
Kies, Sand	35	39	47	82
Zement, Durchschnitt	4.400	106	120	4.520
Flugasche (FA)	100	100	133	233
Betonverflüssiger	0,05	100	133	133

In Abb. 36 werden die ermittelten Bereitstellungsaufwände für die verwendeten Gesteinskörnungen für den Standardbeton C 30/37 der im „Leuchtturmprojekt“ eingesetzten RC-Gesteinskörnung gegenübergestellt.

⁴⁷ www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe; aufgerufen am 26.02.2010.

⁴⁸ Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007.

⁴⁹ TFB Wildeg, Datenerfassung 1996/97 (www.empa.ch).

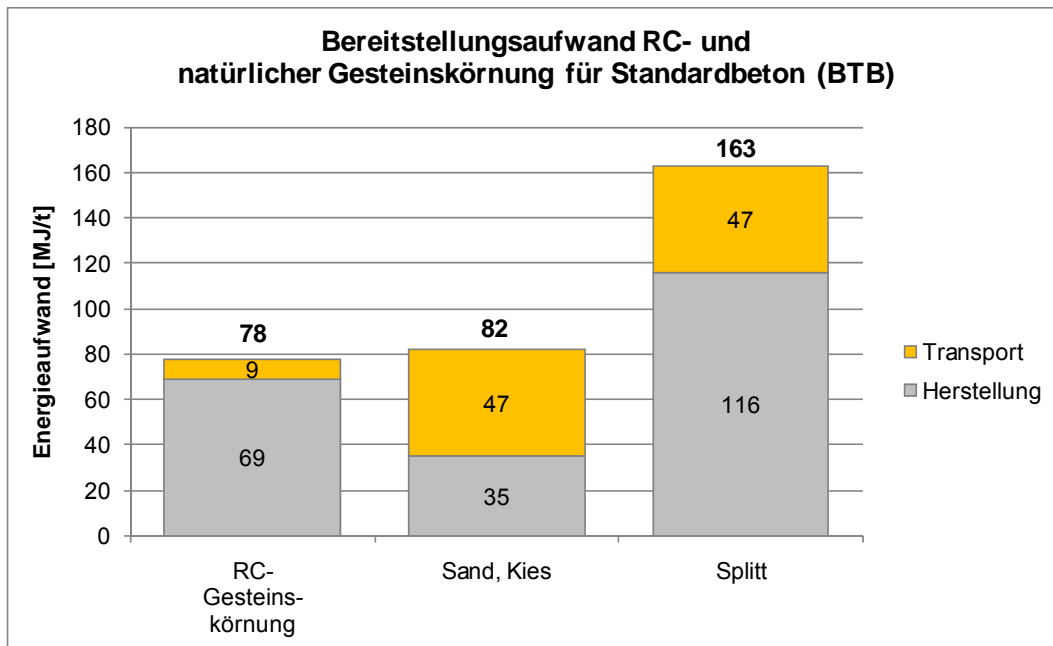


Abb. 36: Vergleich des energetischen Bereitstellungsaufwandes für RC- und natürliche Gesteinskörnung für Standardbeton (BTB)

Energetisch vorteilhaft wirkt sich hier die kurze Transportentfernung der RC-Gesteinskörnung von der RC-Anlage zur Betonmischanlage aus. Es kann durchaus davon ausgegangen werden, dass dies im gewählten Fallbeispiel des „Leuchtturmprojektes“ kein Einzelfall darstellt. RC-Anlagen wie auch Transportbetonmischanlagen sind meist in unmittelbarer Nähe von größeren Siedlungsgebieten oder in diesen gelegen, um die erforderlichen Transportentfernungen möglichst gering zu halten. Zudem werden beide Anlagen meist in Industriegebieten untergebracht. Somit resultieren auch geringe Distanzen zwischen dem RC-Gesteinskörnungsproduzenten und deren optionalen Abnehmern den Betonmischanlagen. Dieser Transportvorteil wiegt im vorliegenden Beispiel den höheren Herstellungsaufwand gegenüber natürlichen Sanden und Kiesen auf. Kiesgruben und vor allem Steinbrüche zur Splittgewinnung liegen fast ausschließlich außerhalb urbaner Räume, was deutlich höhere Transportentfernungen bedingt.

Anzumerken ist hierbei auch, dass die verwendeten Angaben zum Herstellungsaufwand natürlicher, unebrochener Gesteinskörnungen (Sand, Kies) Durchschnittswerte über alle Körnungsbereiche darstellen. Vor allem aber in Norddeutschland herrscht ein deutlicher Überschuss an Sanden. Beim Abbau können Sand/Kies-Verhältnisse von 80:20 auftreten⁵⁰. Das heißt, die Herstellung von Kiesen ist deutlich energieaufwändiger, da bei der Produktion von 1 t Kies ca. 5 t Sand anfallen. Zum Teil müssen grobe Körnungen (Kiese) über größere Entfernungen antransportiert werden. Gerade diese groben Gesteinskörnungen werden beim Recycling von Betonbruch erzeugt.

⁵⁰ www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe; aufgerufen am 26.02.2010.

In der nachfolgenden Tab. 18 ist die Berechnung des gesamten Bereitstellungsaufwandes der Ausgangsstoffe für einen Kubikmeter RC-Beton, Normalbeton (TBS) und Standardbeton (BTB) der Druckfestigkeitsklasse C 30/37 aufgeführt. Abb. 37 stellt die Anteile der Energieaufwände für die einzelnen Ausgangsstoffe des RC-Betons dar und in Abb. 38 sind die Bereitstellungsaufwände der untersuchten Betone grafisch gegenüber gestellt.

Tab. 18: Bereitstellungsaufwände der Ausgangsstoffe zur Herstellung von 1 m³ RC-, Normal- und Standardbeton

Ausgangsstoff	Bereitstellungs-	Zusammensetzung			Bereitstellungsaufwand		
		RC-	Normal-	Standard-	RC-	Normal-	Standard-
	aufwand	Beton	beton	beton	Beton	beton	beton
	[MJ/t]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]
RC-Gesteinskörnung	78	446	-	-	35		
Sand	62	566	649	-	35	40	
Kies	98	672	1092	-	66	107	
Kies/Sand	82	-	-	1.432			117
Splitt	163	-	-	358			58
Zement, Durchschnitt	4.520	-	-	320			1.446
Zement, 25% Flugasche	3.341	360	360	-	1.203	1.203	
Flugasche (FA)	233	-	-	80			19
Zusatzmittel	133	1,80	2,88	1,28	0,2	0,4	0,2
Wasser		187	187	170			
Gesamt					1.339	1.350	1.640

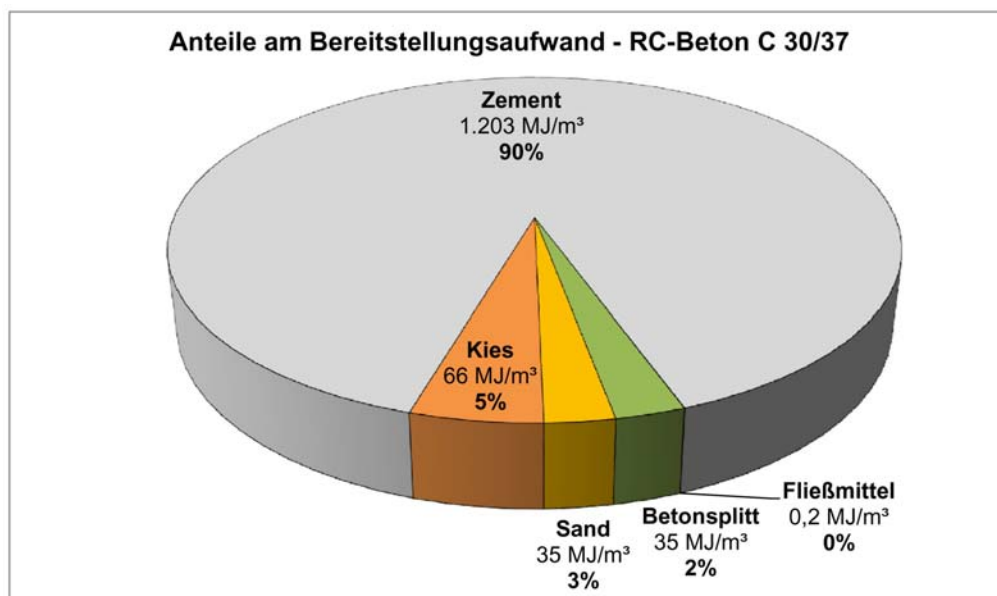


Abb. 37: Anteile der Ausgangsstoffe am Bereitstellungsaufwand für RC-Beton

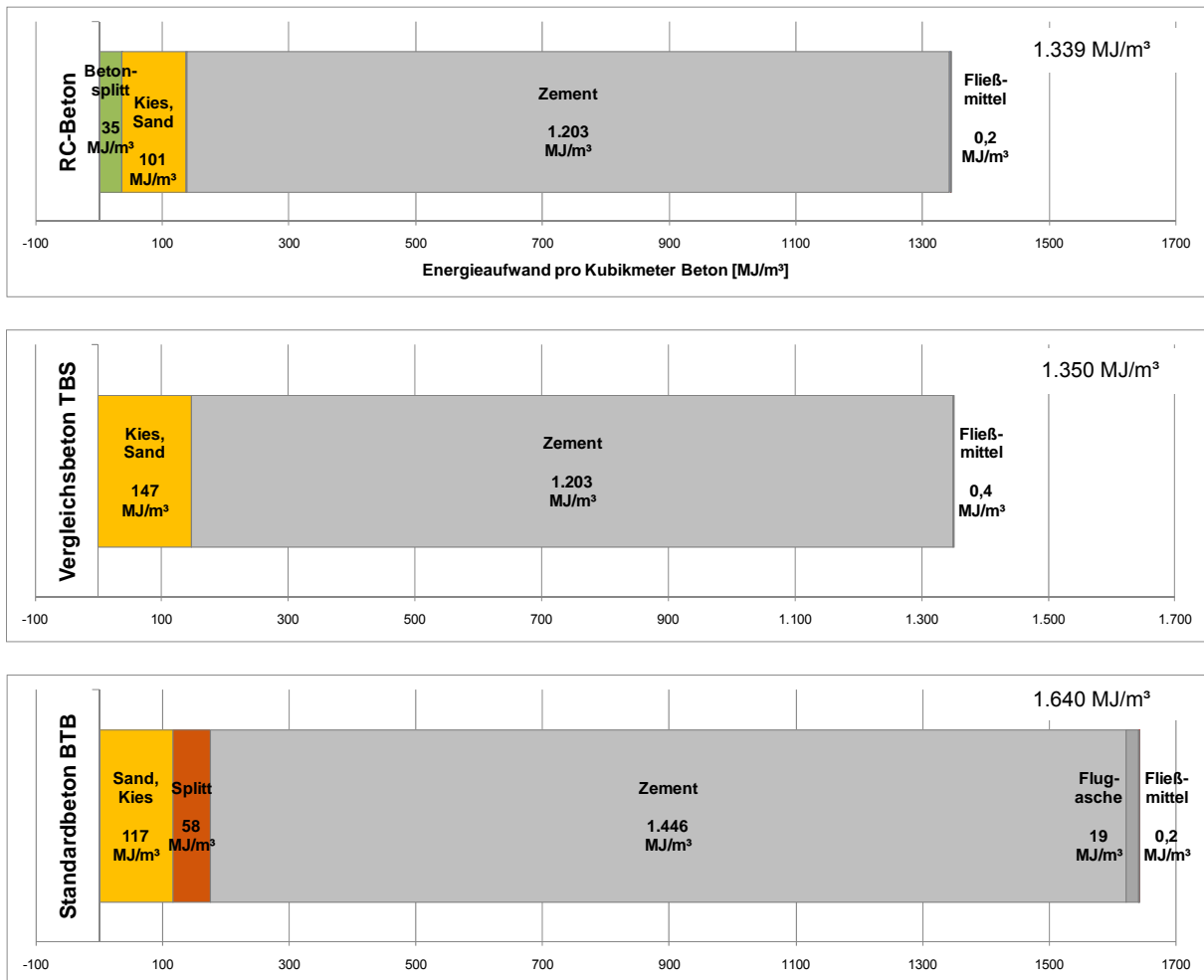


Abb. 38: Vergleich der energetischen Aufwände zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe der untersuchten Betone

Den höchsten Anteil der energetischen Aufwendungen erzielt die Bereitstellung des Zementes. Dies begründet sich auf dem sehr energieintensiven Brennprozessen zur Herstellung des Portlandzementklinkers. Die Verringerung dieses Hauptzementbestandteils bei den Betonen der TBS (RC- wie Normalbeton) durch den Einsatz eines Portlandflugaschezementes reduziert den Bereitstellungsaufwand deutlich.

Durch die Verwendung von RC-Gesteinskörnungen kann der Bereitstellungsaufwand für die Zuschläge gegenüber den natürlichen, unebrochenen Zuschlägen der TBS um 11 MJ/m³ (ca. 7,5 %) gesenkt werden. Die Energieeinsparung beruht dabei auf der Verringerung der Transportaufwendungen für die RC-Gesteinskörnung.

Im bundesweiten Vergleich der zum Einsatz kommenden Gesteinskörnungen für die Herstellung des Standardbeton der BTB mit denen der Fa. TBS stellt sich durch den Einsatz rezyklierter Zuschläge eine Einsparung von 39 MJ/m³ (22 %) dar. Ursache hierfür sind zum einen bundesdurchschnittlich höhere Transportaufwendungen für natürliche Gesteinskörnungen und der Einsatz von gebrochenen natürlichen Zuschlägen (Splitte), welche höhere Herstellungsaufwendungen durch erforderliche Zerkleinerungs-, Klassierungs- und Separierungsprozesse beinhalten.

3.5 Herstellung von Transportbeton – TP 2 und TP 3

Die Energiekosten für den Transportbeton betragen ca. 0,50 – 0,55 €/m³⁵¹. Bei einem Strompreis von 0,15 - 0,22 €/kWh⁵² ergeben sich somit 2,3 – 3,7 kWh/m³ bzw. 8,3 – 13,3 MJ/m³. Der Jahresdurchsatz von TBS beträgt 60.000 m³ Transportbeton, der Jahresstromverbrauch 240.000 kWh. Somit ergeben sich 4,0 kWh/m³ bzw. 14,4 MJ/m³. Die Aufwände für die Herstellung von Normal- und RC-Beton unterscheiden sich nicht.⁵³

Aus der Jahreshochrechnung folgert ein Energieaufwand von 8 - 14 MJ/m³ (**Ø 11 MJ/m³**). Die reinen Prozesskosten betragen ca. 3 MJ/m³ (s. Tab. 19). Daraus resultiert ein Restaufwand von ca. 5 - 11 MJ/m³ (**Ø 8 MJ/m³** für die Beschickung der Zuschlagboxen und die Schiffsentleerung per Kran, die Anlagensteuerung, den Betrieb der Frischbetonrecyclinganlage, die Werksbeleuchtung, Betrieb des Betonlabore u.a.).

Tab. 19: Energieaufwand Herstellung Transportbeton⁵⁴

Material	Fördertechnik	Energie-träger	Leistung		Aus-lastung	Rechen-wert Aus-lastung	Dauer	Energie-aufwand pro Mi-schung ¹		Energie-aufwand pro Kubik-meter
			[kWh]	[kWs]				[kW]	[MJ]	
Gesteins-körnung	Kübelschräg-aufzug	Strom	22	0,0061	80 - 90 %	85%	17	0,088	0,318	0,16
	Kübel-rückführung	Strom	22	0,0061	≤ 10 %	10%	17	0,010	0,037	0,02
								Summe GK:		0,18
Zement	Schnecken ²	Strom	22	0,0061	40 - 50 %	50%	36	0,110	0,396	0,20
Wasser	Pumpe ³	Strom	7,5	0,0021	100%	100%	52	0,108	0,390	0,20
Beton-mischgut	Doppelwellen-zwangs-mischer ⁴	Strom	45	0,0125	Konsistenz-klasse F3	70%	150	1,313	4,725	2,36
Gesamtprozess										2,93

¹ Mischung 2 m³

² Fördermenge 720 kg / Förderleistung 20 kg/s

³ Fördermenge 0,374 m³ / Förderleistung 26 m³/h (0,0072 m³/s)

⁴ Dauer des Mischvorgangs (60 s Beschicken, 60 s Mischen, 30 s Entleeren)

⁵¹ Nach Aufnahmen bei TBS.

⁵² www.verivox.de/power/cityspecial... aufgerufen am 10.03.2010

⁵³ Nach Aufnahmen bei TBS

⁵⁴ Nach Aufnahmen bei TBS

3.6 Verarbeitung von Ortbeton – TP2 und TP3

Für den eingesetzten RC- wie auch Normalbeton gilt die Konsistenzklasse F3 bei gleichem Größtkorn (GK =16 mm). Die Verarbeitbarkeit ist somit für beide Betone gleich. Die Betonverarbeitung wird am Beispiel der Betonierung von Decken untersucht.

Eingesetzt wurden dabei:

- ein Betonmischfahrzeug 8 – 10 m³: Chassis – Mercedes 3241 mit 300 kW⁵⁵) - Diesel,
- eine Fahrzeugbetonpumpe Schwing 34 m (Theoretische Förderleistung 164 m³/h (Chassis – Mercedes 2631 mit 231 kW⁵⁶) - Diesel,
- zwei Innenrüttler (bspw. Hochfrequenz-Beton-Innenrüttler Type VNU mit 1,5 kW⁵⁷) - Strom
- Betonharken und Patsche händischer Einsatz.

Für das Entladen wird das Betonmischfahrzeug nur leicht über den Standgasbetrieb ausgelastet (Annahme für die Auslastung 10 %).

Die Auslastung der Fahrzeugpumpe wird mit 50 % angenommen. Somit ergibt sich eine Förderleistung von 82 m³/h (0,012 h/m³). Gleiches gilt für das Entladen eines Kubikmeters Frischbeton aus dem Betonmischfahrzeug.

Die Innenrüttler sind mit 100 % voll ausgelastet. Die Verdichtungsarbeit wird über den Gesamtprozess des Entladens von 1 m³ Beton (inkl. Fahrzeugwechsel, Standzeiten, Reinigung der Schurren,...) und beträgt 5 min/m³ (0,083 h/m³)⁵⁸.

Tab. 20: Energiebedarf der Betonverarbeitung am Beispiel der Schüttung einer Deckenplatte

Gerät	Leistung	Energieträger	Einsatzzeit	Auslastung	realer Energiebedarf	Spez. Verbrauch Auslastung	Bedarf	PEI _{ET}	E _G
	[kW]		[h]	[%]	[kWh]	[l/kWh]	[l]	[MJ/l]	[MJ]
Betonmischer	300	Diesel	0,012	10	0,36	0,35	0,126	35,3	4,4
Betonpumpe	231	Diesel	0,012	50	1,39	0,28	0,389	35,3	13,7
Innenrüttler (2 Stck.)	2 x 1,5	Strom	0,083	100	0,25	1 kWh = 3,6 MJ			0,9
Energiebedarf pro m³ verbauter Frischbeton $E_{\text{Verarb.RC-Beton}} / E_{\text{Verarb.Beton}}$									19 MJ/m³

⁵⁵ www.itc-berlin.net/en/html/mb_3241.html.

⁵⁶ www.pktrucks.com/de/stock/view/me2001.

⁵⁷ www.laier.com/de/produkts/innenruettler.pho; alle aufgerufen am 20.07.2010

⁵⁸ nach Aufnahmen der FGBR, s. Abb. 25 Vergleich Entladedauer

Der Transportweg des Frischbetons bis zur Baustelle (Pilotprojekt) beträgt 3 km. Bei einer Frischbetonrohddichte von ca. 2.300 kg/m^3 und eines Energieaufwandes von $1,33 \text{ MJ/t*km}$ beläuft sich der Energieaufwand $E_{\text{Trans.RC-Beton}} / E_{\text{Trans.Beton}}$ für den Transport des Frischbetons zum Einbauort auf **9,2 MJ/m³**.

3.7 Energieverbrauch Gesamtprozess

In der folgenden Tabelle erfolgt die Berechnung des Energieaufwandes für den gesamten betrachteten Prozess des Szenario 1 – vom Abbruch über die Betonsplittherstellung zur Herstellung und abschließenden Verarbeitung von RC-Beton C 30/37 (Tab. 21).

Für die Herstellung eines Kubikmeters RC-Beton C 30/37 werden im Fallbeispiel des „Leuchtturmprojektes“ $0,446 \text{ t}$ RC-Gesteinskörnung benötigt. Diese werden aus $0,91 \text{ t}$ Betonbruch gewonnen, welcher dem Abbruch eines entspr. Gebäudes entstammt. Die restlichen $0,464 \text{ t}$ setzen sich zu einem sehr großen Anteil aus Betonsplitt und Betonbrechsand ($0,419 \text{ t}$) zusammen und können direkt als RC-Produkte verwertet werden. $0,045 \text{ t}$ sind Fremd- und Störstoffe wie Eisenmetalle, Vlies, Holz und Plastik sowie Filterkuchen aus der Wasseraufbereitung und werden dem Metallhandel bzw. einer thermischen Verwertung zugeführt.

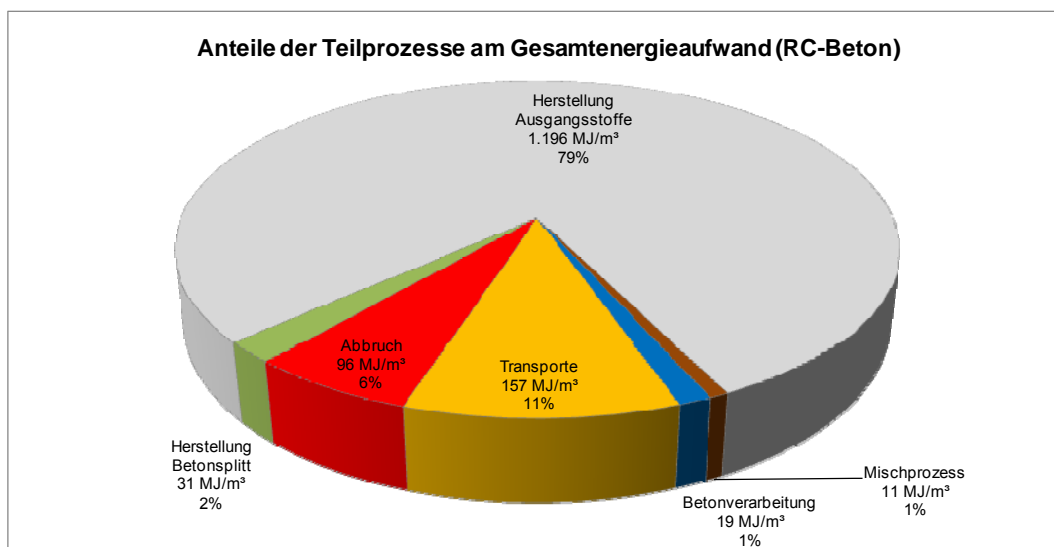
Zudem werden für die RC-Betonproduktion konventionelle Ausgangsstoffe wie Sand, Kies, Zement, Wasser und Zusatzmittel verwendet (vgl. Abschn. 2.4). In die Berechnung des Energieverbrauchs des Gesamtprozesses der RC-Betonherstellung fließen deren Herstellung und Antransport wie der Herstellungsprozess der RC-Gesteinskörnung inkl. des erforderlichen Abbruchs ein. Zudem werden die Ergebnisse der Teilprozessbetrachtungen des Betonmischens und Verarbeitens sowie alle notwendigen Transportprozesse berücksichtigt. Abb. 39 stellt die Energieaufwände der Teilprozesse in ihren Anteilen am Gesamtenergieaufwand grafisch dar.

Die Berechnung der Energieaufwände für Szenario 2 Abbruch, konventionelle Aufbereitung, Herstellung und Verarbeitung von Normalbeton (TBS) und Standardbeton (BTB) erfolgt in Tab. 22 und Tab. 23. Die Abb. 40 und Abb. 41 zeigen die Anteile der Teilprozesse für diese Berechnungen.

Um eine Vergleichbarkeit der Szenarien zu erzielen, muss auch in Szenario 2 neben der Herstellung eines Kubikmeters Normalbeton C 30/37 der Abbruch und die stoffliche Aufbereitung der gleichen Menge an Betonbruch wie in Szenario 1 berücksichtigt werden. Das heißt, es fließen die Energieaufwände für den Abbruch und die konventionelle Aufbereitung von $0,91 \text{ t}$ Betonbruch in die Gesamtbetrachtung ein.

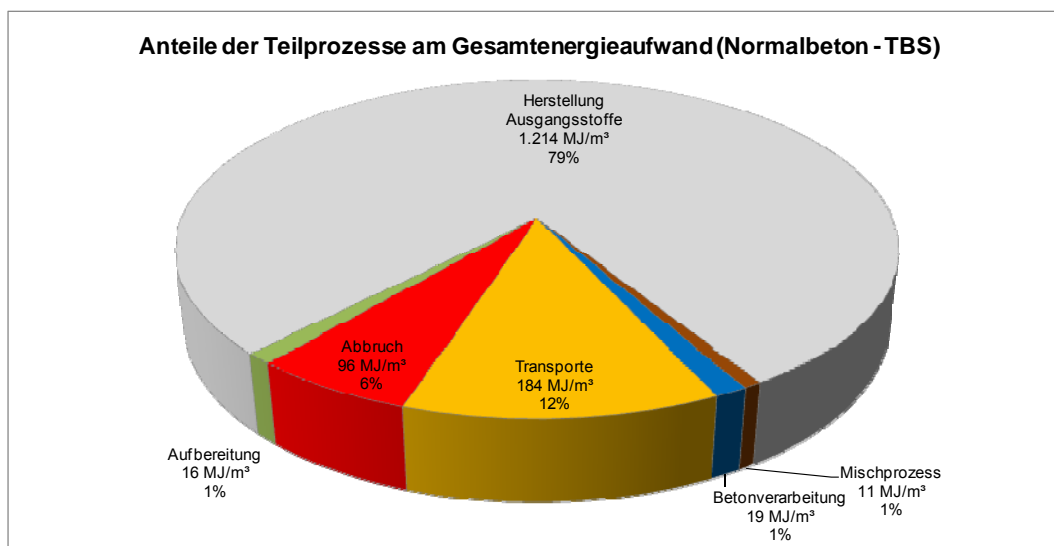
Tab. 21: Gesamtenergieaufwand für Szenario 1 – RC-Beton C30/37

Teilprozess		Menge	Spezifischer Energieaufwand	Energieaufwand pro m ³ RC-Beton
Abbruch	$E_{\text{Abbr.}}$	0,91 t/m ³	105 MJ/t	96 MJ/m ³
Transport zur RC-Anlage	$E_{\text{Trans.Betonbruch}}$	0,91 t/m ³	40 MJ/t	36 MJ/m ³
Aufbereitung (Herstellung Betonsplitt)	$E_{\text{Herst.RC-GK}}$	0,446 t/m ³	69 MJ/t	31 MJ/m ³
Transport zur Betonmischanlage	$E_{\text{Trans.RC-GK}}$	0,446 t/m ³	9 MJ/t	4 MJ/m ³
Herstellung Ausgangsstoffe Sand Kies Zement Wasser Zusatzmittel (FM)	$E_{\text{Herst.RC-Ausg.}}$	0,566 t/m ³ 0,672 t/m ³ 0,360 t/m ³ 0,187 t/m ³ 0,0018 t/m ³	35 MJ/t 35 MJ/t 3.200 MJ/t 0 MJ/t 0,05 MJ/t	20 MJ/m ³ 24 MJ/m ³ 1.152 MJ/m ³ 0 MJ/m ³ 0 MJ/m ³
Transport Ausgangsstoffe Sand Kies Zement Wasser Zusatzmittel (FM)	$E_{\text{Trans.RC-Ausg.}}$	0,566 t/m ³ 0,672 t/m ³ 0,360 t/m ³ 0,187 t/m ³ 0,0018 t/m ³	27 MJ/t 63 MJ/t 141 MJ/t 0 MJ/t 133 MJ/t	15 MJ/m ³ 42 MJ/m ³ 51 MJ/m ³ 0 MJ/m ³ 0,2 MJ/m ³
Betonmischprozess	$E_{\text{Herst.RC-Beton}}$	1 m ³	11 MJ/m ³	11 MJ/m ³
Transport zur Baustelle	$E_{\text{Trans.RC-Beton}}$	1 m ³	9 MJ/m ³	9 MJ/m ³
Betonverarbeitung	$E_{\text{Verarb.RC-Beton}}$	1 m ³	19 MJ/m ³	19 MJ/m ³
Gesamtenergieaufwand - $E_{\text{ges.RC-Beton}}$				1.510 MJ/m³


Abb. 39: Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand Szenario 1 – RC-Beton

Tab. 22: Gesamtenergieaufwand für Szenario 2 – Normalbeton C30/37 (TBS)

Teilprozess		Menge	Spezifischer Energieaufwand	Energieaufwand pro m ³ RC-Beton
Abbruch	$E_{\text{Abbr.}}$	0,91 t/m ³	105 MJ/t	96 MJ/m ³
Transport zur RC-Anlage	$E_{\text{Trans.Betonbruch}}$	0,91 t/m ³	40 MJ/t	36 MJ/m ³
Aufbereitung (Herstellung RC-Material)	$E_{\text{konv.Aufb.}}$	0,91 t/m ³	18 MJ/t	16 MJ/m ³
Transport zur Betonmischanlage		entfällt	entfällt	entfällt
Herstellung Ausgangsstoffe Sand Kies Zement Wasser Zusatzmittel (FM)	$E_{\text{Herst.Ausg.}}$	0,694 t/m ³ 1,092 t/m ³ 0,360 t/m ³ 0,187 t/m ³ 0,00288 t/m ³	35 MJ/t 35 MJ/t 3.200 MJ/t 0 MJ/t 0,05 MJ/t	24 MJ/m ³ 38 MJ/m ³ 1.152 MJ/m ³ 0 MJ/m ³ 0 MJ/m ³
Transport Ausgangsstoffe Sand Kies Zement Wasser Zusatzmittel (FM)	$E_{\text{Trans.Ausg.}}$	0,694 t/m ³ 1,092 t/m ³ 0,360 t/m ³ 0,187 t/m ³ 0,00288 t/m ³	27 MJ/t 63 MJ/t 141 MJ/t 0 MJ/t 133 MJ/t	19 MJ/m ³ 69 MJ/m ³ 51 MJ/m ³ 0 MJ/m ³ 0,4 MJ/m ³
Betonmischprozess	$E_{\text{Herst.Beton}}$	1 m ³	11 MJ/m ³	11 MJ/m ³
Transport zur Baustelle	$E_{\text{Trans.Beton}}$	1 m ³	9 MJ/m ³	9 MJ/m ³
Betonverarbeitung	$E_{\text{Verarb.Beton}}$	1 m ³	19 MJ/m ³	19 MJ/m ³
Gesamtenergieaufwand – $E_{\text{ges.Beton (Normal)}}$				1.540 MJ/m³


Abb. 40: Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand Szenario 2 – Normalbeton (TBS)

Tab. 23: Gesamtenergieaufwand für Szenario 2 – Standardbeton C30/37 (BTB)

Teilprozess		Menge	Spezifischer Energieaufwand	Energieaufwand pro m ³ RC-Beton
Abbruch	E _{Abbr.}	0,91 t/m ³	105 MJ/t	96 MJ/m ³
Transport zur RC-Anlage	E _{Trans.Betonbr ruch}	0,91 t/m ³	40 MJ/t	36 MJ/m ³
Aufbereitung (Herstellung Betonsplitt)	E _{konv.Aufb.}	0,91 t/m ³	18 MJ/t	16 MJ/m ³
Transport zur Betonmischanlage		entfällt	entfällt	entfällt
Herstellung Ausgangsstoffe Kies, Sand Splitt Zement Flugasche Wasser Zusatzmittel (FM)	E _{Herst.Ausg.}	1,432 t/m ³ 0,358 t/m ³ 0,320 t/m ³ 0,080 t/m ³ 0,170 t/m ³ 0,00128 t/m ³	35 MJ/t 116 MJ/t 4.400 MJ/t 100 MJ/t - 0,05 MJ/t	50 MJ/m ³ 41 MJ/m ³ 1.408 MJ/m ³ 8 MJ/m ³ - 0 MJ/m ³
Transport Ausgangsstoffe Kies, Sand Splitt Zement Flugasche Wasser Zusatzmittel (FM)	E _{Trans.Ausg.}	1,432 t/m ³ 0,358 t/m ³ 0,320 t/m ³ 0,080 t/m ³ 0,170 t/m ³ 0,00128 t/m ³	47 MJ/t 47 MJ/t 120 MJ/t 133 MJ/t - 133 MJ/t	67 MJ/m ³ 17 MJ/m ³ 38 MJ/m ³ 11 MJ/m ³ - 0,2 MJ/m ³
Betonmischprozess	E _{Herst.Beton}	1 m ³	11 MJ/m ³	11 MJ/m ³
Transport zur Baustelle	E _{Trans.Beton}	1 m ³	9 MJ/m ³	9 MJ/m ³
Betonverarbeitung	E _{Verarb.Beton}	1 m ³	19 MJ/m ³	19 MJ/m ³
Gesamtenergieaufwand - E_{ges.RC-Beton(Standard)}				1.827 MJ/m³

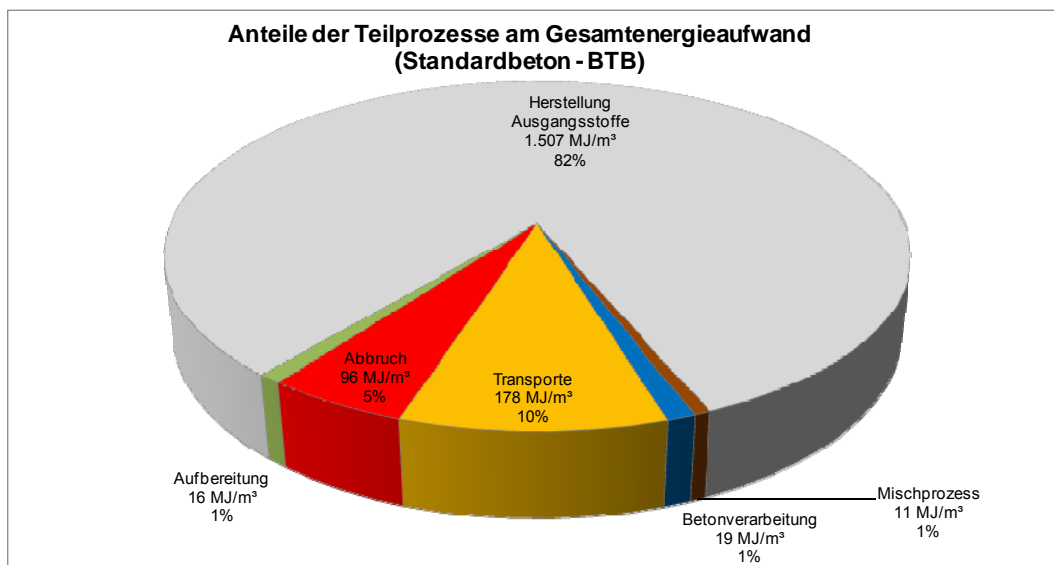


Abb. 41: Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand Szenario 2 –Standardbeton (BTB)

In Tab. 24 sind die ermittelten Gesamtenergieaufwände als auch die Energieaufwände der Teilprozesse vergleichend gegenübergestellt. In Abb. 42 folgt die grafische Darstellung des Vergleichs.

Tab. 24: Vergleich der Gesamtenergieaufwände für die Szenarien 1 und 2

Teilprozesse	Energieaufwand [MJ/m ³] für die Herstellung von		
	RC-Beton	Normalbeton	Standardbeton
Abbruch	96	96	96
Aufbereitung	31	16	16
Herstellung Ausgangsstoffe	1.196	1.214	1.507
Mischprozess	11	11	11
Betonverarbeitung	19	19	19
Transporte	157	184	178
Gesamt	1.510	1.540	1.827

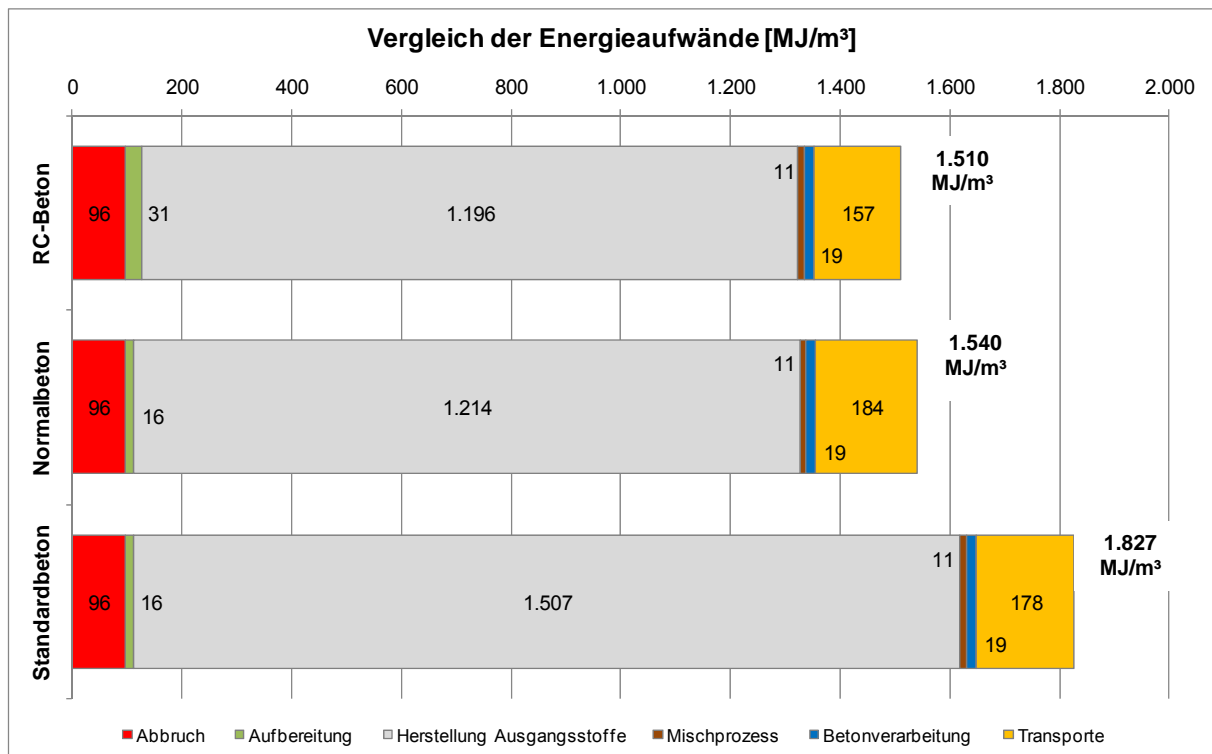


Abb. 42: Synopse der Gesamtenergieaufwände der Szenarien 1 und 2

3.8 Fazit - Betrachtungen zum Energieaufwand

Deutlich wird vor allem in der Gesamtbetrachtung des energetischen Aufwandes der Szenarien 1 und 2 der enorme Einfluss des Herstellungsaufwandes für die Ausgangsstoffe, welcher hauptsächlich auf den energieintensiven Prozess der Zementherstellung beruht. Der Einsatz von Zementen mit einem betontechnologisch sinnvollen, möglichst geringen Anteil an Portlandzementklinker und die damit verbundene Erhöhung der Anteile industrieller Nebenprodukte wie Flugasche oder Silikastaub zeigt in der Senkung der Energieaufwände die größte Wirkung inkl. der hochwertigen Verwertung dieser Nebenprodukte.

Der nächstgrößere Einflussfaktor sind die erforderlichen Transportwege, welche regionalen Gegebenheiten unterliegen und insbesondere für grobe Gesteinskörnungen⁵⁹ sehr lang sein können. Ursache sind beispielsweise die ungünstigen Sand/Kies-Verhältnisse (zum Teil 5/1) in Norddeutschland⁶⁰. Im Grunde können nur diese durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen ersetzt werden, da letztere nur in einem Korngrößenbereich > 2 mm verwendet werden dürfen⁶¹. Hier kann eine Reduzierung des Energieaufwandes durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen sehr effektiv sein. Da sich Abbruchbaustellen und RC-Anlagen zu meist in oder nahe großer Siedlungsgebiete/in Ballungszentren befinden, in welchen auch die meisten Hochbauaktivitäten stattfinden.

Durch die Gegenüberstellung der Bereitstellungsaufwände (Herstellung plus Transport) der RC- und natürlichen Gesteinskörnungen lässt sich der Break-Even-Point der Transportentfernung für natürliche und rezyklierte Gesteinskörnungen berechnen:

$$E_{\text{Herst.RC-GK}} + S_{\text{Trans.RC-GK}} \cdot E_{\text{Trans}} = E_{\text{Herst.nat.GK}} + S_{\text{Trans.nat.GK}} \cdot E_{\text{Trans}}$$

$S_{\text{Trans.RC-GK}}$	- Transportentfernung für RC-Gesteinskörnung (Betonsplitte)
E_{Trans}	- Energieaufwand für Transport pro km und t
$E_{\text{Herst.nat.GK}}$	- Herstellungsaufwand für natürliche Gesteinskörnungen (Sand, Kies, Splitt)
$S_{\text{Trans.nat.GK}}$	- Transportentfernung für natürliche Gesteinskörnungen (Sand, Kies, Splitt)

Die Berechnung des Break-Even-Points für die Transportentfernung von natürlichen Gesteinskörnungen kann somit nach folgender Formel erfolgen:

$$S_{\text{Trans.nat.GK}} = (E_{\text{Herst.RC-GK}} + S_{\text{Trans.RC-GK}} \cdot E_{\text{Trans}} - E_{\text{Herst.nat.GK}}) / E_{\text{Trans}}$$

Desgleichen lässt sich über diese Gleichung die Transportentfernung für RC-Gesteinskörnung berechnen, bis zu welcher der Einsatz dieser energetisch rentabel ist:

$$S_{\text{Trans.RC-GK}} = (E_{\text{Herst.nat.GK}} + S_{\text{Trans.nat.GK}} \cdot E_{\text{Trans}} - E_{\text{Herst.RC-GK}}) / E_{\text{Trans}}$$

⁵⁹ Grobe Gesteinskörnung: Bezeichnung für größere Korngruppen mit oberer Siebgröße $D \geq 4$ mm und unterer Siebgröße $d \geq 2$ mm (Nach DIN EN 12620:2008-07, Abs. 3.9).

⁶⁰ www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe; aufgerufen am 26.02.2010.

⁶¹ DAfStb-Rili Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 vom Dez. 2004.

Bei einer Transportentfernung von 7 km von der RC-Anlage der Fa. Scherer + Kohl zum Transportbetonhersteller TBS ergibt sich somit folgende Transportentfernung (LKW-Transport) für natürliche Gesteinskörnungen, ab welcher der Einsatz von RC-Gesteinskörnung energetisch sinnvoll ist:

$$s_{\text{Trans.Sand/Kies}} = (69 \text{ MJ/t} + 7 \text{ km} \cdot 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km} - 35 \text{ MJ/t}) / 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km}$$

$$s_{\text{Trans.Sand/Kies}} = 32,6 \text{ km}$$

Für die Anlieferung natürlicher Gesteinskörnung per Binnenschiff gilt für das Fallbeispiel TBS folgende Entfernung als energetische Rentabilitätsgrenze:

$$s_{\text{Trans.Sand/Kies}} = (69 \text{ MJ/t} + 7 \text{ km} \cdot 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km} - 35 \text{ MJ/t}) / 0,35 \text{ MJ/t}\cdot\text{km}$$

$$s_{\text{Trans.Sand/Kies}} = 123,7 \text{ km}$$

Ausgehend von einer durchschnittlichen Transportentfernung für Lieferung von Sanden und Kiesen von 39 km⁶² lässt sich folgender Maximaltransportweg für RC-Gesteinskörnungen berechnen:

$$s_{\text{Trans.RC-GK}} = (35 \text{ MJ/t} + 39 \text{ km} \cdot 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km} - 69 \text{ MJ/t}) / 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km}$$

$$s_{\text{Trans.RC-GK}} = 13,4 \text{ km}$$

Das heißt, die Recyclinganlage darf für die Erhaltung der energetischen Rentabilität nicht weiter als 13,4 km von der zu beliefernden Transportbetonmischanlage entfernt sein, wenn durch den Einsatz des Betonsplitts Sand oder/und Kiesanteile ersetzt werden sollen.

Soll durch den Einsatz von Betonsplitt der natürliche Splittanteil gesenkt werden, ist dies bis zu einer Transportentfernung für den Betonsplitt von 74 km energetisch sinnvoll

$$s_{\text{Trans.RC-GK}} = (116 \text{ MJ/t} + 39 \text{ km} \cdot 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km} - 69 \text{ MJ/t}) / 1,33 \text{ MJ/t}\cdot\text{km}$$

$$s_{\text{Trans.RC-GK}} = 74,3 \text{ km}$$

⁶² Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, BTB, 2007

4 Betrachtung des kumulativen Energieaufwandes (KEA) und ausgewählter Emissionen

Die Betrachtung des kumulativen Energieaufwandes (KEA) und ausgewählter klimarelevanter Emissionen der Teilprozesse erfolgt auf Basis der Ermittlungen des Energieaufwandes (vgl. Abschn. 2). Die Berechnungsgrundlage dafür Verfahren ist in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tab. 25: Berechnungsgrundlage zum Szenarienvergleich Emissionen (EM)

<u>Szenario 1:</u>	<u>Szenario 2:</u>
Abbruch + Aufbereitung + RC-Beton	Abbruch + Aufbereitung + Normalbeton
<p>TP 1.1:</p> <p style="text-align: center;">Abbruch + Transport des Betonbruchs¹⁾ zur RC-Anlage</p> <p>$EM_{TP1.1} = EM_{Abbr.} + EM_{Trans.Betonbruch}$</p>	<p>TP 1.2:</p> <p style="text-align: center;">Abbruch + Transport des Betonbruchs⁶³ + konventionelle Aufbereitung des Beton- bruchs⁶⁴</p> <p>$EM_{TP1.2} = EM_{Abbr.} + EM_{Trans.Betonbruch} + EM_{konv.Aufb.}$</p>
<p>TP 2:</p> <p style="text-align: center;">Herstellung Betonsplitt (RC-GK) + Transport Betonsplitt zur Betonmischanlage + Bereitstellung (Gewinnung/Herstellung, Trans- port) weiterer Ausgangsstoffe RC-Beton + Herstellung RC-Beton + Transport RC-Beton + Verarbeitung RC-Beton</p> <p>$EM_{TP2} = EM_{Herst.RC-GK} + EM_{Trans.RC-GK} + EM_{Herst.RC-Ausg.} + EM_{Trans.RC-Ausg.} + EM_{Herst.RC-Beton} + EM_{Trans.RC-Beton} + EM_{Verarb.RC-Beton}$</p>	<p>TP 3:</p> <p style="text-align: center;">Bereitstellung (Gewinnung/Herstellung, Transport) Ausgangsstoffe Normalbeton + Herstellung Normalbeton + Transport Normalbeton + Verarbeitung Normalbeton</p> <p>$EM_{TP3} = EM_{Herst.Ausg.} + EM_{Trans.Ausg.} + EM_{Herst.Beton} + EM_{Trans.Beton} + EM_{Verarb.Beton}$</p>
<p>$EM_{ges.RC-Beton} = EM_{TP1.1} + EM_{TP2}$</p>	<p>$EM_{ges.Beton} = EM_{TP1.2} + EM_{TP3}$</p>

Die Energieträger für die betrachteten Prozesse sind Diesel⁶⁵ und elektrischer Strom⁶⁶. Die KEA- und Emissionsdaten sind der Internet-Datenbank PROBAS des Umweltbundesamtes entnommen.

⁶³ Die Betrachtung der Verwertung/Entsorgung der Restmassen aus dem Abbruch entfällt in beiden Szenarien.

⁶⁴ Die Menge des konventionell aufzubereitenden Betonbruchs entspricht der erforderlichen Betonbruchmenge in Szenario 1.

⁶⁵ PROBAS, Tankstelle/Diesel-DE-2010, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 05.07.2010

⁶⁶ PROBAS, Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2010, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 09.07.2010

4.1 Selektiver Abbruch – TP1

In Tab. 26 sind der kumulierte Energieinhalt sowie ausgewählte Emissionen für den Abbruch eines Wohngebäudes aus Stahlbeton ausgewiesen. Diese resultieren aus der Bereitstellung der Energie über den Energieträger Diesel für die Gewinnung von 1 t Betonbruch durch den Abbruch eines Wohngebäudes in industrieller Bauweise – Stahlbetonelementebauweise (vgl. Abschn. 2.1). Zudem erfolgt die Aufrechnung der KEA- und Emissionswerte für die berechnete Menge aus dem Stofffluss entspr. Szenario 1 und 2 (vgl. Abschn. 2.7).

Tab. 26: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen Abbruchprozess

ermittelter Energieaufwand Abbruch			105 MJ/t		1 m ³ RC-Beton	
			0,000105 TJ/t		0,91 t/m ³ RC-Beton	
Energieträger: Diesel						
	Menge pro TJ		Menge pro t		Menge pro m ³ RC-Beton	
	Diesel	Einheit	Betonbruch	Einheit		Einheit
Ressourcen						
KEA-andere	0,000931	TJ	0,0978	MJ/t	0,0890	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,166	MJ/t	0,151	MJ/m ³
KEA-nichterneuerbar	1,14	TJ	119,7	MJ/t	109	MJ/m ³
Luftemissionen						
CH ₄	18,9	kg	1,98	g/t	1,81	g/m ³
CO	12,5	kg	1,31	g/t	1,19	g/m ³
CO ₂	11.100	kg	1.166	g/t	1.061	g/m ³
NO _x	27,8	kg	2,92	g/t	2,66	g/m ³
SO ₂	34,5	kg	3,62	g/t	3,30	g/m ³
Staub	3,66	kg	0,38	g/t	0,35	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	1.218	g/t	1.108	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	5,68	g/t	5,17	g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	5,37	g/t	4,88	g/m ³

Die ermittelten KEA- und Emissionswerte für den Transport der Betonbruchmenge von 1 t sowie für die berechnete Menge aus dem Stofffluss (0,91 t) entsprechend der Szenarien 1 und 2 zur Aufbereitungsanlage (RC-Anlage) über 30 km (vgl. Abschn. 3.1) sind in Tab. 27 aufgeführt.

Tab. 27: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen Transportprozess Abbruchbaustelle – RC-Anlage

ermittelter Energieaufwand Transport		40	MJ/t	1	m ³ RC-Beton
Abbruchbaustelle - RC-Anlage		0,00004	TJ/t	0,91	t/m ³ RC-Beton
Energieträger: Diesel					
	Menge pro TJ		Menge pro t		Menge pro m ³ RC-Beton
	Diesel	Einheit	Betonbruch	Einheit	Einheit
Ressourcen					
KEA-andere	0,000931	TJ	0,0372	MJ/t	0,0339 MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0632	MJ/t	0,058 MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	1,14	TJ	45,6	MJ/t	41,5 MJ/m ³
Luftemissionen					
CH ₄	18,9	kg	0,76	g/t	0,69 g/m ³
CO	12,5	kg	0,50	g/t	0,46 g/m ³
CO ₂	11.100	kg	444	g/t	404 g/m ³
NO _x	27,8	kg	1,11	g/t	1,01 g/m ³
SO ₂	34,5	kg	1,38	g/t	1,26 g/m ³
Staub	3,66	kg	0,15	g/t	0,13 g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	464	g/t	422 g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	2,16	g/t	1,97 g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	2,04	g/t	1,86 g/m ³

4.2 Konventionelle Aufbereitung – TP1

Für die Berechnung der KEA- und Emissionswerte der konventionellen Aufbereitung musste der ermittelte Energieaufwand auf die Anteile der einzelnen Energieträger gesplittet werden. Der Energieträger Diesel kommt bei der Vorzerkleinerung des Betonbruchs mittels Bagger sowie bei den Transportprozessen des Radladers zum Einsatz. Die eigentliche Aufbereitungsanlage wird mit Strom betrieben.

Die Energieträgeranteile am Energieaufwand und daraus resultierenden KEA und Emissionen sind in Tab. 28 aufgelistet.

Der Transport der Produkte der konventionellen Aufbereitung zur Verwertung wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

Tab. 28: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen der konventionellen Aufbereitung

konventionelle Aufbereitung	Anteil Energieträger: Diesel				Anteil Energieträger: Strom				Gesamt		1 m ³ RC-Beton
			9,40 MJ/t				8,30 MJ/t		17,7 MJ/t		0,91 l/m ³ RC-Beton
Durchsatz			0,0000940 TJ/t				0,0000830 TJ/t		0,000177 TJ/t		
1 t Betonbruch											
	Menge pro TJ	Einheit	Menge pro t	Einheit	Menge pro TJ	Einheit	Menge pro t	Einheit	Menge pro t	Einheit	Menge pro m ³ RC-Beton
	Diesel ¹⁾		Betonbruch		Strom ²⁾		Betonbruch		Betonbruch		Einheit
Ressourcen											
KEA-andere	0,000931	TJ	0,00875	MJ/t	0,161	TJ	1,34	MJ/t	1,35	MJ/t	1,22 MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0149	MJ/t	0,278	TJ	2,31	MJ/t	2,32	MJ/t	2,11 MJ/m ³
KEA-nichterneuerbar	1,14	TJ	10,72	MJ/t	2,38	TJ	19,75	MJ/t	30,47	MJ/t	27,7 MJ/m ³
Luftemissionen											
CH ₄	18,9	kg	0,178	g/t	195	kg	1,62	g/t	1,80	g/t	1,63 g/m ³
CO	12,5	kg	0,118	g/t	94	kg	0,78	g/t	0,90	g/t	0,82 g/m ³
CO ₂	11.100	kg	104,34	g/t	170.000	kg	1.411	g/t	1.515	g/t	1.379 g/m ³
NO _x	27,8	kg	0,26	g/t	166	kg	1,38	g/t	1,64	g/t	1,49 g/m ³
SO ₂	34,5	kg	0,32	g/t	94,5	kg	0,78	g/t	1,11	g/t	1,01 g/m ³
Staub	3,66	kg	0,03	g/t	11,4	kg	0,09	g/t	0,13	g/t	0,12 g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	109,04	g/t	177.000	kg	1.469	g/t	1.578	g/t	1.436 g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	0,51	g/t	218	kg	1,81	g/t	2,32	g/t	2,11 g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	0,48	g/t	224	kg	1,86	g/t	2,34	g/t	2,13 g/m ³

4.3 Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) – TP2

Für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) werden in beiden Teilprozessen Trocken- und Nassaufbereitung die Energieträger Diesel (Bagger-, Radladerbetrieb) und Strom (Anlagenbetrieb) eingesetzt. Für die Herstellung von 3,5 t Betonsplitt (1 t 2/8 mm und 2,5 t 8/16 mm) werden im Prozess der Trockenaufbereitung 7,14 t Betonbruch durchgesetzt. Die daraus hergestellten 4,94 t Waschmedium durchlaufen darauf folgend den Nassprozess der Aufbereitung. Für die Herstellung 1 t Betonsplitt beliebiger Körnungsgröße müssen somit 2,04 t Betonbruch im Trockenprozess und 1,41 t im Nassprozess durchgesetzt werden. Die dafür erforderlichen Energieaufwände unterteilt in die eingesetzten Energieträger sind in Tab. 29 aufgeführt (vgl. auch Tab. 11 und Tab. 12).

Tab. 29: Splittung der Energieträgeranteile für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt)

	Trockenaufbereitung		Nassaufbereitung		Gesamtaufbereitung	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Durchsatzleistung für die Herstellung von:						
1 t Betonsplitt _{2/8mm} + 2,5 t Betonsplitt _{8/16mm} = 3,5 t Betonsplitt _{allg.}	7,14	t	4,94	t		
Energieaufwand für den Durchsatz von 1 t Betonbruch:						
Gesamt	19,5	MJ/t	21,1	MJ/t		
Diesel	9,4	MJ/t	7,0	MJ/t		
Strom	10,1	MJ/t	14,1	MJ/t		
Durchsatzleistung für die Herstellung von 1 t Betonsplitt_{allg.}	2,04	t	1,41	t		
Energieaufwand für die Herstellung von 1 t Betonsplitt_{allg.}:						
Gesamt	39,8	MJ/t	29,8	MJ/t	69,5	MJ/t
Diesel	19,2	MJ/t	9,9	MJ/t	29,1	MJ/t
Strom	20,5	MJ/t	19,9	MJ/t	40,4	MJ/t

Die ermittelten KEA- und Emissionswerte stellen sich wie folgt dar:

Tab. 30: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung (Betonspplitt)

Herstellung Betonsplitt	Anteil Energieträger: Diesel				Anteil Energieträger: Strom				Gesamt		1 m ³ RC-Beton	
			29,1 MJ/t				40,4 MJ/t		70 MJ/t		0,446 t/m ³ RC-Beton	
Herstellung von 1 t Betonsplitt _{us3}			0,0000291 TJ/t				0,00004040 TJ/t		0,000070 TJ/t			
	Menge pro TJ		Menge pro t		Menge pro TJ		Menge pro t		Menge pro t		Menge pro m ³ RC-Beton	
	Diesel ¹⁾	Einheit	Betonbruch	Einheit	Strom ²⁾	Einheit	Betonbruch	Einheit	Betonbruch	Einheit		Einheit
Ressourcen												
KEA-andere	0,000931	TJ	0,0271	MJ/t	0,161	TJ	6,50	MJ/t	6,53	MJ/t	2,91	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0460	MJ/t	0,278	TJ	11,23	MJ/t	11,28	MJ/t	5,03	MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	1,14	TJ	33,17	MJ/t	2,38	TJ	96,15	MJ/t	129,33	MJ/t	57,7	MJ/m ³
Luftemissionen												
CH ₄	18,9	kg	0,550	g/t	195	kg	7,88	g/t	8,43	g/t	3,76	g/m ³
CO	12,5	kg	0,364	g/t	94	kg	3,80	g/t	4,16	g/t	1,86	g/m ³
CO ₂	11.100	kg	323,01	g/t	170.000	kg	6.868	g/t	7.191	g/t	3.207	g/m ³
NO _x	27,8	kg	0,81	g/t	166	kg	6,71	g/t	7,52	g/t	3,35	g/m ³
SO ₂	34,5	kg	1,00	g/t	94,5	kg	3,82	g/t	4,82	g/t	2,15	g/m ³
Staub	3,66	kg	0,11	g/t	11,40	kg	0,46	g/t	0,57	g/t	0,25	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	337,56	g/t	177.000	kg	7.151	g/t	7.488	g/t	3.340	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	1,57	g/t	218	kg	8,81	g/t	10,38	g/t	4,63	g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	1,49	g/t	224	kg	9,05	g/t	10,54	g/t	4,70	g/m ³

Die KEA- und Emissionswerte für den Transport der RC-Gesteinskörnung (Betonspplitt) von 1 t sowie für die berechnete Menge aus dem Stofffluss (0,446 t) entsprechend des Szenario 1 zur Transportbetonmischanlage (TBS) über 7 km (vgl. Abschn. 3.1) sind in Tab. 31 aufgeführt.

Tab. 31: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der RC-Gesteinskörnung (Betonspplitt) zu Transportbetonmischanlage (TBS)

ermittelter Energieaufwand Transport		9,2 MJ/t		1 m ³ RC-Beton		
RC-Anlage - Betonmischanlage		0,0000092 TJ/t		0,446 t/m ³ RC-Beton		
Energieträger: Diesel						
	Menge pro TJ		Menge pro t		Menge pro m ³ RC-Beton	
	Diesel	Einheit	Betonspplitt	Einheit		Einheit
Ressourcen						
KEA-andere	0,000931	TJ	0,00857	MJ/t	0,00382	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0145	MJ/t	0,00648	MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	1,14	TJ	10,49	MJ/t	4,68	MJ/m ³
Luftemissionen						
CH ₄	18,9	kg	0,17	g/t	0,078	g/m ³
CO	12,5	kg	0,12	g/t	0,051	g/m ³
CO ₂	11.100	kg	102	g/t	46	g/m ³
NO _x	27,8	kg	0,26	g/t	0,11	g/m ³
SO ₂	34,5	kg	0,32	g/t	0,14	g/m ³
Staub	3,66	kg	0,03	g/t	0,02	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	107	g/t	47,6	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	0,50	g/t	0,22	g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	0,47	g/t	0,21	g/m ³

4.4 Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Betonherstellung – TP2 und TP3

Die Bereitstellung der Ausgangsstoffe zur Betonherstellung umfasst den Prozess ihrer Gewinnung resp. Herstellung und deren Lieferung an den Transportbetonhersteller.

Aus der Gewinnung / Herstellung einer Tonne der Ausgangsstoffe Sand⁶⁷, Kies⁶⁸, Splitt⁶⁹ und Zement⁷⁰ für die Betonherstellung resultieren die in Tab. 32 aufgeführten KEA sowie ausgewählten Emissionen der PROBAS-Internet-Datenbank. Aufgrund des sehr geringen Anteils der energetischen Aufwände für die Bereitstellung der Zusatzmittel am Gesamtprozess werden diese im Folgenden vernachlässigt. Für die Bereitstellung des Zugabewassers werden gemäß Angaben der PROBAS-Internet-Datenbank⁷¹ keine Emissionen ausgewiesen. Daher wird auch dieses in der weiteren Berechnung außen vor gelassen.

Bei den Angaben zum Zement wird keine Unterscheidung der Zementsorten und somit am Flugaschegehalt vorgenommen. Daher wird im Fall des Standardbetons der zusätzliche Flugascheanteil am Bindemittel von 20 % (80 kg/m³) auf die Zementmenge von 320 kg/m³ aufgeschlagen, da der von TBS verwendete CEM II-B/V 42,5R sogar einen Flugascheanteil von 21 bis 35 % aufweist.

Die KEA- und ausgewählten Emissionswerte der verwendeten Ausgangsstoffe stellen sich wie folgt dar:

Tab. 32: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe zur Betonherstellung

Herstellung Ausgangsstoffe	Sand		Kies		Splitt		Zement	
	Menge pro t		Menge pro t		Menge pro t		Menge pro t	
		Einheit		Einheit		Einheit		Einheit
Ressourcen								
KEA-andere	1,5	MJ	7,69	MJ	2,17	MJ	105	MJ
KEA-erneuerbar	2,56	MJ	3,75	MJ	1,14	MJ	53	MJ
KEA-nichterneuerbar	82	MJ	155	MJ	86,8	MJ	4.700	MJ
Luftemissionen								
CH ₄	2,92	g	12,1	g	4,61	g	799	g
CO	12,6	g	15,4	g	17,8	g	281	g
CO ₂	6.020	g	10.600	g	6.170	g	942.000	g
NO _x	53,7	g	66	g	56,7	g	2.040	g
SO ₂	2,77	g	10,8	g	7,54	g	228	g
Staub	4,53	g	5,56	g	4,7	g	330	g
CO ₂ -Äquivalent	6.150	g	11.000	g	6.600	g	967.000	g
SO ₂ -Äquivalent	40,2	g	56,9	g	47,1	g	1.650	g
TOPP-Äquivalent	68	g	84	g	72,5	g	2.580	g

⁶⁷ nach PROBAS, Xtra-Abbau/Sand-DE-2010, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 23.07.2010

⁶⁸ nach PROBAS, Xtra-Abbau/Kies-DE, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 19.07.2010

⁶⁹ nach PROBAS, Xtra-Abbau/Splitt, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 19.07.2010

⁷⁰ nach PROBAS, Steine-Erden/Zement, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 19.07.2010

⁷¹ nach PROBAS, Xtra-generisch/Wasser, www.probas.umweltbundesamt.de..., aufgerufen am 30.07.2010

Im Vergleich der ausgewählten Emissionswerte CO₂, NO_x und SO₂ sowie der Summe der kumulativen Energieaufwände (KEA-Gesamt) weist die Herstellung der RC-Gesteinskörnungen fast ausschließlich die höchsten Werte auf (vgl. Abb. 43). Diese können im Grunde nur über kürzere Transportwege ausgeglichen werden.

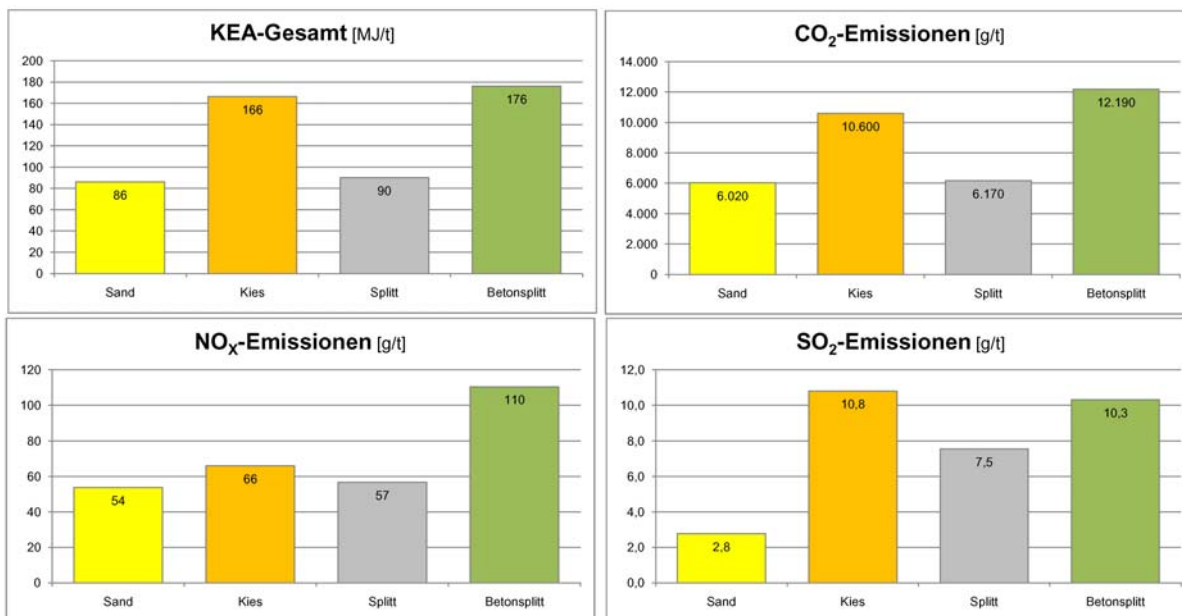


Abb. 43: Vergleich des KEA-Gesamt sowie der CO₂-, NO_x- und SO₂-Emissionen zur Herstellung rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnungen

Bezogen auf die Herstellung eines Kubikmeters RC-, Normal- oder Standardbeton ergeben sich die KEA- und Emissionswerte, welche in den nachfolgenden Tabellen Tab. 33 bis Tab. 35 aufgeführt sind.

Tab. 33: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe für RC-Beton

Herstellung Ausgangsstoffe	Sand		Kies		Splitt		Zement		Gesamt		
	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	
RC-Beton	0,566	t/m ³	0,672	t/m ³	0	t/m ³	0,360	t/m ³		RC-Beton	Einheit
Ressourcen											
KEA-andere	0,849	MJ/m ³	5,17	MJ/m ³	0	MJ/m ³	37,8	MJ/m ³	43,8	MJ/m ³	
KEA-erneuerbar	1,45	MJ/m ³	2,52	MJ/m ³	0	MJ/m ³	19,1	MJ/m ³	23,0	MJ/m ³	
KEA-nichtererneuerbar	46,4	MJ/m ³	104	MJ/m ³	0	MJ/m ³	1.692	MJ/m ³	1.843	MJ/m ³	
Luftemissionen											
CH ₄	1,65	g/m ³	8,13	g/m ³	0,00	g/m ³	287,64	g/m ³	297,42	g/m ³	
CO	7,13	g/m ³	10,35	g/m ³	0,00	g/m ³	101,16	g/m ³	118,64	g/m ³	
CO ₂	3.407	g/m ³	7.123	g/m ³	0	g/m ³	339.120	g/m ³	349.651	g/m ³	
NO _x	30,4	g/m ³	44,4	g/m ³	0,0	g/m ³	734,4	g/m ³	809,1	g/m ³	
SO ₂	1,57	g/m ³	7,26	g/m ³	0,00	g/m ³	82,08	g/m ³	90,91	g/m ³	
Staub	2,56	g/m ³	3,74	g/m ³	0,00	g/m ³	118,80	g/m ³	125,10	g/m ³	
CO ₂ -Äquivalent	3.481	g/m ³	7.392	g/m ³	0	g/m ³	348.120	g/m ³	358.993	g/m ³	
SO ₂ -Äquivalent	22,8	g/m ³	38,2	g/m ³	0,0	g/m ³	594,0	g/m ³	655,0	g/m ³	
TOPP-Äquivalent	38,5	g/m ³	56,4	g/m ³	0,0	g/m ³	928,8	g/m ³	1.023,7	g/m ³	

Tab. 34: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe für Normalbeton (TBS)

Herstellung Ausgangsstoffe	Sand		Kies		Splitt		Zement		Gesamt	
	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit
Normalbeton (TBS)	0,694	t/m ³	1,092	t/m ³	0	t/m ³	0,360	t/m ³	Normalbeton	Einheit
Ressourcen										
KEA-andere	1,04	MJ/m ³	8,40	MJ/m ³	0	MJ/m ³	37,8	MJ/m ³	47,2	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	1,78	MJ/m ³	4,10	MJ/m ³	0	MJ/m ³	19,1	MJ/m ³	25,0	MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	56,9	MJ/m ³	169	MJ/m ³	0	MJ/m ³	1.692	MJ/m ³	1.918	MJ/m ³
Luftemissionen										
CH ₄	2,03	g/m ³	13,21	g/m ³	0,00	g/m ³	287,64	g/m ³	302,88	g/m ³
CO	8,74	g/m ³	16,82	g/m ³	0,00	g/m ³	101,16	g/m ³	126,72	g/m ³
CO ₂	4.178	g/m ³	11.575	g/m ³	0	g/m ³	339.120	g/m ³	354.873	g/m ³
NO _x	37,3	g/m ³	72,1	g/m ³	0,0	g/m ³	734,4	g/m ³	843,7	g/m ³
SO ₂	1,92	g/m ³	11,79	g/m ³	0,00	g/m ³	82,08	g/m ³	95,80	g/m ³
Staub	3,14	g/m ³	6,07	g/m ³	0,00	g/m ³	118,80	g/m ³	128,02	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	4.268	g/m ³	12.012	g/m ³	0	g/m ³	348.120	g/m ³	364.400	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	27,9	g/m ³	62,1	g/m ³	0,0	g/m ³	594,0	g/m ³	684,0	g/m ³
TOPP-Äquivalent	47,2	g/m ³	91,7	g/m ³	0,0	g/m ³	928,8	g/m ³	1.067,7	g/m ³

Tab. 35: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe für Standardbeton (BTB)

Herstellung Ausgangsstoffe	Sand		Kies		Splitt		Zement		Gesamt	
	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit
Standardbeton (BTB)	0,627	t/m ³	0,805	t/m ³	0,358	t/m ³	0,400	t/m ³	Standardbeton	Einheit
Ressourcen										
KEA-andere	0,94	MJ/m ³	6,19	MJ/m ³	0,78	MJ/m ³	42,00	MJ/m ³	49,9	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	1,61	MJ/m ³	3,02	MJ/m ³	0,41	MJ/m ³	21,20	MJ/m ³	26,2	MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	51,4	MJ/m ³	124,8	MJ/m ³	31,1	MJ/m ³	1.880	MJ/m ³	2.087	MJ/m ³
Luftemissionen										
CH ₄	1,83	g/m ³	9,74	g/m ³	1,65	g/m ³	319,60	g/m ³	332,82	g/m ³
CO	7,90	g/m ³	12,40	g/m ³	6,37	g/m ³	112,40	g/m ³	139,07	g/m ³
CO ₂	3.775	g/m ³	8.533	g/m ³	2.209	g/m ³	376.800	g/m ³	391.316	g/m ³
NO _x	33,7	g/m ³	53,1	g/m ³	20,3	g/m ³	816,0	g/m ³	923,1	g/m ³
SO ₂	1,74	g/m ³	8,69	g/m ³	2,70	g/m ³	91,20	g/m ³	104,33	g/m ³
Staub	2,84	g/m ³	4,48	g/m ³	1,68	g/m ³	132,00	g/m ³	141,00	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	3.856	g/m ³	8.855	g/m ³	2.363	g/m ³	386.800	g/m ³	401.874	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	25,2	g/m ³	45,8	g/m ³	16,9	g/m ³	660,0	g/m ³	747,9	g/m ³
TOPP-Äquivalent	42,6	g/m ³	67,6	g/m ³	26,0	g/m ³	1.032,0	g/m ³	1.168,2	g/m ³

Die Berechnung der KEA und Emissionen für den Antransport der Ausgangsstoffe folgt in den Tab. 36 bis Tab. 38:

Tab. 36: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der Ausgangsstoffe für RC-Beton

RC-Beton			Sand		Kies		Splitt		Zement		Gesamt	
Transport Ausgangsstoffe			Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit
eingesetzte Menge pro m ³ RC-Beton			0,566	t/m ³	0,672	t/m ³	0	t/m ³	0,360	t/m ³	RC-Beton	
ermittelter Energieaufwand Transport			27	MJ/m³	63	MJ/m³	0	MJ/m³	141	MJ/m³	231 MJ/m ³	
Herstellungs-/Gewinnungsort - Betonmischanlage			0,000027	TJ/m ³	0,000063	TJ/m ³	0	TJ/m ³	0,000141	TJ/m ³	0,000231 TJ/m ³	
Ressourcen												
KEA-andere	0,00093	TJ	0,014	MJ/m ³	0,039	MJ/m ³	0	MJ/m ³	0,047	MJ/m ³	0,101 MJ/m ³	
KEA-erneuerbar	0,0016	TJ	0,024	MJ/m ³	0,067	MJ/m ³	0	MJ/m ³	0,080	MJ/m ³	0,171 MJ/m ³	
KEA-nichterneuerbar	1,14	TJ	17,4	MJ/m ³	48,3	MJ/m ³	0	MJ/m ³	57,9	MJ/m ³	124 MJ/m ³	
Luftemissionen												
CH ₄	18,9	kg	0,289	g/m ³	0,800	g/m ³	0	g/m ³	0,959	g/m ³	2,05 g/m ³	
CO	12,5	kg	0,191	g/m ³	0,529	g/m ³	0	g/m ³	0,635	g/m ³	1,35 g/m ³	
CO ₂	11.100	kg	170	g/m ³	470	g/m ³	0	g/m ³	563	g/m ³	1.203 g/m ³	
NO _x	27,8	kg	0,425	g/m ³	1,18	g/m ³	0	g/m ³	1,41	g/m ³	3,01 g/m ³	
SO ₂	34,5	kg	0,5272	g/m ³	1,461	g/m ³	0	g/m ³	1,751	g/m ³	3,74 g/m ³	
Staub	3,66	kg	0,0559	g/m ³	0,155	g/m ³	0	g/m ³	0,186	g/m ³	0,397 g/m ³	
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	177	g/m ³	491	g/m ³	0	g/m ³	589	g/m ³	1.257 g/m ³	
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	0,827	g/m ³	2,29	g/m ³	0	g/m ³	2,75	g/m ³	5,86 g/m ³	
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	0,781	g/m ³	2,16	g/m ³	0	g/m ³	2,59	g/m ³	5,54 g/m ³	

Tab. 37: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der Ausgangsstoffe für Normalbeton (TBS)

Normalbeton			Sand		Kies		Splitt		Zement		Gesamt	
Transport Ausgangsstoffe			Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit
eingesetzte Menge pro m ³ Normalbeton			0,694	t/m ³	1,092	t/m ³	0	t/m ³	0,360	t/m ³	Normalbeton	
ermittelter Energieaufwand Transport			27	MJ/m³	63	MJ/m³	0	MJ/m³	141	MJ/m³	231 MJ/m ³	
Herstellungs-/Gewinnungsort - Betonmischanlage			0,000027	TJ/m ³	0,000063	TJ/m ³	0	TJ/m ³	0,000141	TJ/m ³	0,000231 TJ/m ³	
Ressourcen												
KEA-andere	0,00093	TJ	0,017	MJ/m ³	0,064	MJ/m ³	0	MJ/m ³	0,047	MJ/m ³	0,129 MJ/m ³	
KEA-erneuerbar	0,0016	TJ	0,030	MJ/m ³	0,109	MJ/m ³	0	MJ/m ³	0,080	MJ/m ³	0,219 MJ/m ³	
KEA-nichterneuerbar	1,14	TJ	21,4	MJ/m ³	78,4	MJ/m ³	0	MJ/m ³	57,9	MJ/m ³	158 MJ/m ³	
Luftemissionen												
CH ₄	18,9	kg	0,354	g/m ³	1,300	g/m ³	0	g/m ³	0,959	g/m ³	2,61 g/m ³	
CO	12,5	kg	0,234	g/m ³	0,860	g/m ³	0	g/m ³	0,635	g/m ³	1,73 g/m ³	
CO ₂	11.100	kg	208	g/m ³	764	g/m ³	0	g/m ³	563	g/m ³	1.535 g/m ³	
NO _x	27,8	kg	0,521	g/m ³	1,91	g/m ³	0	g/m ³	1,41	g/m ³	3,84 g/m ³	
SO ₂	34,5	kg	0,6465	g/m ³	2,373	g/m ³	0	g/m ³	1,751	g/m ³	4,77 g/m ³	
Staub	3,66	kg	0,0686	g/m ³	0,252	g/m ³	0	g/m ³	0,186	g/m ³	0,506 g/m ³	
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	217	g/m ³	798	g/m ³	0	g/m ³	589	g/m ³	1.604 g/m ³	
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	1,014	g/m ³	3,72	g/m ³	0	g/m ³	2,75	g/m ³	7,48 g/m ³	
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	0,958	g/m ³	3,52	g/m ³	0	g/m ³	2,59	g/m ³	7,07 g/m ³	

Tab. 38: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der Ausgangsstoffe für Standardbeton (BTB)

Normalbeton			Sand		Kies		Splitt		Zement		Gesamt	
Transport Ausgangsstoffe			Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit
eingesetzte Menge pro m ³ Standardbeton			0,627	t/m ³	0,805	t/m ³	0,358	t/m ³	0,400	t/m ³	Standardbeton	
ermittelter Energieaufwand Transport			47	MJ/m³	47	MJ/m³	47	MJ/m³	120	MJ/m³	261 MJ/m ³	
Herstellungs-/Gewinnungsort - Betonmischanlage			0,000047	TJ/m ³	0,000047	TJ/m ³	0,000047	TJ/m ³	0,00012	TJ/m ³	0,000261 TJ/m ³	
Ressourcen												
KEA-andere	0,000931	TJ	0,0274	MJ/m ³	0,0352	MJ/m ³	0,0157	MJ/m ³	0,0447	MJ/m ³	0,123 MJ/m ³	
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0466	MJ/m ³	0,0598	MJ/m ³	0,0266	MJ/m ³	0,0758	MJ/m ³	0,209 MJ/m ³	
KEA-nichterneuerbar	1,14	TJ	33,6	MJ/m ³	43,1	MJ/m ³	19,2	MJ/m ³	54,7	MJ/m ³	151 MJ/m ³	
Luftemissionen												
CH ₄	18,9	kg	0,557	g/m ³	0,715	g/m ³	0,318	g/m ³	0,91	g/m ³	2,50 g/m ³	
CO	12,5	kg	0,368	g/m ³	0,473	g/m ³	0,210	g/m ³	0,600	g/m ³	1,65 g/m ³	
CO ₂	11.100	kg	327	g/m ³	420	g/m ³	187	g/m ³	533	g/m ³	1.467 g/m ³	
NO _x	27,8	kg	0,82	g/m ³	1,05	g/m ³	0,468	g/m ³	1,33	g/m ³	3,67 g/m ³	
SO ₂	34,5	kg	1,02	g/m ³	1,305	g/m ³	0,580	g/m ³	1,66	g/m ³	4,56 g/m ³	
Staub	3,66	kg	0,108	g/m ³	0,138	g/m ³	0,0616	g/m ³	0,176	g/m ³	0,484 g/m ³	
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	342	g/m ³	439	g/m ³	195	g/m ³	557	g/m ³	1.533 g/m ³	
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	1,59	g/m ³	2,05	g/m ³	0,91	g/m ³	2,60	g/m ³	7,15 g/m ³	
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	1,51	g/m ³	1,93	g/m ³	0,860	g/m ³	2,45	g/m ³	6,75 g/m ³	

4.5 Herstellung von Transportbeton – TP2 und TP3

Die Untersuchungen der kumulativen Energiewerte und ausgewählten klimarelevanten Emissionswerte für die Herstellung von RC-, Normal- und Standardbeton (Energieträger: Strom) und deren Transport zur Baustelle (Energieträger: Diesel) sind nachfolgend aufgeführt. Für alle Betone gelten aufgrund der übereinstimmenden Verfahrensparameter die gleichen Ergebnisse.

Tab. 39: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für Betonherstellung (Mischprozess)

Herstellung Beton		Anteil Energieträger: Strom		
Durchsatz				11,00 MJ/m³
1 m ³ Beton				0,000011 TJ/m ³
	Menge pro TJ		Menge pro t	
	Strom ²⁾	Einheit	Beton	Einheit
Ressourcen				
KEA-andere	0,161	TJ	1,77	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,278	TJ	3,06	MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	2,38	TJ	26,2	MJ/m ³
Luftemissionen				
CH ₄	195	kg	2,15	g/m ³
CO	94	kg	1,03	g/m ³
CO ₂	170.000	kg	1.870	g/m ³
NO _x	166	kg	1,83	g/m ³
SO ₂	94,5	kg	1,04	g/m ³
Staub	11,4	kg	0,13	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	177.000	kg	1.947	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	218	kg	2,40	g/m ³
TOPP-Äquivalent	224	kg	2,46	g/m ³

Tab. 40: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport des Betons zur Baustelle

ermittelter Energieaufwand Transport			9 MJ/m³	
Betonmischanlage - Baustelle			0,000009 TJ/m ³	
Energieträger: Diesel				
	Menge pro TJ		Menge pro t	
	Diesel	Einheit	Beton	Einheit
Ressourcen				
KEA-andere	0,000931	TJ	0,00838	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0142	MJ/m ³
KEA-nichtererneuerbar	1,14	TJ	10,26	MJ/m ³
Luftemissionen				
CH ₄	18,9	kg	0,17	g/m ³
CO	12,5	kg	0,11	g/m ³
CO ₂	11.100	kg	100	g/m ³
NO _x	27,8	kg	0,25	g/m ³
SO ₂	34,5	kg	0,31	g/m ³
Staub	3,66	kg	0,03	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	104	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	0,49	g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	0,46	g/m ³

4.6 Verarbeitung von Ortbeton– TP2 und TP3

Für die Verarbeitung des Ortbeton werden beide Energieträger Diesel und Strom eingesetzt. Die resultierenden Emissionen wie auch KEA-Werte sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Tab. 41: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für Betonverarbeitung

Verarbeitung Beton	Anteil Energieträger: Diesel				Anteil Energieträger: Strom				Gesamt	
	Menge pro TJ	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro TJ	Einheit	Menge pro m ³	Einheit	Menge pro m ³	Einheit
Durchsatz			18,1	MJ/m ³			0,9	MJ/m ³	19,0	MJ/m ³
1 m ³ Beton			0,000181	TJ/m ³			0,000009	TJ/m ³	0,000190	TJ/m ³
	Diesel ¹⁾	Einheit	Beton	Einheit	Strom ²⁾	Einheit	Beton	Einheit	Beton	Einheit
Ressourcen										
KEA-andere	0,000931	TJ	0,0169	MJ/m ³	0,161	MJ/m ³	0,145	MJ/m ³	0,16	MJ/m ³
KEA-erneuerbar	0,00158	TJ	0,0286	MJ/m ³	0,278	MJ/m ³	0,250	MJ/m ³	0,28	MJ/m ³
KEA-nichterneuerbar	1,14	TJ	20,6	MJ/m ³	2,38	MJ/m ³	2,14	MJ/m ³	22,78	MJ/m ³
Luftemissionen										
CH ₄	18,9	kg	0,342	g/m ³	195	g/m ³	0,176	g/m ³	0,52	g/m ³
CO	12,5	kg	0,226	g/m ³	94	g/m ³	0,0846	g/m ³	0,31	g/m ³
CO ₂	11.100	kg	201	g/m ³	170.000	g/m ³	153	g/m ³	354	g/m ³
NO _x	27,8	kg	0,503	g/m ³	166	g/m ³	0,149	g/m ³	0,65	g/m ³
SO ₂	34,5	kg	0,624	g/m ³	94,5	g/m ³	0,0851	g/m ³	0,71	g/m ³
Staub	3,66	kg	0,066	g/m ³	11,4	g/m ³	0,0103	g/m ³	0,08	g/m ³
CO ₂ -Äquivalent	11.600	kg	210	g/m ³	177.000	g/m ³	159	g/m ³	369	g/m ³
SO ₂ -Äquivalent	54,1	kg	0,979	g/m ³	218	g/m ³	0,196	g/m ³	1,18	g/m ³
TOPP-Äquivalent	51,1	kg	0,925	g/m ³	224	g/m ³	0,202	g/m ³	1,13	g/m ³

4.7 Emissionen Gesamtprozess

In Summe der ermittelten Emissionen und KEA-Werte lassen sich die des Gesamtprozesses berechnen. Diese Berechnungen für das Szenario 1 – Abbruch, Herstellung der RC-Gesteinskörnung sowie Herstellung und Verarbeitung des RC-Betons sind in den nachfolgender Tabelle aufgeführt. Dabei wurden die einzelnen Transportprozesse zusammengefasst

Tab. 42: KEA-Werte und ausgewählte klimarelevante Emissionen des Gesamtprozesses Szenario 1 - RC-Beton

Gesamtemissionen RC-Beton		Abbruch	Herstellung Betonsplitt	Herstellung Ausgangsstoffe	Herstellung Beton	Verarbeitung Beton	Transport gesamt	Gesamtprozess
eingesetzte Menge pro m ³ RC-Beton	Einheit	0,91 t/m ³	0,446 t/m ³	1,787 t/m ³	1 m ³	1 m ³	1 m ³	1 m ³
Ressourcen								
KEA-andere	MJ/m ³	0,089	2,91	43,8	1,77	0,16	0,147	48,9
KEA-erneuerbar	MJ/m ³	0,15	5,03	23	3,06	0,28	0,250	31,8
KEA-nichterneuerbar	MJ/m ³	108,9	57,7	1.843,0	26,2	22,8	180,5	2.239
KEA-Gesamt	MJ/m ³	109,1	65,6	1.909,8	31,0	23,2	180,9	2.320
Luftemissionen								
CH ₄	g/m ³	1,81	3,76	297,42	2,15	0,52	2,99	308,7
CO	g/m ³	1,19	1,86	118,64	1,03	0,31	1,97	125
CO ₂	g/m ³	1.061	3.207	349.651	1.870	354	1.753	357.896
NO _x	g/m ³	2,66	3,35	809,1	1,83	0,65	4,38	822
SO ₂	g/m ³	3,30	2,15	90,91	1,04	0,71	5,45	104
Staub	g/m ³	0,35	0,25	125,10	0,13	0,08	0,58	126
CO ₂ -Äquivalent	g/m ³	1.108	3.340	358.993	1.947	369	1.831	367.588
SO ₂ -Äquivalent	g/m ³	5,17	4,63	655,0	2,4	1,18	8,54	677
TOPP-Äquivalent	g/m ³	4,88	4,70	1023,7	2,46	1,13	8,07	1.045

Die aus den vorangegangenen Ermittlungen resultierenden Parameterwerte für KEA und Emissionen des Szenarios 2 – Abbruch, konventionelle Aufbereitung, Herstellung / Verarbeitung von Normalbeton C 30/37 in den Varianten Normalbeton (TBS) und Standardbeton (BTB) können den Tab. 43 und Tab. 44 entnommen werden.

Tab. 43: KEA-Werte und ausgewählte klimarelevante Emissionen des Gesamtprozesses Szenario 2 – Normalbeton (TBS)

Gesamtemissionen Normalbeton		Abbruch	Aufbereitung Betonbruch	Herstellung Ausgangsstoffe	Herstellung Beton	Verarbeitung Beton	Transport gesamt	Gesamtprozess
eingesetzte Menge pro m ³ RC-Beton	Einheit	0,91 t/m ³	0,91 t/m ³	2,336 t/m ³	1 m ³	1 m ³	1 m ³	1 m ³
Ressourcen								
KEA-andere	MJ/m ³	0,089	1,22	47,2	1,77	0,16	0,171	50,6
KEA-erneuerbar	MJ/m ³	0,15	2,11	25,0	3,06	0,28	0,291	30,9
KEA-nichtererneuerbar	MJ/m ³	108,9	27,1	1.918	26,2	22,8	209,8	2.313
KEA-Gesamt	MJ/m ³	109,1	30,4	1.990,2	31,0	23,2	210,3	2.394
Luftemissionen								
CH ₄	g/m ³	1,81	1,63	302,88	2,15	0,52	3,47	312,5
CO	g/m ³	1,19	0,82	126,72	1,03	0,31	2,30	132
CO ₂	g/m ³	1.061	1.379	354.873	1.870	354	2.039	361.576
NO _x	g/m ³	2,66	1,49	843,7	1,83	0,65	5,10	855
SO ₂	g/m ³	3,30	1,01	95,8	1,04	0,71	6,34	108
Staub	g/m ³	0,35	0,12	128,02	0,13	0,08	0,67	129
CO ₂ -Äquivalent	g/m ³	1.108	1.436	364.400	1.947	369	2.130	371.390
SO ₂ -Äquivalent	g/m ³	5,17	2,11	684,0	2,4	1,18	9,94	705
TOPP-Äquivalent	g/m ³	4,88	2,13	1067,7	2,46	1,13	9,39	1.088

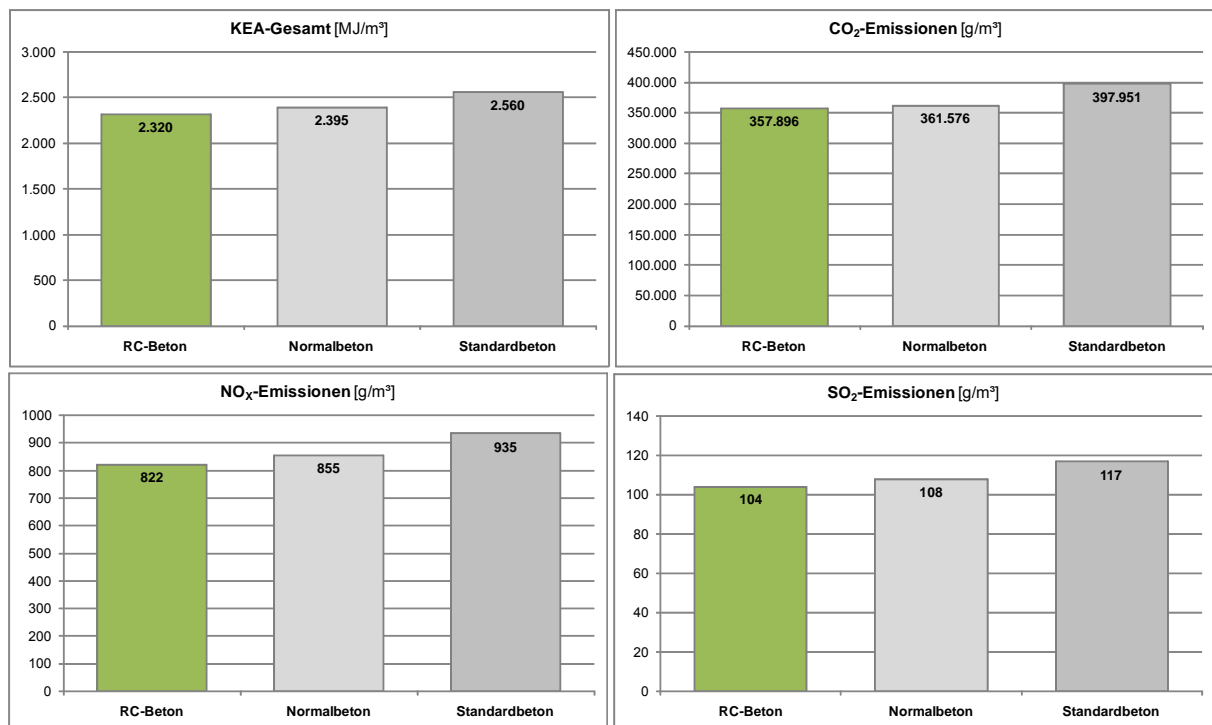
Tab. 44: KEA-Werte und ausgewählte klimarelevante Emissionen des Gesamtprozesses Szenario 2 – Standardbeton (BTB)

Gesamtemissionen Standardbeton		Abbruch	Aufbereitung Betonbruch	Herstellung Ausgangsstoffe	Herstellung Beton	Verarbeitung Beton	Transport gesamt	Gesamtprozess
eingesetzte Menge pro m ³ RC-Beton	Einheit	0,91 t/m ³	0,91 t/m ³	2,36 t/m ³	1 m ³	1 m ³	1 m ³	1 m ³
Ressourcen								
KEA-andere	MJ/m ³	0,089	1,22	49,9	1,77	0,16	0,165	53,3
KEA-erneuerbar	MJ/m ³	0,15	2,11	26,2	3,06	0,28	0,281	32,1
KEA-nichtererneuerbar	MJ/m ³	108,9	27,1	2.087	26,2	22,8	202,8	2.475
KEA-Gesamt	MJ/m ³	109,1	30,4	2.163,1	31,0	23,2	203,2	2.560
Luftemissionen								
CH ₄	g/m ³	1,81	1,63	332,82	2,15	0,52	3,36	342,3
CO	g/m ³	1,19	0,82	139,07	1,03	0,31	2,22	145
CO ₂	g/m ³	1.061	1.379	391.316	1.870	354	1.971	397.951
NO _x	g/m ³	2,66	1,49	923,1	1,83	0,65	4,93	935
SO ₂	g/m ³	3,30	1,01	104,33	1,04	0,71	6,13	117
Staub	g/m ³	0,35	0,12	141,00	0,13	0,08	0,64	142
CO ₂ -Äquivalent	g/m ³	1.108	1.436	401.874	1.947	369	1.759	408.493
SO ₂ -Äquivalent	g/m ³	5,17	2,11	747,9	2,4	1,18	9,61	768
TOPP-Äquivalent	g/m ³	4,88	2,13	1.168,2	2,46	1,13	9,07	1.188

Die ermittelten Parameter der untersuchten Gesamtprozesse der Szenarien 1 und 2 sind in folgender Tabelle gegenüber gestellt.

Tab. 45: Vergleich der KEA- und Emissionswerte der untersuchten Gesamtprozesse

Gesamtemissionen	Einheit	RC-Beton	Normalbeton	Standardbeton
Ressourcen				
KEA-andere	MJ/m ³	48,9	50,6	53,3
KEA-erneuerbar	MJ/m ³	31,8	30,9	32,1
KEA-nichtererneuerbar	MJ/m ³	2.239	2.313	2.475
KEA-Gesamt	MJ/t	2.320	2.395	2.560
Luftemissionen				
CH ₄	g/m ³	309	312	342
CO	g/m ³	125	132	145
CO ₂	g/m ³	357.896	361.576	397.951
NO _x	g/m ³	822	855	935
SO ₂	g/m ³	104	108	117
Staub	g/m ³	126	129	142
CO ₂ -Äquivalent	g/m ³	367.588	371.390	408.493
SO ₂ -Äquivalent	g/m ³	677	705	768
TOPP-Äquivalent	g/m ³	1.045	1.088	1.188


Abb. 44: Vergleich des KEA-Gesamt sowie der CO₂-, NO_x- und SO₂-Emissionen zur Herstellung von RC-Beton (Szenario 1) und Normal-/Standardbeton (Szenario 2)

In der Abb. 44 sind die KEA-Gesamtwerte sowie die ermittelten Emissionswerte für CO₂-, NO_x- und SO₂ grafisch gegenübergestellt. In allen Fällen erzielt der RC-Beton leicht bessere Ergebnisse als die untersuchten Normalbetone. Zum einen ist der Unterschied auf die Verwendung eines energetisch günstigeren Zementes zurückzuführen, welcher auch niedrigere Emissionswerte aufweist. Die Emissions- und KEA-Reduktion gegenüber dem Normalbeton von TBS ist bei der gleichen Zementart auf die etwas günstigeren Transportaufwände für die RC-Gesteinskörnung zurückzuführen. Dies soll abschließend näher betrachtet werden.

4.8 Fazit – Betrachtungen zum KEA und ausgewählten Emissionen

In den abschließenden Betrachtungen zu KEA und klimarelevanten Emissionen sollen die Parameter KEA-Gesamt und CO₂, NO_x und SO₂ gesondert bewertet werden. Zunächst werden daher die KEA-Gesamt-Werte der untersuchten Gesamtprozesse und Teilprozesse der Szenarien 1 und 2 gegenübergestellt.

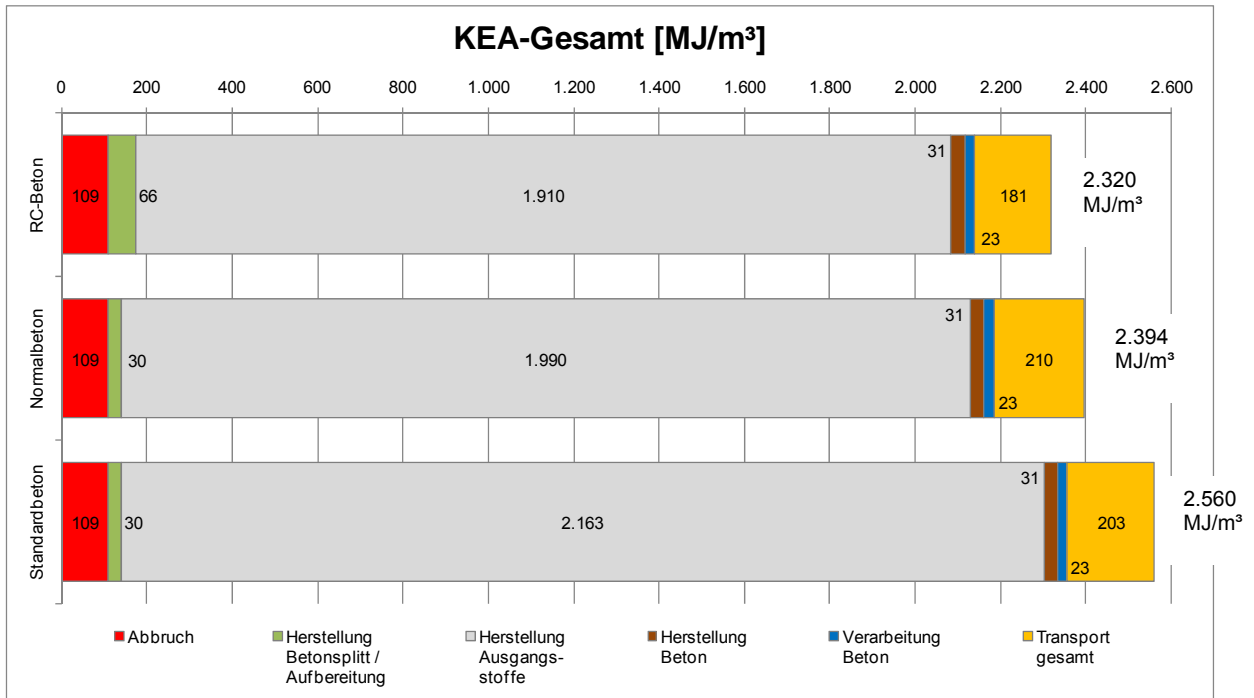


Abb. 45: KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse

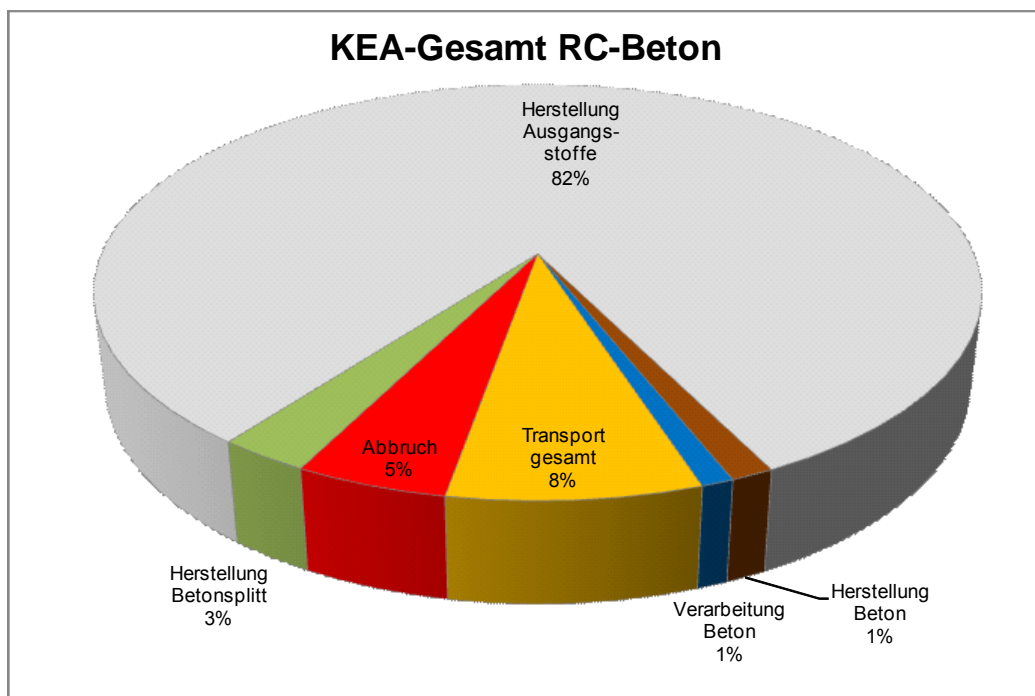


Abb. 46: Anteile der KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton

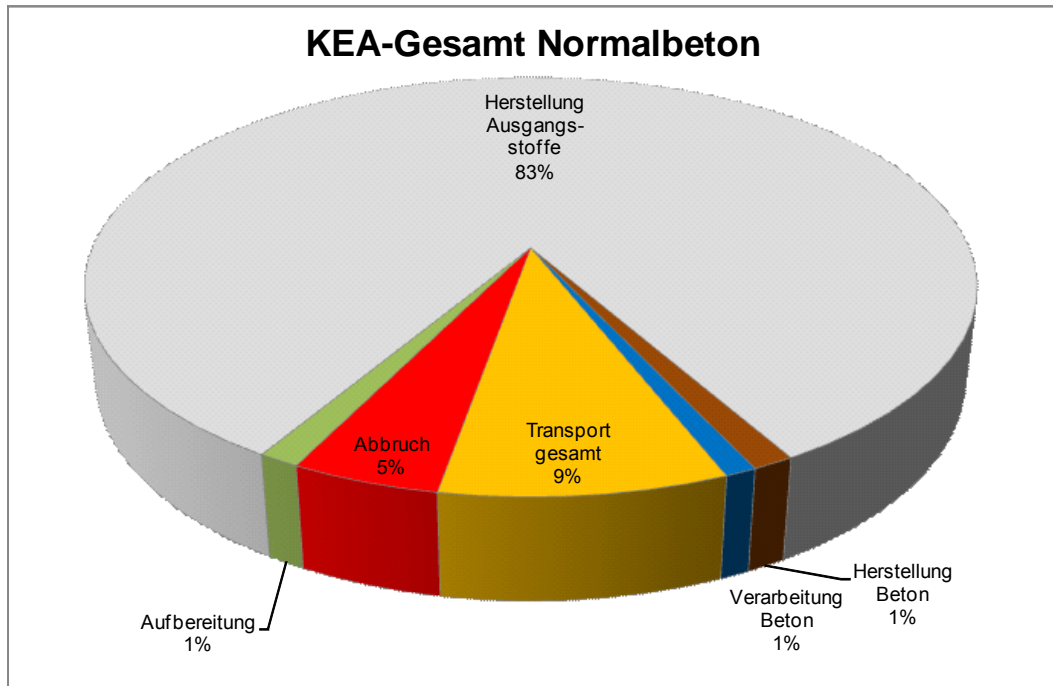


Abb. 47: Anteile der KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)

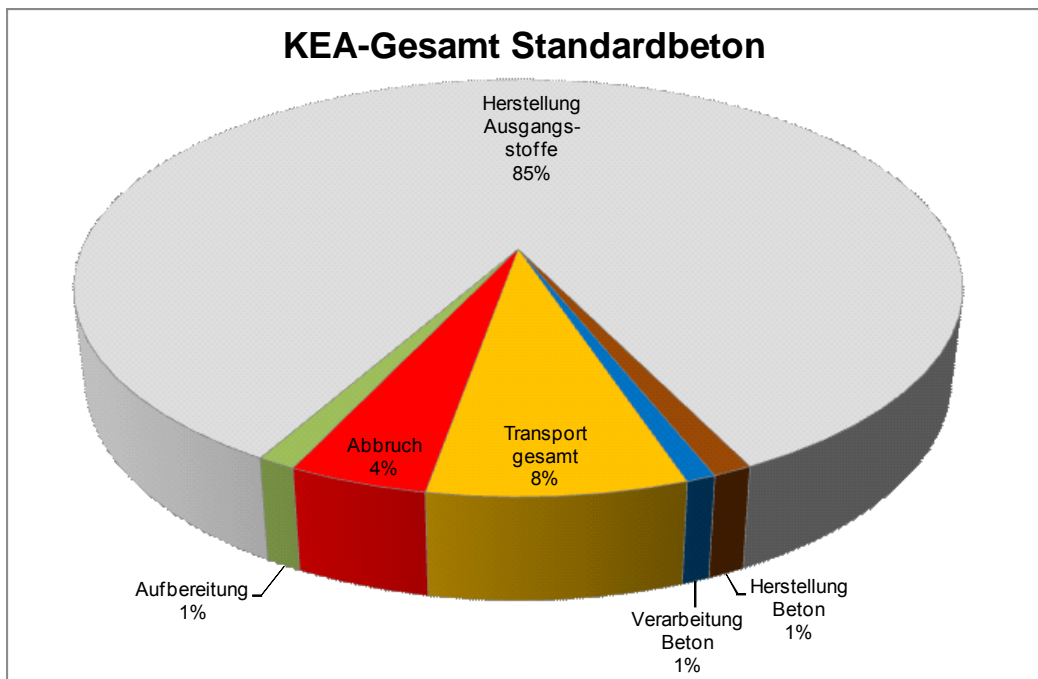


Abb. 48: Anteile der KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse am Gesamtprozess –Standardbeton (BTB)

Deutlich wird der große Einfluss der Herstellung der Ausgangsstoffe, welcher hauptsächlich – wie zuvor erläutert - im energieaufwändigen Prozess der Zementherstellung begründet liegt. Beim RC-Beton (Szenario 1) liegen die KEA-Gesamt-Werte der Ausgangsstoffherstellung unter denen des Normalbetons (TBS) da hier die Herstellung des Betonsplitts gesondert aufgeführt, eigentlich aber mit zu den Ausgangsstoffen zählt. Der niedrigere KEA-Gesamt-Wert kann somit nur durch die günstigeren Transportentfernungen der Betonsplittlieferungen begründet werden.

Die größeren Transportentfernungen sowie der höhere Bindemittleinsatz sowie die Verwendung von Splitt begründen den höheren KEA-Gesamt-Wert beim Standardbeton.

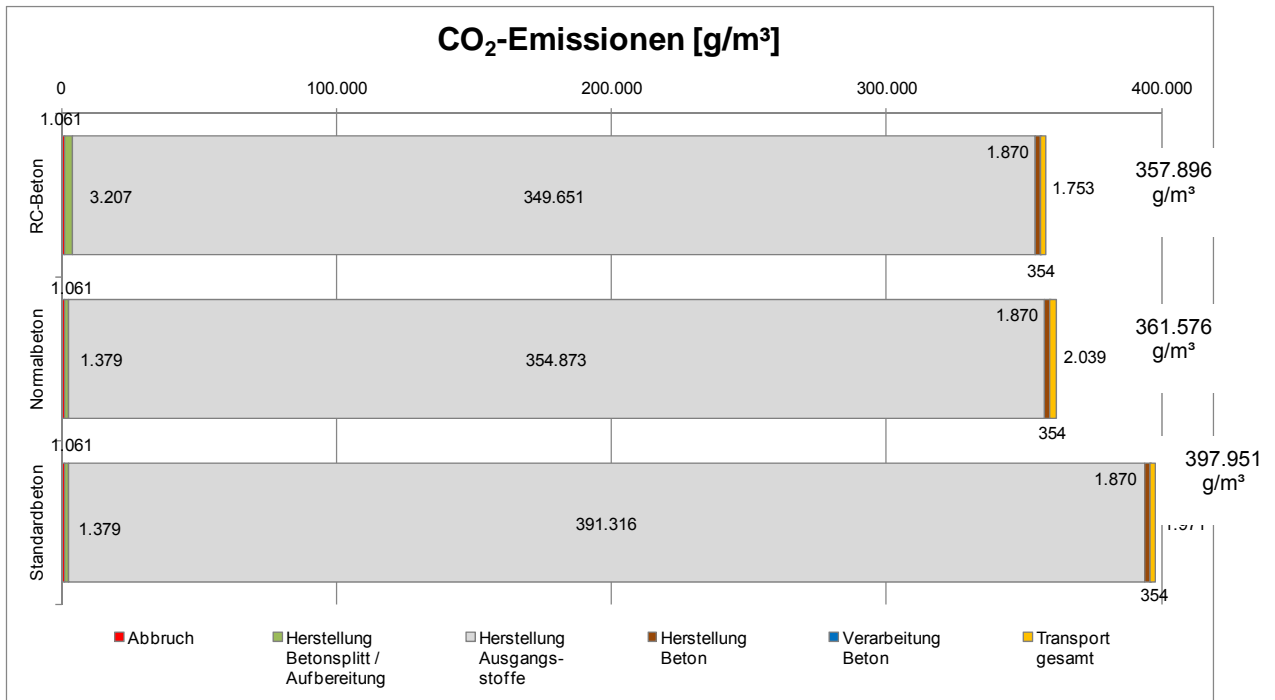


Abb. 49: CO₂-Emissionswerte der Teilprozesse

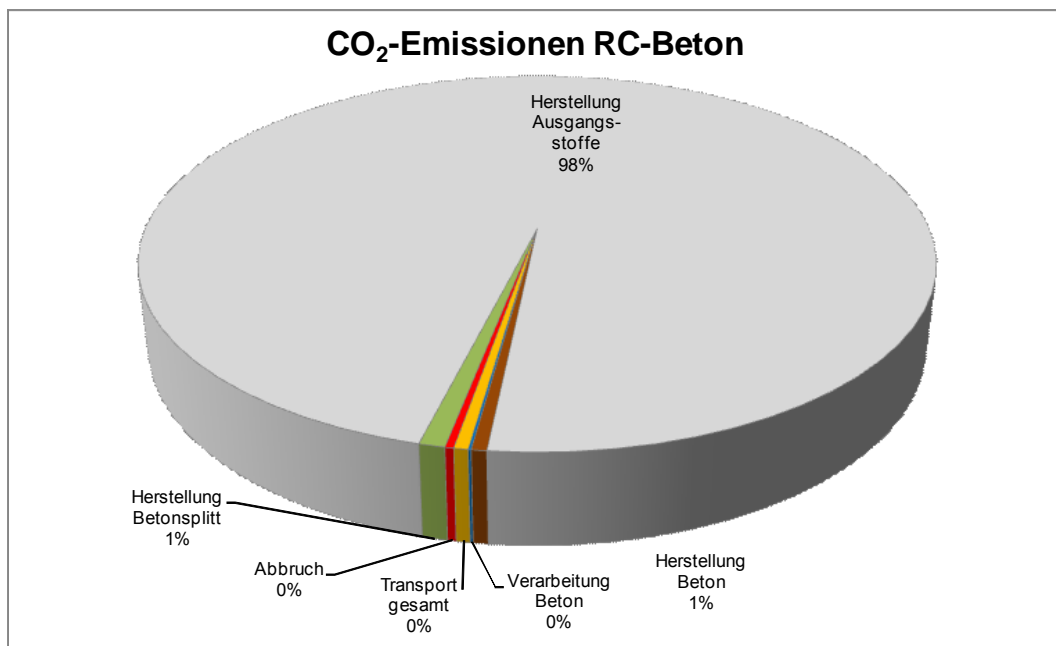


Abb. 50: Anteile der CO₂-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton

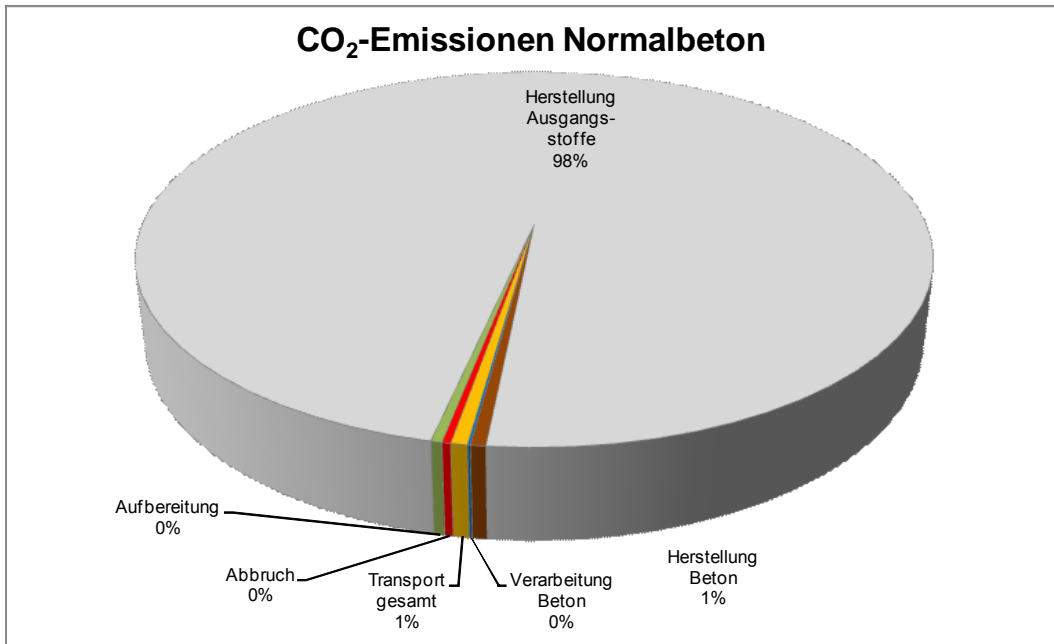


Abb. 51: Anteile der CO₂-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)

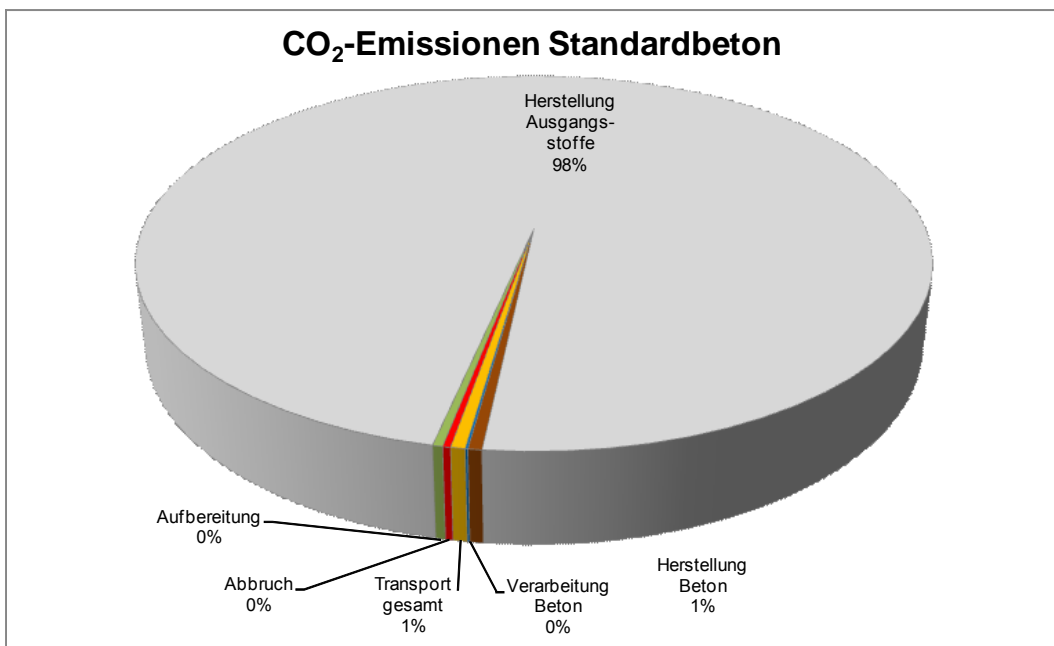


Abb. 52: Anteile der CO₂-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Standardbeton (BTB)

Die hohen CO₂-Emissionen der Zementproduktion sind die absolute Größe in dieser Betrachtung. Sie führen zu den 98 % – 99 % an der Gesamtemission. Gleiches gilt für die NO_x-Emissionen mit einem Anteil von 99 % des Prozesses der Ausgangsstoffherstellung am Gesamtprozess.

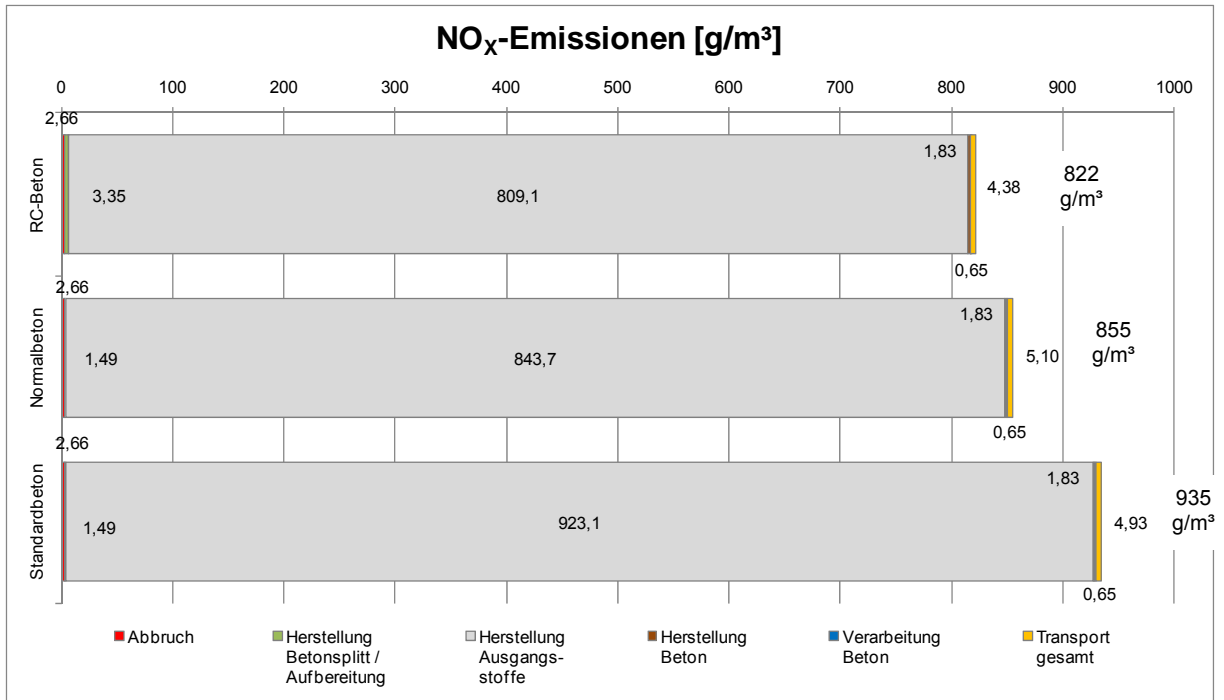


Abb. 53: NO_x-Emissionswerte der Teilprozesse

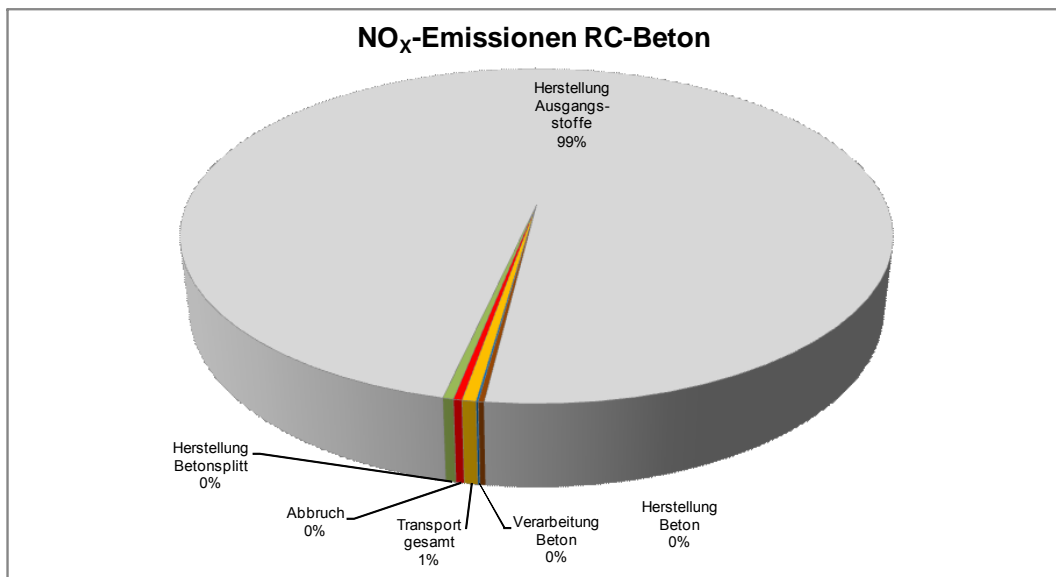


Abb. 54: Anteile der NO_x-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton

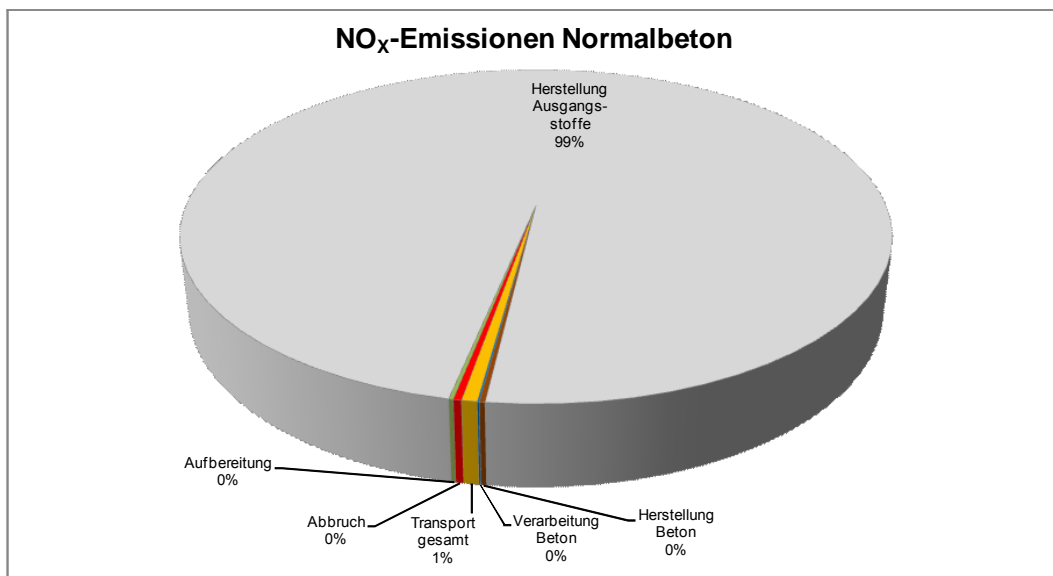


Abb. 55: Anteile der NO_x-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)

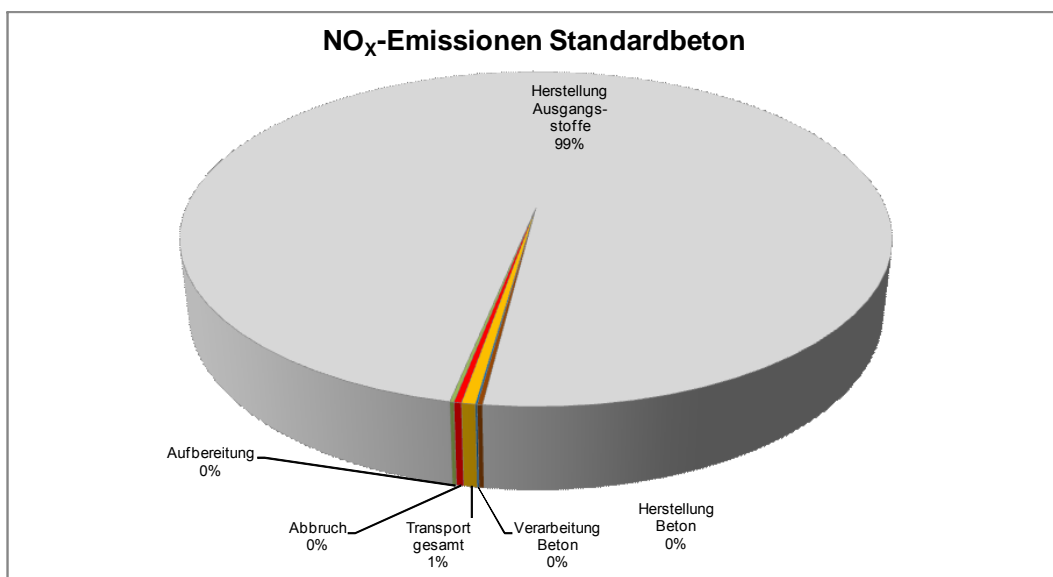


Abb. 56: Anteile der NO_x-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Standardbeton (BTB)

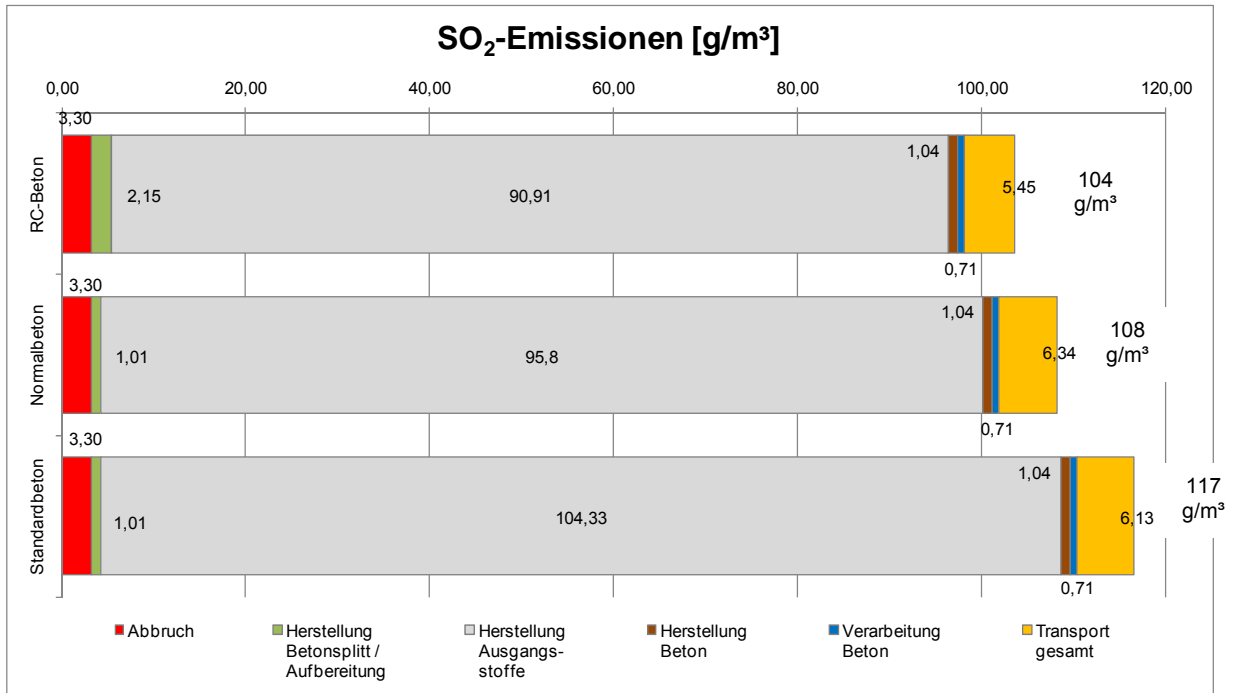


Abb. 57: SO₂-Emissionswerte der Teilprozesse

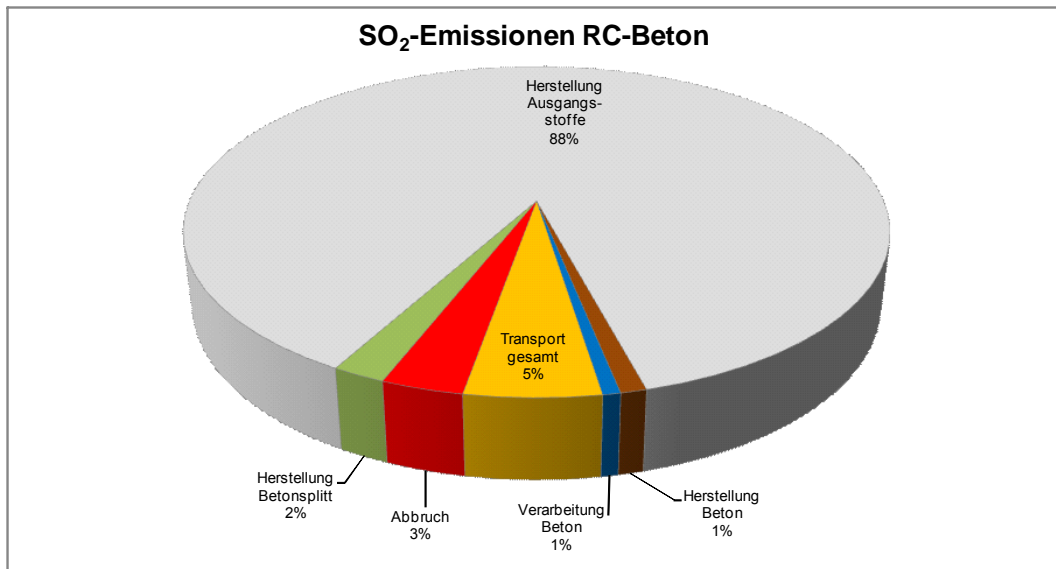


Abb. 58: Anteile der SO₂-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton

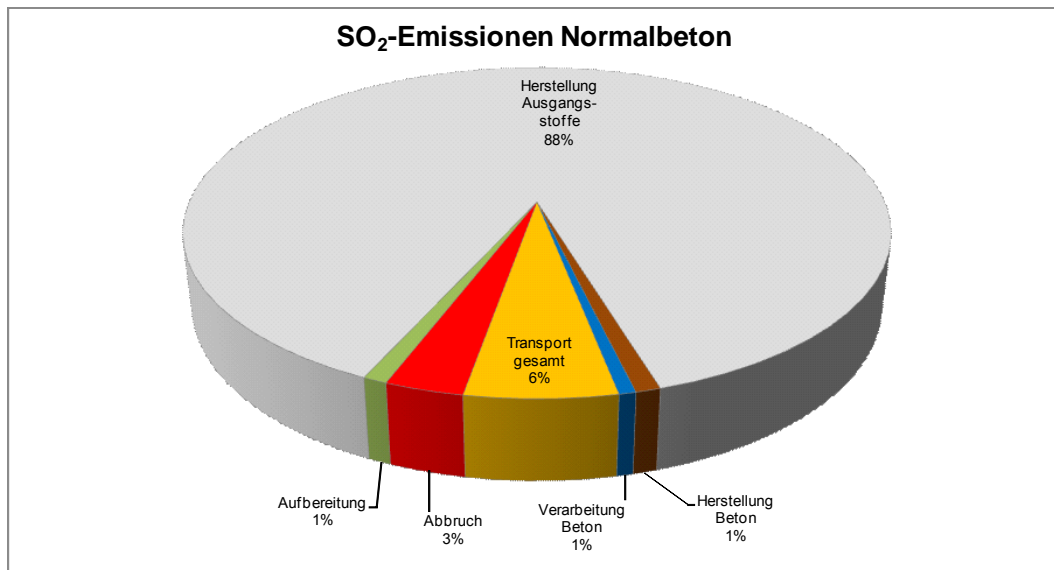


Abb. 59: Anteile der SO₂-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)

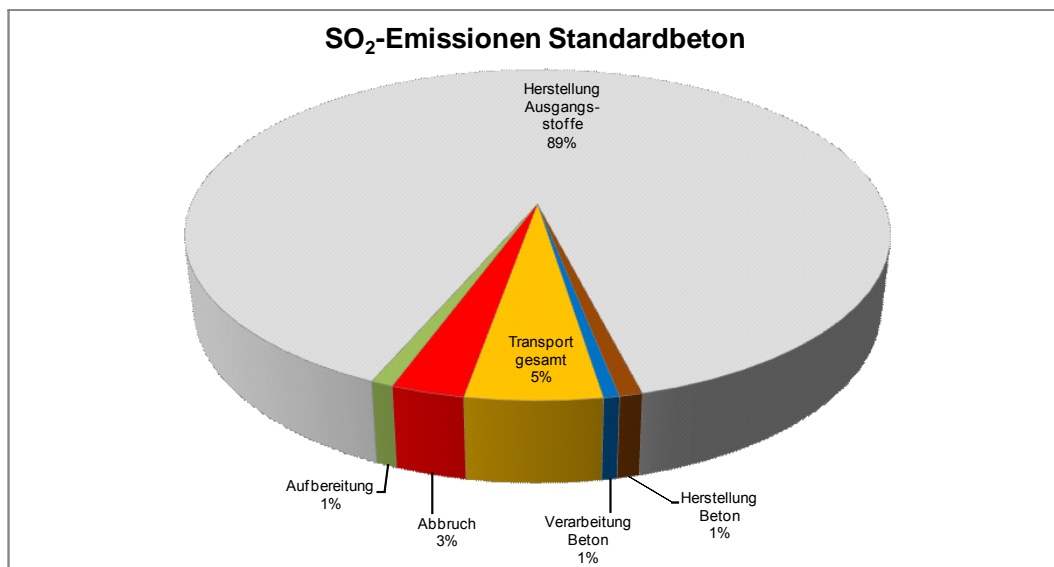


Abb. 60: Anteile der SO₂-Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Standardbeton (BTB)

Auch bei der Betrachtung der SO₂-Emissionen zeigt sich der Haupteinfluss der Zementproduktion über den hohen Emissionsanteil für die Herstellung der Ausgangsstoffe. Erkennbar ist aber auch die Verringerung der Emissionen im Transportanteil durch den Einsatz von Betonsplitt.

5 Schlussfolgerungen

Wie auch bei der Berechnung des Energieaufwandes für die Szenarien 1 und 2 zeigt sich der große Einfluss der energieintensiven und somit auch emissionsstarken Zementproduktion. Erst mit einer Optimierung des Zementeinsatzes durch die Verwendung von Zementen mit einem möglichst niedrigen Portlandzementklinkeranteil können Emissionen und der Energieverbrauch des Gesamtprozesses signifikant gesenkt werden.

Die energetischen Vorteile und damit verbunden die Senkung der Emissionsraten durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen (Betonsplitten) zur Betonherstellung resultieren ausschließlich aus einer Verkürzung der Transportwege. Somit ist die Verwendung von Betonsplitten vor allem in Gebieten mit einer geringen Dichte an Sand-, Kies- und Splittförderstätten und damit verbunden großen Transportentfernungen für natürliche Gesteinskörnungen sinnvoll. Dies gilt vor allem für große Ballungszentren, in welchen eine hohe Bauaktivität herrscht. Diese ist gerade in dichten Siedlungsgebieten mit einer hohen Abbruchrate verbunden, welche wiederum eine größere Anzahl von RC-Unternehmen in der Fläche bindet. So verkürzen sich die Transportwege für rezyklierte Gesteinskörnungen. Der energetische Vorteil wird und kann greifen.

6 Ausblick

Weltweit wird an innovativen Verfahren geforscht, um die Energie- und Umweltbilanz bei der Zementherstellung zu verbessern.

Gelingt es beispielsweise den von der Celitement GmbH⁷² entwickelten gleichnamigen Zement zur Marktreife zu bringen, so könnten sich im Vergleich zum Herstellungsverfahren von Portlandzementklinker der Energieaufwand und der CO₂-Ausstoß um die Hälfte verringern. Anstelle einer Temperatur von 1.450 °C für den Brennprozess erfolgt die Produktion von Celitement bei Temperaturen unter 300 °C.

Diese Entwicklung würde zur Verbesserung der Umweltbilanz aller hergestellten Betone beitragen.

⁷² Ist eine Gründung der Schwenk Baustoff-Gruppe, des Karlsruher Instituts für Technologie KIT und von Wissenschaftlern des KIT [www.baulinks.de/webplugin/2010/0014.php4?n, aufgerufen am 22.10.2010].

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gesamtprozess und Systemgrenzen der Herstellung von RC-/Normalbeton	5
Abb. 2: Massen und Anteile der anfallende Materialien und Stoffe für die Gewinnung 1 t Betonbruchs beim Abbruch eines Stahlbeton-Wohngebäudes.....	8
Abb. 3: Traditioneller und innovativer Verwertungsweg	9
Abb. 4: Verfahrensablauf zur konventionellen Aufbereitung von Betonbruch.....	9
Abb. 5: Prozessübersicht und Massebilanz für den 1. Durchlauf der konventionellen Aufbereitung....	10
Abb. 6: Prozessübersicht und Massebilanz für den 2. Durchlauf der konventionellen Aufbereitung....	10
Abb. 7: Verfahrensablauf zur Herstellung von RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt)	12
Abb. 8: Prozessübersicht und Massebilanz für den 3. Durchlauf der Trockenaufbereitung	12
Abb. 9: Prozessübersicht und Massebilanz für die Nassaufbereitung	14
Abb. 10: Massebilanz des Gesamtprozesses der Betonsplitt Herstellung (prozentual).....	15
Abb. 11: Massebilanz des Gesamtprozesses der Betonsplitt Herstellung von 1 t 2/8 mm	16
Abb. 12: Massebilanz des Gesamtprozesses der Betonsplitt Herstellung; Zielgröße 1 t 2/8 mm.....	16
Abb. 13: Gegenüberstellung des In- und Outputs der Betonsplitt Herstellung von 1 t 2/8 mm	17
Abb. 14: Materialbilanz (Betonrezeptur) RC-Beton C 30/37	17
Abb. 15: Materialbilanz (Betonrezeptur) Normalbeton C 30/37 (Vergleichsrezeptur).....	18
Abb. 16: Gegenüberstellung Ausgangsstoffe RC-Beton / Normalbeton C 30/37 der Fa. TBS.....	19
Abb. 17: Materialbilanz (Betonrezeptur) Standardbeton C 30/37 (BTB).....	19
Abb. 18: Gegenüberstellung Ausgangsstoffe RC-Beton / Standardbeton C 30/37 (BTB).....	20
Abb. 19: Synopse der Betonzusammensetzung von RC-Beton C 30/37, Vergleichsbeton C 30/37 (TBS) und Standardbeton C 30/37 (BTB)	21
Abb. 20: Synopse der Bindemittelzusammensetzung von RC-Beton C 30/37, Vergleichsbeton C 30/37 (TBS) – CEM II/B-V42,5R und Standardbeton C 30/37 (BTB) – Durchschnittszement	21
Abb. 21: Verfahrensablauf zur Herstellung von Transportbeton	22
Abb. 22: Verfahrensablauf zur Verarbeitung von Transportbeton	23
Abb. 23: Konsistenzvergleich RC-Beton C 30/37 (TBS) und Normalbeton C 30/37 Fa. CEMEX	25
Abb. 24: Synopse Konsistenz (Ausbreitmaße) und Betondruckfestigkeit des RC-Betons C 30/37.....	25
Abb. 25: Vergleich der Entladedauer von RC-Beton C 30/37 (TBS) und Normalbeton C 30/37 Fa. CEMEX.....	26
Abb. 26: Stofffluss des Gesamtprozesses der Herstellung von RC-Beton C 30/37 – Szenario 1	27
Abb. 27: Stofffluss des Gesamtprozesses der Herstellung von Normalbeton C 30/37 (TBS) – Szenario 2.....	28
Abb. 28: Stofffluss des Gesamtprozesses der Herstellung von Standardbeton (BTB) – Szenario 2 ...	29
Abb. 29: Prozessübersicht Trockenaufbereitung	32
Abb. 30: Prozessübersicht Herstellung RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt), gewaschen.....	36
Abb. 31: Energieaufwände der Anlagenteile der Trockenaufbereitung	37
Abb. 32: Energieaufwand der Anlagenteile der Trockenaufbereitung	39
Abb. 33: Anteile am Energieaufwand der Anlagenteile der Betonsplitt Herstellung	41

Abb. 34: Vergleich des Bereitstellungsaufwandes für RC- und natürliche Gesteinskörnung (TBS).....	42
Abb. 35: Energetischer Aufwand zur Bereitstellung der Betonausgangsstoffe (TBS)	43
Abb. 36: Vergleich des energetischen Bereitstellungsaufwandes für RC- und natürliche Gesteinskörnung für Standardbeton (BTB).....	46
Abb. 37: Anteile der Ausgangsstoffe am Bereitstellungsaufwand für RC-Beton	47
Abb. 38: Vergleich der energetischen Aufwände zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe der untersuchten Betone	48
Abb. 39: Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand Szenario 1 – RC-Beton.....	52
Abb. 40: Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand Szenario 2 – Normalbeton (TBS)	53
Abb. 41: Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand Szenario 2 –Standardbeton (BTB)	54
Abb. 42: Synopse der Gesamtenergieaufwände der Szenarien 1 und 2.....	55
Abb. 43: Vergleich des KEA-Gesamt sowie der CO ₂ -, NO _x - und SO ₂ -Emissionen zur Herstellung rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnungen	64
Abb. 44: Vergleich des KEA-Gesamt sowie der CO ₂ -, NO _x - und SO ₂ -Emissionen zur Herstellung von RC-Beton (Szenario 1) und Normal-/Standardbeton (Szenario 2)	70
Abb. 45: KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse.....	71
Abb. 46: Anteile der KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton.....	71
Abb. 47: Anteile der KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS).	72
Abb. 48: Anteile der KEA-Gesamtwerte der Teilprozesse am Gesamtprozess –Standardbeton (BTB)	72
Abb. 49: CO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse	73
Abb. 50: Anteile der CO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton.....	73
Abb. 51: Anteile der CO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)	74
Abb. 52: Anteile der CO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Standardbeton (BTB).....	74
Abb. 53: NO _x -Emissionswerte der Teilprozesse	75
Abb. 54: Anteile der NO _x -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton	75
Abb. 55: Anteile der NO _x -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)	76
Abb. 56: Anteile der NO _x -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Standardbeton (BTB).....	76
Abb. 57: SO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse	77
Abb. 58: Anteile der SO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – RC-Beton.....	77
Abb. 59: Anteile der SO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Normalbeton (TBS)	78
Abb. 60: Anteile der SO ₂ -Emissionswerte der Teilprozesse am Gesamtprozess – Standardbeton (BTB).....	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Gegenüberstellung Szenario 1 - RC-Beton“ und Szenario 2 - Normalbeton	5
Tab. 2: Berechnungsgrundlage zum Szenarienvergleich	6
Tab. 3: Massebilanz der konventionellen Aufbereitung	11
Tab. 4: Massebilanz der Trockenaufbereitung zur Betonsplitttherstellung	13
Tab. 5: Berechnungsgrundlage zum Szenarienvergleich Energieaufwand (E)	30
Tab. 6: Energiebedarf Abbruch	31
Tab. 7: Energieverbrauch des eingesetzten Baggers und Radladers bei der Aufbereitung des Betonbruchs	33
Tab. 8: Stromverbrauch bei Volllast, Anzahl und Nutzung der einzelnen Anlagenteile der Trockenaufbereitung in den beiden Durchläufen	33
Tab. 9: Berechnung der Energieaufwände der Anlagenteile der Trockenaufbereitung in MJ/t Durchsatz bei Volllast	34
Tab. 10: Berechnung des Energieaufwandes der konventionellen Aufbereitung	35
Tab. 11: Berechnung des Energieaufwandes der Trockenaufbereitung zur Betonsplitttherstellung	37
Tab. 12: Berechnung des Energieaufwandes der Nassaufbereitung zur Betonsplitttherstellung	38
Tab. 13: Berechnung des Energieaufwandes der Anlagenteile bei der Betonsplitttherstellung	40
Tab. 14: Energieaufwände für den Antransport von Gesteinskörnungen (TBS).....	41
Tab. 15: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von RC- und Normalbeton (TBS)	42
Tab. 16: Energieaufwände für den Antransport von Gesteinskörnungen und Zement (BTB)	44
Tab. 17: Energieaufwand zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Herstellung des Standardbetons (BTB).....	45
Tab. 18: Bereitstellungsaufwände der Ausgangsstoffe zur Herstellung von 1 m ³ RC- , Normal- und Standardbeton	47
Tab. 19: Energieaufwand Herstellung Transportbeton	49
Tab. 20: Energiebedarf der Betonverarbeitung am Beispiel der Schüttung einer Deckenplatte	50
Tab. 21: Gesamtenergieaufwand für Szenario 1 – RC-Beton C30/37	52
Tab. 22: Gesamtenergieaufwand für Szenario 2 – Normalbeton C30/37 (TBS).....	53
Tab. 23: Gesamtenergieaufwand für Szenario 2 – Standardbeton C30/37 (BTB).....	54
Tab. 24: Vergleich der Gesamtenergieaufwände für die Szenarien 1 und 2	55
Tab. 25: Berechnungsgrundlage zum Szenarienvergleich Emissionen (EM).....	58
Tab. 26: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen Abbruchprozess.....	59
Tab. 27: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen Transportprozess Abbruchbaustelle – RC- Anlage	60
Tab. 28: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen der konventionellen Aufbereitung.....	61
Tab. 29: Splittung der Energieträgeranteile für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt)61	
Tab. 30: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung der RC- Gesteinskörnung (Betonsplitt).....	62

Tab. 31: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der RC-Gesteinskörnung (Betonsplitt) zu Transportbetonmischanlage (TBS)	62
Tab. 32: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe zur Betonherstellung	63
Tab. 33: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe für RC-Beton	64
Tab. 34: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe für Normalbeton (TBS)	65
Tab. 35: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für die Herstellung/Gewinnung der Ausgangsstoffe für Standardbeton (BTB)	65
Tab. 36: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der Ausgangsstoffe für RC-Beton.....	66
Tab. 37: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der Ausgangsstoffe für Normalbeton (TBS)	66
Tab. 38: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport der Ausgangsstoffe für Standardbeton (BTB)	66
Tab. 39: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für Betonherstellung (Mischprozess).....	67
Tab. 40: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für den Transport des Betons zur Baustelle	67
Tab. 41: KEA und ausgewählte klimarelevante Emissionen für Betonverarbeitung	68
Tab. 42: KEA-Werte und ausgewählte klimarelevante Emissionen des Gesamtprozesses Szenario 1 - RC-Beton.....	68
Tab. 43: KEA-Werte und ausgewählte klimarelevante Emissionen des Gesamtprozesses Szenario 2 – Normalbeton (TBS)	69
Tab. 44: KEA-Werte und ausgewählte klimarelevante Emissionen des Gesamtprozesses Szenario 2 – Standardbeton (BTB)	69
Tab. 45: Vergleich der KEA- und Emissionswerte der untersuchten Gesamtprozesse.....	70

Quellenangaben

Aufnahmen von Prozessen und Daten der Fachgruppe Bauliches Recycling bei Scherer + Kohl GmbH & Co.KG, Ludwigshafen.

Aufnahmen von Prozessen und Daten der Fachgruppe Bauliches Recycling bei TBS – Transportbeton-Service GmbH, Mannheim, Ludwigshafen.

DAfStb-Rili Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 vom Dez. 2004

DIN EN 197-1:2004-08 Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien für Normalzement.

Eyerer, Peter; Reinhardt, Hans-Wolf: Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden - Wege zu einer ganzheitliche Bilanzierung, Birkhäuser Verlag, 2000.

Hauer, Bruno: Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, Technischer Bericht TB-BTe 2135/2007 Hrsg. Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB), Duisburg, Nov. 2007; www.betonshop.de/files/172/baustoffprofil_tb_200711.pdf.

Heuer, Hans; Gubany, Johann; Hinrichsen, Gerhard: Baumaschinen Taschenbuch – Ratgeber für die Baupraxis, Bauverlag Wiesbaden Berlin, 1994.

Mettke, Angelika (Hrsg.): Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil 1: Krangeführter Rückbau, BTU Cottbus, LS Altlasten, FG Bauliches Recycling 2008.

Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Partieller Rückbau eines Wohngebäudes der WBS 70 in Gröditz (Block 20), BTU Cottbus, LS Altlasten, FG Bauliches Recycling 2005.

TFB Wildeg, Datenerfassung 1996/97, www.empa.ch

www.baulinks.de/webplugin/2010/0014.php4?n

www.itc-berlin.net/en/html/mb_3241.html.

www.laier.com/de/produkts/innenruettler.pho;

www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe

www.pktrucks.com/de/stock/view/me2001

www.probas.umweltamt.de/...

www.verivox.de/power/cityspecial...