

Abschlussbericht

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Mehraufwand für innovative Ansätze zum Klima- und ressourcenschonendem Bauen bei der Umweltstation der Stadt Würzburg (KlimResBau)

gefördert unter dem AZ: 33520/02-35/0 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Antragsteller

Stadt Würzburg, „DIE STADTREINIGER“
Äußere Aumühlstraße 5
97076 Würzburg
Wolfgang Kleiner, Jürgen Schmitt



Kooperationspartner

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.
(ZAE Bayern)
Magdalene-Schoch-Str. 3
97074 Würzburg
Ronny Kastner, Stephan Weismann, Dr. Hans-Peter Ebert



balda architekten GmbH
Kurt-Huber-Ring 9
82256 Fürstenfeldbruck
Franz Balda



Kooperationspartner

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
Fakultät 2 Umwelt und Naturwissenschaften, Arbeitsgebiet Bauliches Recycling
Siemens-Halske-Ring 8
03046 Cottbus
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Steffen Jacob M.Sc. unter Mitarbeit von
Viktoria Arnold, Jakob Fischer



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Datum: 31.03.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einsatz von Recycling-Beton	6
1.1	Beschreibung des Bauvorhabens	6
1.2	Einführung Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton), rechtliche Regelungen	13
1.3	Recherche, gezielte fachliche Unterstützung	18
1.3.1	Identifikation örtlicher RC-Baustofflieferanten und Betonhersteller	18
1.3.2	Gezielte Unterstützung der RC-Baustofflieferanten und Betonhersteller	19
1.4	Begleitung der Umsetzungsmaßnahmen	21
1.4.1	Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton	22
1.4.2	Herstellung des RC-Betons.....	31
1.4.3	Beurteilung der Verarbeitung von RC-Beton und der Bauausführung	44
1.5	Bewertung des Einsatzes von RC-Beton im Vergleich zu Normalbeton	46
1.5.1	Ökobilanzielle Betrachtung - Einführung	46
1.5.2	Stoffstromanalyse	48
1.5.3	Aufwendungen bei der Herstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewinnung..	55
1.5.4	Energetische Betrachtung zur Bereitstellung der Gesteinskörnungen für die Betonherstellung.....	58
1.6	CO ₂ e-Emissionen für die Bereitstellung der RC-GK, von Kies und Sand	61
1.6.1	Synopse der energetischen Aufwendungen von RC-Beton und Normalbeton.....	65
1.6.2	Umweltrelevanz	71
1.6.3	Kosten	80
1.7	Umweltkommunikation.....	82
1.8	Empfehlungen für den künftigen Einsatz von RC-Beton.....	84
	Literaturverzeichnis	86
2	LCA Analyse	89
2.1	Grundlagen und Vorgehensweise	89

2.1.1	ÖKOBAUDAT und Software-Tools.....	89
2.1.2	Lebenszyklus	90
2.1.3	Ausführungsvariante und RC-Beton.....	93
2.1.4	Produktdeklaration (EPD)	93
2.2	LCA Ergebnis der Elementmethode nach LEGEP	95
2.2.1	Auswirkungen der Ökobaudat am Beispiel der PLUS Variante mit Pelletheizung .	97
2.2.2	Detailauswertung der LCA Ergebnisse.....	98
2.3	LCA Gesamtergebnisse – Detailanalyse nach Leistungspositionen	105
2.3.1	Grundlagen der Bewertung	105
2.3.2	LEGEP 2018 mit der Ökobaudat 2017	113
2.4	Gesamtergebnisse.....	114
2.4.1	Umwelteinträge nach Lebenszyklusphasen ohne die PV-Anlage	115
2.4.2	Umwelteinträge nach Kostengruppen	116
2.4.3	Auswirkungen der PV-Anlage auf das Gesamtgebäudeergebnis des Treibhauspotenzial (GWP).....	119
2.5	Vergleich der Detailergebnisse nach Leistungspositionen.....	122
2.5.1	Detailvergleich der Herstellungsphase A1-A3	122
2.5.2	Detailvergleich zwischen Gebäude und Betrieb	130
2.6	Veränderungen in der DGNB Bewertung 2018 zu 2015.....	131
2.7	Zusammenfassung	134
3	Installation und Durchführung Monitoring der aktiven innovativen Bauteile	136
3.1	Systembeschreibung	136
3.2	Inbetriebnahme.....	137
3.3	Monitoring.....	137
4	Öffentlichkeitsarbeit	143
5	Danksagungen.....	148
	Anhang – Einsatz von Recycling-Beton.....	149

Abbildungsverzeichnis..... 166
Tabellenverzeichnis..... 170
Abkürzungsverzeichnis..... 174

1 Einsatz von Recycling-Beton

1.1 Beschreibung des Bauvorhabens

Der Freistaat Bayern unterhält insgesamt 55 Umweltstationen. Die Umweltstationen dienen als Umweltbildungseinrichtungen für interessierte Bürger aller Altersgruppen. Am Standort in Würzburg wurde die Umweltstation anlässlich der Landesgartenschau 1990 errichtet. Folgende Angebote stehen zur Verfügung (Auswahl)¹.

- Abfall-, Umwelt- und Energieberatung,
- Umweltbildung für Kinder, Jugendliche und Erwachsene,
- Vorträge und Führungen und
- Öffentlichkeitsarbeit in den Bereichen Abfallwirtschaft, Umwelt- und Naturschutz.

Nach rund 30 Betriebsjahren hat sich der Eigenbetrieb der Stadt Würzburg „Die Stadtreiniger“ aus u.a. Kapazitätsgründen für einen Neubau in unmittelbarer Nähe des alten Gebäudes entschlossen. Das alte Gebäude der Umweltstation wurde nach Bezug des Neubaus rückgebaut. Bereits in der Planung wurde festgelegt, das Gebäude unter Nachhaltigkeitsprämissen zu bauen und zu bewirtschaften. Das klima- und ressourcenschonende Leuchtturmprojekt zeichnet sich aus durch:

- den Einsatz von Recycling-Beton mit einem ökologischen Zement (CEM III),
- eine verbesserte Dämmung der Gebäudehülle sowie
- dem konsequenten Einsatz von PV zur Realisierung eines bilanziellen Nullenergiehaus-Konzepts,
- den Einsatz eines Eisspeichers für Heiz- und Kühlzwecke.

Damit erhält dieses Projekt Modellcharakter. Abbildung 1 zeigt die Visualisierung der Umweltstation. Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigt das fertiggestellte Gebäude.

¹ vgl. http://www.umweltbildung.bayern.de/qualitaetssiegel/partner/ust_stadt_wuerzburg/index.htm aufgerufen am 01.06.2018



Abbildung 1: Visualisierung des Siegerentwurfes der geplanten Umweltstation der Stadt Würzburg.
© balda architekten



Abbildung 2: Ansicht der Umweltstation von außen. © Stadt Würzburg - Baureferat/FA Tiefbau



Abbildung 3: Innenansicht der Umweltstation mit Begrünung und Baum. © ZAE Bayern



Abbildung 4: Vogelperspektive der Umweltstation mit PV-Anlage und Solarabsorber auf dem Dach. © Stadt Würzburg - Baureferat/FA Tiefbau

Der Neubau der Umweltstation in Würzburg wird als zweigeschossiger Massivbau in Ortbetonbauweise mit elliptischem Grundriss ausgeführt.

Die wichtigsten Eckdaten des Projektes sind der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Eckdaten zum Neubau der Umweltstation

Bauherr	Stadt Würzburg Die Stadtreiniger
Bauzeit (Rohbau)	11/2016 – 09/2017
Bauweise	zweigeschossiger Massivbau in Ortbetonbauweise
Fördermittelgeber	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)
Beteiligte Forschungseinrichtungen	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) Magdalene-Schoch-Straße 3 97074 Würzburg BTU Cottbus – Senftenberg Arbeitsgebiet Bauliches Recycling Siemens-Halske-Ring 8 03046 Cottbus
Baurechtliche Einordnung	<ul style="list-style-type: none"> - gem. Art. 2 Abs. 3 der BayBO als Gebäude der Gebäudeklasse 3 klassifiziert - Gebäudehöhe + 3,84 m (OKF Obergeschoss) - Attikahöhe + 8,05 m - Gesamthöhe + 9,12 m (OK Dachoberlicht)
Nutzung	Einzel- und Doppelbüros sowie Seminarräume für den Verwaltungs- und Lehrbereich
Betonmenge geplant gemäß Ausschreibungs- unterlagen	620 m ³
eingesetzt	~ 650 m ³ davon ~ RC-Beton 480 m ³ (≙ 74 %)
Gründung	Tiefengründung mit Stahlbetonbohrpfählen Ø 35 cm aus Normalbeton
Ausführung Bauteile mit RC-Beton	Bodenplatte EG und alle aufgehenden Wände und Decke und Dach aus RC-Beton

Nachstehende Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die vom Tragwerksplanungsbüro erarbeiteten Schnitte der in Ellipsenform ausgebildeten Umweltstation.

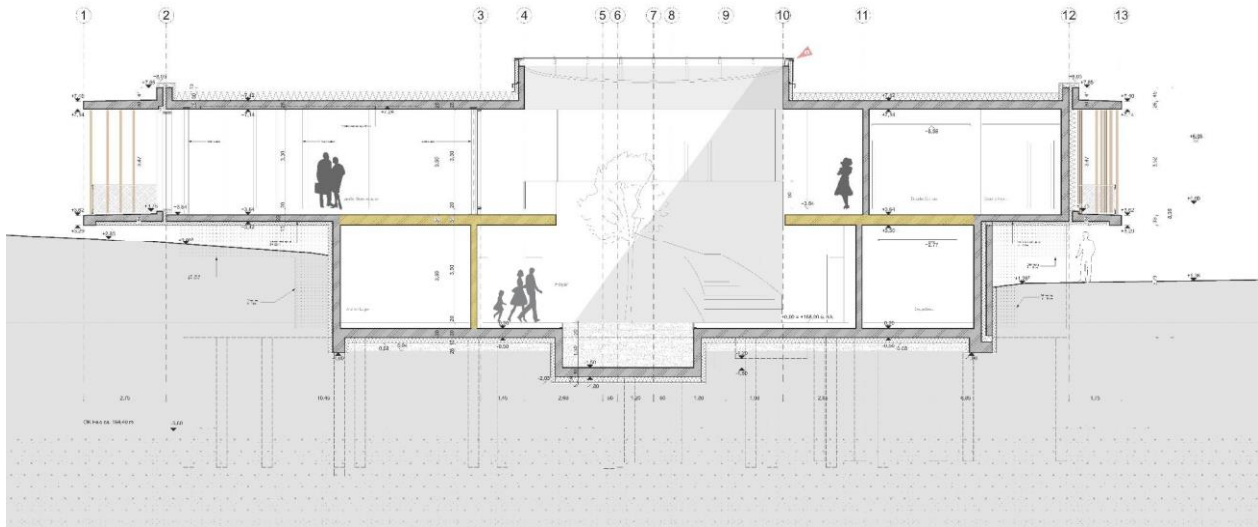


Abbildung 5: Umweltstation - Schnitt in Längsrichtung [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel]

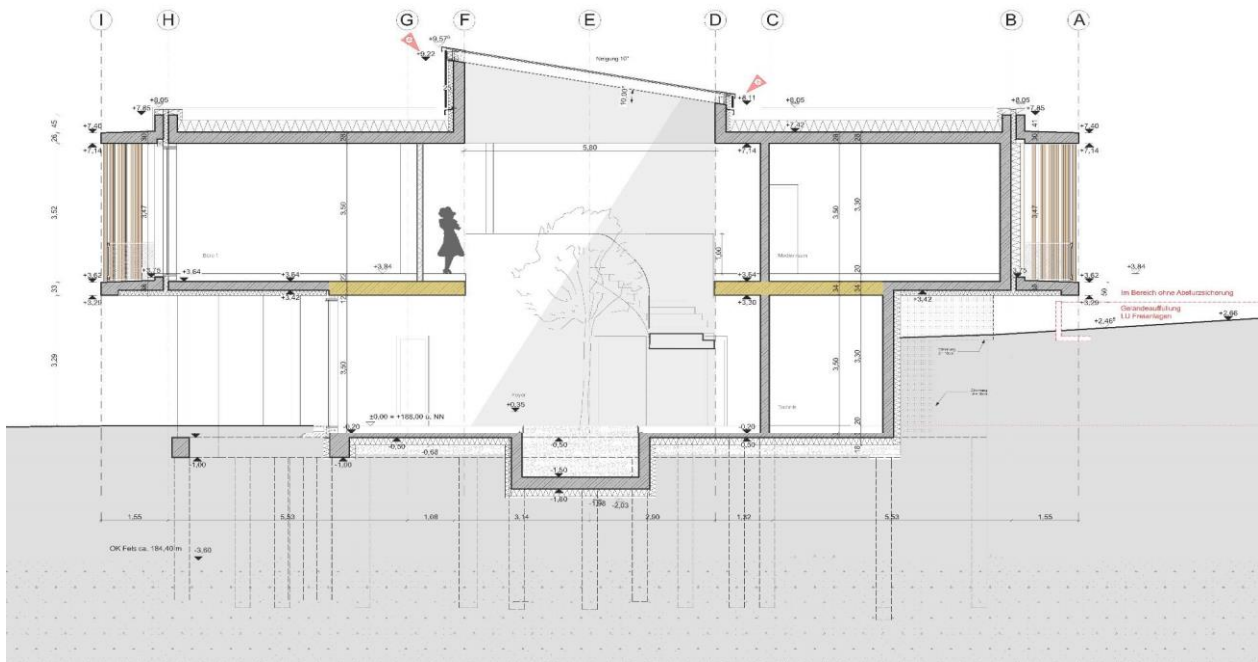


Abbildung 6: Umweltstation – Schnitt in Querrichtung [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel]

Abbildung 7 gibt die isometrische Darstellung der Umweltstation im Überblick wieder.

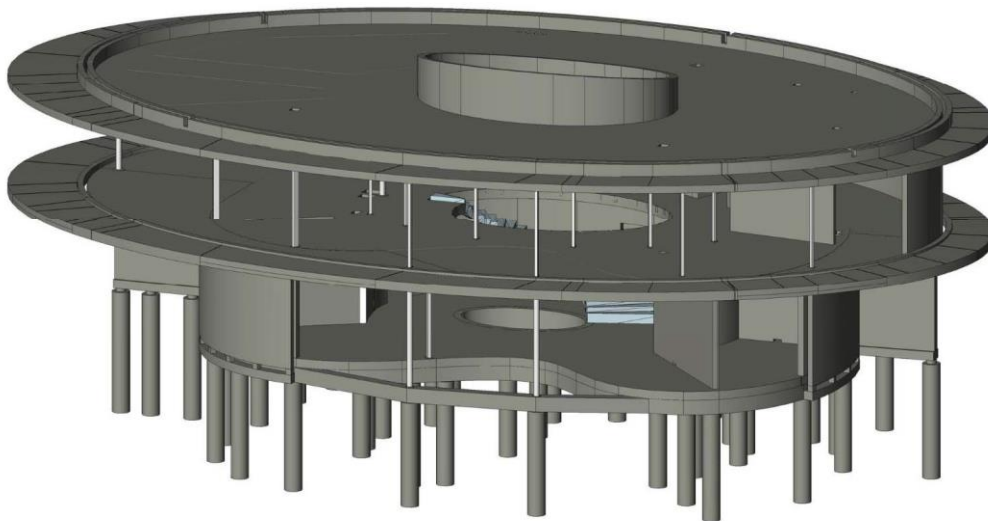


Abbildung 7: Umweltstation – Isometrische Darstellung Umweltstation – Schnitt in Querrichtung [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel]

In Tabelle 2 sind ausgewählte bautechnische Parameter zusammengefasst.

Tabelle 2: Ausgewählte bautechnische Parameter und geplante Betonmengen für den Neubau der Umweltstation [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel]

Bauteil	Betondruckfestigkeitsklasse	Expositions-klasse	Feuchtigkeits-klasse	Betonmenge [m ³]	davon RC-Betonmengen [m ³]
	DIN EN 206-1 Tabelle 7	DIN 1045-2 Tabelle 1			
Bohrpfähle (Normalbeton)	C20/25	XC2	WF	k.A.	
Bodenplatte	C30/37	XC2	WF	106	
Wände EG (außen WDVS) (ohne WDVS)	C20/25	XC1	WO	80	
	C25/30	XC4, XF1	WF	35	

Decke über EG Balkon EG	C30/37	XC1	WO	126	
	C30/37	XC4, XF1	WF	45	
Wände OG (au- ßen WDVS)	C20/25	XC1	WO	47	
Decke über OG Vordach OG	C30/37	XC3	WO	137	
	C30/37	XC4, XF1	WF	44	
Summe Be- tonsorten Nor- malbeton und RC-GK	C20/25	XC1	WO	127	44
	C25/30	XC4, XF1	WF	35	158
	C30/37	XC1, XC2, XC3	WO	369	277
	C30/37	XC4, XF1	WF	89	
Gesamtmenge [m³]				620	480

Der Tabelle 2 ist entnehmbar, dass für die Umweltstation eine Betonmenge von rund 620 m³ geplant wurde. Die Auswertung der Lieferprotokolle ergibt eine verbaute Gesamtbetonmenge in Höhe von 647 m³. Die Ist-Menge an RC-Beton 480 m³ entspricht der tatsächlich verbauten Menge.

1.2 Einführung Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton), rechtliche Regelungen

Zum Einstieg in die Thematik wird erläutert, was unter Recycling-Beton (kurz RC-Beton) zu verstehen ist und welche rechtlichen Regelungen in Deutschland gelten. Abbildung 8 zeigt schematisch, aus welchen Materialien sich ein Normal-/ Primärbeton im Vergleich zum Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (kurz RC-Beton) zusammensetzt. Ersichtlich ist, dass der Unterschied lediglich darin besteht, natürliche Gesteinskörnungen (Kies oder Splitt) **anteilig** durch rezyklierte Gesteinskörnungen (kurz RC-GK) zu ersetzen.

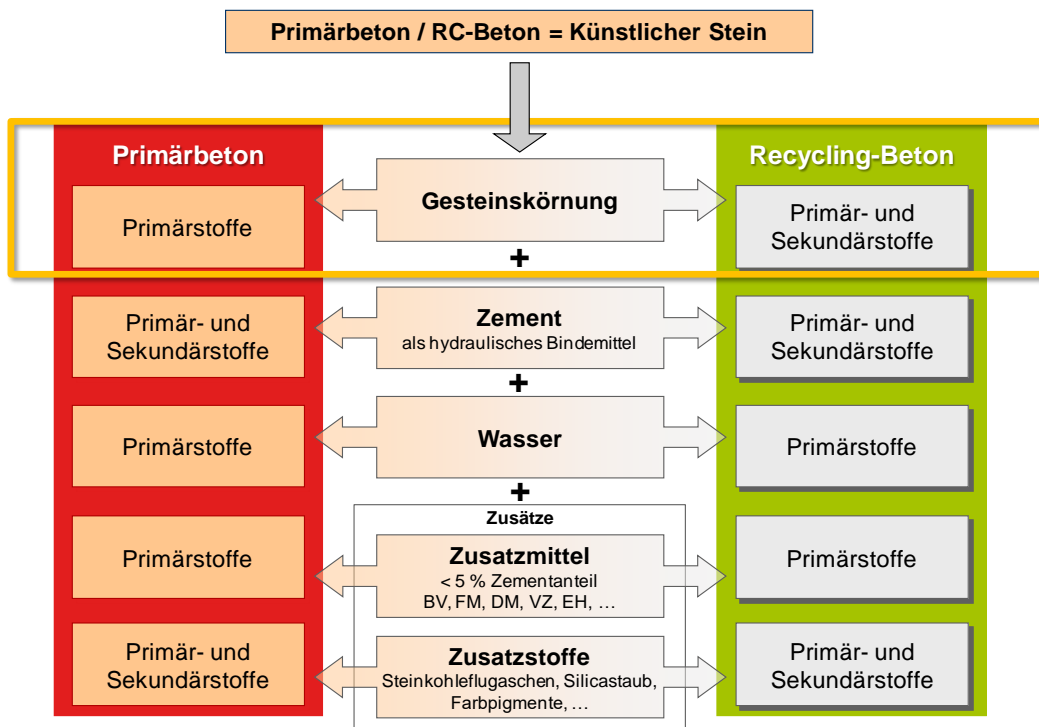


Abbildung 8: Synopse Zusammensetzung Primärbeton mit RC-Beton [Mettke]

Tabelle 3 stellt die in Deutschland geltenden Normen und Regelwerke auf europäischer und nationaler Ebene zur Herstellung von Beton inkl. der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen dar.

Die harmonisierte DIN EN 12620:2008-07 legt die **bautechnischen Eigenschaften** von Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton im Hochbau fest und bildet damit die Grundlage für die erforderliche CE-Kennzeichnung der Gesteinskörnung. Mit dem CE-Kennzeichen dokumentiert der Hersteller, „dass er die Verantwortung für die Übereinstimmung des Bauprodukts mit der

in der Leistungserklärung angegebenen Leistung sowie die Einhaltung aller einschlägigen europäischen Rechtsvorschriften übernimmt.“²

Unter Berücksichtigung der genannten Normen und Regelwerke des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) ist keine weitere Nachweisführung für die normkonforme Herstellung und Verwendung von Recycling-Beton notwendig.

Tabelle 3: Überblick derzeit geltender Regelwerke für die Herstellung von Recycling-Beton [Mettke], Stand 06/2018

Europäische Produktnorm / Deutsche Fassung	Mitteltende deutsche Normen und Regelwerke
Gesteinskörnungen für Beton	
<p>DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008</p>	<p>Umweltverträglichkeit DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen</p> <p>Qualitätssicherung DIN 4226-102:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle</p> <p>DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Reaktion)“, Ausgabe 2013-10</p>
Beton	
<p>DIN EN 206-1: 2001-07 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität;</p>	<p>DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1</p> <p>DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Teil 1, Ausgabe 2010-09</p>

Die spezifischen Anforderungen an die RC-GK werden im Folgenden näher betrachtet. Die Richtlinie des DAfStb³ beschreibt Regelanforderungen, die bei der Verwendung von der RC-GK im Beton erfüllt werden müssen. Die Druckfestigkeit wird auf maximal C30/37 begrenzt, die Herstellung von Leicht- und Spannbeton ist nicht zulässig. Der Substitutionsgehalt der RC-GK im Beton ist von der Feuchtigkeits- und Expositionsklasse des Betons am Ort der Verwendung abhängig (s. Tabelle 4).

² Die neue Bauprodukte-Verordnung, Hrsg. Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V., Berlin 2012, S.5

³ DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

Tabelle 4: Restriktionen zum Einsatz von RC-Beton⁴

Restriktionen	Feuchtigkeitsklassen DAfStb-Alkali-Richtlinie, 2013-10	Expositionsklassen nach DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle 1	DAfStb-Rili Beton mit rezyklierten GK 2010-09	
			Typ 1 Betonsplitt	Typ 2 Bauwerk- splitt
Zulässige Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm bezogen auf gesamte Gesteinskörnung	WO (trocken)	Carbonatisierung XC1	≤ 45 Vol. %	≤ 35 Vol. %
	WF (feucht)	kein Korrosionsrisiko X0 Carbonatisierung XC1 – XC4		
		Frost ohne Taumittleinwirkung XF1¹⁾ + XF3¹⁾ und im Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35 Vol. %	≤ 25 Vol. %
		Schwacher chemischer Angriff XA1	≤ 25 Vol. %	
Bautechnik Restriktionen keine Verwendung von RC-GK im Spann- und Leichtbeton	Korngröße der RC-GK		d ≥ 2 mm	
	Druckfestigkeit		≤ C 30/37	
Regelanforderungen	Kornrohddichte		≥ 2.000 kg/m ³ (± 150 kg/m ³)	
	Wasseraufnahme nach 10 min		≤ 10 M.-%	≤ 15 M.-%
	Säurelösliches Chlorid		≤ 0,04 M.-%	
	Säurelösliches Sulfat		≤ 0,8 M.-%	

Entsprechend der DIN 4226-101 werden RC-GK hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung in vier (Liefer-)Typen für RC-GK unterschieden (s. Tabelle 5).

Die DAfStb-Rili gilt für die Verwendung von RC-GK der Typen 1 und 2 zur Herstellung und Verarbeitung des Betons nach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1. Werden RC-Betone mit den angegebenen Höchstwerten hergestellt, dürfen sie nach DIN 1045-1 – wie o.a. – bemessen werden. In der Praxis wird gegenwärtig hauptsächlich RC-GK vom Typ 1 Betonsplitt zur Herstellung von RC-Beton verwendet. Typ 1 und 2 sind in Abbildung 9 fotodokumentiert. Die RC-GK vom Typ 3 und 4 werden für unbewehrte, nicht konstruktive Betonbauteile und –waren verwendet.

⁴ DAfStb-Richtlinie (kurz: DAfStb-Rili) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.



Abbildung 9: RC-GK Typ 1 Betonsplitt, Typ 2 Bauwerksplitt [Mettke].

Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung der verschiedenen Liefertypen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen⁵

Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620			DIN 4226-101:2017-08 Tab. 1 für Beton <u>nach</u> DIN 1045-2:2008-08		DIN 4226-101:2017-08 Tab. 1 für Beton <u>außerhalb</u> DIN 1045-2:2008-08	
			Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Rc	Rc +	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	Rcu ₉₀	Rcu ₇₀	Rcu ₂₀ ^a	Rcu + Rb ₈₀ ^a
		Ru				
Rb		Mauerziegel, Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton	Rb ₁₀ -	Rb ₃₀ -	Rb ₈₀ ^b	
Ra		Bitumenhaltige Materialien	Ra ₁ -	Ra ₁ -	Ra ₁ -	Ra ₂₀ -
X + Rg		Glas	XRg ₁ -	XRg ₂ -	XRg ₂ -	XRg ₂ -
		Sonstige Materialien				
FL ^c		Schwimmendes Material	FL ₂ -	FL ₂ -	FL ₂ -	FL ₅ -

a) Als Kategorie „angeben“
b) Der Anteil von Kalkstein ist auf maximal 5 M.-% begrenzt. Rb darf dann 85 M.-% betragen
c) Wenn besondere Oberflächeneigenschaften des Betons erforderlich sind, kann die Vereinbarung niedriger Gehalte an aufschwimmenden Bestandteilen angezeigt werden (s. DIN EN 12620:2008-07 Anhang G).

⁵ Nach DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 1

Neben den bautechnischen Anforderungen müssen gemäß der DAfStb-Rili „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ rezyklierte Gesteinskörnungen umweltverträgliche Anforderungen erfüllen. D.h., RC-GK dürfen nur verwendet werden, wenn diese keine umweltschädlichen Auswirkungen haben. Der **Nachweis der Umweltverträglichkeit** ist nach DIN 4226-101:2017-08 zu erbringen. Höchstwerte der Eluat- und Feststoffparameter sind darin festgelegt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Höchstwerte für Eluat- und Feststoffparameter⁶

Eigenschaft / Parameter	Einheit	Höchstwerte
Feststoff		
EOX	[mg/kg]	10
MKW	[mg/kg]	1.000 ^a
PAK nach EPA	[mg/kg]	25
PCB	[mg/kg]	1
Eluat		
pH-Wert	-	12,5 ^b
Elektr. Leitfähigkeit	[μ S/cm]	3.000
Sulfat	[mg/l]	600
Chlorid	[mg/l]	150
Arsen	[μ g/l]	50
Cadmium	[μ g/l]	5
Chrom (ges.)	[μ g/l]	100
Kupfer	[μ g/l]	200
Nickel	[μ g/l]	100
Blei	[μ g/l]	100
Zink	[μ g/l]	400
Quecksilber	[μ g/l]	2
Phenolindex	[μ g/l]	100
<small>a Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar b kein Ausschlusskriterium</small>		

⁶ Höchstwerte nach DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tab. 2

1.3 Recherche, gezielte fachliche Unterstützung

1.3.1 Identifikation örtlicher RC-Baustofflieferanten und Betonhersteller

Im Vorfeld der Baumaßnahme wurden Firmen für die Lieferung der RC-GK eruiert, die Mitglied im Baustoff Recycling Bayern e.V. sind und zertifizierte RC-Baustoffe anbieten. Gleiches gilt für die Betonhersteller im Raum Würzburg. Die kontaktierten Unternehmen sind der Liste im Anhang 1 zu entnehmen. Ein Augenmerk der Recherche belief sich darauf, aus ökologischen Gründen Unternehmen zu wählen, die sich im Umkreis von etwa 30 bis 40 km zur Umweltstation befinden. Den im Anhang 1 aufgeführten Unternehmen ist per E-Mail ein Anschreiben (s. Anhang 2) zugegangen in dem darauf hingewiesen wurde, dass der Neubau der „Umweltstation Würzburg“ in Kürze ausgeschrieben wird mit der Besonderheit, für den Rohbau anstelle von Beton RC-Beton zu verbauen.

Allen interessierten Unternehmen wurde fachliche bzw. beratende Unterstützung zur Herstellung von RC-GK und RC-Beton angeboten. In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die Unternehmen aufgeführt, die auf das Anschreiben reagiert haben. Fett gedruckt sind die Unternehmen, welche vom beauftragten bauausführenden Unternehmen Georg Göbel GmbH (Hochbau) als Unterauftragnehmer eingebunden worden sind.

Tabelle 7: Recyclingunternehmen im Raum Würzburg, die auf das Anschreiben / die Bekanntmachung der Ausschreibung zum Neubau der Umweltstation reagiert / Interesse bekundet haben

Unternehmen	Entfernung Umweltstation [km]	Bemerkungen / Rückmeldungen
Baltasar Höhn Bauunternehmen GmbH & Co. KG	8	gemeldet am 04.11.2016; Vororttermin Fa. Höhn am 30.11.16
Beuerlein GmbH & Co. KG	33	über Hr. Sauer, Fa. Wüffert gemeldet
Heidelberger Sand und Kies GmbH	30	gemeldet am 10.11.2016

Tabelle 8: Betonunternehmen im Raum Würzburg, die auf das Anschreiben / die Bekanntmachung der Ausschreibung zum Neubau der Umweltstation reagiert / Interesse bekundet haben

Unternehmen	Entfernung Umweltstation [km]	Bemerkungen
LZR Lenz- Ziegler- Reifenscheid GmbH	25	gemeldet am 14.11.2016; tel. Rücksprache 24.11.16, gemeinsame Vorversuche zum RC-Beton
Heidelberger Beton GmbH	31	gemeldet am 09.11.2016
Wüffert GmbH & Co. KG	30	gemeldet am 04.11.2016; mehrere tel. Rückfragen

1.3.2 Gezielte Unterstützung der RC-Baustofflieferanten und Betonhersteller

Die Fragen oder Bedenken der Gesteinskörnungs- und Betonproduzenten waren dabei ähnlich; es besteht i.d.R. Unkenntnis darüber, welche Materialeigenschaften zu prüfen und welche Prüfungen durchzuführen sind. Es fanden teilweise Vororttermine mit den o.a. Unternehmen statt – bei den RC-Anlagenbetreibern mit gesonderter Beratung mit Blick auf das Ausgangsmaterial, den Aufbereitungsprozess und das Zielprodukt, bei den Betonproduzenten mit Blick v.a. auf die Rezeptur und den Herstellungsprozess.

Nachstehende Tabelle 9 gibt eine Übersicht zur geplanten Menge und zur Beanspruchung der RC-Betone nach Einbauort im Gebäude. Daraus konnte die benötigte RC-GK Menge hochgerechnet werden. Der untere Teil der Tabelle 9 fasst die RC-GK- und RC-Betonmengen unterteilt nach Festigkeits- und Expositionsclassen zusammen: für den Einsatz von rund 620 m³ RC-Beton werden rund 450 t RC-GK benötigt.

Die Unterauftragnehmer der Georg Göbel GmbH wurden vorbereitend und über den gesamten Realisierungszeitraum des Bauvorhabens „Umweltstation“ und auch darüber hinaus unterstützt. Die generellen bau- und umwelttechnischen Anforderungen, die an die RC-GK- und den RC-Beton gestellt werden, sind im Kapitel 1 aufgeführt.

Fazit: RC-Baustofflieferanten und Betonhersteller wurden im Raum Würzburg identifiziert. Allen Unternehmen wurden seitens der BTU Cottbus – Senftenberg, Arbeitsgebiet Bauliches Recycling persönliche Beratungen und Informationen über die Besonderheiten bei der Herstellung von RC-GK und RC-Beton angeboten und angenommen.

Tabelle 9: Übersicht zu den geplanten und zu den verbauten Mengen an RC-Betonen

Einbauort im Gebäude	Beton-festigkeit	Expositions-klasse	Feuchtigkeits-klasse	Beton-menge [m³]	max. RC-Anteil (Vol.-% ⁷)	RC-GK Menge Hochrechnung ⁸	
					Typ 1	Menge (kg/m³)	Gesamtmasse [t] ca. / gerundet
Vordach OG	C 30/37	XC4, XF1	WF	44	≤ 35	Anmerkung: Üblicherweise werden zur Herstellung von Beton Gesteinskörnungen mit der Korngröße 2/8, 8/16 oder 16/32 verwendet.	
Dach	C 30/37	XC3	WO	137	≤ 45		
Wände OG	C 20/25	XC1	WO	47	≤ 45		
Balkon EG	C 30/37	XC4, XF1	WF	45	≤ 35		
Decke über EG	C 30/37	XC1	WO	126	≤ 45		
Wände EG	C 20/25	XC1	WO	80	≤ 45		
Wandschotte	C 25/30	XC4, XF1	WF	18	≤ 35		
Sichtbetonwände im Eingangsbereich	C 25/30	XC4, XF1	WF	17	≤ 35		
Bodenplatte	C 30/37	XC2	WF	106	≤ 45		
Treppenlauf				5			
Einsatz RC-Beton Gesamtübersicht	C 30/37	XC4, XF1	WF	89	≤ 35	560 – 600	50
	C 30/37	XC3	WF	369	≤ 45	720 – 770	280
	C 20/25	XC1	WO	127	≤ 45		100
	C 25/30	XC4, XF1	WF	35	≤ 35	560 – 600	20
	Gesamtbetonmenge [m³]				~ 620	Gesamtmenge RC-GK Liefertyp 1 zur Herstellung von Beton [t]	
Gesamtbetonmenge verbaut [m³]				~ 647	Verbaute Gesamtmenge RC-GK Liefertyp 1 zur Herstellung von Beton [t]		~ 366

⁷ DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe 2010-09, Tabelle 5

⁸ Hochrechnung nach normativen Vorgaben für den Einsatz von RC-Beton in Abhängigkeit der Umweltbeanspruchungen und aus wissenschaftlich begleiteten Projekten zum Einsatz von RC-Beton (vgl. <https://www-docs.b-tu.de/ag-baurecycling/public/Forschungsberichte/Dokumentation%20Beton.pdf>) und vgl. <https://www-docs.b-tu.de/ag-baurecycling/public/Forschungsberichte/RC-Beton-Untersuchungsergebnisse.pdf>)

Anmerkung: Zum Einsatz gekommen sind im Beton in Ludwigshafen die Körnungen 2/8 und 8/16 (im Verhältnis von etwa 1:2) und in Berlin die Körnung 8/16, die komplett durch RC-GK ersetzt wurde.

1.4 Begleitung der Umsetzungsmaßnahmen

(entspricht AP 2 laut Leistungsangebot vom 21.12.2016)

Als bauausführendes Unternehmen wurde vom Bauherrn die Georg Göbel GmbH (Hochbau) beauftragt, welche das Transportbetonunternehmen Wüffert GmbH & Co. KG als Unterauftragnehmer eingebunden hat. Die Wüffert GmbH & Co. KG hat den RC-Baustoffproduzenten Beuerlein GmbH & Co. KG mit der Lieferung der RC-GK beauftragt. (Durch Umstrukturierungsprozesse im Unternehmen Wüffert erfolgte nach der Realisierung des Rohbaus der Umweltstation im Dezember 2017 eine Unternehmensänderung zu Beuerlein Transportbeton GmbH & Co. KG.). Der Ansprechpartner im Unternehmen Wüffert GmbH & Co. KG zur Zeit der Errichtung der Umweltstation war der Geschäftsführer Frank Sauer. Abbildung 10 gibt einen groben Überblick zu den bei der Rohbauerstellung beteiligten Unternehmen.

Neubau Umweltstation Würzburg, Zeller Straße 44, 97082 Würzburg



Abbildung 10: Beteiligte Bau- und Recyclingunternehmen bei der Erstellung des Rohbaus der Umweltstation Würzburg.

1.4.1 Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton

– **Untersuchungen des Betonbruchs vor Anlieferung an die Recycling-Anlage**

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der RC-GK wurde reiner Betonbruch aufbereitet. Er entstammt aus einem Brückenabbruch der BAB A3 nahe Helmstadt (Autobahnkilometer 266), das dem Baustoffaufbereiter angeliefert wurde.

Vor Anlieferung beim Baustoffaufbereiter wurde der erzeugte Betonbruch hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von der isu umweltinstitut GmbH im Auftrag der Autobahndirektion Nordbayern analysiert. Untersucht wurde der Betonbruch gemäß des bayerischen RC-Leitfadens „Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken“ (RC-Leitfaden), Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Das heißt, es wurde eine Prüfung für den hauptsächlich ungebundenen Einsatz bspw. im Straßenbau geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 wiedergegeben. Für den Einsatz der RC-GK im Beton zur Prüfung der Umweltverträglichkeit ist jedoch die DIN 4226-101 maßgebend. Dementsprechend ist auch die Tabelle 10 aufgebaut.

Im Ergebnis der isu umweltinstitut GmbH zeigt sich, dass das Material alle Prüfwerte für RW 1 und RW 2 einhält mit Ausnahme des Prüfparameters Phenolindex. Das RC-Material wäre gemäß RW 2 aus wasserwirtschaftlicher Sicht in ungebundener Form nur mit technischen Sicherungsmaßnahmen einbaufähig.

Gemäß der geltenden DIN 4226-101: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen werden alle geprüften Prüfparameter sicher eingehalten resp. unterschritten. *Im Rahmen des ungebundenen Einsatzes der RC-GK (s. RC-Leitfaden) ist die Untersuchung des Prüfparameters PCB nicht vorgeschrieben.* Die Untersuchung nach der Aufbereitung des angelieferten Betonbruchs ergab, dass der Wert für PCB unter der Bestimmungsgrenze liegt (s. Tabelle 13).

Tabelle 10: Untersuchungsergebnisse zur Umweltverträglichkeit am Betonbruch vor der Aufbereitung (zusammengefasst aus Prüfprotokollen der isu umweltinstitut GmbH⁹)

Parameter	Einheit	Höchstwert			Istwert		Ergebnisse					
		DIN 4226-101 ¹⁰	RC-Leitfaden ¹¹		Probe 1610526-1 ¹²	Probe 1610526-2 ¹³	Probe 1			Probe 2		
			RW 1	RW 2			DIN 4226-101	RW1	RW2	DIN 4226-101	RW1	RW2
Eluat												
pH-Wert		12,5 ^a	ist anzugeben		11,9	12,0	✓	✓	✓	✓	✓	✓
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	3.000 ^a	2.000	8.000	1.400	1.840	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Chlorid	mg/l	150	125	300	1,6	2,6	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Sulfat	mg/l	600	250	1.000	< 2,0	< 2,0	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Arsen	µg/l	50	10	60	< 5	< 5	✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Blei	µg/l	100	40	200	< 5	< 5	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Cadmium	µg/l	5	2	10	< 0,5	< 0,5	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Chrom (gesamt)	µg/l	100	50	150	< 5	< 5	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Kupfer	µg/l	200	50	300	< 5	< 5	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Nickel	µg/l	100	50	200	< 5	< 5	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Quecksilber	µg/l	2	0,5	2	< 0,2	< 0,2	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Zink	µg/l	400	100	600	< 50	< 50	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Phenolindex	µg/l	100	20	100	100	120	✓	X	✓	X	X	X
Feststoff												
Kohlenwasserstoffe	mg/kg	1.000 ^b	300	1.000	< 100	< 100	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
PAK nach EPA	mg/kg	25	5	20	nicht quantifizierbar		✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
EOX	mg/kg	10	3	15	< 1,0	1,8	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
PCB	mg/kg	1				nicht geprüft		< BG			< BG	
^a kein Ausschlusskriterium ^b Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar. ✓ zulässiger Höchstwert unterschritten ✓✓ zulässiger Höchstwert weit unterschritten, X zulässiger Höchstwert überschritten BG - Bestimmungsgrenze												

⁹ S. Anhang 3

¹⁰ nach DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 2

¹¹ Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2005, Anlage 1

¹² Nach Analysebericht 141117-78 der isu umweltinstitut GmbH vom 03.11.2016

¹³ Ebd.

– **Aufbereitung des Betonbruchs**

Der Betonbruch wurde in der mobilen Aufbereitungsanlage der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG am Standort Helmstadt aufbereitet. Die mobile Aufbereitungseinheit besteht aus einem raupenmobilen Prallbrecher der Firma RUBBLE MASTER HMH GmbH mit angebautem Decksieb zur Herstellung unterschiedlicher Körnungen (s. Abbildung 11).



Abbildung 11: Prallbrecher (gelb) zur Aufbereitung des Betonbruchs [Steffen Beuerlein].

Für die Herstellung von Beton sind die groben enggestuften Gesteinskörnungen 2/8, 8/16, 16/32 üblich¹⁴. Entsprechend der Absprachen mit dem Betonhersteller wurde die Körnung 2/16 für die Herstellung der RC-Betone gewählt und von der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG produziert.

– **Bewertung der eingesetzten RC-Gesteinskörnung**

Die produzierten RC-GK 2/16 wurden hinsichtlich der bautechnischen Eignung und der Umweltverträglichkeit nach den Vorgaben der DIN EN 12620 und DIN 4226-101 geprüft. Für die Expositionsklassen XC2 und XC4 wurde die RC-GK 2/16 der Firma Beuerlein eingesetzt. Für die Expositionsklasse XC4 / XF1 wurde die im Betonwerk vorrätige RC-GK 2/16 der Firma Feess verwendet.

Die **Analyseergebnisse** der RC-GK 2/16 der Firma Beuerlein sind in den nachstehenden Tabelle 11 bis 13 und die der Firma Feess in den Tabellen 14 bis 16 zusammengefasst.

¹⁴ Gesteinskörnungen für Normalbeton – Zement-Merkblatt Betontechnik B 2, 1.2012, Hrsg.: InformationsZentrum Beton GmbH

Tabelle 11: Stoffliche Zusammensetzung der RC-GK 2/16 der Beuerlein GmbH & Co. KG¹⁵

Bestandteile	SOLL Kategorie der RC-Gesteinskörnung Zusammensetzung (M.-%)	IST Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung [Massenanteil]	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
	Typ 1 Betonsplitt/Betonbrechsand für Beton nach DIN 1045-2:2008-08		
R _c Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	R_{cu90} (≥ 90 M.-%)	92,0 M.-%	✓
R _u ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung		8,0 M.-%	✓
R _b Ziegel-Mauersteine (nicht poriert), Klinker, Steinzeug, Kalksandstein-Mauersteine, Verschiedene Mauer- und Dachziegel, Bimsbeton (Leichtbeton), nicht schwimmender Porenbeton	R_{b10} (≤ 10 M.-%)	0,0 M.-%	✓
R _a Bitumenhaltige Materialien, Asphalt	R_{a1} (≤ 1 M.-%)	0 M.-%	✓
AX + R _g Glas und sonstige Materialien	XR_{g1} (≤ 1 M.-%)	0,0 M.-%	✓
FL Schwimmendes Material im Volumen	FL₂ (≤ 2 cm³/kg)	0,0 cm ³ /kg	✓
✓ Anforderung erfüllt			

Feststellbar ist, dass die RC-GK die Anforderungen an den Typ 1 (vgl. Tabelle 5) einhält mit 100 % R_{cu}-Gehalt.

Die Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

¹⁵ Prüfbericht Nr. BBV 1714032/2 vom 07.04.2017

Tabelle 12: Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 2/16 der Beuerlein GmbH & Co. KG ¹⁶

Parameter	Sollwerte	Istwerte	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
Korngrößenverteilung ^a	G _C 85/20	G _C 90/15	✓
Gehalt an Feinanteilen [M.-%] ^a	≤ 4	0,4	✓✓
Stoffliche Zusammensetzung ^a	Liefertyp 1	Liefertyp 1	✓
Kornrohichte [kg/m ³] ^a	≥ 2.000	2.600	✓
Wasseraufnahme (nach 10 min) [M.-%] ^a	≤ 10	4,3	✓✓
Kornformkennzahl ^a	≤ SI ₅₅	SI ₁₅	✓✓
Frost-Tau-Widerstand ^a	F ₄	n.b.	s. Tabelle 15
Wasserlösliche Chloride [M.-%] ^b	-	< 0,005	✓
Säurelösliche Chloride [M.-%] ^a	≤ 0,04	n.b.	
Wasserlösliche Sulfate [M.-%] ^a	≤ 0,2	0,025	✓✓
Säurelösliche Sulfate [M.-%] ^a	≤ 0,8	0,28	✓✓
Gehalt an Gesamtschwefel [M.-%] ^a	≤ 1	0,25	✓✓
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen [M.-%] ^a	≤ 0,1	0,06	✓
Alkaliempfindlichkeitsklasse ^c	zu prüfen	Einstufung in: E III-S	keine Maßnahmen gegen schädigende AKR erforderlich gem. Alkali-Richtlinie Oktober 2013 Tab. 6

✓ Anforderung erfüllt
 ✓✓ Anforderung weit unterschritten
 a: Anforderung nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
 b: Anforderung nach DIN EN 12620:2008-08 Gesteinskörnungen für Beton, Hrsg.: Beuth
 c: Anforderung nach DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“, Ausgabe Oktober 2013, Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
 G_C: grobe Gesteinskörnung, erster Wert gibt den Mindestmassengehalt zwischen 2 und 16 mm an, Soll sind 85 M.-%, Ist 90 M.-%. Der zweite Wert gibt den Maximalmassengehalt für die feine Körnung 0/2 an.
 SI: Shape Index – Verhältnis der Masse nicht kubischer Körner (M₂) zur Messprobenmasse (M₁): $\frac{M_2}{M_1} * 100$ (nach DIN EN 933-4)
 F₄: Frost-Tau-Widerstand max. Masseverlust in Prozent
 E III-S: E-III steht für Gesteinskörnungen, für die gegebenenfalls vorbeugende Maßnahmen zur Vorbeugung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton erforderlich sind. S steht für weitere Gesteinskörnungen, die weder aus Gesteinskörnungen mit Opalsandsteinen einschließlich Kieselkreide noch mit Flint bestehen.

Im Ergebnis der Untersuchungen der RC-GK der Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG ist feststellbar, dass die untersuchten bautechnischen Parameter die vorgegebenen Anforderungen (s. auch Tabelle 4) erfüllen. In Auswertung der Prüfergebnisse ist jedoch festgestellt worden, dass die Untersuchungsergebnisse der säurelöslichen Chloride im Prüfprotokoll nicht dokumentiert worden sind. Der Prüfparameter Frost-Tau-Widerstand ist neben den obligatorisch geprüften bautechnischen Parametern an der RC-GK für den eingesetzten Beton mit der Expositions-klasse XF1 an der RC-Gesteinskörnung der Heinrich Feess GmbH & Co. KG untersucht worden (s. Tabelle 15).

¹⁶ Prüfbericht Nr. BBV 1714032/2 vom 07.04.2017

Tabelle 13: Analyseergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung der RC-GK 2/16 der Beuerlein GmbH & Co. KG ¹⁷

Parameter	Einheit	Höchstwert	Istwert	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
Eluat				
pH-Wert		12,5 ^a	12,2	✓
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	3.000 ^a	3.540	x
Chlorid	mg/l	150	2,0	✓✓
Sulfat	mg/l	600	6,6	✓✓
Arsen	µg/l	50	< 1	✓✓
Blei	µg/l	100	4	✓✓
Cadmium	µg/l	5	< 0,5	✓✓
Chrom (gesamt)	µg/l	100	3	✓✓
Kupfer	µg/l	200	< 10	✓✓
Nickel	µg/l	100	< 1	✓✓
Quecksilber	µg/l	2	< 0,1	✓✓
Zink	µg/l	400	< 10	✓✓
Phenolindex	µg/l	100	< 10	✓✓
Feststoff				
Mineralölkohlenwasserstoffe	mg/kg	1.000 ^b	< 50	✓✓
PAK nach EPA	mg/kg	25	< BG	✓✓
EOX	mg/kg	10	< 0,1	✓✓
PCB	mg/kg	1	< BG	✓
✓ Anforderung erfüllt ✓✓ Anforderung weit unterschritten x Anforderung überschritten, aber kein Ausschlusskriterium a) Kein Ausschlusskriterium b) Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar BG = Bestimmungsgrenze				

Die Analyseergebnisse zur Umweltverträglichkeitsprüfung der RC-GK 2/16 der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG belegen, dass die erzeugte RC-GK uneingeschränkt in dem im Bauvorhaben geforderten Betone einsetzbar ist. Lediglich die elektrische Leitfähigkeit wurde überschritten, dies stellt jedoch kein Ausschlusskriterium dar.

In nachstehenden Tabellen sind die Untersuchungsergebnisse der RC-GK 2/16 der Firma Heinrich Feess GmbH & Co. KG zusammengestellt. Im Ergebnis ist festzustellen, dass alle obligatorisch zu untersuchenden Prüfparameter der RC-GK auch für die erhöhte Beanspruchung aus der Umwelt (Expositionsklasse) XF 1 sicher erfüllt werden.

¹⁷ Prüfbericht Nr. BBV 1714032/2 vom 07.04.2017

Tabelle 14: Stoffliche Zusammensetzung der RC-GK 2/16 der Heinrich Feess GmbH & Co. KG¹⁸

Bestandteile	SOLL Kategorie der RC-Gesteinskörnung Zusammensetzung (M.-%)	IST Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung [Massenanteil]	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
	Typ 1 Betonsplitt/Betonbrechsand für Beton nach DIN 1045-2:2008-08		
R _c Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	Rcu₉₀ (≥ 90 M.-%)	98,9 M.-%	✓
R _u ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung			✓
R _b Ziegel-Mauersteine (nicht porosiert), Klinker, Steinzeug, Kalksandstein-Mauersteine, Verschiedene Mauer- und Dachziegel, Bimsbeton (Leichtbeton), nicht schwimmender Porenbeton	Rb₁₀₋ (≤ 10 M.-%)	0,0 M.-%	✓
R _a Bitumenhaltige Materialien, Asphalt	Ra₁₋ (≤ 1 M.-%)	0,6 M.-%	✓
X + R _g Glas und sonstige Materialien	XRg₁₋ (≤ 1 M.-%)	0,5 M.-%	✓
FL Schwimmendes Material im Volumen	FL₂₋ (≤ 2 cm³/kg)	0,0 cm ³ /kg	✓
✓ Anforderung erfüllt			

¹⁸ Institut Dr. Haag GmbH, Prüfbericht Nr.: 282550B

Tabelle 15: Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 2/16 der Heinrich Feess GmbH & Co. KG¹⁹

Parameter	Sollwerte ²⁰	Istwerte	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
Korngrößenverteilung	G _c 85/20	G _c 90/15	✓
Gehalt an Feinanteilen [M.-%]	≤ 4	0,4	✓✓
Stoffliche Zusammensetzung	Liefertyp 1	Liefertyp 1	✓
Kornrohddichte [kg/m ³]	≥ 2.000	2.460	✓
Wasseraufnahme (nach 10 min) [M.-%]	≤ 10	4,3	✓✓
Kornformkennzahl	≤ SI ₅₅	SI ₁₅	✓✓
Frost-Tau-Widerstand	F ₄	F ₁	✓✓
Wasserlösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,04	0,0012	✓✓
Säurelösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,04	< 0,01	✓✓
Wasserlösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,2	0,0127	✓✓
Säurelösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,8	0,21	✓✓
Gehalt an Gesamtschwefel [M.-%]	≤ 1	0,086	✓✓
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen [M.-%]	≤ 0,1	BG	✓
Alkaliempfindlichkeitsklasse	zu prüfen	Einstufung in: E III-S	keine Maßnahmen gegen schädigende AKR erforder- lich gem. Alkali-Richtli- nie Oktober 2013 Tab. 6
✓ Anforderung erfüllt ✓✓ Anforderung weit unterschritten BG = unter Bestimmungsgrenze			

¹⁹ Institut Dr. Haag GmbH, Prüfbericht Nr.: 282550B

²⁰ DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

Tabelle 16: Analyseergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung der RC-GK 2/16 der Heinrich Feess GmbH & Co. KG²¹

Parameter	Einheit	Höchstwert	Istwert	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
Eluat				
pH-Wert		12,5 ^a	12,0	✓
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	3.000 ^a	820	✓✓
Chlorid	mg/l	150	1,36	✓✓
Sulfat	mg/l	600	13,00	✓✓
Arsen	µg/l	50	< 1	✓✓
Blei	µg/l	100	< 1	✓✓
Cadmium	µg/l	5	< 0,1	✓✓
Chrom (gesamt)	µg/l	100	0,36	✓✓
Kupfer	µg/l	200	0,68	✓✓
Nickel	µg/l	100	< 1	✓✓
Quecksilber	µg/l	2	< 0,1	✓✓
Zink	µg/l	400	95,5	✓✓
Phenolindex	µg/l	100	< 10	✓✓
Feststoff				
Mineralölkohlenwasserstoffe	mg/kg	1.000 ^b	< 50	✓✓
PAK nach EPA	mg/kg	25	< BG	✓✓
EOX	mg/kg	10	< 0,5	✓✓
PCB	mg/kg	1	< BG	✓
✓	Anforderung erfüllt			
✓✓	Anforderung weit unterschritten			
a)	Kein Ausschlusskriterium			
b)	Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar BG = Bestimmungsgrenze			

Fazit: Voraussetzung für die Erzeugung einer qualitativ hochwertigen RC-Gesteinskörnung ist, dass im Vorfeld der Anlieferung des Materials an der RC-Anlage die Umweltverträglichkeit nachzuweisen ist. Nach erfolgter Aufbereitung ist die RC-GK bautechnisch und hinsichtlich der Umweltverträglichkeit zu prüfen. Die bau- und umwelttechnischen Anforderungen an die RC-GK werden nicht nur schlechthin, sondern teilweise sogar mit großer Sicherheit erfüllt. Die hergestellten und eingesetzten RC-GK aus zwei verschiedenen Produktionsstätten sind uneingeschränkt zur Betonherstellung verwendbar.

²¹ Institut Dr. Haag GmbH, Prüfbericht Nr.: 282550B

1.4.2 Herstellung des RC-Betons

Die Firma Wüffert GmbH & Co. KG hat am Standort Marktbreit im Vorfeld der Realisierung des Bauvorhabens Betonrezepturen entwickelt und erprobt. Die ersten Versuche wurden mit der RC-GK der Firma Feess GmbH & Co. KG durchgeführt, da diese Fraktionen im Portfolio der Firma Feess GmbH & Co. KG angeboten werden. Im Raum Würzburg wurden diese Gesteinskörnungen für den Einsatz im konstruktiven Beton zu Beginn der Voruntersuchungen nicht angeboten, weil keine Nachfrage bis dahin an diesem Produkt bestand. Daher wurden zunächst die Betonrezepturen mit der RC-GK der Firma Feess entwickelt (s. Tabelle 17).

Tabelle 17: Betonrezepturen C20/25, C25/30 und C30/37 mit RC-GK der Firma Feess GmbH & Co. KG²²

Bestandteil	Hersteller	Anteil		
		Rezeptur C20/25	Rezeptur C25/30	Rezeptur C30/37
Sand 0/2 mm	Wüffert GmbH & Co. KG Grube Hohenfeld	725 kg/m ³ (41 Vol.-%)	719 kg/m ³ (40 Vol.-%)	701 kg/m ³ (40 Vol.-%)
Kies 2/8 mm		239 kg/m ³ (13 Vol.-%)	255 kg/m ³ (14 Vol.-%)	249 kg/m ³ (14 Vol.-%)
Kies 8/16 mm		221 kg/m ³ (12 Vol.-%)	383 kg/m ³ (22 Vol.-%)	373 kg/m ³ (22 Vol.-%)
RC-GK 2/16 mm	Feess GmbH & Co. KG Kirchheim/Teck	593 kg/m³ (34 Vol.-%)	420 kg/m³ (24 Vol.-%)	410 kg/m³ (24 Vol.-%)
CEM III/A 42,5 N	HeidelbergCement AG - Ze- mentwerk Lengfurt	260 kg/m ³	290 kg/m ³	340 kg/m ³
Flug- asche Power- ment	EnBW Heizkraftwerk Heil- bronn	50 kg/m ³	50 kg/m ³	50 kg/m ³
Fließmit- tel PCT 631	Mapei Austria GmbH Langen- wang	1,56 kg/m ³ (0,6 M.-% v. Ze- ment)	1,74 kg/m ³ (0,6 M.-% v. Ze- ment)	2,04 kg/m ³ (0,6 M.-% v. Ze- ment)
Wasser		190 kg/m ³	186 kg/m ³	187 kg/m ³
Zielgröße (w/z) eq		0,68	0,6	0,52

Feststellbar ist, dass alle betontechnischen Anforderungen gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 zur Herstellung von Beton nach Eigenschaften erfüllt wurden. Der Substitutionsanteil an RC-GK wurde bei allen drei Rezepturen nicht vollständig ausgeschöpft; der Maximalanteil wurde jeweils um etwa 10 % unterschritten. Eine zusammenfassende Übersicht bietet Tabelle

²² Daten von der Firma Wüffert GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt, Betonzusammensetzung nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 vom 31.01.2017

19 (vgl. Anforderungen / Restriktionen Tabelle 4). Anzumerken ist, dass unter dem Gesichtspunkt der geringen Betonmenge für die Beanspruchung XF1 (107 m³ von insgesamt 603 m³ Beton, vgl. Tabelle 2) und der im Betonwerk zwischengelagerten und diesbezüglich geprüften RC-GK der Firma Feess ausreichend vorhanden war, wurden in weiteren Vorversuchen vom Betonproduzenten Wüffert RC-GK der Firma Beuerlein getestet. Die entwickelten Betonrezepturen, konzipiert für die Expositionsklassen XC2 und XC4, sind in Tabelle 18 wiedergegeben.

Tabelle 18: Betonrezepturen C20/25, C25/30 und C30/37 mit RC-GK der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG²³

Bestandteil	Hersteller	Anteil		
		Rezeptur C20/25	Rezeptur C25/30	Rezeptur C30/37
Sand 0/2 mm	Wüffert GmbH & Co. KG Grube Hohenfeld	725 kg/m ³ (40 Vol.-%)	719 kg/m ³ (40 Vol.-%)	701 kg/m ³ (40 Vol.-%)
Kies 8/16 mm		276 kg/m ³ (15 Vol.-%)	274 kg/m ³ (15 Vol.-%)	267 kg/m ³ (15 Vol.-%)
RC-GK 2/16 mm	Beuerlein GmbH & Co. KG Helmstadt	781 kg/m³ (45 Vol.-%)	775 kg/m³ (45 Vol.-%)	755 kg/m³ (45 Vol.-%)
CEM III/A 42,5 N	HeidelbergCement AG - Zementwerk Lengfurt	260 kg/m ³	290 kg/m ³	340 kg/m ³
Flugasche Powerment	EnBW Heizkraftwerk Heilbronn	50 kg/m ³	50 kg/m ³	50 kg/m ³
Fließmittel PCT 631	Mapei Austria GmbH Langenwang	1,56 kg/m ³ (0,6 M.-% v. Zement)	1,74 kg/m ³ (0,6 M.-% v. Zement)	2,04 kg/m ³ (0,6 M.-% v. Zement)
Wasser		190 kg/m ³	186 kg/m ³	187 kg/m ³
Zielgröße (w/z) eq		0,68	0,60	0,52

²³ Daten von der Firma Wüffert GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt, Betonzusammensetzung nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 vom 11.04.2017

Tabelle 19: Synopse Ist- mit Maximalanteil der rezyklierten Gesteinskörnung der Rezepturen mit RC-GK

Restriktionen	geforderte Festigkeitsklasse	Expositions-klassen nach DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle 1	Feuchtigkeitsklasse nach DIN 1045-2, Tabelle 1	Möglicher Maximalanteil nach DAfStb-Rili Beton mit rezyklierten GK 2010-09	Ist-Anteil an RC-GK	RC-GK Lieferant
				Typ 1 Betonsplitt		
Zulässige Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm bezogen auf gesamte Gesteinskörnung	C20/25	XC1	WF	≤ 45 Vol. %	34 Vol. %	Feess GmbH & Co. KG
	C25/30	XC4, XF1	WF	≤ 35 Vol. %	24 Vol. %	
	C30/37	XC4, XF1	WF	≤ 35 Vol. %	24 Vol. %	
	C20/25	XC2	WF	≤ 45 Vol. %	45 Vol. %	Beuerlein GmbH & Co. KG
	C25/30	XC4	WF	≤ 45 Vol. %	45 Vol. %	
	C30/37	XC4	WF	≤ 45 Vol. %	45 Vol. %	

Der Substitutionsanteil der RC-GK, hergestellt von der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG, wurde bei allen drei eingesetzten Betonrezepturen C20/25, C25/30 und C30/37 mit 45 % vollständig ausgeschöpft.

Nachstehende Abbildung 12 zeigt schematisch, aus welchen Elementen sich die Produktionskontrolle zusammensetzt und wie die Konformität des Betons beurteilt wird. Die Bewertung und Überwachung (Erst- und laufende Überwachung) erfolgt durch eine anerkannte Überwachungsstelle und die Zertifizierung der Produktionskontrolle durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle. Die Überwachungsstelle der Firma Wüffert GmbH & Co. KG ist das Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG, die Zertifizierungsstelle ist die TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH.

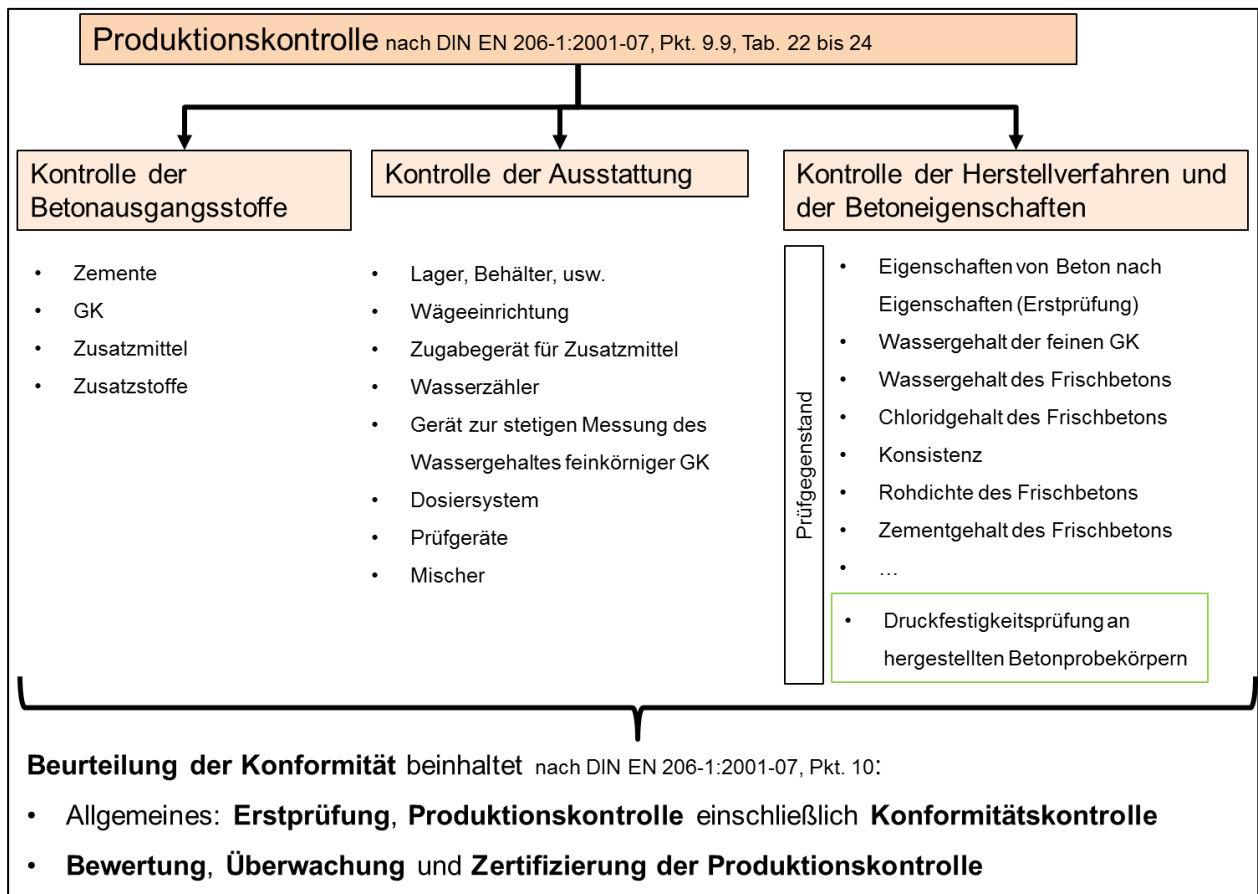


Abbildung 12: Bestandteile der Produktions- und Konformitätskontrolle des Betons nach DIN EN 206-1:2001-07

Zur erstmaligen Herstellung von Beton muss eine sog. **Erstprüfung** erfolgen. Dies ist in der DIN EN 206-1 (vgl. DIBt Verzeichnis Eingeführte Technische Baubestimmungen entsprechend § 3 Abs. 3 MBO, Stand: 13.03.2017) und der DIN 1045-2 geregelt. Gemäß dieser Normen sind die Parameter Frischbetontemperatur, Konsistenz und Druckfestigkeit nach 28 Tagen zu prüfen.

Bei der Verwendung von RC-Beton muss zudem eine sog. **erweiterte Erstprüfung** durchgeführt werden. Diese umfasst:

- die Erstprüfung,
- die Konsistenzveränderung des Betons nach 10, 45 und 90 Minuten nach erfolgter Wasserzugabe,
- die Bestimmung des Feuchtegehaltes der rezyklierten Gesteinskörnung (Kern- und Oberflächenfeuchte) sowie
- im Falle einer nachträglichen Fließmittelzugabe zur Einstellung der Übergabekonsistenz ist eine Anweisung zur Dosierung erforderlich.

Die Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung der Betone sind den Abbildung 13 bis 15 zu entnehmen. Diesen liegen in Form von Prüfprotokollen den Verfassern vor. Die erweiterte Erstprüfung wurde für die Betonsorten mit RC-GK der Firma Feess am 31. Januar 2017 und für

Betone mit RC-GK der Firma Beuerlein am 11. April 2017 durch das Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG durchgeführt.


Erstprüfung C20/25 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08; vgl. auch Abschnitt 8.2, Tab. 14)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich	
	Prüfbedingung				
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22			
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung				
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ (25 + 4)	35,0	✓	
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 45'	F3 420 - 480	450	✓	
	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6	
		Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10' nach 90'	505 420	
		Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte		
			Oberflächenfeuchte		3,5
Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert		
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.300		
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.300		
		nach 28 d	2.270		
	Wasser-Zement-Wert w/z		0,68		
	Frischbeton-Luftgehalt [%]		2,1		
Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		12,0			

Abbildung 13: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C20/25 Beton mit der RC-GK der Firma Feess²⁴

²⁴ Gemäß Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 31.01.2017


Erstprüfung C25/30 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08; vgl. auch Abschnitt 8.2, Tab. 14)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich	
	Prüfbedingung				
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22			
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung				
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ (30 + 4)	42,0	✓	
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 45'	F3 420 - 480	470	✓	
	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6	
		Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10'	530	
		Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte		
			Oberflächenfeuchte		3,7
Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert		
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.320		
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.320		
		nach 28 d	2.290		
	Wasser-Zement-Wert w/z		0,60		
	Frischbeton-Luftgehalt [%]		1,8		
	Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		14,0		
	Wassereindringtiefe [mm]		28		

Abbildung 14: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C25/30 Beton mit der RC-GK der Firma Feess²⁵

²⁵ Gemäß Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 31.01.2017



Erstprüfung C30/37 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08; vgl. auch Abschnitt 8.2, Tab. 14)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich	
	Prüfbedingung				
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22			
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung				
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ (37 + 4)	51,0	✓	
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 45'	F3 420 - 480	460	✓	
	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6	
		Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10' nach 90'	525 430	
		Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte		
			Oberflächenfeuchte		3,7
Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert		
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.330		
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.320		
		nach 28 d	2.300		
	Wasser-Zement-Wert w/z		0,52		
	Frischbeton-Luftgehalt [%]		1,9		
	Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		19,0		
	Wassereindringtiefe [mm]		18		

Abbildung 15: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C30/37 Beton mit der RC-GK der Firma Feess²⁶

²⁶ Gemäß Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 31.01.2017

Erstprüfung C20/25 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08; vgl. auch Abschnitt 8.2, Tab. 14)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
	Prüfbedingung			
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22	18	✓
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung			
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ (25 + 4)	34,0	✓
Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 45'	F3 420 - 480	465	✓	

	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6
		Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10' nach 90'	515 420
		Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte	2,0
			Oberflächenfeuchte	3,7

Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.300
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.290
		nach 28 d	2.270
	Wasser-Zement-Wert w/z		0,68
	Frischbeton-Luftgehalt [%]		2,3
Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		12,5	

Abbildung 16: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C20/25 Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein ²⁷

²⁷ Gemäß Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 11.04.2017

Erstprüfung C25/30 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08; vgl. auch Abschnitt 8.2, Tab. 14)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
	Prüfbedingung			
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22	18	
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung			
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ (30 + 4)	39,0	
Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 45'	F3 420 - 480	465		

	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6
		Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10' nach 90'	520 440
		Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte	2,0
			Oberflächenfeuchte	3,7

Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.320
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.310
		nach 28 d	2.280
	Wasser-Zement-Wert w/z		0,60
	Frischbeton-Luftgehalt [%]		1,9
	Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		14,5
Wassereindringtiefe [mm]		25	

Abbildung 17: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C25/30 Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein ²⁸

²⁸ Gemäß Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 11.04.2017


Erstprüfung C30/37 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08; vgl. auch Abschnitt 8.2, Tab. 14)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
	Prüfbedingung			
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22	18	✓
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung			
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ (37 + 4)	47,0	✓
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 45'	F3 420 - 480	470	✓
	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6
		Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10' nach 90'	535 435
		Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte	2,0
			Oberflächenfeuchte	3,7
Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert	
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.340	
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.330	
		nach 28 d	2.310	
	Wasser-Zement-Wert w/z		0,52	
	Frischbeton-Luftgehalt [%]		2,0	
	Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		18,0	
Wassereindringtiefe [mm]		17		

Abbildung 18: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C30/37 Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein²⁹

Abbildung 19 links zeigt exemplarisch die Bestimmung des Luftgehaltes des Betons und rechts die Herstellung eines Probekörpers. An diesen wurde nach 2 und 28 Tagen die Druckfestigkeit des Betons bestimmt. Die Prüfungen zur Bestimmung des Luftgehaltes und der Druckfestigkeit werden im Rahmen der Produktionskontrolle nach DIN EN 206-1 bzw. DAfStb Rili gefordert.

²⁹ Gemäß Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 11.04.2017



Abbildung 19: Prüfung des Betons vor Auslieferung im Werk [Jacob]

Die DIN EN 206-1:2001- fordert im Rahmen der Konformitätskontrolle für die Druckfestigkeit von Beton nach Eigenschaften - also für den hier hergestellten RC-Beton - eine Mindestprüfhäufigkeit der Probennahme (vgl. Tabelle 13 DIN EN 206-1): im Rahmen der ersten 50 m³ des produzierten Betons sind 3 Proben zu prüfen. Danach sind pro 200 m³ ein Probekörper oder 2 Probekörper je Produktionswoche herzustellen und zu prüfen bis mindestens 35 Prüfergebnisse vorliegen (Erstherstellung). Erst danach beginnt die stetige Herstellung. Diese erfordert die Herstellung eines Probekörpers pro 400 m³ oder eines Probekörpers pro Produktionswoche (s. Abbildung 20).

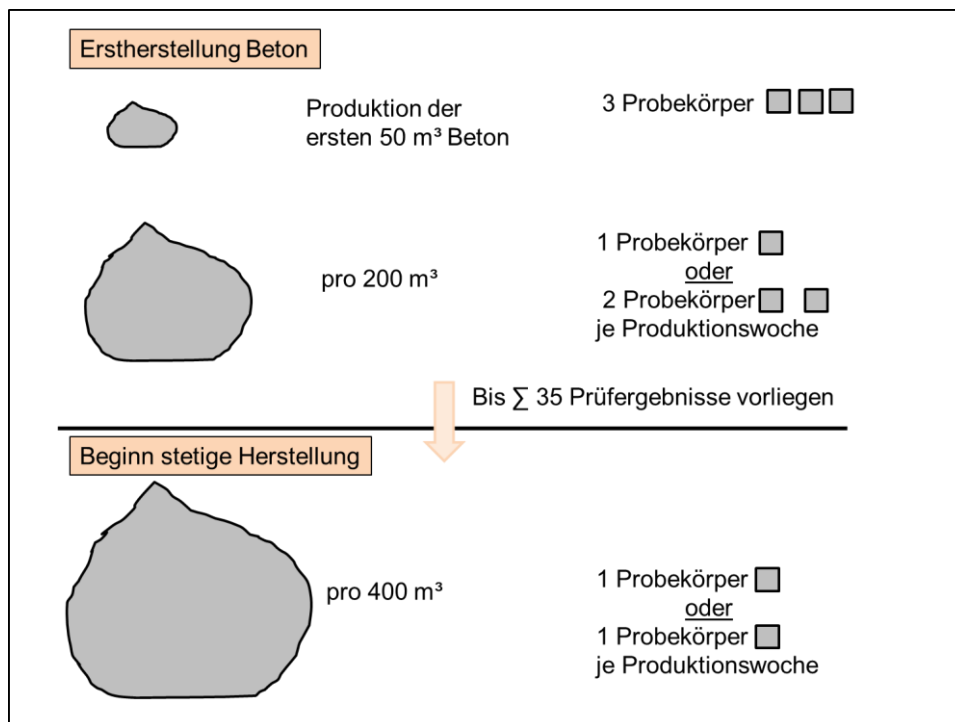


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Mindestprüfhäufigkeit der Probenahmen zur Beurteilung der Konformität nach DIN EN 206-1, Tab. 13

Die Konformitätskriterien für die Druckfestigkeit sind nach DIN EN 206-1:07-2001 Tabelle 14 in nachfolgender Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Konformitätskriterien für die Druckfestigkeit nach DIN EN 206-1 Tabelle 14

Herstellung	Anzahl „n“ der Prüfergebnisse für die Druckfestigkeit in der Reihe	Kriterium 1	Kriterium 2	Ist Prüfergebnisse	
		Mittelwert von „n“ Ergebnissen (f_{cm}) N/mm ²	Jedes einzelne Prüfergebnis (f_{ci}) N/mm ²	Kriterium 1 N/mm ²	Kriterium 2 N/mm ²
Erstherstellung	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$	für C25/30: $\geq 30 + 4$ für C30/37: $\geq 37 + 4$	für C25/30: $\geq 30 - 4$ für C30/37: $\geq 37 - 4$
Stetige Herstellung	15	$\geq f_{ck} + 1,48 \sigma$	$\geq f_{ck} - 4$		

f_{ck} = Zielgröße Druckfestigkeit des Prüfwürfels

In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Messwerte der untersuchten Probekörper hinsichtlich der Druckfestigkeit zusammengefasst. Die Probekörper sind aus Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG hergestellt und haben jeweils ein Abmaß von 150 * 150 * 150 mm. Die rote Linie stellt die Anforderung für das Kriterium 1 dar, die grüne Linie bezieht sich auf Kriterium 2. Die blaue Linie zeigt den Mittelwert (f_{cm}) von 13 Prüfergebnissen für den C25/30 und von 16 Prüfergebnissen für den C30/37. Die Einzelwerte (f_{ci}) sind als Punkte dargestellt.

Für den C20/25 liegt nur ein Prüfprotokoll vor. Die ermittelte Druckfestigkeit beträgt 29 N/mm². Da für die Erstherstellung keine drei Prüfergebnisse vorliegen, kann keine Aussage über die Konformität getroffen werden.

In Auswertung der Prüfergebnisse (vgl. Anhang 4) und des Nachweises der Konformität ergibt sich:

Der Nachweis für den Mittelwert (f_{cm}) von n = 13 Prüfergebnissen wird bei C25/30 unter der anteiligen Verwendung von 45 Vol.-% RC-GK erbracht mit $f_{cm,ist} 34,8 \text{ N/mm}^2 \geq f_{cm,soll} 34 \text{ N/mm}^2$.

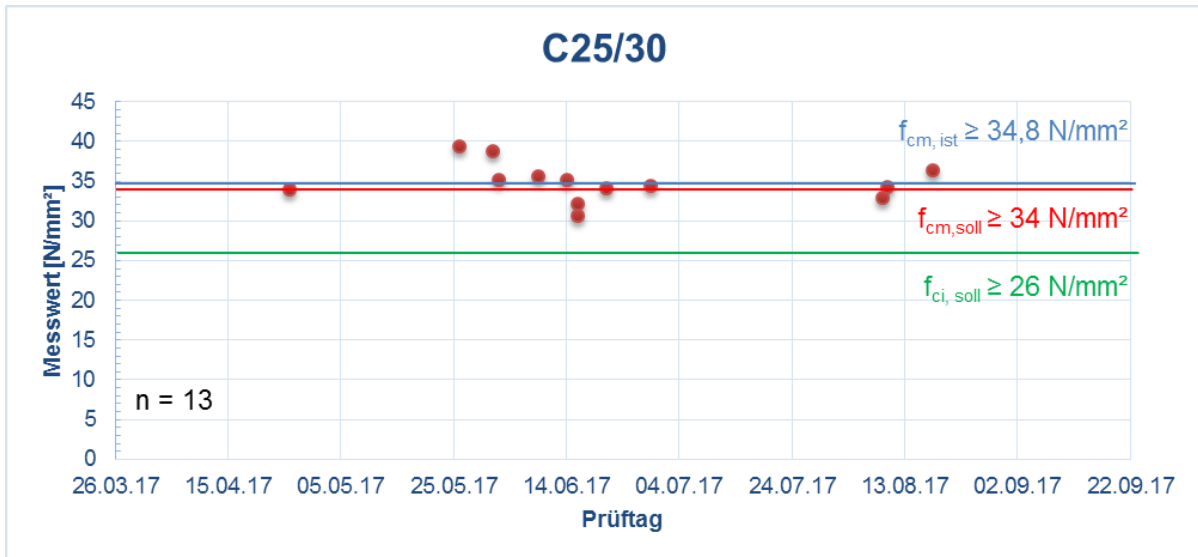


Abbildung 21: An Prüfkörpern gemessene Betondruckfestigkeiten nach 28 Tagen des C25/30

In Auswertung der Prüfergebnisse (vgl. Anhang 4) und des Nachweises der Konformität ergibt sich:

Der Nachweis für den Mittelwert (f_{cm}) von $n = 16$ Prüfergebnissen wird bei C30/37 unter der anteiligen Verwendung von 45 Vol.-% RC-GK erbracht mit $f_{cm,ist} 43,5 \text{ N/mm}^2 \geq f_{cm,soll} 41 \text{ N/mm}^2$.

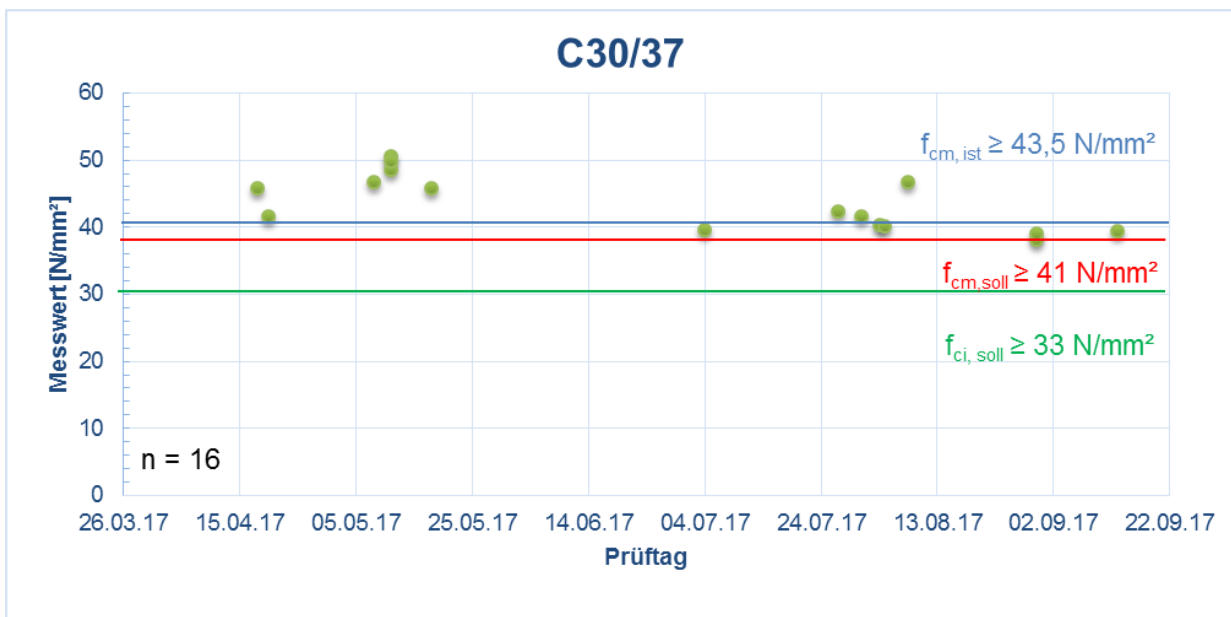


Abbildung 22: An Prüfkörpern gemessene Betondruckfestigkeiten des C30/37

Fazit: Die Herstellung der RC-Betone C20/25 mit $\sim 40 \text{ m}^3$, C25/30 mit $\sim 160 \text{ m}^3$ und C30/37 mit $\sim 280 \text{ m}^3$ erfolgte normkonform. Die gestellten Anforderungen im Rahmen der Erstprüfung und der erweiterten Erstprüfung wurden für die zuvor genannten RC-Betone erfüllt. Für die RC-Betone C25/30 und C30/37 ist die Konformität nachgewiesen, für den C20/25 kann keine

Aussage getroffen werden aufgrund der geringen Anzahl an Prüfergebnissen. Die geforderten Druckfestigkeiten sind bei allen Mischungen erreicht worden.

1.4.3 Beurteilung der Verarbeitung von RC-Beton und der Bauausführung

Zur Bewertung der Verarbeitbarkeit ist vor dem Einbau des Betons durch die Bauberatung und Prüflabor GmbH & Co. KG das Ausbreitmaß und die Temperatur geprüft und ein Probewürfel je Lieferung zur Bestimmung der Druckfestigkeit hergestellt worden (s. Abbildung 23).

Die Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß, s. Abbildung 25) lag bei 9 von 23 Proben geringfügig außerhalb der vorgegebenen Konsistenzgrenze zum Zeitpunkt des Einbaus. Seitens der Georg Göbel GmbH wurden keine Unterschiede zum Normalbeton oder Schwierigkeiten bei der Verarbeitung festgestellt.

Die Verarbeitung des RC-Betons ist auf der Baustelle gleichwohl in Anwesenheit von Mitarbeitern der BTU C-S an vier Terminen vor Ort überprüft worden. Bei allen Begehungen bestätigte zudem der Polier die Gleichwertigkeit des RC-Betons mit einem Primärbeton. Für den RC-Beton mussten erwartungsgemäß keine besonderen technologischen Maßnahmen bei der Verarbeitung getroffen werden.



Abbildung 23: Überprüfung des Ausbreitmaßes und Messung der Temperatur auf der Baustelle [Jacob]



Abbildung 24: Einbau des Betons mit einem Kübel und Verdichtung des Betons mit einem Innenrüttler [Jacob]

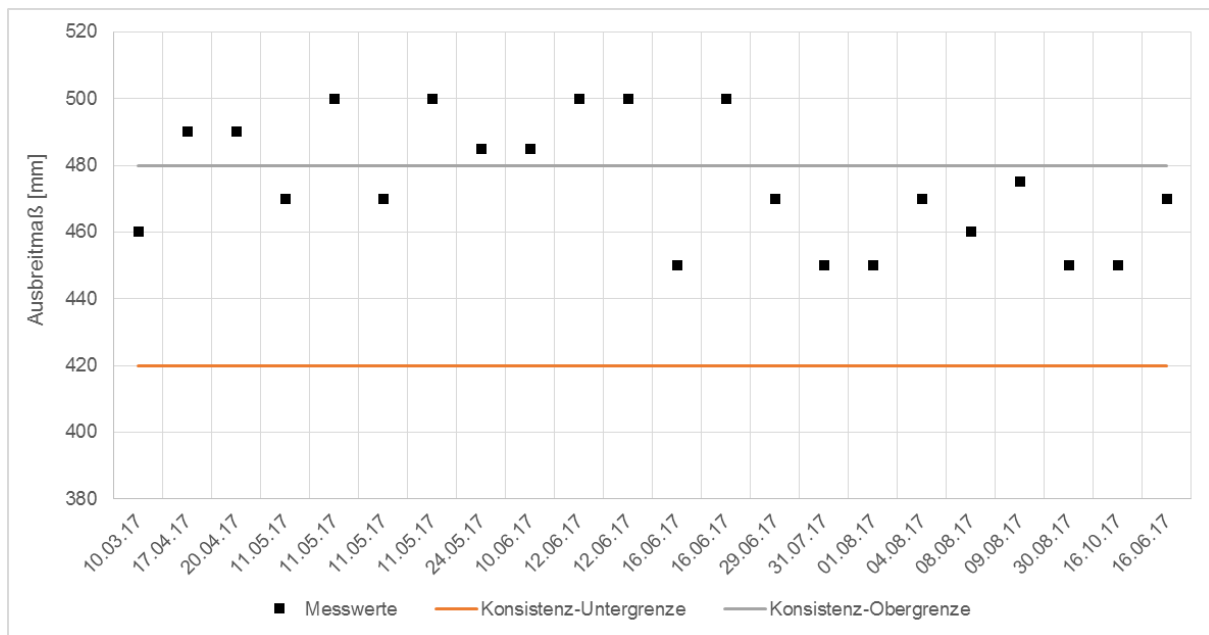


Abbildung 25: Messwerte Ausbreitmaß während der Baumaßnahme

Der RC-Beton wurde auf der Baustelle durch die Firma Georg Göbel GmbH eingebaut und nachbehandelt. Der Einbau des RC-Betons erfolgte für die Errichtung der Wände mit einem Kübel (s. Abbildung 24) und für die Errichtung der Decken mit einer Betonpumpe. Nach dem Einbau wurde der Beton mit einem Innenrüttler verdichtet (s. Abbildung 24). Die Nachbehandlung des RC-Betons entspricht der eines Normalbetons entsprechend den normativen Vorgaben DIN 1045-3 Pkt. 8.7 „Nachbehandlung und Schutz“, d. h. eine diesbezügliche spezielle Behandlung für den RC-Beton ist nicht erforderlich.

Fazit: Der RC-Beton erfüllt uneingeschränkt die gestellten Anforderungen. An ~ 40 % der Messwerte für das Ausbreitmaß wurden geringfügige Abweichungen der Konsistenz festgestellt (s. Abbildung 25). Durch die weichere Konsistenz wurde der Einbau begünstigt, ohne Einbußen in der Qualität des Betons zu verzeichnen. Die Verarbeitung des RC-Betons auf der Baustelle wurde von den Facharbeitern im Vergleich zum Normalbeton als besonders positiv bewertet.

1.5 Bewertung des Einsatzes von RC-Beton im Vergleich zu Normalbeton

1.5.1 Ökobilanzielle Betrachtung - Einführung

(entspricht AP 3 laut Leistungsangebot vom 21.12.2016)

Die ökologische Bewertung basiert auf einer ökobilanziellen Betrachtung. Grundlage hierfür bildet die Stoffstromanalyse zur Herstellung der RC-GK im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung. Die Betrachtung beschränkt sich auf die Punkte Rohstoffeinsätze, Energieverbräuche sowie Transportprozesse und deren CO₂e-Emissionen³⁰. Aufwendungen für die Prüfverfahren zur Bestimmung der Eigenschaften der RC-GK und RC-Betone wurden nicht berücksichtigt.

Das betrachtete System ist in Abbildung 26 für den RC-Beton grün markiert, für den Normalbeton rot. Es werden somit die Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen herausgearbeitet.

Die Systemgrenze des RC-Betons beginnt beim Abbruch / Rückbau von Gebäuden oder technischen Anlagen. Das Abbruchmaterial resp. der Betonbruch wird Recyclinganlagen zugeführt (vgl. 4.1) und dort aufbereitet. Nach der Behandlung und den entsprechenden Prüfungen, in denen die bau- und umwelttechnische Eignung der RC-GK bestätigt wird, kann diese zur Herstellung von Beton verwendet werden. Da nach den geltenden Regelwerken (s. Kapitel 1.2) nur anteilig rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden dürfen, wird zudem der Betrachtungsrahmen zur Bereitstellung von Sand und Kies mit eingeschlossen (grün markierter geschlossener Rahmen). Für die Herstellung von Primärbeton gilt der rot markierte Betrachtungsrahmen.

Unterschiede bestehen in der Bereitstellung der Gesteinskörnung (Gewinnung und Transport zum Betonhersteller) und in der Zusammensetzung des Primär- im Vergleich zum RC-Beton. Die Betonherstellung an sich, der Transport zur Baustelle und die Verarbeitung sind identisch bei beiden Betonen.

Nachstehend wird die produzierte RC-GK der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG betrachtet, da diese über 80 % der gesamt eingesetzten rezyklierten Gesteinskörnung ausmacht.

³⁰ CO₂e steht für CO₂-equivalents [zu dt.: CO₂-Äquivalente], bezeichnet das Maß für das Treibhauspotenzial einer Substanz oder die klimaschädliche Wirkung einer Aktivität

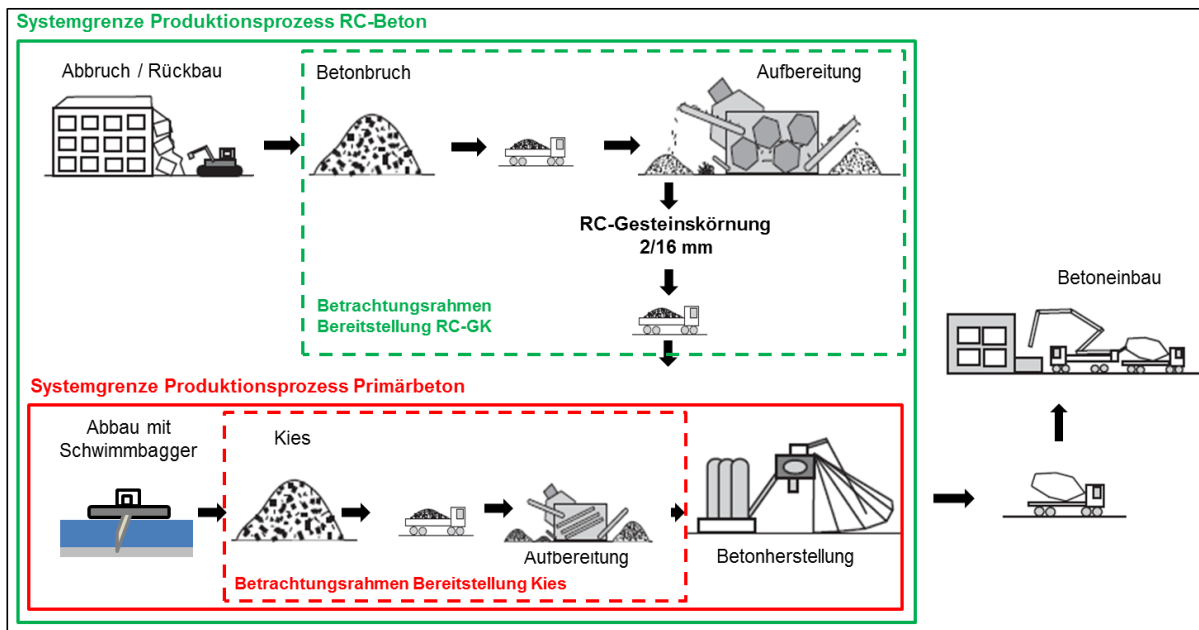


Abbildung 26: Überblick über die Systemgrenze des Primär- / RC-Betons [Metke]

Den Ausgangspunkt für die Herstellung des Betons bildet somit die Gewinnung und Aufbereitung von Gesteinskörnungen.

Bereitstellung des Betonbruchs und Aufbereitung dessen zu Betonsplitt

Das Ausgangsmaterial der RC-GK stammt aus einem Abbruch einer Brücke aus Beton nahe Helmstadt (b. Würzburg). Vor der Aufbereitung wurde aus dem Haufwerk eine Probe nach LAGA PN 98³¹ gezogen, durch ein Prüflabor hinsichtlich der Umweltverträglichkeit untersucht und als unbelastet deklariert (s. Kapitel 1.4.1). Der reine Betonbruch wurde per LKW in die 7 km entfernte Aufbereitungsanlage der Beuerlein GmbH & Co. KG in Helmstadt transportiert. Die folgenden Daten für die Darstellung der Stoffströme, als auch für die energetische Betrachtung, wurden von der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG und der Firma Wüffert GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt.

Gewinnung von Sand und Kies

Die Wüffert GmbH & Co. KG bezieht den Sand und Kies aus einer eigenen Kiesgrube, in etwa 3 km Entfernung zur Betonmischanlage. Für die Förderung des Naturmaterials wird ein Saugbagger eingesetzt. In der Siebanlage wird das Kies-Sand-Gemisch in die Fraktionen < 2 mm und > 2 mm getrennt. Anschließend wird der Sand 0/2 und der Kies 2/x entweder auf der Gewinnungsstätte zwischengelagert oder direkt zur Transportbetonmischanlage transportiert. Der Kies wird auf dem Areal der Betonmischanlage in einer Prallmühle gebrochen und in die gängigen Fraktionen für Beton abgiesbt.

³¹ LAGA PN 98: Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; Hrsg.), 2004

1.5.2 Stoffstromanalyse

– *Bereitstellung der RC-GK*

Abbildung 27 zeigt das Fließbild zur Aufbereitung des Betonbruchs der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG. Bei der Anlieferung des Inputmaterials wird neben einer Sichtkontrolle das Prüfprotokoll der Deklarationsanalyse geprüft. Die Prüfergebnisse aus umwelttechnischer Sicht (s. Tabelle 10, Kap. 4.1) haben ergeben, dass das Inputmaterial nicht schadstoffbelastet ist und somit in der RC-Anlage aufbereitet werden kann.

Nach Aufgabe des Inputmaterials erfolgt eine Absiebung des feinen Materials < 50 mm. Dieses Vorabsiebmaterial und vorhandene Störstoffe, wie Holz oder Folien, beeinträchtigen die Qualität der RC-GK und müssen entfernt werden. Die Aufbereitung des verbliebenen Materials wird in einer Prallmühle mit integriertem Windsichter und Magnetabscheider durchgeführt, dabei werden Metalle (Bewehrungseisen) und Störstoffe entfernt. Das Material wird im Anschluss nach Korngrößen sortiert. Der Brechsand (< 2 mm) wird abgesiebt und getrennt von der rezyklierten Gesteinskörnung (in diesem Fall 2/16) verwertet. Gröberes Material > 16 mm wird in die Prallmühle zurückgeführt und nochmals zerkleinert. Die Anlage wird mittels eines Kettenbaggers beschickt und die innerbetrieblichen Transporte werden über Förderbänder und Radlader realisiert.

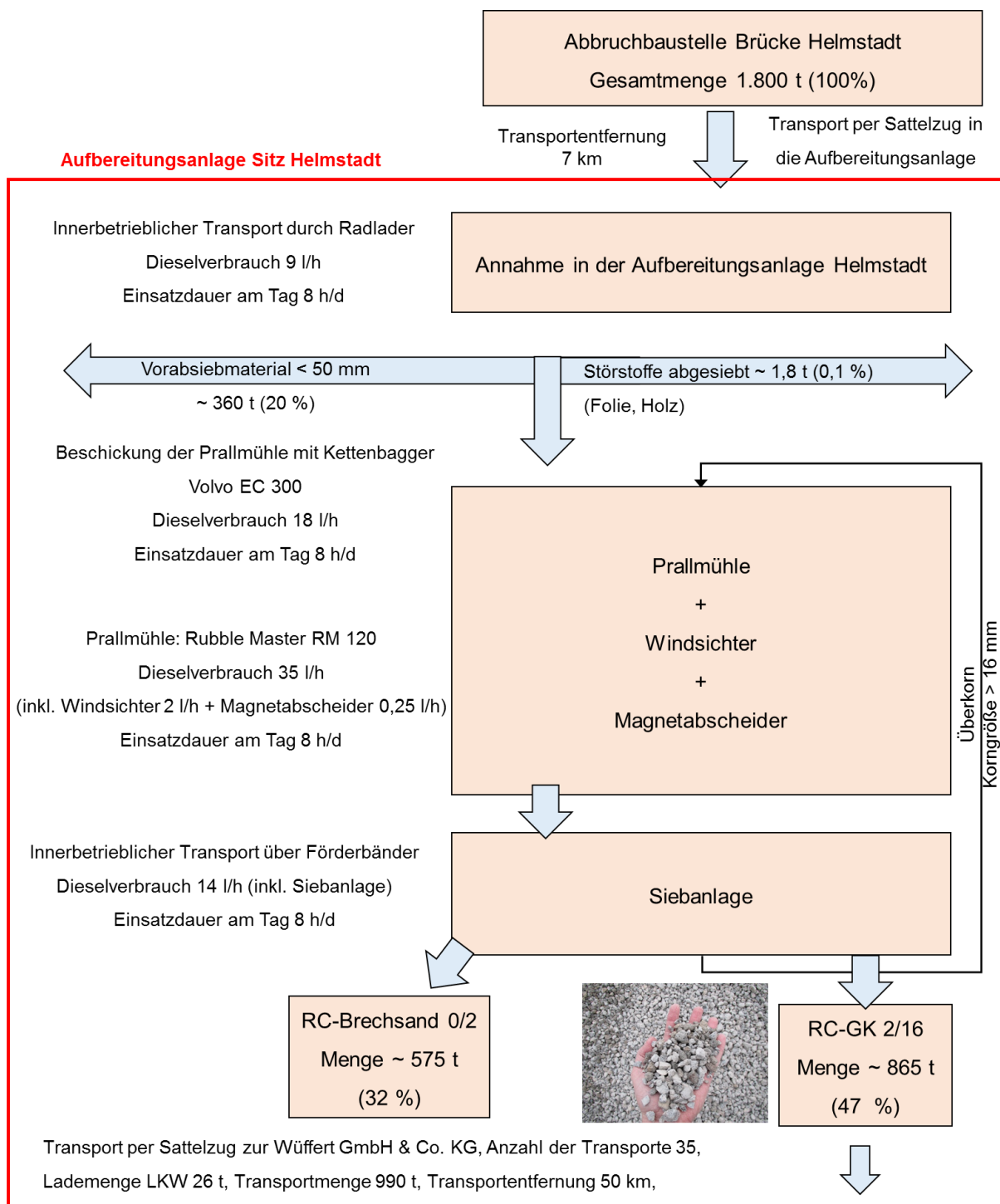


Abbildung 27: Fließbild der Aufbereitung der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG

Insgesamt wurden rund 1.800 t Betonbruch in die Anlage angeliefert. Vorab wurden davon etwa 20 % (rund 360 t) abgesiebt. Die verbleibenden 1.440 t wurden in der Prallmühle aufbereitet (siehe Abbildung 11, Kap. 4.1). Etwa 1 % (18 t) des Materials entfallen auf abgeschiedene Metalle und 0,1 % entfallen auf Störstoffe (1,8 t).

Fast ein Drittel (32 %) des Ausgangsmaterials liegt nach dem Brechvorgang als Fraktion 0/2 vor, während knapp 50 % auf die rezyklierte Gesteinskörnung 2/16 entfallen. Zur Herstellung von 1 t RC-GK wurden ca. 2,1 t Inputmaterial benötigt.

Der obere Teil der Abbildung 28 verdeutlicht den Stoffstrom der Aufbereitung. Der Stoffstrom ist auf eine Ausgangsmasse von 1.000 kg Betonbruch heruntergerechnet. Die angegebenen Werte sind Durchschnittswerte. Der untere Teil der Abbildung 28 stellt im Umkehrschluss dar, dass für die Produktion von 1 t RC-GK 2/16 2,1 t Betonbruch benötigt wurden.

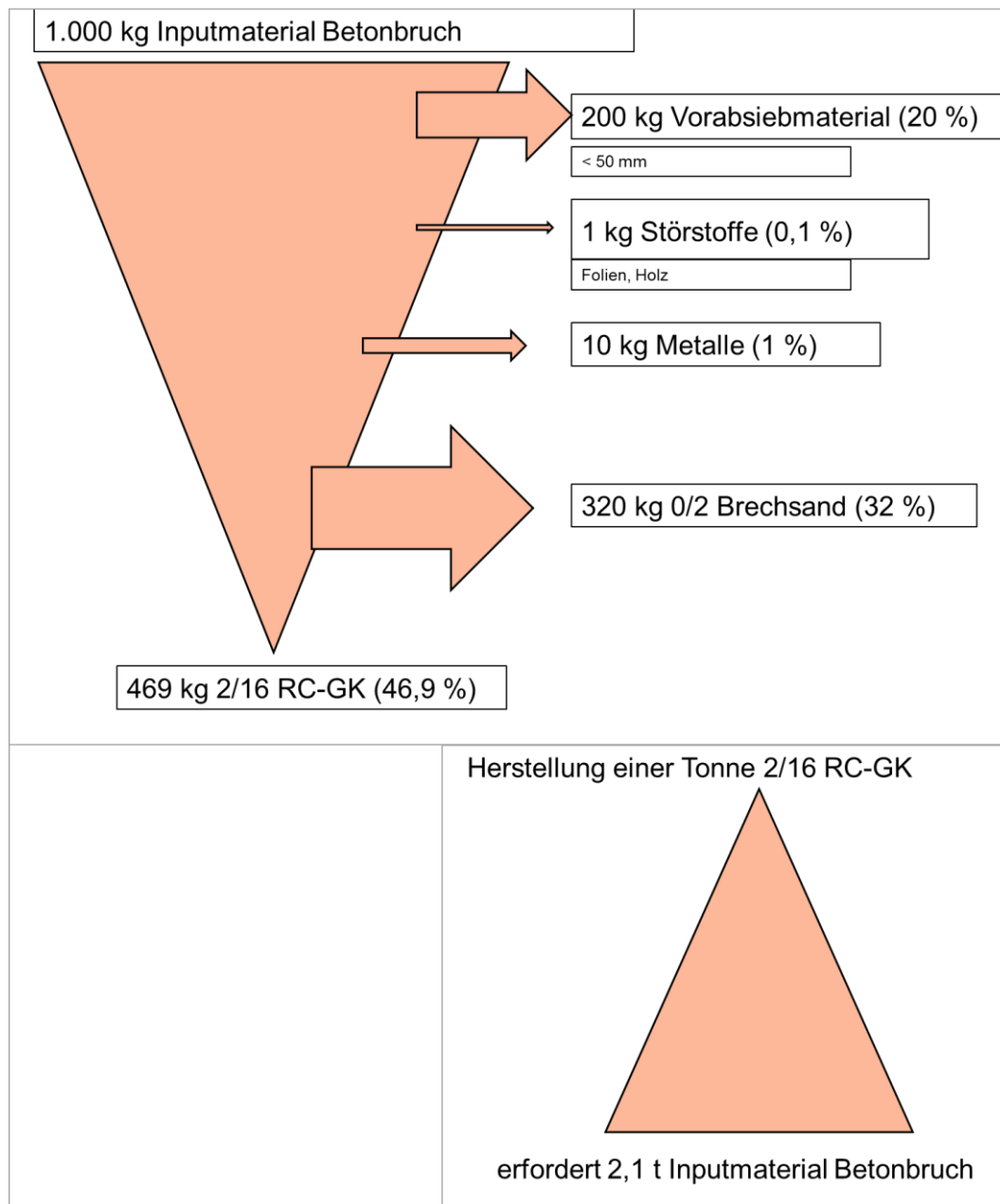


Abbildung 28: Stoffstrom zur Herstellung der RC-GK für den RC-Beton

Das Verhältnis der Menge des Inputmaterials zur hergestellten RC-GK mit ca. 2:1 ist sehr gut. Zum Vergleich: Eigene Untersuchungen bspw. beim Bauvorhaben Laborgebäude HU Berlin zeigten ein Mengenverhältnis Input zu Output 5:1³² und beim Bauvorhaben Boardinghouse in

³² Mettke, A.; Schmidt, S.; Jacob, S.: Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin Mitte, 2015, S. 40

Ludwigshafen 2,5:1³³. Die Abweichung insbesondere bei der Herstellung der RC-GK für das Bauvorhaben in Berlin besteht darin, dass (nur) die Körnung 8/16 verwendet wurde.³⁴

Als Gegenüberstellung des Stoffstromes bei der Erzeugung der RC-GK wird im Folgenden auf den Stoffstrom bei der Bereitstellung der Kiese und Sande eingegangen.

– **Bereitstellung des Sandes / Kieses**

Die Wüffert GmbH & Co. KG besitzt in Hohenfeld nahe Marktbreit eine eigene Kiesgrube zur Förderung von Kies und Sand. Über einen Saugbagger (s. Abbildung 29 links) wird Material aus der Grube gewonnen und über die Rohrleitung zur Siebstrecke transportiert. Die Siebstrecke ist rechts in untenstehender Abbildung 26 zu sehen und trennt die Fraktionen Sand (< 2 mm) vom Kies (> 2 mm).



Abbildung 29: Saugbagger in der Kiesgrube und Siebstrecke zur Trennung von Sand und Kies

Anschließend wird das Naturmaterial über Förderbänder transportiert und auf Halden zwischengelagert (s. Abbildung 30 links). Nach der Gewinnung wird das Material durch LKW zum Betonwerk in Marktbreit gefahren und dort wird das Naturmaterial in einer Prallmühle aufbereitet (s. Abbildung 30 rechts). Im Anschluss an die Prallmühle wird das Material mittels einer Siebmaschine in die gängigen Betonfraktionen 2/8, 8/16 und 16/32 gesiebt. Das Überkorn > 32 mm wird über einen Rücklauf wieder in die Prallmühle zurückgeführt und nochmals gebrochen.

³³ Mettke, A.; Heyn, S.: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), 2010, S. 15

³⁴ Mettke, A.; Schmidt, S.; Jacob, S.: Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin Mitte, 2015



Abbildung 30: Haldenlagerung des Sandes und Prallmühle zur Aufbereitung des Kieses

Der Saugbagger fördert pro Stunde 100 t Material. Das Verhältnis von Sand zu Kies wird von der Firma Wüffert GmbH & Co. KG mit 2:1 angegeben. Pro Tag werden 900 t gefördert, wovon 600 t auf Sand und 300 t auf Kies entfallen. Der Anteil der Kiesfraktionen wird von der Firma Wüffert GmbH mit 35 % (2/8), 45 % (8/16) und 20 % (16/32) angegeben.

Produktion zur Gewinnung von Kies / Sand (Nassgewinnung)

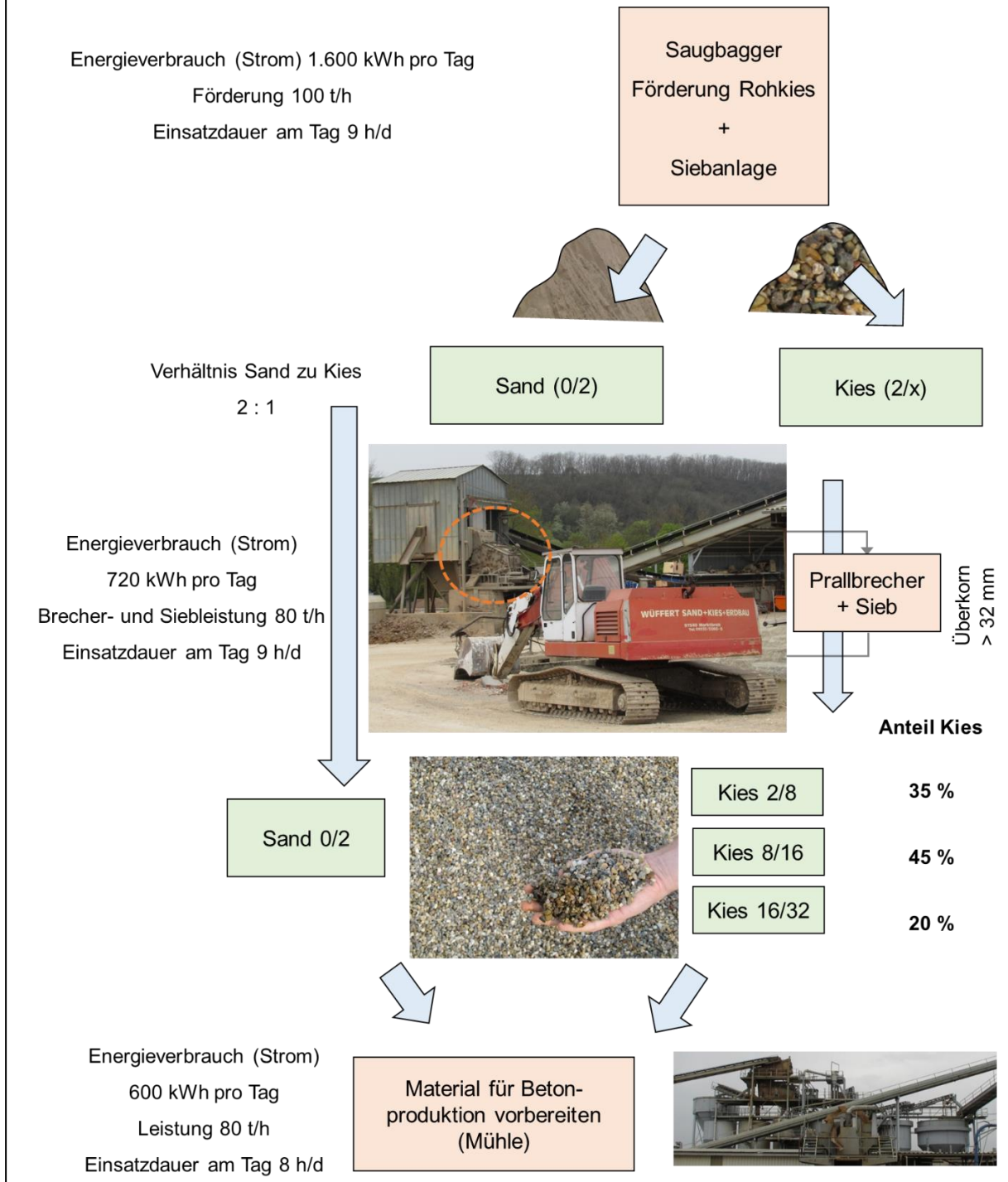


Abbildung 31: Kiesgewinnung der Wüffert GmbH & Co. KG

Bei Betrachtung der Input- zu Output-Mengen ergibt sich für die Gewinnung von Kies 2/16 (diese Körnung entspricht der eingesetzten RC-GK) ein Verhältnis von 3,75:1. Im Vergleich der Input- zu Output-Mengen der RC-GK mit dem Verhältnis von 2,1:1 wird ein besseres Ergebnis erzielt. Bei der Gesamtbetrachtung des Outputs stellt sich dies jedoch so dar, dass bei der Gewinnung des Kieses die Fraktion Sand 0/2 (~ 67 %) problemlos im Betonbau verwendbar ist. Hingegen ist die Verwendung des erzeugten Brechsandes, der bei der Herstellung von

RC-GK (32 %) anfällt, nach aktuellem Stand der normativen Vorgaben nicht im Beton einsetzbar. Es sei denn, es erfolgt ein gesonderter Nachweis.

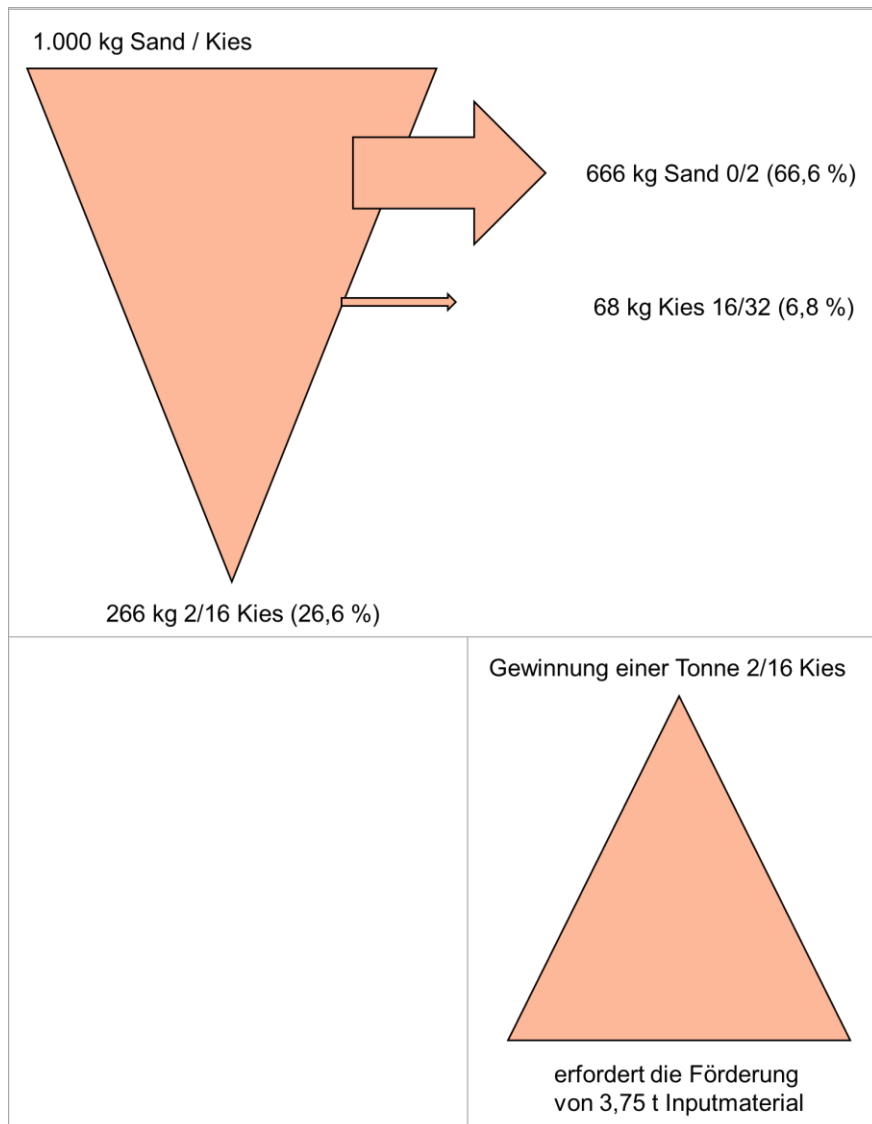


Abbildung 32: Stoffstrom zur Herstellung des Kieses 2/16

Der obere Teil der Abbildung 32 verdeutlicht den Stoffstrom bei der Gewinnung von Kies, bei dem auch Sand gefördert wird. Der dargestellte Stoffstrom ist für eine Ausgangsmenge von 1 Tonne aufgezeigt. Die angegebenen Werte sind Durchschnittswerte. Der untere Teil der Abbildung 32 stellt im Umkehrschluss dar, dass für die Produktion von 1 t Kies der Körnung 2/16 3,75 t Material gefördert werden müssen. Zur Förderung von 1 t Sand sind 1,5 t abzubauen. Für nachstehende Berechnungen, wird ebenfalls die Inputmenge für die Produktion von 1 t Kies der Körnung 8/16 benötigt: um eine Tonne Kies 8/16 zu erhalten, sind 6,7 t Input aufzugeben.

1.5.3 Aufwendungen bei der Herstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewinnung

– Bereitstellung der RC-GK

In Tabelle 21 werden die berechneten Energieverbräuche für die einzelnen Aggregate der Aufbereitungsanlage gezeigt. Der Bagger (Volvo EC300) wird genutzt, um die Prallmühle (Rubblemaster RM 120) zu beschicken. Radlader werden eingesetzt, um das Material innerbetrieblich zu transportieren.

Tabelle 21: Berechnung des Energieverbrauches der eingesetzten Geräte

Gerät	Energieträger	Be- darf ³⁵	Heizwert Die- sel	Energiebedarf	Durchsatz ³⁶	Energiever- brauch
		[l/h]	[MJ/l]	[MJ/h]	[t/h]	[MJ/t]
		1	2	3 (1*2)	4	5 (3 : 4)
Bagger	Diesel	18	34,7 ³⁷	625	90	6,94
Radlader	Diesel	9		312	90	3,47
Prallmühle	Diesel	35		1.215	90	13,49
Förderband	Diesel	7		243	90	2,69
Siebma- schine	Diesel	7		243	90	2,69
Energieverbrauch gesamt						<u>29,3</u>

In der folgenden Abbildung 33 sind die einzelnen Anlagenteile mit ihren jeweiligen Anteilen am Verbrauch grafisch dargestellt.

³⁵ Alle Angaben der Geräte basieren auf den Angaben der Beuerlein GmbH & Co. KG und stellen Mittelwerte dar.

³⁶ Ebd.

³⁷ Erich Hahne: *Technische Thermodynamik: Einführung und Anwendung*. 5. völlig überarb. Auflage. Oldenbourg-Verlag, München 2010, S. 406, 408

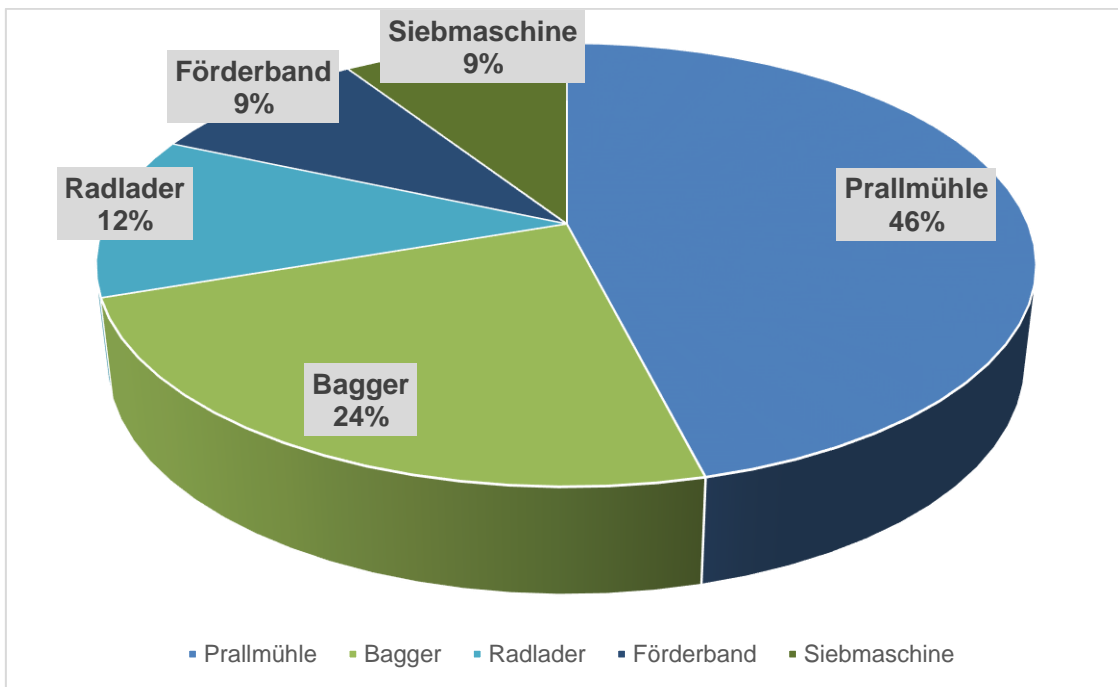


Abbildung 33: Energieaufwand der einzelnen Anlagenteile der Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG

Der Gesamtenergieverbrauch wird wie folgt berechnet:

Energieverbrauch gesamt = Energieverbrauch * Inputmaterial für 1 t RC GK 2/16

$$61,5 \text{ MJ/t} = 29,3 \text{ MJ/t} * 2,1 \text{ t Input für 1 t RC-GK 2/16}$$

Zur **Herstellung von einer Tonne RC-GK 2/16** werden unter Berücksichtigung des erzeugten Anteils dieser Körnung im Input rund **62 MJ/t Energie** benötigt.

– **Bereitstellung des Kieses**

In Tabelle 22 werden die Energiebedarfe zur Förderung von Kies bei der Firma Wüffert GmbH & Co. KG angegeben. Mit einem Saugbagger wird das Material aus der Kiesgrube gefördert und anschließend der Sand vom Kies mittels Siebung getrennt. Der Kies wird im Anschluss auf dem Gelände des Betonwerkes mit einer Prallmühle gebrochen und nochmals gesiebt. Der Sand wird ohne Aufbereitung nach dem Sieben als feine Gesteinskörnung im Beton verwendet.

Tabelle 22: Berechnung des Energiebedarfes der eingesetzten Geräte

Förderung	Geräte	Energieträger	Energiebedarf ³⁸	Energiebedarf	Durchsatz ³⁹	Energieverbrauch
			[kWh/h]	umgerechnet in [MJ/h] 1 kWh = 3,6 MJ	[t/h]	[MJ/t]
			1	2	3	4 (2 : 3)
Kies + Sand	Saugbagger	Strom	177,8	640	100	6,4
	Siebanlage					
Energieverbrauch Förderung Kies-Sand gesamt						<u>6,4</u>
Kies	Prallmühle	Strom	95	342	80	4,3
	Siebanlage					
Energieverbrauch Förderung und Aufbereitung Kies gesamt						<u>10,7</u>

Der Gesamtenergieverbrauch wird wie folgt berechnet:

$$\text{Energieverbrauch Kies} = \text{Energieverbrauch (Förderung und Aufbereitung Kies + Förderung Kies-Sand)} * \text{Inputmaterial für 1 t Kies 2/16}$$

$$40,1 \text{ MJ/t} = (4,3 \text{ MJ/t} + 6,4 \text{ MJ/t}) * 3,75 \text{ t Input} / 1 \text{ t Kies 2/16}$$

Da der Sand nur gefördert und gesiebt resp. nicht in der Prallmühle aufbereitet werden muss, ergibt sich der Energieverbrauch für die Förderung des Sandes wie folgt:

$$\text{Energieverbrauch Sand} = \text{Energieverbrauch (Förderung Kies/Sand)} * \text{Inputmaterial}$$

$$\text{für 1 t Sand 0/2}$$

$$9,6 \text{ MJ/t} = 6,4 \text{ MJ/t} * 1,5 \text{ t Input}^{40} / 1 \text{ t Sand 0/2}$$

Zur Bereitstellung von einer Tonne Kies 2/16 werden rund **40 MJ/t**, zur Bereitstellung von einer Tonne Sand 0/2 werden rund **10 MJ/t Energie** benötigt.⁴¹

³⁸ Alle Angaben der Geräte basieren auf den Angaben der Wüffert GmbH & Co. KG.

³⁹ siehe FN 35

⁴⁰ vgl. Abbildung 32

⁴¹ Diese Erhebung deckt sich auch in etwa mit dem Energieaufwand zur Förderung von Kies 2/32 von rund 49 MJ/t. (aus: <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225&lang=de>, zuletzt aufgerufen am 13.11.2019)

Fazit: Für die Herstellung von einer Tonne RC-GK der Körnung 2/16 werden rund 62 MJ/t (~17 kWh/t) benötigt. Im Vergleich dazu werden für die Förderung und Aufbereitung einer Tonne Kies der Körnung 2/16 40 MJ/t (~ 11 kWh/t) gebraucht. Das heißt, dass für die Förderung von Kies 2/16 etwa ein Drittel weniger Energie gebraucht wird im Vergleich zur Produktion der RC-GK 2/16.

1.5.4 Energetische Betrachtung zur Bereitstellung der Gesteinskörnungen für die Betonherstellung

- **Betrachtung der energetischen Aufwendungen für die Transporte zur Bereitstellung der Gesteinskörnungen**

Das Ausgangsmaterial der RC-GK ist mit dem LKW von der Abbruchbaustelle zur Aufbereitungsanlage 7 km und von der Aufbereitungsanlage zum Betonwerk 50 km transportiert worden. Das Naturmaterial (Kies, Sand) wurde 2 km mit dem LKW bis zur Betonmischanlage transportiert. Das Betonwerk befindet sich 32 km von der Baustelle der Umweltstation entfernt. Vereinfacht werden die Transportdistanzen in Abbildung 34 dargestellt.

Da die Transportentfernung für die Lieferung von Beton und RC-Beton zur Umweltstation identisch ist (Betonproduzent für beide Betonsorten ist die Wüffert GmbH & Co. KG), wird diese nicht ökologisch betrachtet. Der Unterschied besteht demnach darin, dass für Sand und Kies eine minimale Transportdistanz bis zum Betonwerk 2 km und für die Anlieferung der RC-GK 50 km (ohne Transport von der Abbruch- bzw. Rückbau-Baustelle bis zur RC-Anlage) zurückzulegen sind.



Abbildung 34: Vereinfachte Darstellung der Transportdistanzen der Gesteinskörnungen und für den Beton

Die Aufwendungen zum Transport der Gesteinskörnungen vom Gewinnung- bzw. Anfallort bis zum Betonwerk sind Tabelle 23 entnehmbar.

Tabelle 23: Energieaufwand zur Lieferung der Gesteinskörnungen per LKW vom Gewinnungsort bis zum Betonwerk

Material	Transportmittel	Transport-entfernung	Energieaufwand ⁴²	Energieverbrauch
		[km]	[MJ/t*km]	[MJ/t]
RC-GK 2/16	LKW	57	1,01 ⁴³	57,6
Sand 0/2	LKW	2		2,0
Kies 2/16	LKW	2		2,0

– **Betrachtung der energetischen Aufwendungen für die Bereitstellung der Gesteinskörnungen**

Die energetischen Aufwendungen zur Herstellung der Gesteinskörnungen und der Energieverbrauch für deren Transport sind der Tabelle 24 zu entnehmen. Der Transportaufwand für die RC-GK ergibt sich aus dem Transport des Bauschutts vom Gewinnungsort (Abbruch-/Rückbaubaustelle) bis zur Bauschuttzubereitungsanlage (7 km) und von dort bis zum Betonwerk (50 km); also in Summe 57 km. Im Ergebnis ist feststellbar, dass

- der Energieaufwand für die Erzeugung der RC-GK im Vergleich zum Kies höher ist und
- ein höherer Energieaufwand für den Transport der RC-GK bis zum Betonwerk im Vergleich zum Transport des Kieses entstanden ist (vgl. auch Abbildung 35).

Tabelle 24: Übersicht zu Energieaufwendungen zur Bereitstellung der RC-GK, des Kieses und des Sandes

Material	Energieverbrauch Herstellung / Förderung	Energieverbrauch Transport	Energieverbrauch Bereitstellung
	[MJ/t]	[MJ/t]	[MJ/t]
RC-GK 2/16	61,5	57,6	119,1
Kies 2/16	40,1	2,0	42,1
Sand 0/2	9,6	2,0	11,6

⁴² Wert 1,01: Energieaufwand aus der Datenbank ProBas, LKW-Diesel DE-2020, verfügbar unter: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={9FFC63F4-7F7B-4F04-9B06-2C61114F1C36}> (aufgerufen am 10.04.2018), Fahrleistung: 82.025 km/a, Lebensdauer: 7,9 a, Kraftstoff: Diesel, spez. Verbrauch: 29,2 l/100 km, Straßenkategorie: Durchschnittswert, Tonnage: 10,2 t, Luftemission: 0,0675 kg CO₂e/tkm

⁴³ Zum Vergleich: Schienengüterverkehr 0,33 MJ/tkm; Luftfracht 9,77 MJ/tkm; Seefracht 0,09 MJ/tkm; aus: „Deutsche Bahn Integrierter Bericht 2018 – Auf dem Weg zu einer besseren Bahn“, Deutsche Bahn AG, 2019, S. 91

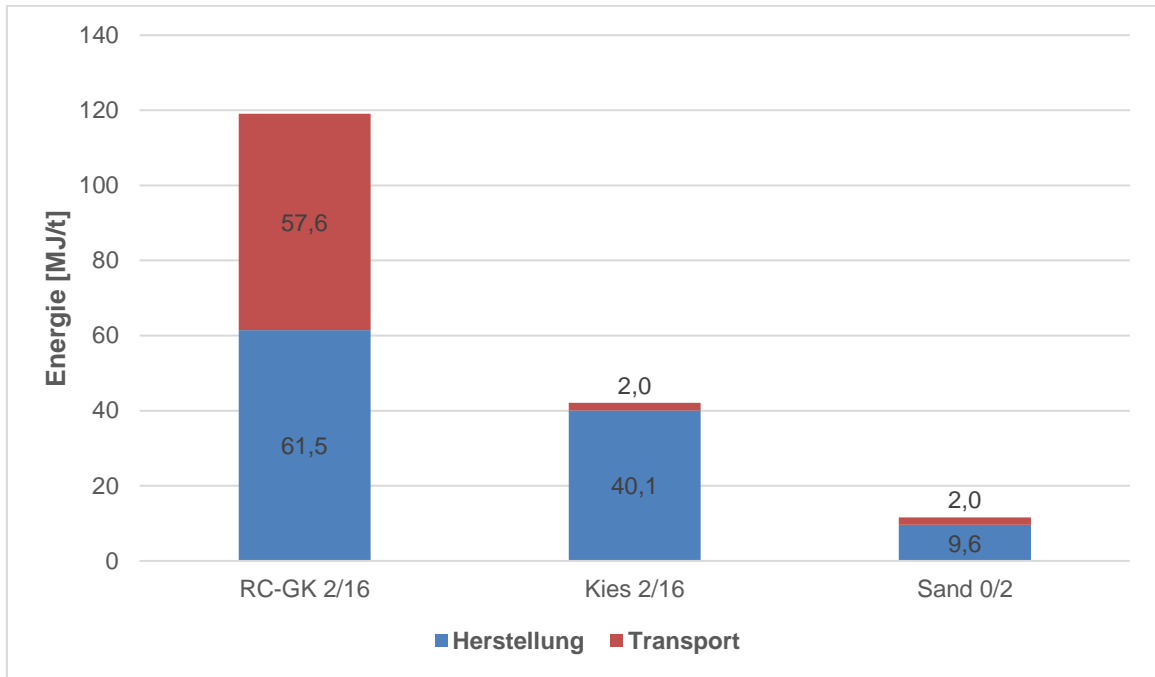


Abbildung 35: Energieaufwand zur Bereitstellung der Gesteinskörnungen

1.6 CO₂e-Emissionen für die Bereitstellung der RC-GK, von Kies und Sand

Aus den in Kapitel 1.5.4 berechneten energetischen Aufwendungen werden im Folgenden die CO₂e-Emissionen⁴⁴ für die Bereitstellung der Gesteinskörnungen errechnet. Zugrunde gelegt werden dabei:

- **119,1 MJ/t** für die Herstellung/Erzeugung + den Transport von einer Tonne RC-GK 2/16,
- **42,1 MJ/t** für die Förderung, Aufbereitung + den Transport einer Tonne Kies 2/16 und
- **11,6 MJ/t** zur Förderung + für den Transport von einer Tonne Sand 0/2.

Die Berechnung erfolgt u. a. auf Grundlage der Daten aus der ProBas-Datenbank.

Aufgrund der divergierenden Daten in der Literatur für Diesel- CO₂e – Emissionen, erfolgte die Berechnung zunächst mit dem höheren CO₂e –Wert (worst case); s. Tabelle 25.

Beim Dieselkraftstoff sind im Vergleich zum Energieträger Strom die Emissionen bei der Herstellung und während der Nutzung mit zu berücksichtigen: **CO₂e-Ausstoß Diesel: 15,5⁴⁵ g/MJ (Herstellung von Diesel) + 73,2⁴⁶ g/MJ (Nutzung von Diesel) = 88,7 g/MJ**

Tabelle 25: Aufschlüsselung der CO₂e-Emissionen bei Bereitstellung der Gesteinskörnungen - Fallbeispielrechnung

Art der Herstellung Produkt	Transport				Herstellung				Gesamt
	Herstellungs-/ Förderungsaufwand [MJ/t]	Energie-träger	CO ₂ e- Ausstoß	CO ₂ e- Ausstoß	Trans- port- auf- wand [MJ/t]	Energie- träger	CO ₂ e- Ausstoß	CO ₂ e- Aus- stoß	Gesamt CO ₂ e- Emission- en [g/t]
			[g/MJ]	[g/t]			[g/MJ]	[g/t]	
	1		2	3 (1 * 2)	4		5	6 (4 * 5)	7 (3 + 6)
Aufberei- tung	61,5	Diesel: Herstellung ⁴⁷	15,5⁴⁸	953,3	57,6	Diesel: Herstellung	15,5	892,8	10.564

⁴⁴ Definition s. Fußnote 29

⁴⁵ Bünger, Dr. U. et al.: Vergleich von CNG [Anm.: Compressed Natural Gas, z. Dt. verdichtetes Erdgas] und LNG [Anm.: Liquid Natural Gas, z Dt. verflüssigtes Erdgas] zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2016, S. 60 Tab. 22;

Vgl. auch: CO₂-Äquivalent aus TankstelleDiesel-DE-2020 (inkl. Bio) von 13,308 g CO₂e / MJ verfügbar unter: <http://www.pro-bas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={9BD908A0-5200-419E-B82C-3B2C89A20891}> aufgerufen am 10.04.2018

⁴⁶ ebd.; vgl. auch <https://www.chemie.de/lexikon/Dieselmkraftstoff.html> (aufgerufen am 23.10.2019): Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung von Diesel: 2,65 kg/l, Heizwert von Dieselmkraftstoff: 9,8 kWh/l ergibt für die Nutzung: ~ 75 g/MJ

⁴⁷ gemeint ist hiermit die Herstellung des Kraftstoffs Diesel

⁴⁸ Bünger, Dr. U. et al.: Vergleich von CNG [Anm.: Compressed Natural Gas, z. Dt. verdichtetes Erdgas] und LNG [Anm.: Liquid Natural Gas, z Dt. verflüssigtes Erdgas] zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2016, S. 60 Tab. 22;

RC-GK 2/16		+ Nutzung ⁴⁹	73,2 ⁵⁰	4501,8		+ Nutzung	+ 73,2	+	4216,3	
		Gesamt	∑ 88,7	∑ 5455,1		Gesamt	∑ 88,7	∑ 5109		
Abbau Kies 2/16	40,1	Strom	152,1 ⁵¹	6099,2	2,0	Herstellung	15,5	31,0	6.277	
						+ Nutzung	+ 73,2	+ 146,4		
						Gesamt	∑ 88,7	∑ 177,4		
Abbau Sand 0/2	9,6	Strom	152,1 ⁵¹	1460,2	2,0	Herstellung	15,5	31,0	1.638	
						+ Nutzung	+ 73,2	+ 146,4		
						Gesamt	∑ 88,7	∑ 177,4		

Unter Zugrundelegung der minimalen und der maximalen CO₂e – Emissionen für Dieselkraftstoff (70g CO₂e/MJ; in Tabelle 26 blau gekennzeichnet und 88,7g CO₂e/MJ) erfolgte die Berechnung der CO₂e – Emissionen für die Bereitstellung der Gesteinskörnungen (Tabelle 26).

Tabelle 26: Zusammenfassende Aufschlüsselung der CO₂e-Emissionen bei Bereitstellung der Gesteinskörnungen

Art der Herstellung	Herstellung				Transport				Gesamt
	Herstellungs-/ Förderungsaufwand	Energie- träger	CO ₂ e- Ausstoß	CO ₂ e- Ausstoß	Transpor- taufwand	Energie- träger	CO ₂ e- Ausstoß	CO ₂ e- Ausstoß	Gesamt CO ₂ e- Emissionen
	[MJ/t]		[g/MJ]	[g/t]	[MJ/t]		[g/MJ]	[g/t]	
	1		2	3 (1 * 2)	4		5	6 (4 * 5)	
Aufbereitung RC-GK 2/16	61,5	Diesel	70 ⁵² bis 88,7	4.305 bis 5.455	57,6	Diesel	70 bis 88,7	4.032 bis 5.109	8.337 bis 10.564
Abbau Kies 2/16	40,1	Strom	152,1 ⁵³	6.099	2,0			140 bis 177,4	6.239 bis 6.277

Vgl. auch: CO₂-Äquivalent aus Tankstelle Diesel-DE-2020 (inkl. Bio) von 13,308 g CO₂e / MJ verfügbar unter: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7b0E0B2796-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7d> aufgerufen am 10.04.2018

⁴⁹ die Nutzung entspricht der Verbrennung im Verbrennungsmotor

⁵⁰ ebd.; vgl. auch <https://www.chemie.de/lexikon/Dieselmkraftstoff.html> (aufgerufen am 23.10.2019): Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung von Diesel: 2,65 kg/l, Heizwert von Dieselmkraftstoff: 9,8 kWh/l ergibt für die Nutzung: ~ 75 g/MJ

⁵¹ CO₂-Äquivalent aus EI-KW-Park-DE-2020 (PRIMES) verfügbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7b0E0B2796-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7d> aufgerufen am 23.10.2019

⁵² Recherche: Ökobaudat 64,11 g CO₂ / t km, verfügbar unter <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f54f1e4c-07e2-4045-9f1b-fb28ef8adf13&lang=de> aufgerufen am 10.12.2019; 74 g CO₂ / ML * 1,01 MJ / t km = 74,7 g CO₂ / t km, verfügbar unter: <https://fu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de> aufgerufen am 10.12.2019

⁵³ CO₂-Äquivalent aus EI-KW-Park-DE-2020 (PRIMES) verfügbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7b0E0B2796-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7d> aufgerufen am 23.10.2019

Abbau Sand 0/2	9,6			1.460				140 bis 177,4	1.600 bis 1.638
-------------------	-----	--	--	-------	--	--	--	------------------	--------------------

Die Berechnungen ergeben für die **Bereitstellung** (Herstellung + Transport bzw. Förderung + Transport) der Gesteinskörnungen folgende CO₂e-Emissionen (vgl. Abbildung 364):

~ **8,4 bis 10,5 kg CO₂e** für 1 t RC-GK 2/16,

~ **6,2 bis 6,3 kg CO₂e** für 1 t Kies 2/16 und

~ **1,6 kg CO₂e** für 1 t Sand 0/2.

Für die **Herstellung** der RC-GK 2/16 / t (Aufbereitung des Betonbruchs in der RC-Anlage) betragen die CO₂e-Emissionen rund **4,3 bis 5,5 kg CO₂e** (vgl. Tabelle 25, Spalte 3). Beim Abbau und der Förderung von einer Tonne Kies 2/16 werden **6,1 kg CO₂e** freigesetzt. Damit ist der **CO₂e-Ausstoß bei der Kiesproduktion ca. 9 % höher** (s. Abbildung 36).

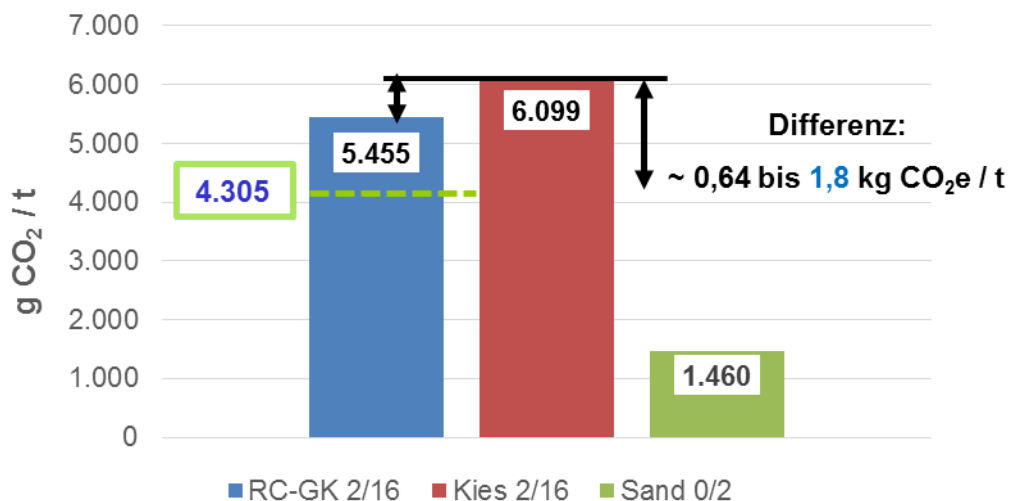


Abbildung 36: CO₂e-Emissionen bei der Herstellung von 1 t Gesteinskörnung ohne Transport

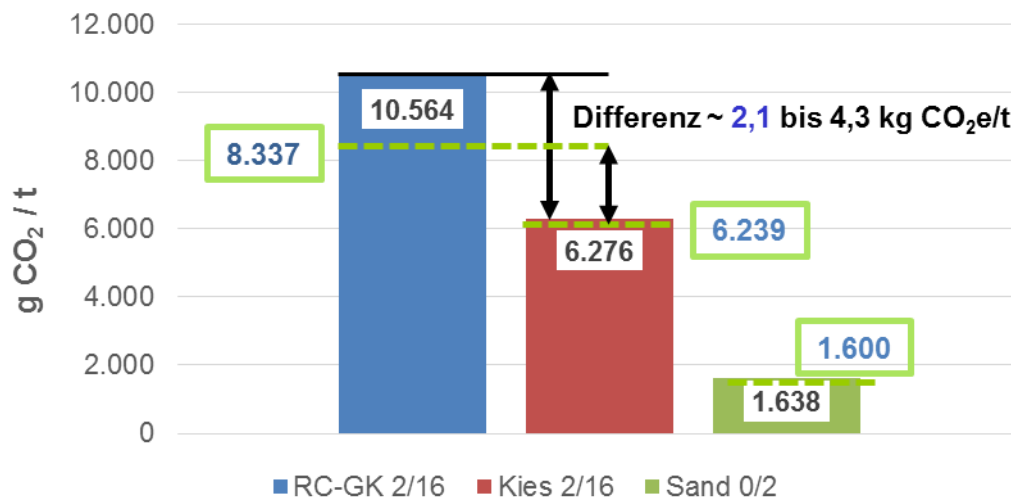


Abbildung 37: CO₂e-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 t Gesteinskörnung inkl. Transport

– **Bewertung der CO₂e-Emissionen bei der Bereitstellung der Gesteinskörnungen**

Zur vollständigen Bewertung der CO₂e-Emissionen ist es notwendig, die Menge der eingesetzten rezyklierten Gesteinskörnung zu integrieren. Beim Bau der Umweltstation sind drei Betonsorten mit der RC-GK zum Einsatz gekommen (s. Kapitel 1.4.2). Tabelle 27 gibt einen Überblick über die zum Einsatz gekommenen Mengen der einzelnen Betone und der dabei eingesetzten Mengen an RC-GK. Der mögliche Anteil an RC-GK im Beton wurde nach den Vorgaben der DAfStb-Rili⁵⁴ - entsprechend der Beanspruchung aus der Umwelt (Expositionsklassen) - ausgeschöpft.

Tabelle 27: Eingesetzte Betonmengen und Mengen an RC-GK beim Bau der Umweltstation Würzburg⁵⁵

Beton	Menge Beton [m ³]	Anteil RC-GK [%]	Menge RC-GK [t/m ³]	Gesamtmenge RC-GK [t]
	1		2	3 1 * 2
C 20/25	43,5	45	0,781	34
C 25/30	158,25	45	0,775	123
C 30/37	276,75	45	0,755	209
Gesamtmenge RC-Beton	478,5	Anteil RC-GK ausgeschöpft	Gesamtmenge RC-GK	~ 366

⁵⁴ DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

⁵⁵ Angaben von der Firma Wüffert GmbH & Co. KG

- ***Differenz an CO₂e durch den Einsatz von RC-GK im Vergleich zum Einsatz natürlicher GK zur Herstellung von Beton***

Anhand der zuvor berechneten Ergebnisse ist feststellbar, dass durch die eingesetzte RC-GK 2/16 im Beton bzw. RC-Beton in der Umweltstation ~ **0,7 bis 1,5 t** mehr an **CO₂e** ausgestoßen wurde im Vergleich zum herkömmlichen Beton⁵⁶ (s. nachfolgende Berechnung). Dies ist auf die hohe Transportentfernung für die Anlieferung der RC-GK von 57 km (von der Abbruch-/Rückbau-Baustelle über die RC-Anlage bis zum Betonwerk) zurückzuführen. Der Kies hingegen war nur 2 km von der Abbau-/Gewinnungsstätte bis zum Betonwerk zu transportieren. Das Transportdelta zur Anlieferung der RC-GK im Vergleich zum Kies beträgt demnach 55 km.

Eingesetzte Menge RC-GK (gesamt) * Differenz an CO₂e pro Tonne RC-GK (Mehrausstoß an CO₂e gegenüber Kies)

$$366 \text{ t RC-GK} * 2,1 \text{ bis } 4,3 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{t RC-GK} = \mathbf{767 \text{ bis } 1.574 \text{ kg CO}_2\text{e}}$$

Für die Berechnung des spezifischen Ausstoßes pro m³ Beton wird der Mehrausstoß an CO₂e durch die eingesetzte Betonmenge dividiert.

$$767 \text{ bis } 1.574 \text{ kg CO}_2\text{e} : 480 \text{ m}^3 \text{ RC-Beton} = \mathbf{1,6 \text{ bis } 3,3 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{m}^3 \text{ RC- Beton}}$$

Speziell für dieses Bauvorhaben ergibt sich demzufolge ein zusätzlicher Ausstoß an CO₂e in Höhe von ~ **1,6 bis 3,3 kg / m³** für den RC-Beton im Vergleich zum Beton mit natürlichen GK.

Allerdings wird nochmals betont, dass mit 2 km Transportentfernung zwischen der Kiesgrube und dem Betonwerk (vgl. Abbildung 34) eine ideale Situation vorherrscht. Diese ideale Transportkonstellation für die Produktion von Normalbeton kann jedoch generell nicht als Standard angesehen werden.

1.6.1 Synopse der energetischen Aufwendungen von RC-Beton und Normalbeton

An dieser Stelle wird zum wiederholten Male darauf hingewiesen, dass die Firma Wüffert GmbH & Co. KG aufgrund der erstmaligen Herstellung von RC-Beton als Sicherheit zusätzlich 10 kg Zement / m³ Beton eingesetzt hat. Der Betonhersteller hatte anfangs angenommen, dass der RC-Beton nicht die Festigkeiten des Normalbetons erreichen kann. Diese Besorgnis hat sich bereits in den Vorversuchen im Rahmen der Erstprüfung und der erweiterten Erstprü-

⁵⁶ gegenüber dem Einsatz des untersuchten natürlichen Kies 2/16 bei der gleichen Betonmenge von 366 t

fung sowie während der Bauzeit als unbegründet erwiesen. Alle Betone erfüllten uneingeschränkt die Anforderungen an die Betondruckfestigkeit (s. dazu Kapitel 1.4.2, speziell Abbildung 21 und Abbildung 22).

In nachstehenden Tabelle 28, Tabelle 29 und Tabelle 30 werden die Bereitstellungsaufwände für die eingesetzten Betonrezepturen dargestellt. Die in Klammern grün markierten Angaben entsprechen der Zementmenge ohne „Sicherheitszugabe“ von 10 kg / m³ Beton.

Zu beachten ist, dass der eingesetzte CEM III Zement (Hochofenzement) in der Ausschreibung vorgeschrieben wurde. Dieser Zement kann unterschiedliche Hüttensandgehalte aufweisen⁵⁷. Durch den reduzierten Klinkergehalt wird die emittierte Menge an CO_{2e} im Vergleich zu einem CEM I (Portlandzement) jedoch deutlich reduziert.

Die berechneten **energetischen Aufwände zur Herstellung der RC – Betone mit Transport** C20/25, C25/30 und C30/37 sind zu den vergleichbaren Normalbetonrezepturen (s. nachfolgende Tabelle 28, Abbildung 32 und Abbildung 33) höher:

- für den RC-Beton C20/25 um 78,7 MJ/m³ (~ 21,9 kWh/m³), d.h. etwa 15%;
für den RC-Beton C20/25 ohne „Sicherheitszugabe“ um 60 MJ/m³ (~ 16,7 kWh/m³),
d.h. etwa 11 %,
- für den RC-Beton C25/30 um 78,2 MJ/m³ (~ 21,7 kWh), d.h. etwa 13% (10 %),
für den RC-Beton C25/30 ohne „Sicherheitszugabe“ um 59,7 MJ/m³
(~ 16,6 kWh/m³), d.h. etwa 10%,
- für den RC-Beton C30/37 um 76,6 MJ/m³ (~ 21,3 kWh), d.h. etwa 11% (9 %)
für den RC-Beton C30/37 ohne „Sicherheitszugabe“ um 58,1 MJ/m³
(~ 16,1 kWh/m³), d.h. etwa 9%.

Zurückzuführen ist das Ergebnis auf den weiten Transportweg (57 km; 7 km von der Abbruchbaustelle bis zur RC-Anlage und 50 km von der RC-Anlage bis zum Betonwerk) der eingesetzten RC-GK 2/16 und die erhöhte Menge an Zement (10 kg pro m³ Beton; „Sicherheitszugabe“). Unter Nichtberücksichtigung der „Sicherheitszugabe“ von 10 kg Zement pro m³ Beton könnte der Energiemehrverbrauch um 2, 3 und 4% in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeitsklasse gesenkt werden (im Text und in Tabelle 28, Tabelle 29 und Tabelle 30 grün markiert).

⁵⁷ Zementarten nach DIN EN 197-1: CEM III/ A mit 36 - 65 M-% Hüttensand, CEM III/ B mit 66 – 80 M-% Hüttensand, CEM III/C mit 81 – 95 M-% Hüttensand (NA-Zemente (NA= niedriger wirksamer Alkaligehalt) [Zement-Merkblatt Betontechnik B1 1.2006]

Tabelle 28: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C20/25 (Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG; Betonrezeptur s. Tabelle 18) aus energetischer Sicht

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung / Betonrezeptur		Energieaufwand zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe		Energieaufwand zur Betonproduktion	
	RC-Beton [t/m³]	Normalbeton [t/m³]	Herstellung [MJ/t]	Transport [MJ/t]	RC-Beton [MJ/m³]	Normalbeton [MJ/m³]
	1	2	3	4	1 * (3+4)	2 * (3+4)
Sand 0/2	0,725	0,725	9,6	2,0	8,4	8,4
Kies 2/16	-	0,781	40,1	2,0	-	32,9
RC-GK 2/16	0,781	-	61,5	57,6	93,0	-
Kies 8/16	0,276	0,276	71,7 ⁵⁸	2,0	20,3	20,3
Zement CEM III/A 42,5 N	0,26 (0,25)	0,25	1.802 ⁵⁹	54 ⁶⁰	482,6 (464)	464
Flugasche	0,05	0,05	0 ⁶¹	113 ⁶²	5,65	5,65
Zusatzmittel PCT 631	0,00156	0,00156	- ⁶³	323 ⁶⁴	0,50	0,50
Wasser	0,19	0,19	0 ⁶⁵		0	0
Gesamt					610,5 (591,8)	531,8
					Erhöhung (Mehraufwand) an Energie im Vergleich zum Normalbeton	+ 15 % (+ 11 %)

⁵⁸ Hochgerechnet aus den Daten der energetischen Bereitstellung (vgl. Abbildung 28 und Tabelle 22):

71,7 MJ/t = (4,3 MJ/t + 6,4 MJ/t) * 6,7 t Input / 1 t Kies 8/16

⁵⁹ Entnommen aus ÖKOBAU.DAT (Datensatz Zement CEM III 42,5) http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 11.04.2018
Für einen vergleichbaren CEM II werden etwa 2.925 MJ/t (598,6 MJ/t erneuerbare Primärenergie + 2.326 MJ/t nicht erneuerbare Primärenergie) benötigt (entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=08d59fb4-e75c-4f31-82f2-caa0bcaa5f04&stock=OBD_2017_I&lang=de).

Durch die Verwendung eines CEM III wurde der Energieverbrauch um fast 45 % reduziert.

⁶⁰ Transport per LKW über 53 km vom Zementwerk Lengfurt nach Marktbreit

⁶¹ „Das Ziel des Betriebs von Kohlekraftwerken ist die Erzeugung von Strom und Wärme. Flugasche wird bei der Entstaubung des Rauchgases gewonnen. Die Systemgrenze wird nach dem Elektrofilter festgelegt. Daher sind die Aufwendungen des Kraftwerksbetriebs der Strom- und Wärmegewinnung zuzuschlagen. Flugaschen werden die Aufwendungen zur Lagerung der Flugasche sowie die Transporte zur Weiterverarbeitung zugeschlagen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt am Werkstor.“ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 12.04.2018

⁶² Transport per LKW über 112 km vom Heizkraftwerk Heilbronn nach Marktbreit

⁶³ Hier konnte aus den Datenbanken kein Wert ermittelt werden. Nachfragen bei der Firma Mapei führten leider zu keinen genauen Angaben. Deshalb bleibt das Feld offen.

⁶⁴ Transport per Zug von Langenwang (AUT) nach Biebesheim am Rhein über 760 km (der Energiebedarf ist entnommen aus: [http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=\(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED\)](http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED)) aufgerufen am 17.04.2018) und dann per LKW über 168 km von Biebesheim am Rhein nach Marktbreit.

⁶⁵ Vernachlässigt.

Tabelle 29: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C25/30 (Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG; Betonrezeptur s. Tabelle 18) aus energetischer Sicht

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung / Betonrezeptur		Energieaufwand zur Bereitstel- lung der Ausgangsstoffe		Energieaufwand zur Beton- produktion	
	RC-Beton [t/m³]	Normal-be- ton [t/m³]	Herstellung [MJ/t]	Transport [MJ/t]	RC-Beton [MJ/m³]	Normalbeton [MJ/m³]
	1	2	3	4	1 * (3+4)	2 * (3+4)
Sand 0/2	0,719	0,719	9,6	2,0	8,3	8,3
Kies 2/16	-	0,775	40,1	2,0	-	32,6
RC-GK 2/16	0,775	-	61,5	57,6	92,3	-
Kies 8/16	0,274	0,274	71,7 ⁶⁶	2,0	20,2	20,2
Zement CEM III/A 43,5 N	0,29 (0,28)	0,28	1.802 ⁶⁷	54 ⁶⁸	538,2 (519,7)	519,7
Flugasche	0,05	0,05	0 ⁶⁹	113 ⁷⁰	5,65	5,65
Zusatzmittel PCT 631	0,00174	0,00156	.. ⁷¹	323 ⁷²	0,56	0,56
Wasser	0,186	0,186	0 ⁷³		0	0
Gesamt					665,2 (646,7)	587,0
Erhöhung (Mehraufwand) an Energie im Vergleich zum Normal- beton					+ 13 % (+ 10 %)	

⁶⁶ Hochgerechnet aus den Daten der energetischen Bereitstellung (vgl. Abbildung 28 und Tabelle 22):

71,7 MJ/t = 10,7 MJ/t * 6,7 t Input / 1 t Kies 8/16

⁶⁷ Entnommen aus ÖKOBADAT (Datensatz Zement CEM III 42,5) http://www.oekobaudat.de/OEKOBADAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 11.04.2018
Für einen vergleichbaren CEM II werden etwa 2.925 MJ/t (598,6 MJ/t erneuerbare Primärenergie + 2.326 MJ/t nicht erneuerbare Primärenergie) benötigt (entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBADAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=08d59fb4-e75c-4f31-82f2-caa0bcaa5f04&stock=OBD_2017_I&lang=de).

Durch die Verwendung eines CEM III wurde der Energieverbrauch um fast 45 % reduziert.

⁶⁸ Transport per LKW über 53 km vom Zementwerk Lengfurt nach Marktbreit

⁶⁹ „Das Ziel des Betriebs von Kohlekraftwerken ist die Erzeugung von Strom und Wärme. Flugasche wird bei der Entstaubung des Rauchgases gewonnen. Die Systemgrenze wird nach dem Elektrofilter festgelegt. Daher sind die Aufwendungen des Kraftwerksbetriebs der Strom- und Wärmegewinnung zuzuschlagen. Flugasche werden die Aufwendungen zur Lagerung der Flugasche sowie die Transporte zur Weiterverarbeitung zugeschlagen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt am Werkstor.“ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBADAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 12.04.2018

⁷⁰ Transport per LKW über 112 km vom Heizkraftwerk Heilbronn nach Marktbreit

⁷¹ Hier konnte aus den Datenbanken kein Wert ermittelt werden. Nachfragen bei der Firma Mapei führten leider zu keinen genauen Angaben. Deshalb bleibt das Feld offen.

⁷² Transport per Zug von Langenwang (AUT) nach Biebesheim am Rhein über 760 km (der Energiebedarf ist entnommen aus: [http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=\(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED\)](http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED)) aufgerufen am 17.04.2018) und dann per LKW über 168 km von Biebesheim am Rhein nach Marktbreit.

⁷³ Vernachlässigt.

Tabelle 30: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C30/37 (Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG; Betonrezeptur s. Tabelle 18) aus energetischer Sicht

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung / Betonrezeptur		Energieaufwand zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe		Energieaufwand zur Betonproduktion	
	RC-Beton [t/m³]	Normalbeton [t/m³]	Herstellung [MJ/t]	Transport [MJ/t]	RC-Beton [MJ/m³]	Normalbeton [MJ/m³]
	1	2	3	4	1 * (3+4)	2 * (3+4)
Sand 0/2	0,701	0,701	9,6	2,0	8,1	8,1
Kies 2/16	-	0,755	40,1	2,0	-	31,8
RC-GK 2/16	0,755	-	61,5	57,6	89,9	-
Kies 8/16	0,267	0,267	71,7 ⁷⁴	2,0	19,7	19,7
Zement CEM III/A 43,5 N	0,34 (0,33)	0,33	1.802 ⁷⁵	54 ⁷⁶	631,0 (612,5)	612,5
Flugasche	0,05	0,05	0 ⁷⁷	113 ⁷⁸	5,7	5,7
Zusatzmittel PCT 631	0,00204	0,00204	- ⁷⁹	323 ⁸⁰	0,6	0,6
Wasser	0,187	0,187	0 ⁸¹		0	0
Gesamt					755,0 (736,5)	678,4
					+ 11 % (+ 9 %)	
					Erhöhung (Mehraufwand) an Energie im Vergleich zum Normalbeton	

⁷⁴ Hochgerechnet aus den Daten der energetischen Bereitstellung (vgl. Abbildung 28 und Tabelle 22):

71,7 MJ/t = 10,7 MJ/t * 6,7 t Input / 1 t Kies 8/16

⁷⁵ Entnommen aus ÖKOBAU.DAT (Datensatz Zement CEM III 42,5) http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 11.04.2018
Für einen vergleichbaren CEM II werden etwa 2.925 MJ/t (598,6 MJ/t erneuerbare Primärenergie + 2.326 MJ/t nicht erneuerbare Primärenergie) benötigt (entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=08d59fb4-e75c-4f31-82f2-caa0bcaa5f04&stock=OBD_2017_I&lang=de).

Durch die Verwendung eines CEM III wurde der Energieverbrauch um fast 45 % reduziert.

⁷⁶ Transport per LKW über 53 km vom Zementwerk Lengfurt nach Marktbreit

⁷⁷ „Das Ziel des Betriebs von Kohlekraftwerken ist die Erzeugung von Strom und Wärme. Flugasche wird bei der Entstaubung des Rauchgases gewonnen. Die Systemgrenze wird nach dem Elektrofilter festgelegt. Daher sind die Aufwendungen des Kraftwerksbetriebs der Strom- und Wärmegewinnung zuzuschlagen. Flugasche werden die Aufwendungen zur Lagerung der Flugasche sowie die Transporte zur Weiterverarbeitung zugeschlagen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt am Werkstor.“ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 12.04.2018

⁷⁸ Transport per LKW über 112 km vom Heizkraftwerk Heilbronn nach Marktbreit

⁷⁹ Hier konnte aus den Datenbanken kein Wert ermittelt werden. Nachfragen bei der Firma Mapei führten leider zu keinen genauen Angaben. Deshalb bleibt das Feld offen.

⁸⁰ Transport per Zug von Langenwang (AUT) nach Biebesheim am Rhein über 760 km (der Energiebedarf ist entnommen aus: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED}>) aufgerufen am 17.04.2018) und dann per LKW über 168 km von Biebesheim am Rhein nach Marktbreit.

⁸¹ Vernachlässigt.

In nachfolgender Tabelle 31 sind die Untersuchungsergebnisse zum Energiemehrbedarf für die RC-Betone gegenüber der Normalbetonrezepturen zusammengefasst. Werden die 7 km Transportweg von der Abbruch-/Rückbau-Baustelle bis zur RC- Anlage nicht berücksichtigt, reduziert sich der energetische Mehraufwand in Summe um ~ 2.588 MJ ($7 \text{ km} * 1,01 \text{ MJ} / \text{t} * \text{km} = 7,07 \text{ MJ/t} * 366 \text{ t RC-GK}$) und beträgt demnach 34.409 MJ inkl. „Sicherheitszulage“.

Unberücksichtigt der energetischen Aufwendungen für den Transport des Bauschutts von der Abbruch-/Rückbau-Baustelle bis zur RC-Anlage (2.588 MJ) und der „Sicherheitszulage“ in Höhe von 8.865 MJ (36.997 MJ – 28.132 MJ) ergäbe sich eine energetische Einsparung von 11.453 MJ; d.h. der energetische Mehraufwand würde in Summe 25.544 MJ (36.997 MJ - 11.453 MJ) betragen.

Der Energieaufwand für 50 km Transport beträgt 50,5 MJ/t; multipliziert mit der transportierten RC-GK-Menge 366 t ergibt 18.438 MJ. Damit wird deutlich, dass auch ohne Berücksichtigung aller Transporte und des „Sicherheitszuschlages“ der Energiebedarf **zur Herstellung** des RC-Betons im Vergleich zum Normalbeton um 7.106 MJ (25.544 MJ – 18.438 MJ) höher ist.

Tabelle 31: Energiebedarf für den eingesetzten RC-Beton (mit Berücksichtigung der „Sicherheitszulage“) beim Bauvorhaben der Umweltstation Würzburg

Betonsorte	Menge Beton [m³]	Energieaufwand für Normalbeton [MJ/m³] / für Σ verbaute Menge [MJ]	Mehr Energieaufwand für RC-Beton im Vergleich zum Normalbeton [MJ/m³]	Mehr Energieaufwand verbauter RC-Beton [MJ]
C 20/25	43,5	531,8 / 23.133,3	78,7 (60)	3.423 (2.610)
C 25/30	158,25	587,0 / 92.892,75	78,2 (59,7)	12.375 (9.443)
C 30/37	276,75	678,4 / 187.747,2	76,6 (58,1)	21.199 (16.079)
Gesamtmenge RC-Beton	478,5		Gesamtmehrbedarf Energie RC-GK	36.997 (28.132)

– **Auswertung der energetischen Aufwendungen für den RC-Beton**

Für alle drei Betonsorten ist feststellbar, dass zwischen 11 und 15 % mehr Energie für die Bereitstellung des RC-Betons (Herstellung und Transport) gegenüber dem vergleichbaren Normalbeton notwendig war. Dies ist insbesondere auf die weite Transportdistanz von 57 km zwischen RC-Anlage und Betonwerk zurückzuführen. Ohne die „Sicherheitszulage“ von 10 kg Zement / m³ Beton würde der Energiemehraufwand nur noch zwischen 9 % und 11 % liegen. Betrachtet man den Energieaufwand der Betonausgangsstoffe (Herstellung; vgl. Tabelle 28)

so ist dieser beim RC-Beton vergleichsweise zum Normalbeton um $\sim 35 \text{ MJ/m}^3$ (17 MJ/m^3 ohne „Sicherheitszulage“) bzw. $\sim 7 \%$ ($\sim 3\%$) höher.

1.6.2 Umweltsrelevanz

1.6.2.1 Synopse der CO₂e- Auswirkungen von RC-Beton und Normalbeton

In Tabelle 32 sind die CO₂e-Emissionen für die Bereitstellung von 1 m³ RC- und Normalbeton C20/25 erfasst.

Tabelle 32: Darstellung der CO₂e - Emissionen für 1 m³ RC- und Normalbeton (C20/25)

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung		Bereitstellungsaufwand ⁸²		Gesamtemissionen	
	RC-Beton [t/m ³]	Normalbeton [t/m ³]	Herstellung [g CO ₂ e/t]	Transport [g CO ₂ e/t]	RC-Beton [g CO ₂ e / m ³]	Normalbeton [g CO ₂ e / m ³]
	1	2	3	4	1 * (3+4)	2 * (3+4)
Sand 0/2	0,725	0,725	1.460	140 bis 177,4	1.160 bis 1.187	1.160 bis 1.187
Kies 2/16	-	0,781	6.099		-	4.873 bis 4.902
RC-GK 2/16	0,781	-	4.305 bis 5.455	4.032 bis 5.109	6.511 bis 8.251	-
Kies 8/16	0,276	0,276	10.898	140 bis 177,4	3.046 bis 3.057	3.046 bis 3.057
Zement CEM III	0,26 (0,25)	0,25	376.600 ⁸³	717 ⁸⁴	98.102 (94.329)	94.329
Flugasche	0,05	0,05	0 ⁸⁵	1.514 ⁸⁶	75,7	75,7
Zusatzmittel	0,00156	0,00156	- ⁸⁷	2.272 ⁸⁸	3,5	3,5
Wasser	0,19	0,19	0 ⁸⁹		0	
Gesamt					108.898 bis 110.676 (105.125 bis 106.903)	103.487 bis 103.554

Zugrunde gelegt für die Berechnung sind Daten, die in Kapitel 1.6 berechnet wurden sowie Daten aus ÖKOBAU.DAT für die einzelnen Materialien zur Betonherstellung und PROBAS für die Transportaufwendungen.

Tabelle 33: Darstellung der CO₂e - Emissionen für 1 m³ RC- und Normalbeton (C25/30)

⁸² Teilweise berechnet in Kapitel 5.5, vgl. Tabellen 26, 28 ff.

⁸³ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfd&stock=OBD_2017_I&lang=de 0,3766 kg CO₂e / kg Zement; umgerechnet auf Gramm CO₂e / Tonne Zement

⁸⁴ Transport per LKW über 53 km vom Zementwerk Lengfurt nach Marktbreit

⁸⁵ „Das Ziel des Betriebs von Kohlekraftwerken ist die Erzeugung von Strom und Wärme. Flugasche wird bei der Entstaubung des Rauchgases gewonnen. Die Systemgrenze wird nach dem Elektrofilter festgelegt. Daher sind die Aufwendungen des Kraftwerkbetriebs der Strom- und Wärmegewinnung zuzuschlagen. Flugaschen werden die Aufwendungen zur Lagerung der Flugasche sowie die Transporte zur Weiterverarbeitung zugeschlagen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt am Werkstor.“ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 12.04.2018

⁸⁶ Transport per LKW über 112 km vom Heizkraftwerk Heilbronn nach Marktbreit

⁸⁷ Hier konnte aus den Datenbanken kein Wert ermittelt werden. Nachfragen bei der Firma Mapei führten leider zu keinen genauen Angaben. Deshalb bleibt das Feld offen.

⁸⁸ Transport per Zug von Langenwang (AUT) nach Biebesheim am Rhein über 760 km (der Energiebedarf ist entnommen aus: [http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=\(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED\)](http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED)) aufgerufen am 17.04.2018) und dann per LKW über 168 km von Biebesheim am Rhein nach Marktbreit.

⁸⁹ Vernachlässigt.

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung		Bereitstellungsaufwand ⁹⁰		Gesamtemissionen	
	RC-Beton [t/m ³]	Normalbeton [t/m ³]	Herstellung [g CO ₂ e/t]	Transport [g CO ₂ e/t]	RC-Beton [g CO ₂ e / m ³]	Normalbeton [g CO ₂ e / m ³]
	1	2	3	4	1 * (3+4)	2 * (3+4)
Sand 0/2	0,719	0,719	1.460	140 bis 177,4	1.151 bis 1.177	1.150 bis 1.177
Kies 2/16	-	0,775	6.099			-
RC-GK 2/16	0,775	-	4.305 bis 5.455	4.032 bis 5.109	6.461 bis 8.187	-
Kies 8/16	0,274	0,274	10.898	140 bis 177,4	3.024 bis 3.035	3.024 bis 3.035
Zement CEM III	0,29 (0,28)	0,28	376.600 ⁹¹	717 ⁹²	109.422 (105.649)	105.649
Flugasche	0,05	0,05	0 ⁹³	1.514 ⁹⁴	75,7	75,7
Zusatzmittel	0,00174	0,00174	- ⁹⁵	2.272 ⁹⁶	3,95	3,95
Wasser	0,186	0,186	0 ⁹⁷			
Gesamt					120.138 bis 121.901 (116.365 bis 118.128)	114.738 bis 114.805

⁹⁰ Teilweise berechnet in Kapitel 5.5, vgl. Tabelle 25

⁹¹ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc&stock=OBD_2017_I&lang=de 0,3734 kg CO₂e / kg Zement; umgerechnet auf Gramm CO₂e / Tonne Zement

⁹² Transport per LKW über 53 km vom Zementwerk Lengfurt nach Marktbreit

⁹³ „Das Ziel des Betriebs von Kohlekraftwerken ist die Erzeugung von Strom und Wärme. Flugasche wird bei der Entstaubung des Rauchgases gewonnen. Die Systemgrenze wird nach dem Elektrofilter festgelegt. Daher sind die Aufwendungen des Kraftwerkbetriebs der Strom- und Wärmeabgabe zuzuschlagen. Flugaschen werden die Aufwendungen zur Lagerung der Flugasche sowie die Transporte zur Weiterverarbeitung zugeschlagen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt am Werkstor.“ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 12.04.2018

⁹⁴ Transport per LKW über 112 km vom Heizkraftwerk Heilbronn nach Marktbreit

⁹⁵ Hier konnte aus den Datenbanken kein Wert ermittelt werden. Nachfragen bei der Firma Mapei führten leider zu keinen genauen Angaben. Deshalb bleibt das Feld offen.

⁹⁶ Transport per Zug von Langenwang (AUT) nach Biebesheim am Rhein über 760 km (der Energiebedarf ist entnommen aus: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED}>) aufgerufen am 17.04.2018) und dann per LKW über 168 km von Biebesheim am Rhein nach Marktbreit.

⁹⁷ Vernachlässigt.

Tabelle 34: Darstellung der CO₂e – Emissionen für von 1 m³ RC- und Normalbeton (C30/37)

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung		Bereitstellungsaufwand ⁹⁸		Gesamtemissionen	
	RC-Beton [t/m ³]	Normalbeton [t/m ³]	Herstellung [g CO ₂ e/t]	Transport [g CO ₂ e/t]	RC-Beton [g CO ₂ e / m ³]	Normalbeton [g CO ₂ e / m ³]
	1	2	3	4	1 * (3+4)	2 * (3+4)
Sand 0/2	0,701	0,701	1.460	140 bis 177,4	1.122 bis 1.148	1.122 bis 1.148
Kies 2/16	-	0,755	6.099			4.710 bis 4.739
RC-GK 2/16	0,755	-	4.305 bis 5.455	4.032 bis 5.109	6.294 bis 7.976	
Kies 8/16	0,267	0,267	10.898	140 bis 177,4	2.947 bis 2.957	2.947 bis 2.957
Zement CEM III	0,34 (0,33)	0,33	376.600 ⁹⁹	717 ¹⁰⁰	128.287 (124.515)	124.515
Flugasche	0,05	0,05	0 ¹⁰¹	1.514 ¹⁰²	75,7	75,7
Zusatzmittel	0,00204	0,00204	- ¹⁰³	2.272 ¹⁰⁴	4,6	4,6
Wasser	0,187	0,187	0 ¹⁰⁵			
Gesamt					138.730 bis 140.448 (134.958 bis 136.676)	133.374 bis 133.439

⁹⁸ Teilweise berechnet in Kapitel 5.5, vgl. Tabelle 25

⁹⁹ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfd&stock=OBD_2017_I&lang=de 0,3734 kg CO₂e / kg Zement; umgerechnet auf Gramm CO₂e / Tonne Zement

¹⁰⁰ Transport per LKW über 53 km vom Zementwerk Lengfurt nach Marktbreit

¹⁰¹ „Das Ziel des Betriebs von Kohlekraftwerken ist die Erzeugung von Strom und Wärme. Flugasche wird bei der Entstaubung des Rauchgases gewonnen. Die Systemgrenze wird nach dem Elektrofilter festgelegt. Daher sind die Aufwendungen des Kraftwerkbetriebs der Strom- und Wärmegewinnung zuzuschlagen. Flugaschen werden die Aufwendungen zur Lagerung der Flugasche sowie die Transporte zur Weiterverarbeitung zugeschlagen. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt am Werkstor.“ Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 12.04.2018

¹⁰² Transport per LKW über 112 km vom Heizkraftwerk Heilbronn nach Marktbreit

¹⁰³ Hier konnte aus den Datenbanken kein Wert ermittelt werden. Nachfragen bei der Firma Mapei führten leider zu keinen genauen Angaben. Deshalb bleibt das Feld offen.

¹⁰⁴ Transport per Zug von Langenwang (AUT) nach Biebesheim am Rhein über 760 km (der Energiebedarf ist entnommen aus: [http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=\(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED\)](http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=(C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED)) aufgerufen am 17.04.2018) und dann per LKW über 168 km von Biebesheim am Rhein nach Marktbreit.

¹⁰⁵ Vernachlässigt.

In nachfolgender Tabelle 35 sind die errechneten CO₂e Emissionen für die eingesetzten Betone zusammengefasst und gegenübergestellt. Grün gekennzeichnet sind die berechneten Daten, die sich ohne „Sicherheitszulage“ von 10 kg / m³ Zement ergeben.

Tabelle 35: Gegenüberstellung der CO₂e-Emissionen Normalbeton – zum RC-Beton

Beton-sorte	Menge Beton [m ³]	Emissionen Bereitstellung Normalbeton [g CO ₂ e / m ³]	Emissionen Bereitstellung RC-Beton [g CO ₂ e / m ³]	Differenz Emissions-menge Bereitstellung Normalbeton zu RC-Beton ¹⁰⁶ [g CO ₂ e/m ³]	Summe Emissionen Bereitstellung Normalbeton [g CO ₂ e]	Zusätzliche Emissions-menge infolge zusätzlichem Zement 10kg/ m ³ „Sicherheits-zulage“ RC-Beton gesamt [g CO ₂ e]	Summe IST-Emissions-menge Bereitstellung RC-Betone [g CO ₂ e]
	1	2		3 ¹⁰⁷	4 (1*2)	5 (1*3)	6 (4+5)
C 20/25	43,5	103.487 bis 103.554	108.898 bis 110.676 (105.125 bis 106.903)	5.411 bis 7.122 (1.638 bis 3.349)	4.501.685 bis 4.504.599	235.379 bis 309.807 (71.253 bis 145.682)	4.737.064 bis 4.814.406 (4.572.938 bis 4.650.281)
C 25/30	158,25	114.738 bis 114.805	120.138 bis 121.901 (116.365 bis 118.128)	5.400 bis 7.096 (1.627 bis 3.323)	18.157.289 bis 18.167.891	854.550 bis 1.122.942 (257.473 bis 525.865)	19.011.839 bis 19.290.833 (18.414.762 bis 18.693.756)
C 30/37	276,75	133.374 bis 133.439	138.730 bis 140.448 (134.676 bis 136.676)	5.356 bis 7.009 (1.302 bis 3.237)	36.911.255 bis 36.929.243	1.482.273 bis 1.939.741 (360.329 bis 895.840)	38.393.528 bis 38.868.984 (37.271.584 bis 37.532.651)
Gesamt-menge Beton	478,5		Gesamtemissionen		59.570.229 bis 59.601.734	2.572.202 bis 3.372.490 (689.055 bis 1.567.387)	62.142.431 bis 62.974.223 (60.259.284 bis 61.169.120)

Im Ergebnis der Berechnungen wird festgestellt, dass die CO₂e-Emissionen der bereitgestellten RC-Betone im Vergleich zum Normalbeton jeweils um ~5,4 bis 7 kg CO₂e / m³ höher sind (s. Tabelle 35, Spalte 3). Dies ist – wie bereits mehrfach betont - auf die weiten Transportdistanzen der RC-GK von der Bauschuttanfallstelle über die RC-Anlage zum Betonwerk (57 km) und auf den höheren, nicht erforderlichen Zementgehalt von 10 kg / m³ im Beton zurückzuführen. Ohne diese „Sicherheitszulage“ hätten ca. 3,7 bis 4 kg von den ~ 5,4 bis 7 kg emittierten CO₂e / m³ RC-Beton in jeder Betonrezeptur eingespart werden können bzw. würden die CO₂e

¹⁰⁶ Entspricht der zusätzlichen Emissionsmenge bei der Verwendung von RC-Beton im Vergleich zu Normalbeton

¹⁰⁷ Berechnet aus der Differenz des Energieaufwandes von Normalbeton zum RC-Beton, vgl. Tabelle 32, Tabelle 33 und Tabelle 34. Schwarzer Wert entspricht dem IST-Zement-Anteil; Grüner Wert entspricht der Nichtberücksichtigung der Sicherheitszulage von 10 kg Zement / m³ Beton.

Emissionen nur um 1,6 bis 3,3 kg CO₂e / m³ höher beim RC-Beton ausfallen gegenüber dem Normalbeton.

In Summe beläuft sich bei diesem Bauvorhaben der höhere CO₂e Ausstoß auf insgesamt 2,6 bis 3,37 t (62,142 bis 62,974 t CO₂e – 59,570 bis 59,602 t CO₂e; s. Tabelle 35). Allein der Transport von der Anfallstelle des Bauschutts über die RC-Anlage bis hin zum Betonwerk der RC-GK von 57 km verursachte ~ 4,03 bis 5,11 kg CO₂e / t (s. Tabelle 26, Spalte 6); also für 366 t eingesetzte RC-GK sind dies 1,5 bis 1,8 t CO₂e (366 t * 0,004 bis 0,005 t CO₂e / t).

Die Herstellung von RC-GK (ohne Transportweg) gegenüber der Kiesproduktion ergibt in dem Fall eine Einsparung von ca. 0,644 bis 1,8 kg CO₂e / t (4.305 bis 5.455 g CO₂e / t – 6.099 g CO₂e / t). D. h., bei einer Transportentfernung < 9 bis 27 km¹⁰⁸ zwischen RC-Anlage und Betonwerk wäre der RC-Beton nach dem Kriterium CO₂e –Ausstoß ökologischer als der Normalbeton.

1.6.2.2 Bewertung der CO₂e - Auswirkungen des RC-Betons gegenüber Normalbeton

Beim Bau der Umweltstation in Würzburg sind unter Zugrundelegung der energetischen Aufwendungen für die Aufbereitungs-, Transportprozesse und Ausgangsstoffe zur Betonherstellung resp. für die Bereitstellung von RC-Beton z.B. C 20/25 inkl. „Sicherheitszulage in Höhe von 10 kg/m³ Zement“¹⁰⁹ rund 5,4 bis 7 kg CO₂e / m³ höhere Emissionen zu verzeichnen im Vergleich zur Bereitstellung eines vergleichbaren Normalbetons (vgl. Tabelle 35, Spalte 3 und Abbildung 35). Hochgerechnet auf die insgesamt verbaute Menge an RC-Beton 20/25 von 43,5 m³ ergibt einen um ca. 196 kg bis 305 kg höheren CO₂e- Ausstoß. Wäre der RC-Beton ohne „Sicherheitszulage“ von 10 kg Zement / m³ Beton produziert worden, ergäbe sich eine Reduktion der CO₂e - Emissionen um rund 3,7 bis 4 kg CO₂e / m³ bzw. für die Gesamtmenge an RC-Beton C 20/25 von ca. 161 kg bis 174 kg CO₂e.

Ohne Berücksichtigung der Transporte und „Sicherheitszulage“ stellen sich die CO₂e-Emissionen bspw. für den Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 wie folgt dar (Daten siehe Tabelle 32; Ergebnis siehe Abbildung 36): Der RC-Beton weist um rund 1,4 kg/m³ geringere CO₂e-Emissionen gegenüber dem Normalbeton auf. Hochgerechnet auf 43,5 m³ Beton C 20/25 ergäbe dies eine Verminderung um ca. 61 kg CO₂e.

¹⁰⁸ Berechnung, Daten siehe Tabelle 25:

Kiesproduktion + 2 km Transport zum Betonwerk 6.239 bis 6.277 g CO₂e pro t - RC-GK Produktion 4.305 bis 5.455,1 g CO₂e pro t = 821,5 bis 1.934 g

CO₂e pro t

821,5 bis 1.934 g CO₂e pro t : 70 bis 88,7 g CO₂e pro MJ (Dieselkraftstoff) = 9,26 bis 27,6 MJ.

9,26 bis 27,6 MJ : 1.01 MJ/t*km = rund 9 bis 27 km

¹⁰⁹ Die „Sicherheitszulage“ wäre aus bautechnischer Sicht nicht erforderlich gewesen, da alle Prüfparameter zur Herstellung der RC-Betone erfüllt wurden. Da der Betonproduzent bis dato keine Erfahrungen mit der Herstellung von RC-Betonen hatte und kein Risiko eingehen bzw. sicher gehen wollte, wurden bei jeder verbaute Rezeptur 10 kg/m³ mehr Zement eingesetzt.

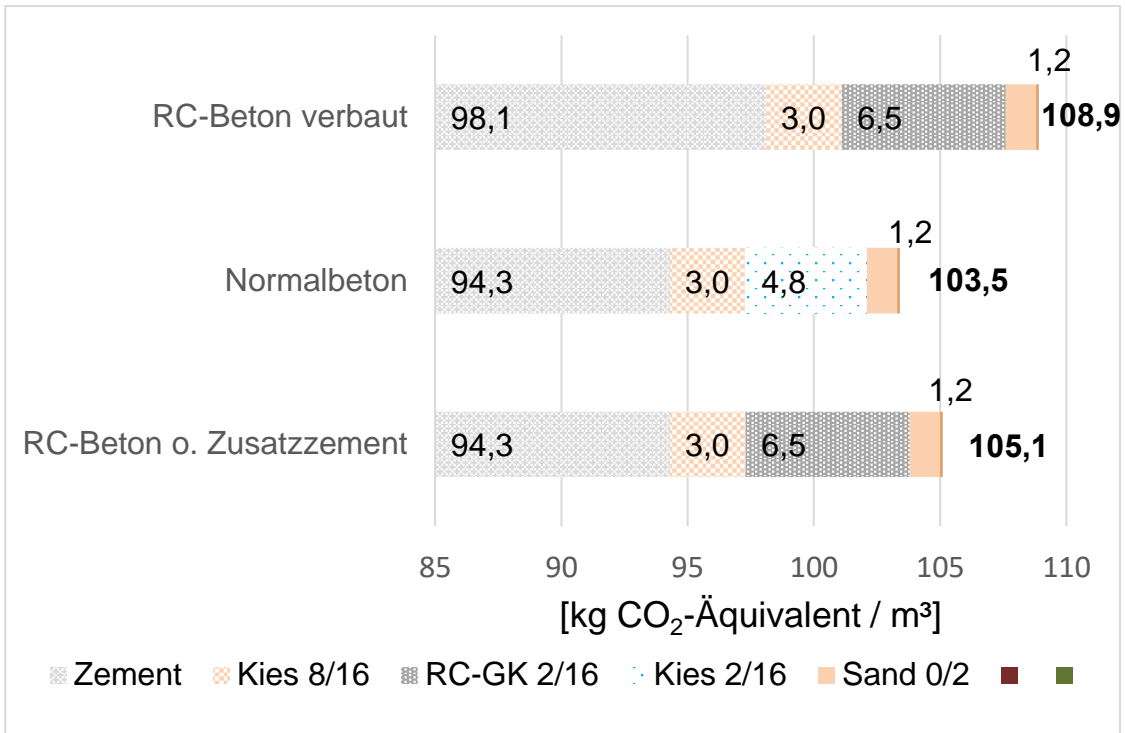


Abbildung 38: Gesamt CO₂e-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 m³ RC-/Normalbeton C 20/25 (Herstellung+ Transport)

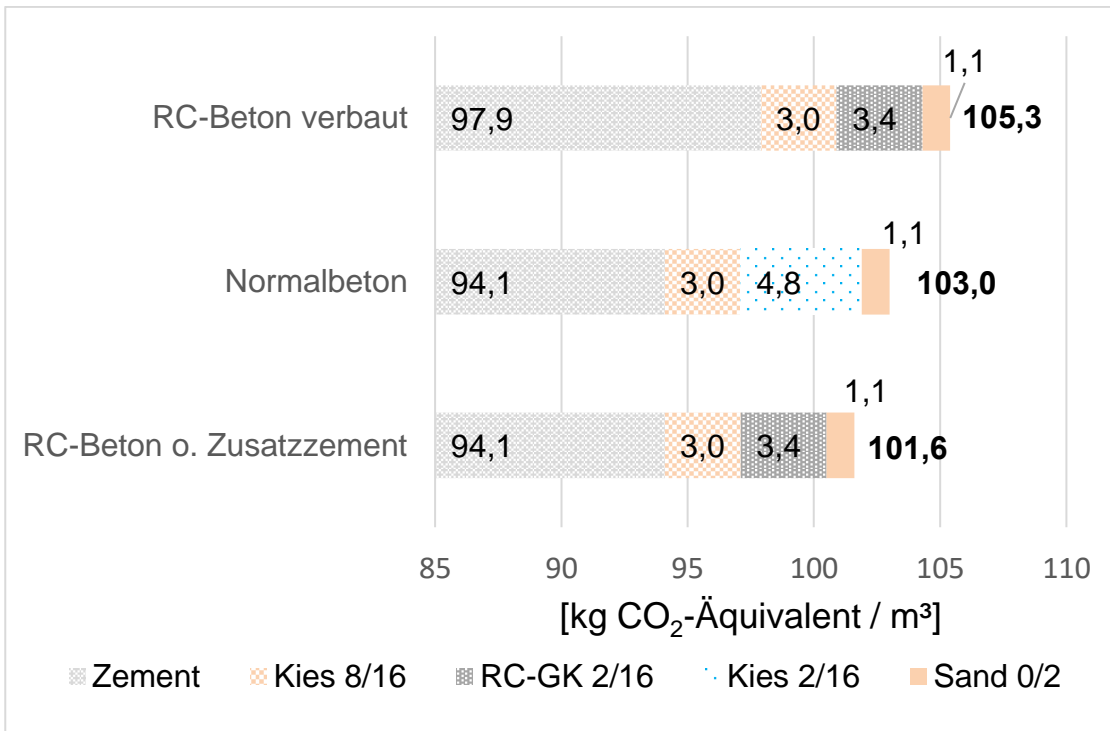


Abbildung 39: CO₂e-Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC-/Normalbeton C 20/25

Adäquat erfolgt nachstehend die Gegenüberstellung der ermittelten CO₂e - Emissionen für den eingesetzten C 30/37. Hier sind die gleichen Effekte zu verzeichnen wie beim C 20/25. Bei Betrachtung der Herstellung des RC-Betons C 30/37 ohne „Sicherheitszulage“ im Vergleich zur Herstellung des Normalbetons ergeben sich energetische Vorteile von ca. 1,3 kg

CO_{2e} pro m³ (siehe Abbildung 38; Daten siehe Tabelle 34). Hochgerechnet auf den eingesetzten RC-Beton in Höhe von 276,75 m³ (siehe Tabelle 31) ergäbe sich ein verminderter CO_{2e}-Ausstoß um rund 360 kg gegenüber dem Normalbeton.

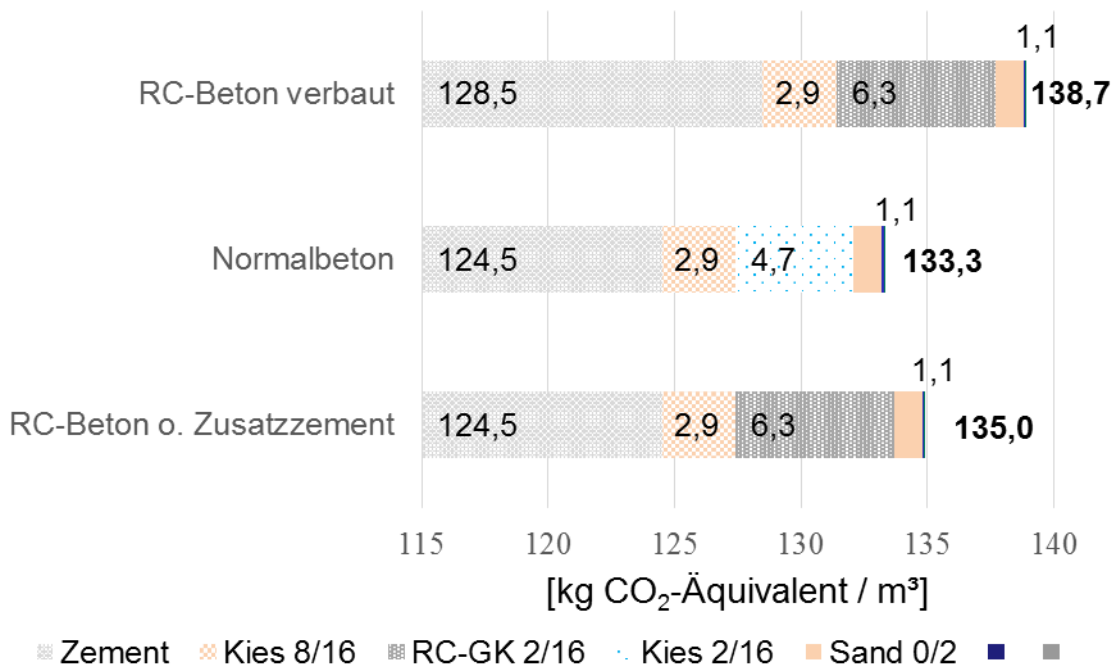


Abbildung 40: Gesamt CO_{2e}-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 m³ RC-/Normalbeton C 30/37 (Herstellung+ Transport)

Verantwortlich für den hohen CO_{2e}-Ausstoß im Beton ist jeweils der Zement mit über 90 % (vgl. Abbildungen 35 bis 38).

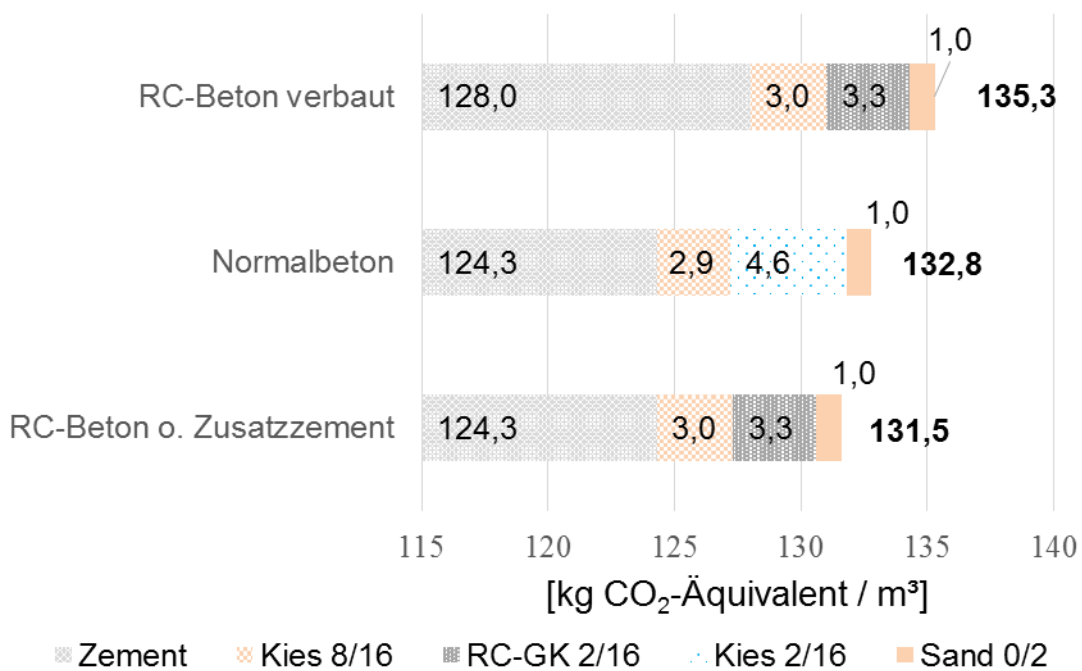


Abbildung 41: CO_{2e}-Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC-/Normalbeton C 30/37

1.6.2.3 Effekte des Ressourcenschutzes und der Schonung von Deponieraum

Für den RC-Betoneinsatz sprechen vor allem die Effekte des Ressourcenschutzes sowie die Nicht-Inanspruchnahme von Landschaft durch die Substitution von Primärrohstoffen. Für die Herstellung des Betons der Umweltstation kamen ~ 366 t RC-GK zum Einsatz. Für die Ermittlung der dazugehörigen Flächeninanspruchnahme bzw. deren Nicht-Inanspruchnahme werden Daten genutzt, die vom Landesamt für Umwelt des Freistaates Bayern zur Verfügung gestellt wurden.

Der Freistaat Bayern verfügt insbesondere in Südbayern über große Sand- und Kiesvorkommen. Im Norden sind die Vorkommen an Kiesen und Sanden auf schmale Talräume begrenzt.¹¹⁰ Die Sedimente sind überwiegend in sandiger Form vorhanden, Kiese sind in Abhängigkeit vom Liefergebiet in unterschiedlicher Weise gemischt. Oftmals besteht aber ein Mangel an qualitativen Kiesen.¹¹¹ Auf Nachfragen bei der Regierung Unterfranken und beim Landesamt für Umwelt in Augsburg konnte ermittelt werden, dass im Raum Würzburg Sande und Kiese bereits knapp werden¹¹². Flächen für die Förderung von Sand und Kies stehen nur begrenzt in der Nähe entlang des Mains zur Verfügung. Außerdem wird es immer komplizierter, weitergehende Abbaugenehmigungen für Primärbaustoffe zu erhalten. Akteure aus Naturschutzverbänden, Bürgerinitiativen sowie konkurrierende Nutzungen wehren sich gegen eine Fortsetzung des Landschaftsverbrauchs durch Kies- und Splittabbau und den damit verbundenen Eingriffen in den Naturhaushalt. Durch den Abtrag von Bodenschichten bis zu den anstehenden oberflächennahen Rohstoffen gehen die Filter- und Puffereigenschaften für das zu schützende Grundwasser verloren. Bei Nassausbaggerungen von Kiesen und Sanden wird das Grundwasser freigelegt, wodurch die Gefahr besteht, dass Schadstoffe direkt ins Grundwasser gelangen können.

Die mit dem Kiesabbau einhergehende Flächeninanspruchnahme ist maßgeblich von der Mächtigkeit der abzubauenen Schicht abhängig. Im Raum Würzburg und entlang des Mains kann von einer durchschnittlichen Dicke der Kiesschicht von fünf bis sechs Metern ausgegangen werden¹¹³. Bei der nachstehend überschläglichen Berechnung wird im Mittel eine 5,5 m dicken Schicht angesetzt. Bei einer Dichte für den Kies von 1,8 t/m³ und einer Mächtigkeit von 5,5 m ergibt sich für einen Quadratmeter Fläche eine abbauwürdige Menge von 9,9 t Kies. Ausgehend von der zum Einsatz gekommenen Menge an RC-GK 366 t zur Herstellung von RC-Beton und dem Abbauverhältnis beim Kies von 1:3,75 (vgl. Abbildung 32) ergibt sich eine **eingesparte Landschaftsfläche von ~ 140 m²**.¹¹⁴

¹¹⁰ Rohstoffe in Bayern – Situation, Prognosen, Programm, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, Mai 2002, S. 31, 34

¹¹¹ Ebd., S. 36

¹¹² Diverse Telefonate mit Mitarbeitern bei der Regierung Unterfranken bzw. mit dem Landesamt für Umwelt im April 2018.

¹¹³ Nach Angaben des Landesamts für Umwelt des Freistaates Bayern: Dr. Büttner.

¹¹⁴ Berechnung: $366 \text{ t} / 9,9 \text{ t/m}^2 = 36,97 \text{ m}^2 * 3,75 = 138,6 \text{ m}^2$

Diese Fläche entspricht der Entnahme von Kies und Sand in einem theoretischen Fall, wenn senkrecht ab OK +/- 0 mm ausgehoben würde. Wird allerdings von einer schichtenweise Abgrabung ausgegangen, so ergibt sich bei einer maximalen Grubentiefe (je Schicht) von ca. 2 Meter¹¹⁵ **eine Gesamtfläche von ~ 380 m².**

Die Verwendung von RC-Baustoffen und RC-Gesteinskörnungen schont zudem die knappen Verfüll- und Deponiekapazitäten. Zwar sind mit Stand 2015 für den Freistaat Bayern noch ausreichend Restlaufzeiten für Deponien prognostiziert worden¹¹⁶

- für die DK 0 (nicht gefährliche Inertabfalldeponien, umgangssprachlich häufig als „Bauschuttdeponie“ und „Erdaushubdeponie“ bezeichnet) > 15 Jahre,
- für die DK I (nicht gefährliche und gefährliche Abfälle wie z.B. Bodenaushub, Bauabfälle, Asbest) > 22 Jahre,
- für die DK II (nicht gefährliche und gefährliche Abfälle wie z.B. Bauabfälle, Straßenaufbruch, Aschen) > 28 Jahre,

allerdings wird auch auf regionale Deponiebedarfe aufmerksam gemacht. Dies wurde seitens der Projektleiterin des hier vorgelegten Teilprojektes „RC-Beton“ auch in Würzburg festgestellt. Nicht unerhebliche Mengen an Bauschutt wurden bis in den Freistaat Thüringen transportiert aufgrund nicht ausreichender örtlicher Entsorgungskapazitäten.

1.6.3 Kosten

Eine Ermittlung der genauen Kosten war nicht möglich, denn die beteiligten Unternehmen haben sich nur verbal geäußert. Zahlen wurden nur punktuell zur Verfügung gestellt.

Im Gegensatz zu Naturbaustoffen müssen RC-Baustoffe neben den bautechnischen auch umwelttechnische Anforderungen erfüllen. Die Kosten für die Überprüfung der Einhaltung der bau- und umwelttechnischen Anforderungen belaufen sich auf etwa 8.000 € inkl. MwSt¹¹⁷. Bei einer produzierten Menge von rund 366 t ergibt sich ein Preis allein für die Prüfkosten des Materials von rund 21,90 €/t. Vergleiche mit den Preislisten von drei Schüttgut anbietern¹¹⁸ im Raum Würzburg ergaben, dass für vergleichbare Kiese die Preise zwischen 17,40 €/t bis 19

¹¹⁵ Angenommen nach BG-Vorschrift „Bauarbeiten“ (BGV C 22), sowie DIN 4124 Baugruben und Gräben für Gräben ohne Absicherung

¹¹⁶ Haeming, Hartmut: Gibt es deutschlandweit Deponiebedarf für mineralische Abfälle?, Vortrag anlässlich 27. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar am 18. und 19. Oktober 2017, PPP Folie 15

¹¹⁷ Angaben auf Nachfrage bei Wüffert GmbH & Co. KG sowie SBE GmbH & Co. KG.

¹¹⁸ Preisliste Firma Wüffert, Stand 01.01.2017 https://www.beuerlein-transportbeton.de/downloads/2017/Preislisten_Wueffert_Schuetttqueter_privat.pdf

Preisliste Baustoffe Bankert Beton, Stand 2018 http://www.baustoff-benkert.de/fileadmin/user_upload/bilder/pdf/2018-PL-Schuetttgutpreisliste.pdf

Preisliste LZR, Stand 2015,

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiyIM7kgsbaA-hUNa1AKHURFAzQQFghWMAc&url=https%3A%2F%2Fwww.lzr-baur.de%2Fapp%2Fdownload%2F24134224%2Fpreise_PDF2015.pdf&usq=AOvVaw3dko5_TVeXUIkrBGzTp2mJ

€/t zzgl. Mehrwertsteuer liegen (20,70 bis 22,60 €/t). Zuzüglich der Kosten für die Herstellung der RC-GK ist festzustellen, dass die RC-GK teurer sind als vergleichbare Naturbaustoffe. Dies begründet sich vor allem durch die erstmalige Herstellung der RC-GK und den o.a. höheren Prüfungsumfang / Prüfungskosten für die rezyklierte Gesteinskörnung.

Neben den erhöhten Kosten für die RC-GK im Vergleich zum Kies hat der Betonhersteller zusätzlich Aufwendungen für die Produktionskontrolle. Diese umfassen nach DAfStb-Rili¹¹⁹:

- eine Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der RC-GK für jedes Lieferfahrzeug,
- die Ermittlung der Kornrohichte (ofentrocken) und der Wasseraufnahme nach zehn Minuten in jeder Produktionswoche,
- die Ermittlung des Wassergehaltes der RC-GK bei Änderungen der Feuchtebedingungen sowie
- im Rahmen des Festigkeitsnachweises für den Beton muss der Luftgehalt am Frischbeton und die Frischbetonrohichte bestimmt werden.

Bei regelmäßigem Abruf der RC-GK und RC-Beton, verringert sich der Anteil an den Prüf- und Zertifizierungskosten für die RC-GK. Der Verkaufspreis der RC-GK kann in Folge dessen ebenfalls verringert werden, was insbesondere dem Betonproduzenten und auch dem Kunden / Bauunternehmen / Bauherren zugute kommt.

Erfahrungen in Mannheim / Ludwigshafen haben gezeigt, dass RC-Beton zu gleichen Kosten wie Normalbeton hergestellt werden kann, wenn ein kontinuierlicher Abruf erfolgt. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass Sande bzw. Kiese endlich verfügbar sind bzw. nicht nachwachsen und sie auch im Raum Würzburg knapp werden, ist eine Alternative zum Einsatz von natürlichen Baustoffen unumgänglich. Sowohl die RC-GK und der RC-Beton haben in diesem Bauvorhaben gezeigt, dass Sie hinsichtlich der Qualität gegenüber vergleichbaren Naturrohstoffen / Normalbetonen absolut gleichwertig sind.

¹¹⁹ DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

Thema „Recyclingbaustoffe im Hochbau – Ressourceneffizienz – Von der Linear- in die Kreislaufwirtschaft“ durch auf der Dr. Alexander Hentschel, Dr. Kreuz + Partner, Büro Nürnberg und Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke, BTU Cottbus-Senftenberg, zum Einsatz von RC-Beton vor ca. 100 interessierten Teilnehmern referierten. Deutlich herausgearbeitet worden ist, dass RC-Beton wie konventioneller Beton bemessbar, herstellbar und einsetzbar ist ohne Qualitätseinbußen.

1.8 Empfehlungen für den künftigen Einsatz von RC-Beton

Mit dem erstmalig wissenschaftlich begleiteten Einsatz von RC-Beton wurde im Freistaat Bayern ein Grundstein für eine hochwertige Verwertung von mineralischen Abfällen im öffentlichen Hochbau gelegt. Um den Einsatz von RC-Baustoffen (hier im Speziellen RC-Beton) weiter zu forcieren, wird empfohlen, Folgendes zu beachten.

➤ Nachfrage

Die konstanten Nachfragen zum Einsatz von RC-Beton sichern die Bereitstellung von zertifizierten RC-Gesteinskörnungen im konstruktiven Betonbau. Dies gilt für Bauherren insbesondere der öffentlichen Hand, aber auch für private Bauherren und sorgt für einen künftig umfassenderen Einsatz von RC-Betonen. Sowohl das Bayerische Abfallwirtschaftsgesetz¹²⁰ als auch ein Beschluss vom Bayerischen Landtag¹²¹ fordern kategorisch die Vorbildwirkung der öffentlichen Hand im Umgang und dem Einsatz von RC-Baustoffen. Mit der Umweltstation wurde ein erstes Zeichen für den Einsatz von RC-Beton gesetzt; dies gilt es auszubauen, um ökologische Vorteile weiter zu erschließen.

➤ Markt RC-Beton

Anhand der Kostenbetrachtung (s. Kapitel 1.6.3) wird deutlich, dass die Produktion von RC-GK anfangs mit hohen Kosten verbunden ist. Beim Absatz von größeren Mengen sinken sowohl die anteiligen Kosten für den Gesteinskörnungsproduzenten als auch die für den Betonhersteller. Durch die oben dargelegte Nachfrage können insbesondere öffentliche Bauvorhaben dazu beitragen, einen Absatzmarkt für den RC-Beton zu schaffen. Die Ergebnisse der RC-GK hinsichtlich der CO₂e-Emissionen (s. Kapitel 1.6 ff.) dienen dazu, den Umwelt- und Ressourcenschutz im Bausektor stärker zu beachten und Potenziale für Einsparungen zu erschließen. Außerdem wird durch knapper werdende Naturbaustoffe zwangsläufig der Markt für RC-Baustoffe interessanter werden.

¹²⁰ Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Bewirtschaftung von Abfällen in Bayern, in der Fassung der Bekanntmachung vom 9. August 1996, zuletzt geändert im Juli 2017, Art. 2 Abs. 1 „*Staat, Gemeinden, Landkreise, Bezirke und die sonstigen juristischen Personen des öffentlichen Rechts haben vorbildhaft dazu beizutragen, daß die Ziele des Art. 1 Abs. 1 erreicht werden.*“

²*Dazu sind finanzielle Mehrbelastungen und Minderungen der Gebrauchstauglichkeit in angemessenem Umfang hinzunehmen.“*

¹²¹ Drucksache 17/15975: Beschluss des Bayerischen Landtages vom 14.03.2017. Der Wortlaut des Beschlusses ist:

„Die Staatsregierung wird aufgefordert, sich dafür einzusetzen, dass zur Schonung natürlicher Ressourcen bei staatlichen Baumaßnahmen künftig vermehrt Recyclingbaustoffe anstelle von natürlichen Rohstoffen eingesetzt werden, soweit dies ohne Mehrkosten für die Baumaßnahme möglich ist und umweltfachliche Gründe, insbesondere der Gewässerschutz, nicht entgegenstehen.“

➤ **Öffentlichkeitsarbeit**

Die transparente Darstellung der Ergebnisse ist notwendig, um die Akzeptanzbarrieren, die noch immer für RC-Baustoffe existieren, abzubauen. Leuchtturmprojekte, wie der Bau der Umweltstation dienen dazu, erste Ergebnisse und Erfahrungen unter praktischen Bedingungen zu analysieren. Für die Verbreitung der Ergebnisse ist es notwendig, die Öffentlichkeit (Bauherren, Fachplaner etc.) umfassend zu informieren und einzubinden, wie bspw. durch Vor-Ort-Begehungen. Damit einhergehend sind ein Wissenszuwachs für alle Beteiligten und Interessierten sowie auch ein Abbau von Hemmnissen oder Befindlichkeiten, die derzeit noch gegen einen Einsatz von RC-Baustoffen sprechen, zu erwarten.

Die BTU Cottbus – Senftenberg hat in diesem Feld bereits ein Forschungsprojekt mit dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz durchgeführt. Im Ergebnis aus dem Projekt ist eine Broschüre veröffentlicht worden, die das Wissen der am Bau Beteiligten, als auch von Interessierten, erweitern und die Akzeptanz für RC-Baustoffen steigern soll. Die Broschüre ist im Internet abrufbar unter: http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_abfall_002.htm

➤ **Evaluation einer Primärbaustoffsteuer¹²²**

Angesichts der in den letzten Jahren immer stärker geforderten Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeitsbetrachtung in unterschiedlichsten Wirtschaftsbereichen (u.a. Bauwirtschaft, Landwirtschaft, IT, Industrie, Energiesektor), ist der Vorschlag zur Einführung einer Primärbaustoffsteuer für die Baubranche zu diskutieren. Das Umweltbundesamt hat im August 2019 ein Positionspapier veröffentlicht, welches dafür plädiert vor allem den Abbau von natürlichen Bausanden, -kiesen und Naturgips mit einem Wert von 3,00 € pro Tonne zu besteuern. Bei einer geschätzten Menge von 250 Mio. t dieser Primärbaustoffe, könnten sich Steuereinnahmen in Höhe von 750 Millionen Euro generieren. Mit diesen Einnahmen soll es ermöglicht werden, die Attraktivität von Sekundärrohstoffen zu steigern, bzw. durch Förderung den Einsatz von Recyclingbaustoffen zu verbessern resp. RC-Baustoffe wettbewerbsfähiger zu machen. Sofern diese Steuer eingeführt und die damit verbundenen Verwendungsmaßnahmen umgesetzt werden, werden Neubauten zukünftig nicht nur ökologische Vorteile bieten, sondern im starken Maße auch finanzielle Einsparungen bieten.

¹²² In Anlehnung an das „Positionspapier zur Primärbaustoffsteuer“, Umweltbundesamt (Hrsg.), August 2019; <https://eu-recycling.com/Archive/24904> (aufgerufen am 16.01.2020)

Literaturverzeichnis

Analysebericht 141117-78 der isu umweltinstitut GmbH vom 03.11.2017

Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2005

Angaben der Beuerlein GmbH & Co. KG sowie Wüffert GmbH & Co. KG

Bünger, Dr. U. et al.: Vergleich von CNG [Anm.: Compressed Natural Gas, z. Dt. verdichtetes Erdgas] und LNG [Anm.: Liquid Natural Gas, z Dt. verflüssigtes Erdgas] zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2016

DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

Die neue Bauprodukte-Verordnung, Hrsg. Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V., Berlin 2012

DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen

Diverse Telefonate mit Mitarbeitern bei der Regierung Unterfranken bzw. mit dem Landesamt für Umwelt im April 2018

Gesteinskörnungen für Normalbeton – Zement-Merkblatt Betontechnik B 2 , 1.2012, Hrsg.: InformationsZentrum Beton GmbH

Haeming, Hartmut: Gibt es deutschlandweit Deponiebedarf für mineralische Abfälle?, Vortrag anlässlich 27. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar am 18. und 19. Oktober 2017

Hahne, Erich: *Technische Thermodynamik: Einführung und Anwendung*. 5. völlig überarb. Auflage. Oldenbourg-Verlag, München 2010

LAGA PN 98: Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; Hrsg.), 2004

Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), 2010

Mettke, Angelika; Schmidt, Stephanie; Jacob, Steffen: Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin Mitte, 2015

Positionspapier zur Primärbaustoffsteuer, Umweltbundesamt (Hrsg.), August 2019 <https://eu-recycling.com/Archive/24904> aufgerufen am 16.01.2020

Preisliste Baustoffe Bankert Beton, Stand 2018 http://www.baustoff-benkert.de/fileadmin/user_upload/bilder/pdf/2018-PL-Schuettgutpreisliste.pdf aufgerufen am 25.04.2018

Preisliste Firma Wüffert, Stand 01.01.2017 https://www.beuerlein-transportbeton.de/downloads/2017/Preislisten_Wueffert_Schuettgueter_privat.pdf aufgerufen am 25.04.2018

Preisliste LZR, Stand 2015,
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiylM7kgsbaAhUNa1AKHURFAzQQFghWMAc&url=https%3A%2F%2Fwww.lzr-baur.de%2Fapp%2Fdownload%2F24134224%2Fpreise_PDF2015.pdf&usq=AOvVaw3dtko5_TVeXUIkrBGzTp2mJ aufgerufen am 25.04.2018

ProBas-Datenbank, Energieaufwand LKW-Diesel DE-2020, verfügbar unter: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={9FFC63F4-7F7B-4F04-9B06-2C61114F1C36}> Prüfbericht Nr. BBV 1714032/2 vom 07.04.2017

ProBas-Datenbank, Energieaufwand Zug ist entnommen aus: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={C509D739-9E20-4B8D-A461-ACC627110AED}> aufgerufen am 25.04.2018

ProBas-Datenbank, CO₂-Äquivalent aus Tankstelle Diesel-DE-2020 (inkl. Bio) verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={9BD908A0-5200-419E-B82C-3B2C89A20891}> aufgerufen am 25.04.2018

Prüfbericht des Jouaux Prüflabor für mineralische Baustoffe und Beton GmbH & Co. KG vom 11.04.2017

Rohstoffe in Bayern – Situation, Prognosen, Programm, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, Mai 2002, S. 31, 34

Technisches Merkblatt CEM III/A 42,5 N, Lieferwerk Lengfurt, Hrsg.: Heidelberg Cement AG, Verkaufsregion Süd-Ost

ÖKOBAU.DAT, Energiebedarf Zement CEM III 42,5 http://www.oekobaudat.de/OEKO-BAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 25.04.2018

ÖKOBAU.DAT, Energiebedarf Flugasche Entnommen aus http://www.oekobaudat.de/OEKO-BAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 25.04.2018

2 LCA Analyse

2.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Für die Umweltstation der Stadt Würzburg mit 700 m² Nettogrundfläche wurden drei Ökobilanz-Tools eLCA (BBSR), SBS Building Sustainability (IPB) und LEGEP verglichen. Die Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt Erarbeitung eines innovativen Energie-, Ökologie- und Informationskonzepts für die Umweltstation der Stadt Würzburg (InnUmWü) (Az 33520/01-35) wurden herangezogen und einer detaillierten Analyse unterzogen, um genauere Aussagen über die einzelnen LCA Gesamtergebnisse und Lebenszyklusphasen treffen zu können. Diese Untersuchungen beruhten noch auf der Entwurfsplanung des Gebäudes. Zu diesem Zeitpunkt der Planung waren noch keine detaillierte Aussage bzgl. aller verbauten Materialien oder Komponenten möglich.

Durch die Berücksichtigung von nicht in der Ökobaudat vorhandenen Produktdeklarationen (EPDs) und den detaillierten Aufbau nach der Leistungsverzeichnisstruktur hatte LEGEP bzgl. der Detailgenauigkeit ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber Programmen wie eLCA und SBS.

Auf Grundlage der detaillierten Ausschreibungsunterlagen der Umweltstation wurden die einzelnen Leistungsverzeichnispositionen in LEGEP eingegeben und die Ergebnisse verglichen. In der Werkplanung mit anschließender Ausschreibung gab es keine größeren konstruktiven Änderungen zur Entwurfsphase. Somit war die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Vorgängerprojekt gegeben.

2.1.1 ÖKOBAUDAT und Software-Tools

2.1.1.1 ÖKOBAUDAT

Mit der ÖKOBAUDAT, einer Baustoffdatenbank für die Bestimmung globaler ökologischer Wirkungen, stellt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) eine vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken zur Verfügung. Die Entwicklung dieser Datenbasis begann mit der Version 2009 und hat sich mit den Versionen 2011, 2013, 2015, 2016-I, 2017-I usw. bis zur heutigen 2020-I weiterentwickelt.

Die verwendete ÖKOBAUDAT 2017-I enthält sowohl generische Datensätze als auch firmen- oder verbandsspezifische Datensätze aus Umweltproduktdeklarationen. Die darin veröffentlichten Daten sind kostenfrei zugänglich und können für die Ökobilanzierung auf Bauteil- und Gebäudeebene verwendet werden.

Es werden Baumaterialien sowie Bau- und Transportprozesse der folgenden Kategorien hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen beschrieben, so beispielsweise mineralische Baustoffe, Dämmstoffe, Holzprodukte, Metalle, Anstriche und Dichtmassen, Bauprodukte aus Kunststoffen, Komponenten von Fenstern, Türen und Vorhangfassaden und Gebäudetechnik. Als erste Ökobilanz-Datenbank folgt die ÖKOBAUDAT seit September 2013 der DIN EN 15804. Dies bedeutet, dass die Phase D, Potenzial für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling, separat betrachtet wurde.

Die ÖKOBAUDAT wurde im Rahmen von Forschungsprojekten der Forschungsinitiative Zukunft Bau durch die Forschungspartner thinkstep (vormals PE International AG), KIT - Institut für Angewandte Informatik und Online Now! GmbH mit Unterstützung der Deutschen Baustoffindustrie entwickelt.

2.1.1.2 LCA Software Übersicht

Es wurde eine Auswahl von relevanten Software Programmen zur LCA-Analyse getroffen. Betrachtet wurden im Rahmen des Projekts folgende Software-Produkte:

- eLCA vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR),
- SBS Building Sustainability vom Fraunhofer IBP in Zusammenarbeit mit der Firma thinkstep AG,
- LEGEP von der LEGEP Software GmbH und der LCA Vorabschätzung „precheck“.

Die Versionen eLCA und SBS befanden sich zum Untersuchungszeitpunkt noch in einer Beta-Testphase.

2.1.2 Lebenszyklus

Für die Gebäude LCA in Deutschland und Europa wurde eine einheitliche Bewertung durch die Norm DIN EN 15978¹²³ definiert. Für die Zertifizierung nachhaltiger Gebäude nach BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen) oder DGNB (Deutsche Gesellschaft Nachhaltiges Bauen) ist eine Ökobilanz nach dieser Norm erforderlich.

¹²³ DIN EN 15978:2012-10, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualitäten von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung

LEBENSWEGLPHASEN	A 1-3			A 4-5		B 1-7					C 1-4				D		
	HERSTELLUNGS- PHASE			ERRICHT- UNGSPHASE		NUTZUNGSPHASE					ENDE DES LEBENSZYK- LUS				VORTEILE UND BELASTUNGEN AUßERHALB DER SYSTEMGRENZE		
	Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung / Einbau Nutzung ¹	Instandhaltung ²	Instandsetzung	Austausch ²	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallverwertung	Entsorgung	Potential für Wiederver- wertung, Rückgewin- nung und Recycling	
MODULE GEMÄß DIN EN 159878	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
DEKLARIERTE MODULE	X	X	X				(x) ³		(x) ⁴		X	(x) ⁵			X	X	X



- 1) Wirkungen aus gesundheitsrelevanten Emissionen in Innenraum und Umwelt werden den Kriterien ENV1.2 und SOC1.2 zugeordnet
- 2) Ein Szenario für den Energiebedarf des Gebäudes im Betrieb, wobei nur der in der EnEV 2014 erfasste Energiebedarf berücksichtigt wird (Modul B6).
- 3) Instandhaltungsprozesse werden als Wasserverbrauch in ENV2.2 unvollständig abgebildet. In Gebäude-Ökobilanz nicht enthalten.
- 4) Beinhaltet nur die Herstellung und Entsorgung des ausgetauschten Produkts, nicht den Austauschprozess selbst (analog Bauprozess).
- 5) Wasserverbrauch des Gebäudes wird nur für den Indikator „Wasserverbrauch“ berücksichtigt.

Abbildung 43: Bezeichnung und beschreibende Angaben der Module A bis D in Bezug auf die DIN EN 15978 aus der DGNB-Dokumentation.¹²⁴

Abbildung 43 zeigt die benötigten Module auf den Lebenswegphasen für die Berechnung nach DGNB. Grundsätzlich war es in vielen Programmen lange Zeit nach Einführung der DIN EN 15978 nicht möglich die Phase D (Potenzial für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling) getrennt von Phase C (Abfallverwertung und Entsorgung - Ende des Lebenszyklus) zu betrachten. LEGEP war hier 2016 das erste Programm, dass diese Aufteilung DIN-gerecht umgesetzt hatte. Bei geschätzt jedem zweiten Datensatz ist bis heute nur die Herstellungsphase A1-A3 in der Ökobaudat angegeben. Die Phase D wird oftmals, wenn Datensätze vorhanden sind, nur mit Pauschalwerten berücksichtigt.

¹²⁴ DGNB Kriterium ENV1.1, Ökobilanz – Emissionsbedingte Umweltwirkungen, Version 2015 (15.05.15) und DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau, ENV 1.1, Ökobilanz des Gebäudes, Version 2018, https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/version2018/02_ENV1.1_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf?m=1526470491&, (16.10.2018)

Tabelle 36: Systemgrenzen der Ökobilanz im DGNB System (berücksichtigt sind die Kostengruppen der DIN 276)¹²⁵.

Legende:
 x = berücksichtigt
 (x) = teilweise berücksichtigt
 = nicht berücksichtigt
 = nicht relevant

KG	DIN 276	A 1-3 HERSTELLUNGSPHASE			A 4-5 ERRICHTUNGSPHASE		B 1-7 NUTZUNGSPHASE							C 1-4 ENDE DES LEBENSZYKLUS				D
		ROHSTOFFESCHAFFUNG	TRANSPORT	PRODUKTION	TRANSPORT	ERRICHTUNG / EINBAU	NUTZUNG	INSTANDHALTUNG	INSTANDESETZUNG	AUSTAUSCH	MODERNISIERUNG	ENERGIEVERBRAUCH IM BETRIEB	WASSERVERBRAUCH IM BETRIEB	RÜCKBAU / ABRISS	TRANSPORT	ABFALLVERWERTUNG	ENTSORGUNG	POTENTIAL FÜR WIEDERVERWERTUNG, RÜCKGEWINNUNG UND RECYCLING
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
300	Bauwerk - Baukonstruktionen																	
310	Baugrube																	
311	Baugrubenherstellung																	
312	Baugrubenumschließung																	
313	Wasserhaltung																	
319	Baugrube, sonstiges																	
320	Gründung																	
321	Baugrundverbesserung	x	x	x												x	x	x
322	Flachgründungen	x	x	x												x	x	x
323	Tiefgründungen	x	x	x												x	x	x
324	Unterböden und Bodenplatten	x	x	x												x	x	x
325	Bodenbeläge	x	x	x			(x) ²			(x) ¹						x	x	x
326	Bauwerksabdichtungen	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
327	Dränagen	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
329	Gründung, sonstiges	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
330	Außenwände																	
331	Tragende Außenwände	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
332	Nichttragende Außenwände	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
333	Außenstützen	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
334	Außentüren und -fenster	x	x	x			(x) ²			(x) ¹						x	x	x
335	Außenwandbekleidungen, außen	x	x	x			(x) ²			(x) ¹						x	x	x
336	Außenwandbekleidungen, innen	x	x	x			(x) ²			(x) ¹						x	x	x
337	Elementierte Außenwände	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
338	Sonnenschutz	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
339	Außenwände, sonstiges	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
340	Innenwände																	
341	Tragende Innenwände	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
342	Nichttragende Innenwände	x	x	x						(x) ¹						x	x	x
343	Innenstützen	x	x	x						(x) ¹						x	x	x

Tabelle 36 zeigt einen Ausschnitt der Systemgrenzen der DGNB Ökobilanz. Die Umweltstation wurde in diesem Projekt jedoch über die DGNB Grenzen hinaus betrachtet. Um ein neu errichtetes Gebäude vollständig abzubilden, wurden auch z.B. die Baugrube oder grundlegende Versorgungsleitungen auf dem Grundstück einbezogen.

¹²⁵ DGNB Kriterium ENV1.1, Ökobilanz – Emissionsbedingte Umweltwirkungen, Version 2015 (15.05.15)

Für die DGNB Auswertung wurden nicht relevante Kostengruppen (Ausschnitt siehe Tabelle 36) im LEGEP-Programm deaktiviert, um ein Ergebnis innerhalb der DGNB Grenzen vergleichen zu können.

2.1.3 Ausführungsvariante und RC-Beton

Durch die Auswertungen im Vorgängerprojekt kam die Variante PLUS, ähnlich der Gebäudehülle eines Passivhauses, mit Wärmepumpe und Eisspeicher zur Ausführung.

Für die Berechnung der Ökobilanz nach DGNB wurde die PV-Anlage für alle Varianten nicht berücksichtigt. Berechnungen im Vorgängerprojekt mit einem Ertrag von 31.200 kWh/a zeigten, dass hier ein Spitzenergebnis in der Ökobilanzierung der DGNB nahe der Maximalpunktzahl erreicht wurde. Folglich wären sonst die Ergebnisse der Gebäudekonstruktion in den Hintergrund gerückt. Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wurden in diesem Forschungsprojekt die Ergebnisse der einzelnen Phasen aufgeschlüsselt und direkt miteinander verglichen. In der Ausführung des Gebäudes wurde die PV-Anlage aus Platzgründen minimal auf 28.000 kWh/a reduziert.

Durch die fehlende Produktdeklaration (EPD) des recycelten Beton konnte dieses Material nicht in der ökologischen Berechnung berücksichtigt werden. Im Projekt war es nicht möglich einen verwendbaren Datensatz mit einer anderen Software im EPD - Format mit allen emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Primärenergien zu erzeugen.

Durch den ca. 95% Anteil des Zementes am Global Warming Potential (GWP) im Beton, kann bei gleichem Zementbedarf davon ausgegangen werden, dass es zumindest in der wichtigsten emissionsbedingten Umwelteinwirkung dem GWP keine signifikanten Verbesserungen durch den RC-Beton zu erwarten sind.

2.1.4 Produktdeklaration (EPD)

In LEGEP konnten Produktdeklarationen (EPDs) über eine neu geschaffene Eingabeschnittstelle (siehe Abbildung 44) berücksichtigt werden.

Projektspezifische Sachbilanz Schüco Isokorb® Typ KXT50-CV35-V6-H200-RE1120							
Basisdaten	Indikator	Einheit	Herstellung A1-A3	Einbau A5	Abfallbehandlung C3	Beseitigung C4	Potenziale nach dem Ende des Lebenszyklus D
Resourceneinsatz	Umweltwirkung						
Umweltwirkung	Globales Treibhauspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquival.	25,000000	0,000000	0,000000	0,101000	-6,300000
	Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	kg CFC11-Äquival.	0,000000753000000	0,000000000000000	0,000000000000000	0,000000000001270	-0,000000051200000
	Versauerungspotential (AP)	kg SO ₂ -Äquival.	0,188000	0,000000	0,000000	0,000643	-0,070400
	Eutrophierungspotential (EP)	kg P-Äquival.	0,009140	0,000000	0,000000	0,000088	-0,003460
	Potential zur Bildung für troposphärisches Ozon (POCP)	kg C ₂ H ₄ -Äquival.	0,015900	0,000000	0,000000	0,000060	-0,003880
	Potential für den abiotischen Ressourcenabbau - Elemente für nicht-fossile Ressourcen (ADP Stoffe)	kg Sb-Äquival.	0,001820000	0,000000000	0,000000000	0,000000000	-0,001280000
	Potential für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe (ADP Fossil)	MJ	330,000000	0,000000	0,000000	1,330000	-72,900000

Die Fehleranalyse dieser Schnittstelle wurde vom ZAE Bayern an die LEGEP-Entwickler weitergegeben, was zu einer reibungslosen Funktion in der nächsten Version führte.

Trotz intensiver Suche nach bestimmten Produkten, konnten nur wenige EPDs (z.B. Isokorb) überhaupt in der Berechnung berücksichtigt werden. Fehlende Bauteile in der Ökobaudat 2017, z.B. für die Holzpfostenriegelfassade, wurde vergeblich bei den EPD Ausstellern wie der IFT Rosenheim oder im Institut Bauen und Umwelt e.V. angefragt, um zumindest produktähnliche EPDs verwenden zu kommen.


L5 - Fassadenarbeiten			
02 Holzpfostenriegelfassade			
	Pfosten-Riegel-Fassade EG und OG - 3fach-Verglasung	233,900	m ² 337
	Pfosten-Riegel-Fassade EG und OG - Holz mit Klemmprofil	365,800	m 337
	Pfosten-Riegel-Fassade EG und OG - Anschluss	170,200	m 337

Abbildung 44: Aufteilung der Pfosten-Riegel-Fassade in LEGEP

So mussten folglich z.B. das Bauteil Holz-Pfosten-Riegelfassade (siehe Abbildung 44) aus Einzelmaterialien erstellt werden, um eine genaue Abbildung verwenden zu können. Die einzelnen Flächen und Längen wurden hier aufwendig in einer separaten Berechnung ermittelt.

Auch die RC-Beton Ergebnisse der TU Cottbus konnten durch viele fehlende ökologische Werte (z.B. Versauerungspotenzial, Überdüngungspotenzial usw.) und der nicht vorhandenen EPD Gliederung nicht in der EPD Eingabe berücksichtigt werden. Durch den sehr geringen Unterschied im CO₂ (s. 1.6.2.2) wurde hier von Normalbeton ausgegangen.

2.2 LCA Ergebnis der Elementmethode nach LEGEP

Durch die Weiterentwicklungen und die Fehleranalyse des Programmes LEGEP verändern sich die Ergebnisse (s. Tabelle 37) des Vorprojektes. Hier wurde die Analyse noch auf Grundlage der Entwurfsplanung durchgeführt.

Programme	Ökobaudat	Pellet	WP	WP + Eisspeicher
SBS	2013	89,3	75,7	80,2
eLCA	2011	85,4	73,8	79,6
LEGEP	2011	86,4	105,3	106,8
LEGEP - mit Phase C/D	2015	93,9	104,8	106,7
LEGEP - getrennte Phase C and D - 1. Korrektur	2015	97,5	98,6	101,9
LEGEP - getrennte Phase C and D - 2. Korrektur	2016	—	—	99,6
precheck	2015	97,9	101,4	103,1

Tabelle 37: Übersicht der LCA Ergebnisse nach DGNB Neubauversion Büro und Verwaltungsgebäude (NBV2015)

Erst in LEGEP – getrennte Phase C und D – 2. Korrektur konnte davon ausgegangen werden, dass ein vollständig korrektes Ergebnis ohne Programmfehler vorliegt.

Tabelle 38: Bewertungssystem DGNB - Neubauversion Büro- und Verwaltungsgebäude (NBV15)

	Indikator	NBV15				
		Maximale Bewertungspunkte in der DGNB	Gewichtungs-schlüssel Indikatoren	CPL - Maximal mögliche Teilpunkte	Gewichtung Teilergebnisse	Maximal möglicher Erfüllungsgrad
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / CO ₂	120	0,40	48	7	120
	Versauerungspotenzial - AP / SO ₂	120	0,15	18		
	Ozonbildungspotenzial - POCP / C ₂ H ₄	120	0,15	18		
	Überdüngungspotenzial - EP / PO ₄ ³⁻	120	0,15	18		
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / R11	120	0,15	18		
Primär-energie	Gesamtprimärenergiebedarf - PEges	120	0,40	48	5	100
	Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PEne	120	0,60	72		
	PEe/PEges (PEe - erneuerbarer Primärenergieb.)	50	0,20	10		
DGNB Ausw. NBV15	Erfüllungsgrad "Ökobilanz"					111,7

Als Grundlage wurde für alle Auswertungen das Bewertungssystem DGNB – Neubauversion Büro- und Verwaltungsgebäude (NBV15) (s. Abbildung 41) gewählt. Somit konnte ein vergleichbares Ergebnis erhalten werden. Ergebnisse über 100% sind nur theoretisch möglich. Die offizielle Maximalpunktzahl des Erfüllungsgrad „Ökobilanz“ liegt nach DGNB bei 100%.

Erst durch die detaillierte Auswertung der emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und den Ressourcenbedarf (Primärenergie) konnte ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Programmen und Versionen gezogen werden.

Tabelle 39: Vergleich aller Werkzeuge für den Energie PLUS-Hausstandard mit Wärmepumpe und Eisspeicher nach DGNB-Erfüllungsgrad.

	Tool Ökobaudat	PLUS + WP + Eisspeicher						precheck 2015
		SBS 2013	eLCA 2011	LEGEP 2011	LEGEP 2015 Phase C/D	LEGEP 2015 separate Phase C und D	LEGEP 2016 separate Phase C und D	
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	45,94	41,53	28,69	31,32	35,93	39,57	25,24
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0871	0,0901	0,0660	0,064	0,0685	0,0780	0,0610
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0076	0,0092	0,0073	0,0063	0,0065	0,0072	0,0060
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0099	0,0093	0,0070	0,0083	0,0095	0,0081	0,0086
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{FR11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	29,6	45,7	33,0	6,0	-3,5	20,5	53,0
Primärenergie	Gesamprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	976,9	765,0	483,2	512,6	625,1	592,2	479,2
	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	635,6	673,3	407,2	366,7	424,9	493,8	335,9
	Erneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{re} / MJ	341,3	91,7	75,9	146,0	200,2	98,4	143,3
	PE _{re} /PE _{ges}	0,35	0,12	0,16	0,28	0,32	0,17	0,30
DGNB Evalu. NBV15	Punkte "emissionsbedingte Umwelteinwirkungen"	84,4	82,4	111,7	111,5	103,2	99,3	105,3
	Punkte "Ökobilanz - Primärenergie"	74,3	75,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Erfüllungsgrad "Ökobilanz"	80,2	79,6	106,8	106,7	101,9	99,6	103,1

Tabelle 39 zeigt ein deutlich positiveres Ergebnis in LEGEP als in SBS und eLCA. Erst durch eine detaillierte Analyse könnte ein Programmfehler in der LEGEP Berechnung (rot markiert, Variante LEGEP 2011, LEGEP 2015 Phase C/D und LEGEP precheck 2015) analysiert werden. Die Ursache war die Nichtberücksichtigung eines Eingabefeldes der Wärmepumpe (WP) durch das Programm LEGEP.

Die LEGEP-Auswertungen mit der Ökobaudat 2015 oder 2016 mit separater Phase C und D zeigte gegenüber den Auswertungen von eLCA mit der Ökobaudat 2011 oder SBS mit der Ökobaudat 2013 ein deutlich besseres Ergebnis.

Das negative Ergebnis des Ozonschichtabbaupotenzial (rot markiert) in LEGEP 2015 separate Phase C und D ist unrealistisch. Die Analyse der Daten ergab, dass der Fehler durch unrealistisch hohe Gutschriften in Phase D entstanden war.

Erst die Auswertung mit LEGEP und der Ökobaudat 2016 separate Phase C und D lies ein vollständig plausibles Ergebnis zu. Zudem wurde in dieser Auswertung der nach EnEV Berechnung ermittelte Strombedarf direkt in LEGEP berücksichtigt. Der unbekannt Umrechnungsfaktor in LEGEP von Wärmeenergie in Wärmepumpenstrom konnte somit verhindert werden.

LEGEP precheck ist ein vereinfachtes Verfahren in LEGEP, was die komplette Gebäudekonstruktion mit Durchschnittswerten nach der Ökobilanz der DGNB in einer sehr frühen Planungsphase

abbilden kann. Es soll dem Nutzer helfen eine ökologische Erstabschätzung für das Gebäude zu bekommen. Jedoch ist auch hier eine vorläufige EnEV Berechnung Grundvoraussetzung, um die Energiedaten des Ist- und Referenzgebäudes berücksichtigen zu können.

Das Ergebnisse Erfüllungsgrad „Ökobilanz“ im Vergleich zwischen LEGEP precheck und LEGEP mit der Ökobaudat 2015 ist trotz des Wärmepumpenfehlers in der Berechnung ähnlich. Ursache ist der relativ große Anteil der einzelnen emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Ressourcenbedarf (Primärenergie) der Nutzungsphase über 50 Jahren am Gesamtergebnis. Wird das Ergebnis genauer analysiert, zeigten sich in einigen Faktoren kleinere Unterschiede.

Besonders bei Holzkonstruktionen und komplexeren Gebäuden mit vielen technischen Komponenten ist diese Vorabschätzungsmethode mit LEGEP Precheck mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

2.2.1 Auswirkungen der Ökobaudat am Beispiel der PLUS Variante mit Pelletheizung

Zur Überprüfung der Unterschiede wurde am Beispiel der Pelletheizung ein Vergleich zwischen der Ökobaudat 2011 und 2015 durchgeführt. Alle Bauteile wurden in LEGEP mit der Ökobaudat 2015 eingegeben und anschließend auf die Ökobaudat 2011 geändert.

Tabelle 40: Bewertungssystem DGNB - Neubauversion Büro- und Verwaltungsgebäude (NBV15) – Vergleich der PLUS-Variante mit einer Pelletheizung.

	Tool Ökobaudat	PLUS + Pellet		
		eLCA 2011	LEGEP 2011	LEGEP 2015
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	38,96	37,38	37,53
	Versauerungspotenzial - AP / $\text{kg}_{\text{SO}_2\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,114	0,112	0,099
	Ozonbildungspotenzial - POCP / $\text{kg}_{\text{C}_2\text{H}_4\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0108	0,0114	0,0092
	Überdüngungspotenzial - EP / $\text{kg}_{\text{PO}_4\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0134	0,0131	0,0153
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / $\cdot 10^{-8} \text{ kg}_{\text{R11-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	29,7	36,0	6,0
	Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PE_{ges} / MJ	984,1	980,8
Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PE_{ne} / MJ		538,5	523,8	450,5
Erneuerbarer Primärenergiebedarf - PE_{re} / MJ		445,6	456,9	237,2
$\text{PE}_{\text{re}} / \text{PE}_{\text{ges}}$		0,45	0,47	0,34
DGNB Evalu. NBV15	Punkte "emissionsbedingte Umwelteinwirkungen"	84,2	85,2	90,7
	Punkte "Ökobilanz - Primärenergie"	87,1	88,0	100,0
	Erfüllungsgrad "Ökobilanz"	85,4	86,4	94,6

Tabelle 40 zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen LEGEP und eLCA mit der Ökobaudat 2011. Die Ergebnisse mit LEGEP und der Ökobaudat 2015 waren trotz der höheren berücksichtigten Materialanzahl in vielen Punkten der emissionsbedingten Umwelteinwirkungen beim gleichen DGNB Bewertungssystem besser als mit der Ökobaudat 2011.

Besonders im Bereich der Primärenergien war eine deutliche Veränderung der Ergebnisse festzustellen. Somit wurde mit der Ökobaudat 2015 ein deutlich höherer Erfüllungsgrad „Ökobilanz“ erreicht.

In dieser Auswertung wurde wegen der Vergleichbarkeit in allen Programmen die gemeinsame Phase C/D genutzt. Durch die in der DIN EN 15978 geforderte Trennung der Phase C und D in der Ökobilanz wird sich das Ergebnis nochmals verbessern.

2.2.2 Detailauswertung der LCA Ergebnisse

Durch die Detailauswertung der Rohdaten nach den Bewertungsfaktoren der DGNB (emissionsbedingte Umwelteinflüsse und Ressourcenbedarf (Primärenergie)) war die Möglichkeit eines objektiven Vergleiches geschaffen.

In den folgenden Tabellen sind die Detailauswertungen der LCA Phasen der Variante Gebäudehülle ähnlich einem Passivhaus (PLUS-Variante) mit Wärmepumpe und Eisspeicher dargestellt. Die prozentuale Abweichung wurde zu SBS mit der Ökobaudat 2013 errechnet.

Die Bewertungskriterien verändern sich in der neuen DGNB 2018 (s.2.6 Veränderungen in der DGNB Bewertung 2018 zu 2015 ab Seite 131. Im Projekt wurde die grundlegend veränderte DGNB-Auswertung der Ökobilanz nach ENV 1.1 (DGNB 2018) eingeführt.

Zum Zeitpunkt der Auswertungen war die Nutzung dieser grundlegend veränderten Bewertung der DGNB 2018 in LEGEP nicht möglich, da die Softwarehersteller Zeit zur Umstellung benötigten. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde daher weiter die Auswertung nach DGNB 2015 verwendet.

2.2.2.1 Herstellungsphase A1-A3

Die einzelnen Materialien und Bauteile wurden in jedem Programm möglichst getreu den Vorgaben der Planer nach der Entwurfsplanung eingegeben. Die nach DIN 276 in Kostengruppe 400 Bauwerk - Technische Anlagen benötigten Daten konnten zum damaligen Planungsstand nicht in der ökologischen Berechnung berücksichtigt werden. Ausnahme waren die nach DGNB benötigte Kostengruppe 421 der Wärmeversorgungsanlage. Zudem wurde hier wie nach der DGNB gefordert ein Malus von 10% auf das Ergebnis der Gebäudekonstruktion in Kostengruppe 300 für die Technischen Anlagen der Kostengruppe 400 berücksichtigt.

Tabelle 41: Vergleich der Herstellungsphase A1-A3 zwischen den einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.

Herstellungsphase A1 - A3		SBS mit Ökobaudat 2013	eLCA mit Ökobaudat 2011		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. B)		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. K)		LEGEP mit Ökobaudat 2016 - Berechnung nach Elementen (2.K)	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kgCO ₂ -equiv./(m ² NRA a)	12,85	10,70	-16,7	11,61	-9,7	11,70	-8,9	11,70	-8,9
	Versauerungspotenzial - AP / kgSO ₂ -equiv./(m ² NRA a)	0,0323	0,0303	-6,0	0,0323	0,2	0,0330	2,4	0,0330	2,4
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kgC ₂ H ₄ -equiv./(m ² NRA a)	0,0031	0,0037	17,9	0,0029	-6,1	0,0029	-6,7	0,0029	-6,7
	Überdüngungspotenzial - EP / kgPO ₄ -equiv./(m ² NRA a)	0,0040	0,0034	-16,1	0,0036	-9,6	0,0037	-8,1	0,0037	-8,1
	Ozonschichtabbau-potenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kgR11-equiv./(m ² NRA a)	9,25	22,21	140,2	5,13	-44,5	5,13	-44,5	5,13	-44,5
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PEges / MJ	199,74	181,06	-9,3	159,29	-20,3	161,33	-19,2	161,33	-19,2
	Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PEne / MJ	174,20	161,90	-7,1	124,05	-28,8	125,56	-27,9	125,56	-27,9
	PEre/PEges PEre - erneuerbarer Primärenergiebedarf	0,13	0,11		0,22		0,22		0,22	

Die Auswertung der Herstellungsphase (s. Tabelle 41) zeigte trotz unterschiedlicher Ökobaudatenbanken grundsätzlich ähnliche Ergebnisse in allen Programmen. Nur im Ozonschichtabbau-potenzial dem ODP sind größere Unterschiede erkennbar. Kleinere Unterschiede sind in den Primärenergien zur Herstellung des Gebäudes vorhanden.

Aufgrund der niedrigeren Anzahl an Daten in der Ökobaudat 2013 war zu erwarten gewesen, dass die Ergebnisse von SBS geringfügig niedriger sind als die von LEGEP mit der Ökobaudat 2015. Jedoch sind in den neueren Datenbank Ökobaudat 2015 deutlich mehr Datensätze für die Phase D vorhanden, welche die ökologische Bilanz wiederum verbessern.

In LEGEP Programmversionen ab Ende 2016 war es möglich die nach DIN EN 15804¹²⁶ geforderte Trennung der Phasen C und D der Umweltproduktdeklarationen an der Umweltstation zu untersuchen.

2.2.2.2 Nutzungsphase - Instandsetzungsphase B2 und Austauschphase B4

In der Nutzungsphase wurde die Instandsetzungsphase B2 und die Austauschphase B4 von Materialien und Komponenten während der Lebensdauer von 50 Jahren betrachtet.

¹²⁶ DIN EN 15804:2014-07, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorien – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung

Tabelle 42: Vergleich der Nutzungsphase B2, B4 zwischen den einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.

	Nutzungsphase - Instandsetzungs- und Austauschphase B2/B4	SBS mit Ökobaudat 2013	eLCA mit Ökobaudat 2011		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. B)		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. K)		LEGEP mit Ökobaudat 2016 - Berechnung nach Elementen (2.K)	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kgCO ₂ -equiv./(m2NRA-a)	3,65	4,02	10,1	1,44	-60,4	1,46	-59,9	1,46	-59,9
	Versauerungspotenzial - AP / kgSO ₂ -equiv./(m2NRA-a)	0,0097	0,0100	3,1	0,0071	-26,6	0,0072	-25,1	0,0072	-25,1
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kgC ₂ H ₄ -equiv./(m2NRA-a)	0,0014	0,0019	41,2	0,0014	3,7	0,0014	3,4	0,0014	3,4
	Überdüngungspotenzial - EP / kgPO ₄ -equiv./(m2NRA-a)	0,0012	0,0011	-12,6	0,0005	-57,7	0,0005	-56,7	0,0005	-56,7
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / -10-8 kgR11-equiv./(m2NRA-a)	6,86	10,44	52,3	0,64	-90,6	0,64	-90,6	0,64	-90,6
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PEges / MJ	77,36	106,20	37,3	33,17	-57,1	33,58	-56,6	33,58	-56,6
	Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PEne / MJ	75,62	103,98	37,5	28,69	-62,1	28,99	-61,7	28,99	-61,7
	PEre/PEges PEre - erneuerbarer. Primärenergiebedarf	0,02	0,02		0,14		0,14		0,14	

Tabelle 42 zeigt vor allem größere Abweichungen in vielen emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Primärenergien. Die deutlich niedrigen Werte von LEGEP im Treibhauspotenzial, Überdüngungspotenzial, Ozonschichtabbaupotenzial sowie in der Primärenergie konnten nicht logisch zu den anderen Programmen nachvollzogen werden.

2.2.2.3 Energieverbrauches im Betrieb B6

Tabelle 43: Vergleich des Energieverbrauches im Betrieb B6 zwischen den einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.

	Nutzungsphase - Energieverbrauch im Betrieb B6	SBS mit Ökobaudat 2013	eLCA mit Ökobaudat 2011		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. B)		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. K)		LEGEP mit Ökobaudat 2016 - Berechnung nach Elementen (2.K)	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kgCO ₂ -equiv./(m2NRA-a)	28,26	26,15	-7,5	15,84	-43,9	22,77	-19,4	26,41	-6,5
	Versauerungspotenzial - AP / kgSO ₂ -equiv./(m2NRA-a)	0,0469	0,0517	10,2	0,0242	-48,4	0,0348	-25,8	0,0439	-6,4
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kgC ₂ H ₄ -equiv./(m2NRA-a)	0,0035	0,0037	6,5	0,0018	-47,6	0,0026	-24,8	0,0032	-6,3
	Überdüngungspotenzial - EP / kgPO ₄ -equiv./(m2NRA-a)	0,0045	0,0048	6,5	0,0039	-13,0	0,0056	25,0	0,0042	-6,2
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / -10-8 kgR11-equiv./(m2NRA-a)	13,92	13,41	-3,7	0,00	-100,0	0,29	-97,9	15,71	12,8
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PEges / MJ	713,37	495,78	-30,5	328,17	-54,0	471,66	-33,9	438,78	-38,5
	Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PEne / MJ	397,80	423,74	6,5	212,91	-46,5	306,00	-23,1	374,88	-5,8
	PEre/PEges PEre - erneuerbarer. Primärenergiebedarf	0,44	0,15		0,35		0,35		0,15	-67,1

Die Detailauswertungen der Versorgungsphase B6 mit LEGEP / Ökobaudat 2015 - 1. Berechnung (Tabelle 43) zeigte deutlich niedrigere emissionsbedingte Umwelteinwirkungen und Primärenergiewerte gegenüber den anderen Programmen. Die Ursache war ein Programmfehler der Nichtberücksichtigung eines Wärmepumpeneingabefeldes in LEGEP. Dies wurde den Entwicklern mitgeteilt und von diesen in der nächsten Version korrigiert.

In einer neueren Beta-Programmversion wurde die Berechnung der Versorgung mit LEGEP / Ökobaudat 2015 – 1. Korrektur nochmals mit dem Wärmebedarf der Umweltstation ausgeführt. Die Ergebnisse waren hierbei schon deutlich ähnlicher zu den anderen Programmen.

Nach einem neuen offiziellen Update wurde in LEGEP / Ökobaudat 2016 die separate Phase C und D eine zweite Korrektur errechnet. Hier wurde der nach EnEV genau ermittelte Stromverbrauch für die Wärmepumpe berücksichtigt. Zuvor wurde der Stromverbrauch durch das Programm anhand des Heizwärmebedarf nach EnEV und des Heizsystems Wärmepumpe selbst errechnet. Dabei war nicht bekannt welchen cop-Wert das Programm für die Wärmepumpenberechnung annimmt.

Die Ergebnisse von LEGEP mit der Ökobaudat 2016 und der direkten Eingabe des Stromverbrauches über eine 50-jährige Betriebsdauer passen gut mit den Ergebnissen von eLCA und SBS zusammen. Die verwendeten emissionsbedingten Umweltfaktoren und Ressourcenverbräuche (Primärenergie) für Strom (siehe 2.2.2.4 ab Seite 103) zeigen, dass sich die verwendeten DGNB Stromfaktoren im Zeitraum 2011- 2016 nicht verändert haben.

Die Ergebnisse von LEGEP mit der Ökobaudat 2016 und der direkten Eingabe des Stromverbrauches über eine 50-jährige Betriebsdauer passen gut mit den Ergebnissen von eLCA und SBS zusammen. Die verwendeten emissionsbedingten Umweltfaktoren und Ressourcenverbräuche (Primärenergie) für Strom (siehe 2.2.2.4 ab Seite 103) zeigen, dass sich die verwendeten DGNB Stromfaktoren im Zeitraum 2011- 2016 nicht verändert haben.

Tabelle 44: Vergleich der Entsorgung C und der Wiederverwertung, Rückgewinnung und des Recyclings der Phase D für die einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.

Entsorgungsphase C3, C4 und Recycling D		SBS mit Ökobaudat 2013 Phase C/D	eLCA mit Ökobaudat 2011 Phase C/D		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. B) Phase C/D	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umweltwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kgCO2-equiv./(m2NRA·a)	1,19	0,67	-43,6	2,74	131,1
	Versauerungspotenzial - AP / kgSO2-equiv./(m2NRA·a)	-0,0018	-0,0019	6,4	0,0017	-194,4
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kgC2H4-equiv./(m2NRA·a)	-0,0004	-0,0001	-67,8	0,0002	-158,8
	Überdüngungspotenzial - EP / kgPO4-equiv./(m2NRA·a)	0,0002	0,0001	-65,8	0,0004	136,0
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10-8 kgR11-equiv./(m2NRA·a)	-0,43	-0,38	-12,2	0,00	--
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PEges / MJ	-13,58	-18,05	33,0	-4,23	-68,9
	Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PEne / MJ	-12,02	-16,36	36,1	-4,17	-134,7
	PEre/PEges PEre - erneuerbarer. Primärenergiebedarf	--	--		--	

Tabelle 44 zeigt den direkten Vergleich der LCA Detailauswertung für die Abfallbehandlung C3 und Abfallbeseitigung C4 während der Entsorgungsphase. In SBS und eLCA war es noch nicht möglich die Phase C und D getrennt zu betrachten. Deshalb wurden diese beiden Phasen gemeinsam berücksichtigt.

In der detaillierten Analyse fiel auf, dass in LEGEP mit der Ökobaudat 2015 – Berechnung nach Elementen (1.B) Phase C/D die Phase D trotz der Berücksichtigung im Programm nicht rechnerisch berücksichtigt wurde. Bei dem rot markiertem Wert in Tabelle 44 (vorletzte Spalte LEGEP) handelte es sich sehr wahrscheinlich um einen Programmfehler.

In einer neueren Version von LEGEP wurde die 1. Korrektur und 2. Korrektur mit getrennter Phase C und Phase D (Tabelle 45), wie nach der DIN EN 15978 gefordert betrachtet. Hierdurch konnten anschließend die Einzelwerte genau analysiert werden.

Tabelle 45: Vergleich der Entsorgungsphase C und der Wiederverwertung, Rückgewinnung und des Recyclingphase D in LEGEP.

Entsorgungsphase C3 und C4 und Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling D		LEGEP mit Ökobaudat 2015 - Berechnung nach Elementen (1. K)			LEGEP mit Ökobaudat 2016 - Berechnung nach Elementen (2.K)		
		Phase C	Phase D	Phase C+D	Phase C	Phase D	Phase C+D
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kgCO ₂ -equiv./(m ² NRA·a)	2,77	-2,78	-0,01	2,77	-2,78	-0,01
	Versauerungspotenzial - AP / kgSO ₂ -equiv./(m ² NRA·a)	0,0017	-0,0082	-0,0066	0,0017	-0,0082	-0,0066
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kgC ₂ H ₄ -equiv./(m ² NRA·a)	0,0002	-0,0006	-0,0004	0,0002	-0,0006	-0,0004
	Überdüngungspotenzial - EP / kgPO ₄ -equiv./(m ² NRA·a)	0,0004	-0,0007	-0,0003	0,0004	-0,0007	-0,0003
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kgR ₁₁ -equiv./(m ² NRA·a)	0,00	-9,62	-9,62	0,00	-9,62	-9,62
Primärenergie	Gesamprimärenergiebedarf - PEges / MJ	-4,48	-37,01	-41,49	-4,48	-37,01	-41,49
	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PEne / MJ	-4,18	-39,81	-43,99	-4,18	-39,81	-43,99
	PEre/PEges PEre - erneuerbarer. Primärenergiebedarf	--	--	--	--	--	--

Tabelle 45 zeigte, dass in beiden neueren LEGEP Versionen mit der Ökobaudat 2015 und 2016 die Ergebnisse identisch sind. Zudem befinden sich alle Werte im Summenergebnis der Phase C+D im negativen Bereich.

In den emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und den Ressourcenbedarf (Primärenergie) sind durch die Trennung der Phase C und D (Tabelle 44) niedrigere Werte als mit gemeinsamer Phase C/D vorhanden. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Ökobaudat 2015 und 2016 mehr Daten in Phase C und D als die Ökobaudat 2011 oder 2013 besitzt. Zudem werden die Materialien in Phase D oftmals nur mit prozentualen Pauschalen berücksichtigt.

Durch den Datenausbau in der Phase D wird der Einfluss auf die LCA Konstruktionsergebnisse in Zukunft ökologisch noch aussagekräftigere Ergebnisse erzielen. Denn bereits jetzt haben alle emissionsbedingten Umweltfaktoren und Primärenergien aus Phase C+D (s. Tabelle 45), in der LEGEP Berechnung, ein negatives Vorzeichen.

2.2.2.4 Verwendete Stromfaktoren für die Berechnung

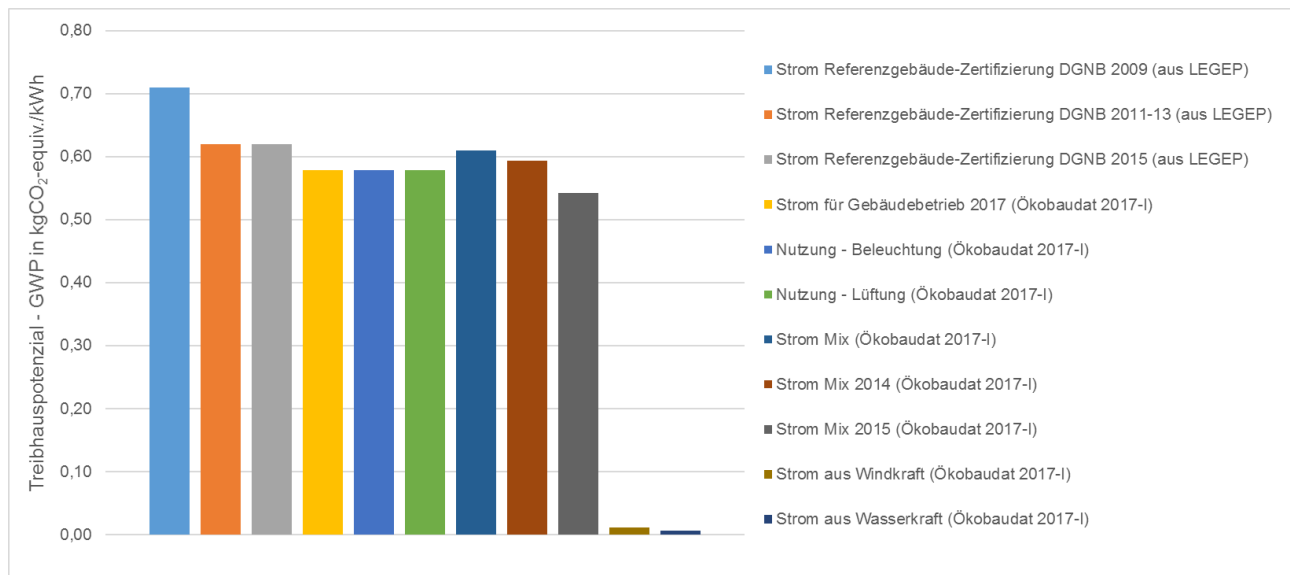


Abbildung 45: Vergleich des Treibhauspotenzial (GWP), der Stromwerte Referenzgebäude-Zertifizierung nach DGNB Version und der Ökobaudat 2017.

Der Vergleich der Abbildung 45 zeigt die verschiedene Werte für die wichtigste emissionsbedingte Umwelteinwirkung des Treibhauspotenziales (GWP) nach den verschiedenen DGNB-Berechnungen und den verschiedenen Ökobaudat - Datenbanken für den 50-jährigen Gebäudebetrieb in Phase B6. Für die Berechnungen wurden die DGNB-Werte verwendet. Nach DGNB 2011, 2013 und 2015 sind für den Strom keine Unterschiede vorhanden.

Die aufgeführten emissionsbedingten Umwelteinwirkungen (s. Abbildung 45 und Abbildung 46) sind für den Strom in den letzten Jahren gefallen. Hierfür ist der höhere Anteil der regenerativen Energien verantwortlich. Jedoch dauert die Übernahme der aktuellen Daten in die Ökobaudat immer einige Jahre. In der Ökobaudat 2017 ist somit nur der Strom Mix 2015 vorhanden.

Die DGNB 2015 Bewertung verwendete noch ältere und höhere Werte für Energie als in der Ökobaudat 2017 (s. Abbildung 45 und Abbildung 46) um Ihr Bewertungssystem nicht jährlich ändern zu müssen. Folglich wird der ökologische Anteil in der Ökobilanz für den Gebäudebetrieb gegenüber der Gebäudekonstruktion aufgewertet.

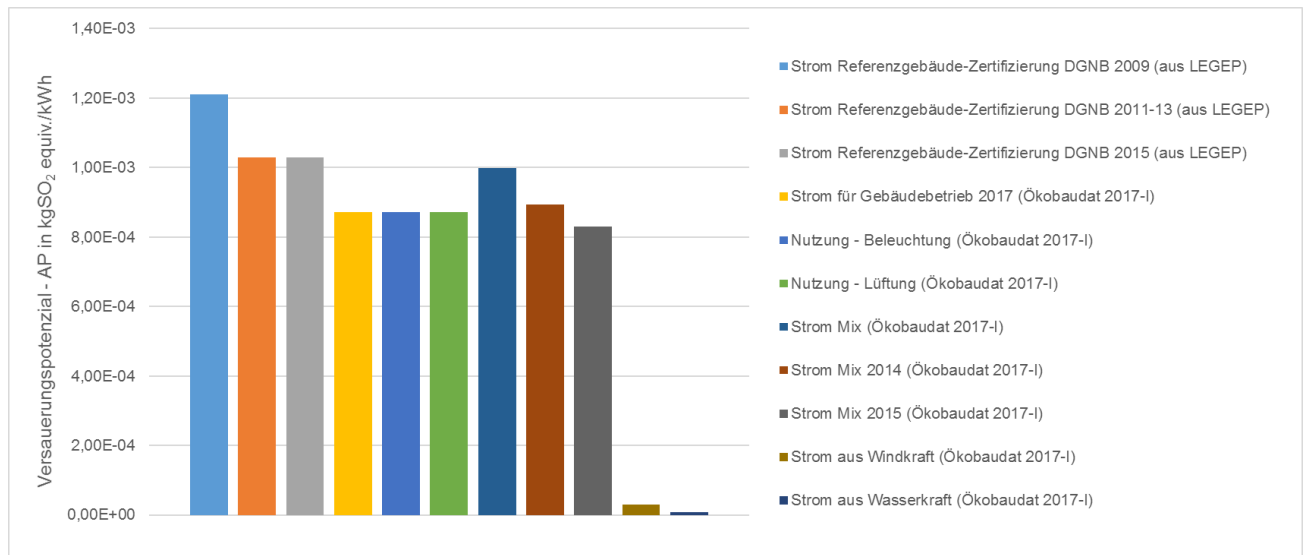


Abbildung 46: Vergleich des Versauerungspotentials (AP) für die Stromwerte der Referenzgebäude-Zertifizierung nach DGNB Version und der Ökobaudat 2017.

Je nach emissionsbedingten Umwelteinwirkungsfaktor z.B. bzgl. des Versauerungspotentials (AP) (s. Abbildung 46) ist der Unterschied zwischen den einzelnen Werten in der Ökobaudat 2017 kleiner oder größer.

2.3 LCA Gesamtergebnisse – Detailanalyse nach Leistungspositionen

2.3.1 Grundlagen der Bewertung

Für die detaillierte LCA Analyse wurden alle Gewerke der ausgeführten Plus-Variante mit Wärmepumpe und Eisspeicher sowie einer passivhausähnlichen Gebäudehülle in die Software LEGEP möglichst detailgetreu eingegeben. Der Ertrag der PV-Anlage wurde dabei mit 28.000 kWh/a angesetzt.

Tabelle 46: Übersicht der berücksichtigten Leistungsverzeichnisse (LVs) in der LCA-Software LEGEP.

LEGENDE	
Berücksichtigung in LEGEP	
Trotz vorhandenem LV keine ökologischen Daten vorhanden	
Ausschreibungen für die Kostengruppe 300	
01 Baugrube	
02 Baumeister	
03 Gerüste	
04 Dach	
05 Fassade	
06 Zimmerer	
07 Schlosser	
09 Estrich	
10 Fliesen	
11 Parkett	
12 Estrich geschliffen	
13 Trockenbau	
14 Glaswandelemente	
15 Mobile Trennwände	
16 WC-Trennwände	
17 Maler	
18 Tischler	
19 Schreiner	
20 Lose Möblierung	
21 textile Behänge	
22 Baureinigung	
Ausschreibungen für die Kostengruppe 400/ 500	
21 Aufzug	
22 LV Elektro	
23 Medientechnik	
24 Photovoltaik	
30 Sanitär	
31 Heizung	
32 Lüftung	
33 Klima	

Die Tabelle 46 zeigt die verschiedenen Leistungsbeschreibungen (LVs) für den Bau der Umweltstation und die in LEGEP berücksichtigten Bereiche. Hierbei konnte die Betrachtung der Ökobilanz über die nach DGNB geforderten Systemgrenzen¹²⁷ hinausgehen und das Gebäude vollständig betrachtet werden.

¹²⁷ DGNB Kriterium „Ökobilanz des Gebäudes“ (ENV1.1), https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/version2018/02_ENV1.1_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf?m=1526470491& (Seite 71-77), Stand 08.10.2018

Die Leistungsverzeichnisse Schreiner, lose Möblierungen, textile Behänge, Baureinigung und Medientechnik sind sehr individuell und konnten durch die nicht vorhandenen ökologischen Daten nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 47: Übersicht Anzahl der betrachteten Elemente in LEGEP.

Anzahl der Elemente

	Makro	Grob	Fein	Text	Sonstige	Summe
KG 100	0	0	0	0	0	0
KG 200	0	0	5	0	0	5
KG 300	0	0	338	0	0	338
KG 400	0	1	234	0	0	235
KG 500	0	0	60	0	0	60
KG 600	0	0	0	0	0	0
KG 700	0	0	0	0	0	0
Ohne	0	0	0	0	0	0
Summe	0	1	637	0	0	638
	Stamm	Eigen	Projekt			
Herkunft	1	596	41			

Insgesamt wurden über 2400 LV-Positionen untersucht und mehr als 630 mögliche ökologische Feinelemente (s. Tabelle 47) aus den Positionen übertragen. Die Positionen bestehen größtenteils aus verschiedenen Materialien, was zu ungefähr ca. 3000 Materialpositionen führte. In der Detailberechnung konnte auch der Eisspeicher mit der Absorberfläche auf dem Dach der Umweltstation abgebildet werden.

Die große Differenz zwischen den LV-Positionen und den tatsächlichen eingefügten ökologischen Positionen in LEGEP liegt an Planungspositionen, Dienstleistungen und vor allem an sehr vielen Kleinteilpositionen ohne vorhandene ökologische Materialdaten.

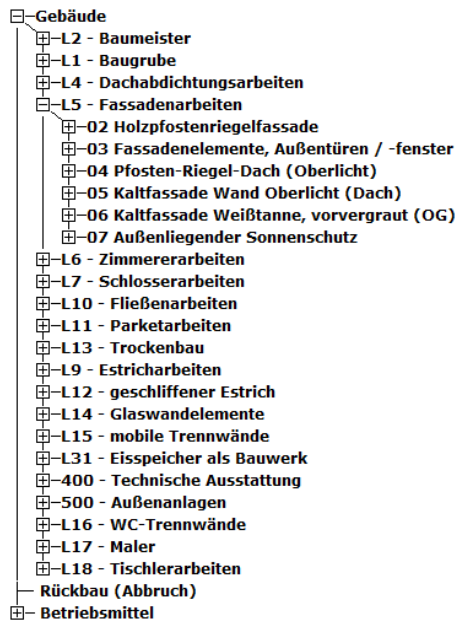


Abbildung 47: Strukturierung der LV-Gliederung in LEGEP

Um die Übersichtlichkeit der vielen Einzelpositionen zu behalten wurde die Reihenfolge der Eingabe nach der LV-Struktur (s. Abbildung 47) in LEGEP ausgeführt.

Parallel zu Eingabe in LEGEP wurden die einzelnen Leistungsbereiche übersichtlich mit dem vorhandenen ökologischen Datenbestand dokumentiert.

Tabelle 48: Berücksichtigungsgrad der LV-Bereiche in LEGEP

LEGENDE

	nicht berücksichtigt, nur Leistungen, kein Material
	keine Datensätze vorhanden
	teilweise
	fast vollständig
	vollständig

Ausschreibung	Bereich	Arbeiten	Berück.
LV 1 Baugrube	01 Baustelleneinrichtung	01.01 Baustelleneinrichtung	
		01.02 Bauzaun	
		01.03 Baumschutz	
	02 Erdarbeiten	02.01 Vorbereitende Maßnahmen	
		02.02 Rohdungen	
		02.03 Oberbodenarbeiten	
		02.04 Baugrubenaushub	
		02.05 Bodenbewegung, Planum, Sauberkeitsschicht	
		02.06 Böschungssicherung	
		03.01 Bohrpfähle	

LV 2 Baumeisterarbeiten	01 Baustelleneinrichtung	01.01 Baustelleneinrichtung allgemein	
			01.02 Vorbereitende Arbeiten
			01.03 Sicherheitseinrichtungen
		02 Erdarbeiten	
		03 Grundleitungen (HLS)	
		04 Betonarbeiten	04.01 Sauberkeitsschichten, Füllbeton
			04.02 Tragschichten, Trennlagen
			04.03 Fundamente
			04.04 Bodenplatten
			04.05 Einbauteile Gründung
			04.06 Wände aus Beton
			04.07 Decke
			04.08 Treppe
			04.09 Bewehrung Stahl
			04.10 Auskragende Bauteile, Anschluss
			04.11 Formstahl, Kleineisen, Ankerschienen
			04.12 Schalung Fundamente und Platten
		04.13 Schalung Wände	
		04.14 Schalung Deckenplatten	
		04.15 Stahlbauteile	
		04.16 Öffnungen, Aussparungen	
		04.17 Dämmungen, Trennlagen	
	05 Abdichtungsarbeiten		
	06 Elektroarbeiten (ELT)	06.01 Ortbetonarbeiten für Elektro	
		06.02 Fundamenterder	
		06.03 Grundleitungen für Elektro	
LV 3 Gerüstbauarbeiten	01 Gerüstbauarbeiten	01.01 Fassadengerüst	
		01.02 Dachdeckerfang	
		01.03 Gerüstturm Foyer	
		01.04 Raumgerüst Außenbereich	

LV 4 Dachabdichtungs- arbeiten	01 Vorbereitende Arbeiten		
	02 Dampfsperren		
	03 Dämmung		
	04 Metalldeckung, Anschlüsse		
	05 Durchdringungen		
	06 Abläufe		
	07 Auflastschichten		
	08 Absturzsicherung		
	09 Sonstige Leistungen		
LV 05 Fassade	01 Vorbereitenden Arbeiten		
	02 Holz-Pfosten-Riegelfassade		
	03 Fassadenelemente, Außentüren / -fenster		
	04 Pfosten-Riegel-Dach (Oberlicht)		
	05 Kaltfassade Wand Oberlicht (Dach)		
	06 Kaltfassade Weißtanne, vorvergraut (OG)		
	07 Außenliegender Sonnenschutz		
LV 06 Zimmererarbeiten	01 Holzlamellen als starrer Sonnenschutz		
LV 07 Schlosserarbeiten	01 Vorbereitende Arbeiten		
	02 Edelstahlnetzgeländer		
	03 Treppengeländer		
	04 Gitterroste		
LV 09 Estricharbeiten	01 Vorbereitende Maßnahmen - allgemeine Arbeiten		
	02 Bodenbelag Estrich		
	03 Estrichbeschichtungen		
	04 Sonstige Leistungen		
LV 10 Fliesenarbeiten	01 Vorbereitende Arbeiten		
	02 Bodenbelag EG+OG		
	03 Wandfliesen EG+OG+Küche		
	04 Einbauten		
	05 Fugen		
LV 11 Parketarbeiten	01 Vorbereitende Arbeiten		
	02 Parkettverlegearbeiten		
	03 Treppenbelag		
LV 12 geschliffener Estrich	01 Vorbereitende Maßnahmen - allgemeine Arbeiten		
	02 Bodenbelag Estrich		

LV 13 Trockenbau	01 Metallständerwände	01.01 Vorbereitende Arbeiten	
			01.02 Installationswand, Schächte
			01.03 Montagewände
			01.04 Details für Montagewände
			01.05 Sonstige Leistungen
	02 Abhangdecken Sanitär EG und Abhangdecken	02.01 Unterdecken - Gipsplatten	
		02.02 Unterdecken - Einbauelemente und Öffnungen	
	03 Akustiksegel und -Platten	03.01 Akustikplatten Vortragsräume	
		03.02 Akustiksegel Büroräume	
		03.03 Öffnungen und Ausschnitte	
LV 14 Glaswandelement	01 Glaselementwand		
LV 15 Mobile Trennwand	01 Baustelleneinrichtung		
	02 Mobile Trennwandanlage		
	03 Schachtverkleidung		
LV 16 WC-Trennwände	01 WC-Kabinen		
	02 Zubehör für WC-Kabinen		
LV 17 Malerarbeiten	1.1 Sicherheitseinrichtungen, Baustelleneinrichtung		
	1.2 Schutzmaßnahmen und vorbereitende Maßnahmen		
	1.3 Außenflächen Metall		
	1.4 Innenflächen Metall		
	1.5 Deckenfächen mineralische Untergünde, GK		
	1.6 Wandflächen Trockenbauwände		
	1.7 Innentüren Holz		
	2 WDVS		
LV 18 Tischlerarbeiten	01 Innentüren		
	02 Holztäfer Wandbekleidungen		
LV 21 Aufzugsanlage	1.0 Personenaufzug		
	2.0 Abnahme, Inbetriebnahme		

LV 22 Elektroinstallations- arbeiten	1.1 Niederspannungs- schaltanlagen	1.1.1 Zähleranlagen und Messeinrichtungen	
	1.2 Niederspannungs- installationen	1.2.1 Leerrohre	
		1.2.2 Dosen und Abzweigkästen	
		1.2.3 Kabelrinnen und Steigetrassen	
		1.2.4 Kabelkanäle und Geräteeinbaukanäle	
		1.2.5 Fußboden-Installationsysteme	
		1.2.6 Kabel und Leitungen	
		1.2.7 Anschlüsse	
		1.2.8 Verteilungen	
		1.2.9 Installationsgeräte UP	
		1.2.10 KNX-Gebäudesystemtechnik	
		1.2.11 Sonnenschutzsteuerung	
		1.2.12 Schlitze und Durchbrüche	
		1.2.13 Brandabschottungen	
		1.2.14 Stundenlohnarbeiten	
		1.2.15 Inbetriebnahmen/Abnahmen/ Dokumentation	
	1.3 Beleuchtungsanlagen	1.3.1 Beleuchtungsanlagen	
	1.4 Blitzschutzanlagen	1.4.1 Erdung und Potentialausgleich	
		1.4.2 Innerer Blitzschutz	
	2.1 Such- und Signalanlagen	2.1.1 Sprechanlage	
		2.1.2 Notrufanlage	
	2.2 Fernseh- und Antennenanlagen	2.2.1 Antennenanlage	
	2.3 Gefahrenmelde-anlagen	2.3.1 Brandmeldeanlage	
	2.4 Übertragungsnetze	2.4.1 Datenschränke und Zubehör	
		2.4.2 Datenleitungsnetz Kupfer	
	3.1 Baustelleneinrichtung	3.1.1 Baustelleneinrichtung	
		3.1.2 Baustrom, Baubeleuchtung	
	4.1 Starkstromanlagen	4.1.1 Starkstromanlagen	
LV 24 Photovoltaikanlage	1 Planung / Projektierung		
	2 Montagesysteme		
	3 PV- Module		
	4 Wechselrichter		
	5 Monitoring / Controlling		
	6 DC- Verkabelung		
	7 Überspannungsschutz		
	8 Inbetriebnahme / Dokumentation		

LV 30 Abwasser-, Wasser, und Gasanlagen	1.1 Wasserversorgungs-system mit Zubehör		
	1.2 Schmutzwasser-system mit Zubehör		
	1.3 Regenwassersystem mit Zubehör		
	1.4 Systemdämmung		
	1.5 Einrichtungsgegen-stände und Zubehör		
LV 31 Heizung	1.1 Eisspeicher mit Erdarbeiten und Zubehör		
	1.2 Solar-Luft Absorberanlage mit Zubehör		
	1.3 Wärmepumpe mit Zubehör		
	1.4 Rohrleitungen und Armaturen mit Zubehör		
	1.5 Systemdämmung Heizung		
	1.6 Heizflächen mit Zubehör		
LV 32 Lufttechnische Anlagen	1.1 Gerader Luftkanal		
	1.2 Einbauten und Durchlässe		
	1.3 Systemdämmung		
	1.4 Kühlung mit Zubehör		
	1.5 Lüftungsgeräte mit Regelung und Zubehör		
LV 33 Technische Anlagen in Außenanlagen	1.1 Schmutz-, Regen-, Mischwassersystem mit Erdarbeiten		
	1.2 Trinkwasser-Versorgung		
	1.3 Nichttrinkwasser-Versorgung		
	1.4 Elektro-Erdarbeiten		

Tabelle 48 zeigt eine Auflistung der verschiedenen Bereiche im Leistungsverzeichnis. Die unterschiedlichen Farben zeigen den möglichen Berücksichtigungsgrad mit ökologischen Daten für die jeweiligen Bereiche an. Durch diese Auswertung konnte einfach festgestellt werden wo große ökologische Datenlücken wie z.B. die Elektroarbeiten vorhanden sind.

Schreinerarbeiten, lose Möblierung, textile Behänge, Baureinigung und die Audio- /Medientechnik konnten durch die individuellen Positionen und den somit fehlenden ökologischen Daten nicht berücksichtigt werden.

Bei komplexen technischen Bauteilen hauptsächlich in der Kostengruppe 400 (Bauwerk – Technische Anlagen) konnten oft nur die Materialien des Prozesses berücksichtigt werden. Folglich ist

der eigentliche Produktionsprozess A3 für ein Bauteil aus mehreren Materialien oftmals nicht in den Datensätzen vorhanden.

Die Berücksichtigung des RC-Beton war bis jetzt auf Grund der fehlenden Produktdeklaration EPD nicht möglich. Durch die vorliegenden Laborergebnisse der Zusammensetzung des RC-Betons, wird von einem ähnlichen ökologischen Ergebnis im Vergleich zum Normalbeton ausgegangen.

Nach Eingabe der LV-Positionen wurde festgestellt, dass das Programm zur Ökobilanzierung Schwierigkeiten mit der Abbildung von Instandsetzungs- und Austauschprozesses bei einer Standardgebäudelebensdauer von 50 Jahren besitzt. Auf Nachfrage beim Programmentwickler war dies nur möglich mit der Eingabe der vorgefertigten Elemente im Programm. Folglich konnten viele selbst erstellten Elemente aus Positionen in der Instandhaltung nicht berücksichtigt werden. LEGEP wollten eine Lösung für dieses Problem entwickeln. Jedoch hat die Problemlösung einige Zeit in Anspruch genommen. Erst zum Projektende hat der Softwarehersteller versichert, dass eigene Positionen und Elementen flexibel nach eigenen Instandhaltungszeiten eingebunden werden können. Durch die sehr späte Implementierung konnte dies nicht mehr im Projekt überprüft werden.

Folglich konnte die Instandhaltung und die damit verbundenen Phasen C und D nicht vollständig in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Bei der freien Eingabe von Umwelt-Produktdeklarationen (EPDs) in LEGEP traten im Programm anfangs Berechnungsfehler auf, die mittlerweile vom Entwickler nach Hinweis vom ZAE Bayern beseitigt wurden. Von der Ökobaudat unabhängige EPDs können somit uneingeschränkt im Programm verwendet werden.

2.3.2 LEGEP 2018 mit der Ökobaudat 2017

Durch inkonsistente Massen und ökologische Ergebnisse zwischen der LEGEP Version 2017 und 2018 war es nicht möglich, ein eindeutiges Ergebnis zu erhalten. Dies wurde durch den direkten Vergleich der beiden Versionen festgestellt. Diese Auffälligkeiten wurden den Entwicklern mitgeteilt.

Folglich wurden alle weiteren detaillierten Ergebnisse mit der LEGEP Version 2017 und der Ökobaudat 2016 errechnet.

2.4 Gesamtergebnisse

Der Gesamterfüllungsgrad des DGNB Systems (s. Abbildung 48) zeigt die Gebäudeeinordnung. Hierbei ist Platin mit einem Gesamterfüllungsgrad > 80% die höchste Auszeichnung.

Gesamterfüllungsgrad	Mindest- erfüllungsgrad	Auszeichnung	DGNB Logo
ab 35 %	— %	Bronze*	
ab 50 %	35 %	Silber	
ab 65 %	50 %	Gold	
ab 80 %	65 %	Platin	

*Diese Auszeichnung gilt nur für Bestandsgebäude

Abbildung 48: DGNB System bewertet nach dem Erfüllungsgrad¹²⁸.

Diese Einordnung ist für die gesamte DGNB gültig. Zur Orientierung können auch die Unterpunkte wie z.B. ENV1.1 die Ökobilanz - emissionsbedingten Umwelteinwirkungen oder die ENV2.1 Ökobilanz – Ressourcenverbrauch (Primärenergien) mit diesem System bewertet werden. Der Anteil dieser beiden Unterpunkte, aus der Ökologischen Qualität eines Gebäudes, besitzt einen Anteil von 12,5% an der DGNB Gesamtbewertung für NBV 2015 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude, Version 2015.2).

Tabelle 49: Übersicht der Ergebnisse nach DGNB 2015.

Planstand	Komponenten	Ökobilanz- emissionsbedingte Umwelteinwirkung	Ökobilanz - Ressourcenverbrauch (Primärenergie)	Erfüllungsgrad Ökobilanz
Ausführungsplanung/ Ausschreibung	mit PV	113,4	81,8	100,2
	ohne PV	97,4	74,2	87,7

Trotz der sehr genauen Betrachtung der Umweltstation nach Leistungspositionen liegen beide DGNB Auswertungen der Ökobilanz - emissionsbedingte Umweltauswirkungen, ob mit oder ohne PV-Anlage weit über 80 Bewertungspunkten (s. Tabelle 49). Der maximal erreichbare Höchstwert beträgt 100 Punkte. Punktebewertungen zwischen 100 und 120 sind nur rechnerisch möglich.

¹²⁸ DGNB, <https://www.dgnb-system.de/de/system/bewertung/> (gesehen 15.11.2018)

Werden die beiden Bereiche als eine Gesamtökobilanz (Gewichtung DGNB 7:5) betrachtet, wird in beiden Fällen ob mit oder ohne PV-Anlage ein Platinergebnis erreicht. Die ausgeführte Variante mit Solaranlage erzielt mit 100,2 % ein hervorragendes Gesamtergebnis. Das offizielle Höchstergebnis von 100 % nach der Ökobilanz der DGNB wird somit erreicht.

Das Ergebnis Ökobilanz – emissionsbedingte Umwelteinwirkungen ist in beiden Fällen mit 113,4 % und 97,4 % über bzw. nahe an der maximalen offiziell erreichbaren 100 % und erreicht somit Platin.

Für die Bewertung bzgl. der Ökobilanz – Ressourcenverbrauch (Primärenergie) wird mit PV-Anlage eine Platinbewertung mit 81,8 % erreicht. Ohne PV-Anlage ist hier eine Silberbewertung mit 74,2 % vorhanden.

Durch die fehlenden Verknüpfungen im Programm LEGEP hat die Nutzungsphase - Instandsetzungs- und Austauschphase nicht alle Bauteile berücksichtigt. Dies hat wiederum geringe Auswirkungen auf die Entsorgungsphase C3, C4 und die Recyclingphase D.

2.4.1 Umwelteinträge nach Lebenszyklusphasen ohne die PV-Anlage

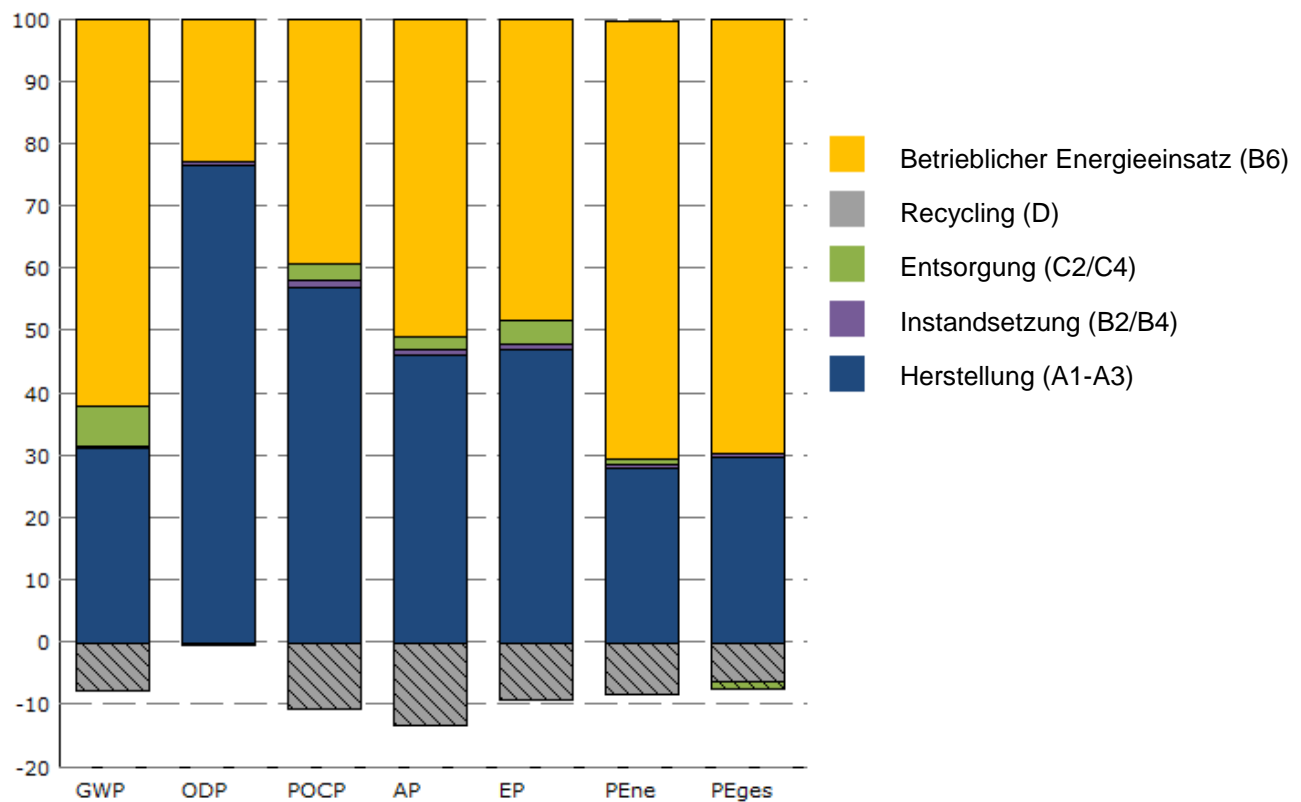


Abbildung 49: Umwelteinträge nach Lebenszyklusphasen (ohne Baugrubenaushub).

Die Abbildung 49 zeigt die verschiedenen Umwelteinträge für die verschiedenen Lebenszyklusphasen der Umweltstation in Würzburg. Die emissionsbedingten Umweltfaktoren (GWP - Treibhauspotenzial, ODP - Ozonschichtabbaupotenzial, POCP - Ozonbildungspotenzial, AP - Versauerungspotenzial und EP – Überdüngungspotenzial) und die Primärenergien (PE_{ne} und PE_{ges}) wurden auf 100% normiert. Die verschiedenen Prozesse in einem LCA-Prozess eines Gebäudes haben teilweise sehr unterschiedliche Anteile. Das Treibhauspotenzial als wichtigster Faktor und die Primärenergien werden hauptsächlich durch den betrieblichen Energieeinsatz (B6) während der Lebensdauer von 50 Jahren bestimmt. Alle andere emissionsbedingten Faktoren haben einen viel größeren Einfluss in der Herstellung (A1-A3) des Gebäudes. Besonders ist dies am ODP (s. Abbildung 49) mit annähernd 75% sichtbar.

Das Recycling-Potential aus den Materialien wird in der Abbildung 49 als negativer Wert dargestellt und beträgt in den meisten emissionsbedingten Umweltfaktoren und den Primärenergien ca. 10 % am Bauwerk inkl. Lebensdauer von 50 Jahren. Nur im OPD hat das Recycling keinerlei Auswirkungen.

2.4.2 Umwelteinträge nach Kostengruppen

Um die Verteilung der emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und der Primärenergien übersichtlich darzustellen, wurde die Herstellungsphase A1-A3 nach den unterschiedlichen Kostengruppen (z.B. Außenwände, Dächer, Decken usw.) dargestellt. Die Zuordnung erfolgte über die LEGEP-Eingabe mit Kostengruppen für die einzelnen Materialien und Komponenten.

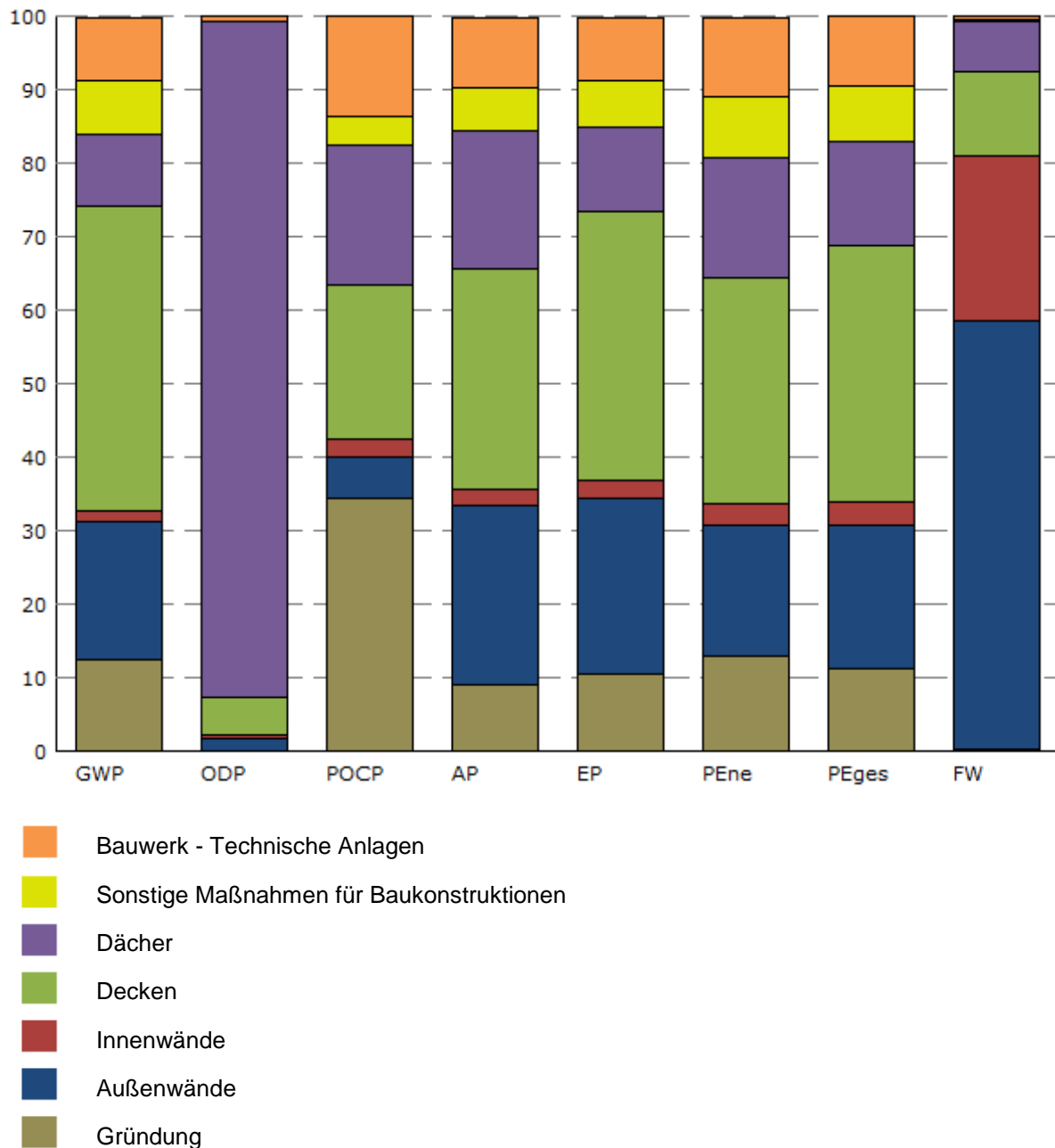


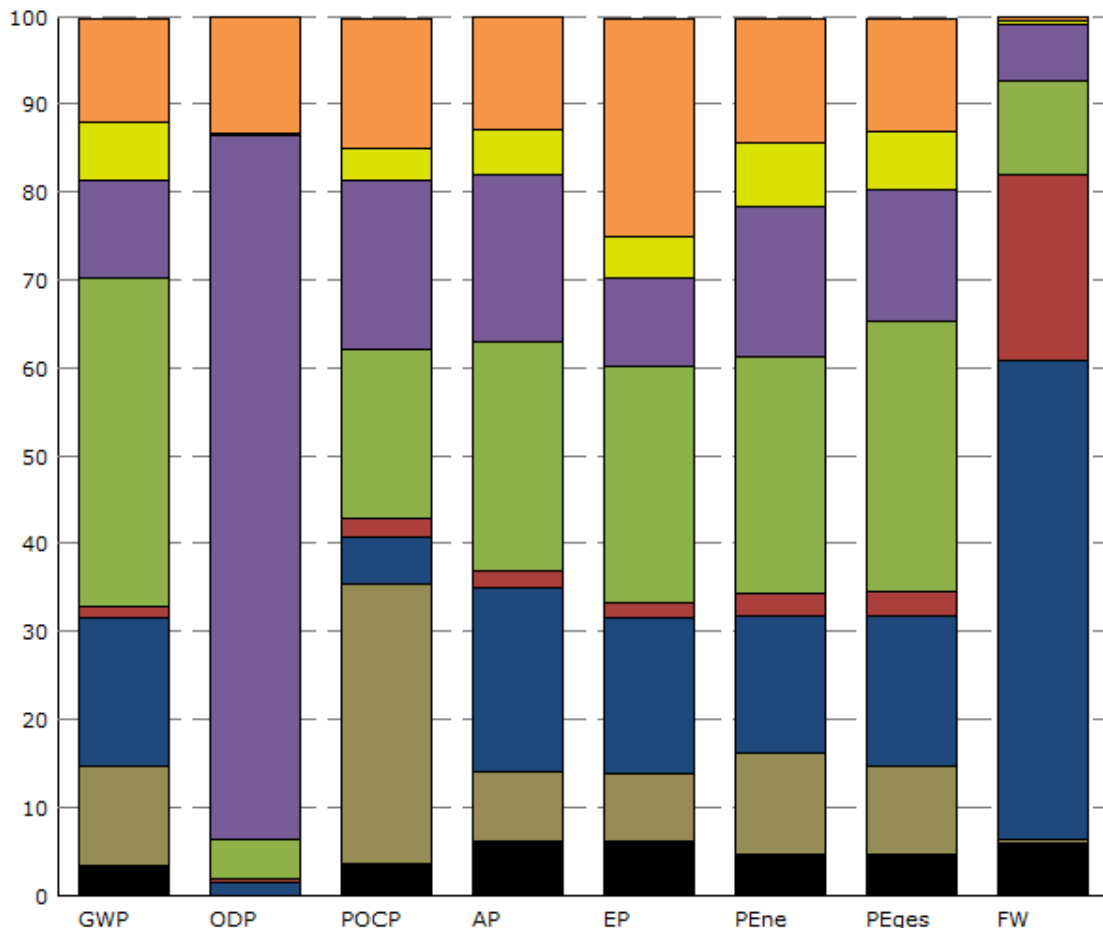
Abbildung 50: Umwelteinträge nach Kostengruppen Herstellungsphase A1-A3 (DGNB-Grenzen ohne PV-Anlage).

Abbildung 50 zeigt nach rechts aufgetragen die unterschiedlichen emissionsbedingten Umweltfaktoren (GWP, ODP, POCP, AP und EP), Primärenergien (PE_{ne} und PE_{ges}) und den Frischwasserbedarf (FW), auf 100% normiert, in den Grenzen der DGNB ohne Solaranlage. Die Anteile der Gebäudematerialien und Bauteile nach den Kostengruppen nach DIN 276 (z.B. 330 Außenwände, 360 Dächer oder 400 Bauwerk – Technische Anlagen) können so trotz ihrer numerisch großen Unterschiede mit dieser auf 100% normierten Darstellung übersichtlich abgebildet werden.

Die Bauteile des Eisspeichers mit den Absorbern wurde zur Übersichtlichkeit in Kostengruppe 399 aufgenommen. Der Anteil wird in der Abbildung 50 in gelb unter „Baukonstruktive Einbauten / Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen“ dargestellt. Die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Primärenergien sind bei allem emissionsbedingten Umweltfaktoren und Primärenergien im mittleren einstelligen Prozentbereich. Ausnahme ist der ODP und der Frischwasserbedarf mit annähernd 0 %.

Die Abbildung zeigt auch das sich Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) und der Frischwasserbedarf (FW) für die Herstellung A1-A3 der Umweltstation signifikant von den anderen Faktoren unterscheiden. Solche großen Abweichungen wie in Abbildung 50 konnten anschließend in den Details ausfindig gemacht werden.

Damit konnte z.B. herausgefunden werden, dass die PU-Dämmplatten im Dachbereich einen sehr großen Anteil am ODP bzgl. des Gesamtgebäudes haben.



- Bauwerk - Technische Anlagen
- Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen
- Dächer
- Decken
- Innenwände
- Außenwände
- Gründung
- Baugrube

Abbildung 51: Umwelteinträge nach Kostengruppen Herstellungsphase A1-A3 (mit PV-Anlage).

In Abbildung 51 wurde auch die PV-Anlage, die Kostengruppe 310 Baugrube sowie die für das Gebäude notwendigen Arbeiten in Kostengruppe 500 betrachtet.

Diese Berücksichtigung aller notwendigen Kostengruppen (auch außerhalb der DGNB), der Herstellungsphase A1-A3, für die Erstellung eines Gebäudes verschiebt die jeweiligen Anteile in Abbildung 51 im Vergleich zu Abbildung 50.

2.4.3 Auswirkungen der PV-Anlage auf das Gesamtgebäudeergebnis des Treibhauspotenzial (GWP)

2.4.3.1 Treibhauspotenzial (GWP) ohne PV-Anlage

Das Treibhauspotenzial ist in der Ökobilanz mit einem Anteil von 40 % der wichtigste Faktor unter den emissionsbedingten Umwelteinwirkungen. Hier wird die Umweltstation ohne die vorhandene Solaranlage mit einem angesetzten Ertrag von 28.000 kWh/a abgebildet.

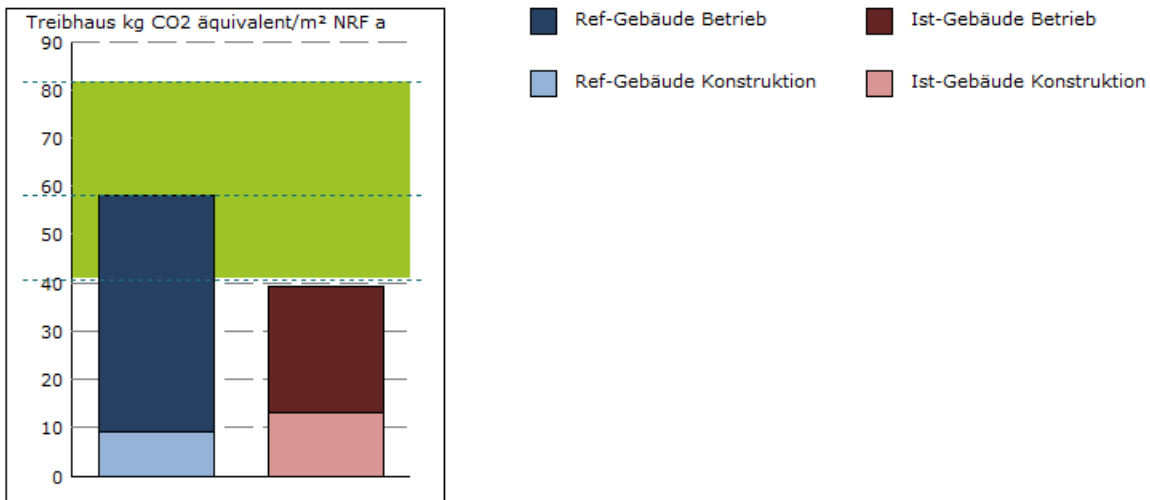


Abbildung 52: LEGEP-Screenshot - Vergleich der Bewertung Referenzgebäude mit Ist-Gebäude nach dem Steckbrief ENV 1.1 (DGNB) Treibhauspotenzial kg CO₂ äquivalent – V2015 ohne PV-Anlage.

Das Säulendiagramm in Abbildung 52 zeigt das Treibhauspotenzial der Umweltstation im Vergleich zum Referenzgebäude nach DGNB für alle Phasen A-D. Der linke Balken (blau) zeigt das Ergebnis des Referenzobjektes und der rechte Balken (rot) der berechnete Ist-Wert der Umweltstation.

In der Auswertung wird nach Konstruktion (heller) und den Betrieb des Gebäudes über 50 Jahre (dunkler) unterschieden. Die Abbildung zeigt, dass deutlich höhere Treibhauspotenzial für die Konstruktion der Umweltstation im Gegensatz zum Referenzgebäude nach EnEV. Einen gewissen Anteil hat hierbei auch das Bauwerk des Eisspeichertanks und die damit verbundene Technik des Solarabsorbers auf dem Dach des Gebäudes (s. Absatz 2.5.1.1).). Andererseits ist der Anteil des Treibhauspotenziales im Gebäudebetrieb der Umweltstation durch die Energieeinsparungen über 50 Jahre deutlich niedriger als im Referenzgebäude.

Das Referenzgebäude ist abhängig vom pauschalen Konstruktionswert der emissionsbedingten Umwelteinwirkungen (z.B. Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial usw.) und den Primärenergien nach DGNB. Die errechneten emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Primärenergien über eine Lebensdauer des Gebäudes von 50 Jahren werden aus dem Energiebedarf nach dem EnEV Referenzgebäude ermittelt.

Der grüne Bereich in der Abbildung zeigt den Bewertungsbereich der DGNB von unten maximal bis oben minimal. Trotz der hier noch nicht berücksichtigten Solaranlage ist das Ökobilanzergebnis nach DGNB für den wichtigsten Klimafaktor das Treibhauspotenzial unter dem dargestellten grünen Grenzbereich. Somit wird bereits ohne Solaranlage die Maximalpunktzahl im Treibhauspotenzial erreicht.

Angemerkt werden muss, dass der Anteil der Instandhaltung der Umweltstation durch die Struktur von LEGEP nicht vollständig berücksichtigt werden konnte. Dies würde das Ergebnis durch den Einsatz der Austauschmaterialien erfahrungsgemäß wenige Prozent verschlechtern. Dies ist bei allen folgenden Gesamtergebnissen zu berücksichtigen.

2.4.3.2 Treibhauspotenzial (GWP) mit PV-Anlage

Der Einsatz der PV-Anlage in der Umweltstation erhöht die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen durch die verwendeten Materialien der PV-Anlage. Jedoch reduziert die PV-Anlage auch die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen durch den regenerativ produzierten Strom. Vor allem für den wichtigsten Faktor Treibhauspotenzial sind deutliche Reduzierungen möglich.

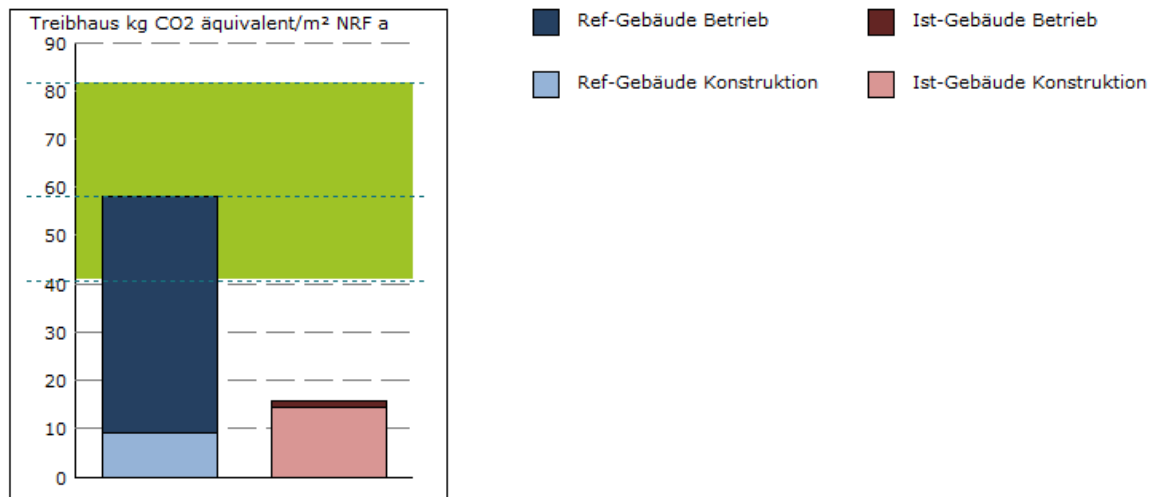


Abbildung 53: LEGEP-Screenshot - Vergleich der Bewertung Referenzgebäude mit Ist-Gebäude nach dem Steckbrief ENV 1.1 (DGNB) Treibhauspotenzial kg CO₂ äquivalent – V2015 mit PV-Anlage.

In Abbildung 53 wird für die Umweltstation (rot) mit einem prognostiziertem PV-Ertrag von 28.000 kWh/a ein hervorragender Wert bzgl. des Treibhauspotenziales im Vergleich zum Referenzgebäude nach DGNB (blau) erreicht.

Im Vergleich zu Abbildung 52 wird der Stromertrag der PV-Anlage über 50 Jahre in Abbildung 53 mitberücksichtigt. Durch die Komponenten der PV-Anlage der Umweltstation steigt das Treibhauspotenzial in der Konstruktion des Gebäudes nur geringfügig an (roter Balken/ heller Bereich) (s. auch Absatz 2.5.1.2). Andererseits wird der Anteil des Treibhauspotenziales im Betrieb des Gebäudes durch die Stromproduktion zur Eigenverbrauch deutlich reduziert (roter Balken/ dunkler Bereich).

2.5 Vergleich der Detailergebnisse nach Leistungspositionen

2.5.1 Detailvergleich der Herstellungsphase A1-A3

Tabelle 50: Vergleich der Herstellungsphase (A1-A3) zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Herstellungsphase A1-A3		PLUS + Wärmepumpe (ohne PV-Anlage) nach DGNB		
		Entwurfsplanung LEGEP 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung LEGEP 2017 Ökobaudat 2016	Abweichung in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	11,70	13,10	12,0
	Versauerungspotenzial - AP / $\text{kg}_{\text{SO}_2\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0330	0,0392	18,8
	Ozonbildungspotenzial - POCP Potential / $\text{kg}_{\text{C}_2\text{H}_4\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0029	0,0046	58,4
	Überdüngungspotenzial - EP / $\text{kg}_{\text{PO}_4\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0037	0,0040	9,2
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / $\cdot 10^{-8} \text{ kg}_{\text{R11-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	5,1	52,3	919,4
	Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - $\text{PE}_{\text{ges}} / \text{MJ}$	161,3	184,9
Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - $\text{PE}_{\text{ne}} / \text{MJ}$		125,6	147,4	17,4
Erneuerbarer Primärenergiebedarf - $\text{PE}_{\text{re}} / \text{MJ}$		35,8	37,4	4,7
$\text{PE}_{\text{re}} / \text{PE}_{\text{ges}}$		0,22	0,20	-8,6

Die Berechnung der detaillierten Ausführungseingabe nach Leistungsverzeichnispositionen (s. Tabelle 50) zeigte eine Abweichung der emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Primärenergien zu den Berechnungen in der Vorplanung. Die prozentuale Abweichung in der Herstellungsphase A1-A3 (s. Tabelle 50) ist bezogen auf die Berechnung der Entwurfsplanung prozentual dargestellt. In diesen Berechnungen wurden die Systemgrenzen nach DGNB berücksichtigt. Die PV-Anlage wurde vorerst nicht in dieser Detailuntersuchung berücksichtigt.

Die Abweichung in der Ökobilanz zwischen der Entwurfsplanung und der Ausführungsplanung sind in zwei emissionsbedingten Umweltkategorien, dem Ozonbildungspotenzial und dem Ozonschichtabbaupotenzial sehr groß. Alle anderen Werte liegen bei einer Abweichung von unter 20% vom Ausgangswert der Entwurfsplanung.

In diesen Detailberechnungen sowie in der Entwurfsplanung wurde die Systemgrenzen nach DGNB berücksichtigt.

In der neuen DGNB 2018 Bewertung (siehe 2.6 Veränderungen in der DGNB Bewertung 2018 zu 2015 ab Seite 131) wird zukünftig das Ozonschichtabbaupotenzial nicht mehr in der Ökobilanz berücksichtigt. Somit wäre die emissionsbedingte Umwelteinwirkung mit der größten Abweichung nicht mehr vorhanden.

Trotz der hohen Anzahl der Materialien und Positionen in der detaillierten Rechnung, halten sich die Abweichungen zu den Berechnungen der Ökobilanz in der Vorplanung in fast allen emissionsbedingten Umweltfaktoren und Ressourcenverbräuchen (Primärenergie) in Grenzen.

2.5.1.1 Anteil des Eisspeichers mit Solarabsorbern in der Herstellungsphase A1-A3

Für den Eisspeicher wurde ein Betontank mit 132,5 m³ Innenvolumen vorgesehen der über Solarabsorber auf dem Dach der Umweltstation regeneriert werden kann. Für den Tank inkl. Absorber wurden laut dem Planern ca. 3600 m PE-Rohr eingesetzt. Soweit bekannt, wurden alle größeren Bauteile in den LCA-Berechnung berücksichtigt.

Tabelle 51: Vergleich der Herstellungsphase (A1-A3) in der detaillierten Ausführungsplanung ohne PV-Anlage, mit und ohne Eisspeicher.

Herstellungsphase A1-A3		PLUS + Wärmepumpe (ohne PV-Anlage) nach DGNB		
		Ausführung LEGEP 2017 Ökobaudat 2016	Ausführung LEGEP 2017 Ökobaudat 2016 ohne Eisspeicher- anlage	Abweichung in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	13,10	12,13	-7,4
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0392	0,0370	-5,7
	Ozonbildungspotenzial - POCP Potential / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0046	0,0045	-3,7
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0040	0,0038	-6,4
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	52,3	52,3	0,0
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	184,9	171,2	-7,4
	Nichternewbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	147,4	135,5	-8,1
	Erneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{re} / MJ	37,4	35,8	-4,5
	PE _{re} /PE _{ges}	0,21	0,20	-3,2

Tabelle 51 zeigt den direkten Vergleich der Herstellungsphase A1-A3 mit und ohne Eisspeichers und Solarabsorber. Trotz des sehr großen Speichers ist der Anteil der verschiedenen emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Primärenergien in allen Faktoren max. 8,1 % größer in der Herstellungsphase.

2.5.1.2 Anteil des PV-Anlage in der Herstellungsphase A1-A3

Für die aufgeständerte PV-Anlage wurde eine Fläche von 176,2 m² und der Einsatz von 4 Wechselrichtern vorgesehen.

Tabelle 52: Vergleich der Herstellungsphase (A1-A3) zwischen der detaillierten Ausführungsplanung mit und ohne PV-Anlage.

Herstellungsphase A1-A3		PLUS + Wärmepumpe nach DGNB		
		Ausführung LEGE 2017 Ökobaudat 2016 <u>ohne</u> PV-Anlage	Ausführung LEGE 2017 Ökobaudat 2016 <u>mit</u> PV-Anlage	Abweichung in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	13,10	14,00	6,9
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0392	0,0426	8,5
	Ozonbildungspotenzial - POCP Potential / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0046	0,0048	4,3
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0040	0,0052	27,3
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	52,3	60,0	14,7
	Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	184,9	200,2
Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ		147,4	159,7	8,3
Erneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{re} / MJ		37,4	40,5	8,1
PE _{re} /PE _{ges}		0,20	0,20	-0,2

Tabelle 52 zeigt den Unterschied der Umweltstation mit und ohne Bewertung der Solaranlage für die Herstellungsphase A1-A3. Die Unterschiede liegen in den Primärenergien weit unter 10 % vom Ausgangswert des Gesamtgebäudes ohne Solaranlage. In den emissionsbedingten Umwelteinwirkungen zeigt nur das Überdüngungspotenzial und das Ozonschichtabbaupotenzial deutlich Abweichung über 10%.

Kapitel 2.4.3.2 zeigt, dass das Potenzial in der Nutzungsphase der PV-Anlage über 50 Jahre beträchtlich größer ist als die Herstellungsphase A1-A3 und somit insgesamt deutlich z.B. an Treibhausgasemissionen einspart werden kann.

2.5.1.3 Anteil der Gründung ohne und mit Bodenaushub in der Herstellungsphase A1-A3
(außerhalb der DGNB)

Die DGNB berücksichtigt in ihren Kriterien (Tabelle 36) nicht alle Kostengruppen die für die Erstellung eines Gebäudes notwendig sind. In LEGEP war es möglich die Umweltstation über die Grenzen der DGNB hinaus zu betrachten und alle für den Bau der Umweltstation benötigten Kostengruppen zu berücksichtigen. Folglich konnten auch die Positionen in Kostengruppe 310 oder notwendige Arbeiten wie die Entwässerung usw. der Kostengruppe 500 berücksichtigt werden. Diese Positionen gehören zu einem funktionstüchtigen Gebäude und müssten eigentlich für die vollständige Ökobilanz eines Gebäudes berücksichtigt werden.

Tabelle 53: Vergleich der Herstellungsphase zwischen der detaillierten Ausführungsplanung mit und ohne Baugrube und notwendiger Leitungsführung in KG 500 (außerhalb der DGNB).

Herstellungsphase A1-A3		PLUS + Wärmepumpe (inkl. PV-Anlage)				
		Ausführung LEGE 2017 Ökobaudat 2016 nach DGNB	Ausführung LEGE 2017 Ökobaudat 2016 + Baugrube ohne Erdaushub + KG 500	Abweichung in %	Ausführung LEGE 2017 Ökobaudat 2016 + Baugrube mit Aushub + KG 500	Abweichung in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	14,00	14,80	5,7	15,25	8,9
	Versauerungspotenzial - AP / $\text{kg}_{\text{SO}_2\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0426	0,0464	9,1	0,0478	12,3
	Ozonbildungspotenzial - POCP Potential / $\text{kg}_{\text{C}_2\text{H}_4\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0048	0,0051	5,4	0,0051	5,4
	Überdüngungspotenzial - EP / $\text{kg}_{\text{PO}_4\text{-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	0,0052	0,0057	10,1	0,0060	16,0
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / $\cdot 10^{-8} \text{ kg}_{\text{R11-equiv.}} / (\text{m}^2_{\text{NRA}} \cdot \text{a})$	60,0	60,3	0,5	60,3	0,5
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - $\text{PE}_{\text{ges}} / \text{MJ}$	200,2	218,2	9,0	225,5	12,6
	Nichternewbarer Primärenergiebedarf - $\text{PE}_{\text{ne}} / \text{MJ}$	159,7	173,2	8,5	179,4	12,4
	Erneuerbarer Primärenergiebedarf - $\text{PE}_{\text{re}} / \text{MJ}$	40,5	45,0	11,2	46,1	13,8
	$\text{PE}_{\text{re}} / \text{PE}_{\text{ges}}$	0,20	0,21	2,0	0,20	1,0

Die zwei Varianten außerhalb der DGNB berücksichtigen zum einen die Arbeiten der notwendigen Außenanlagen KG 500 (z.B. notwendige Gräben, Leitungen usw.) und zum anderen die KG 500 und die Baugrube in KG 310 (z.B. Baugrubenaushub und Vorbereitung) (s. Tabelle 53) mit. Der Baugrubenaushub und Erdarbeiten als Kiesherstellungsproduktion wie in LEGEP angenommen, ist aus Sicht des ZAE Bayern sehr fraglich. Deshalb sollten diese Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden.

Der prozentuale Anstieg wurde zur Ausführung LEGEP 2017, Ökobaudat 2016 nach DGNB dargestellt und hat einen nicht unbeträchtlichen Einfluss auf das Ergebnis der Herstellungsphase A1-A3.

2.5.1.4 Vergleich der einzelnen Phasen zwischen Entwurfsplanung und Ausführungsplanung

Tabelle 54: Vergleich der Nutzungsphase - Instandsetzungs- und Austauschphase B2/B4 zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Nutzungsphase - Instandsetzungs- und Austauschphase B2/ B4		Entwurfsplanung LEGEP 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung nach Leistungsverzeichnis LEGEP 2017 Ökobaudat 2016	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	1,46	0,16	-89,0
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0072	0,0008	-88,6
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0014	0,0001	-92,6
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0005	0,0001	-85,4
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,64	0,29	-54,5
	Gesamtprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	33,58	4,37	-87,0
Primärenergie	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	28,99	3,34	-88,5
	PE _{re} /PE _{ges}	0,14	0,24	73,4
	PE _{re} - erneuerbarer. Primärenergiebedarf			

Tabelle 54 zeigt, dass sich durch die Berücksichtigung der Nutzungsphase die Ergebnisse nicht merklich verändern. Die minimale Abweichung des Ozonschichtabbaupotenziales wird durch die Erweiterung der Nachkommastellen im Ozonschichtabbaupotenzial OPD in der LEGEP Version verursacht.

Tabelle 55: Vergleich der Nutzungsphase - Energieverbrauch im Betrieb B6 zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Nutzungsphase - Energieverbrauch im Betrieb B6		Entwurfsplanung LEGEP 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung nach Leistungsverzeichnis LEGEP 2017 Ökobaudat 2016	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	26,41	26,41	0,0
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0439	0,0439	0,0
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0032	0,0032	0,0
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0042	0,0042	0,0
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	15,71	15,74	0,2
	Gesamtprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	438,78	438,78	0,0
Primärenergie	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	374,88	374,88	0,0
	PE _{re} /PE _{ges}	0,15	0,15	0,0
	PE _{re} - erneuerbarer. Primärenergiebedarf			

Tabelle 55 zeigt, das sich nichts verändert hat in der Berechnung der Nutzungsphase. Die minimale Abweichung des Ozonschichtabbaupotenziales wird durch die Erweiterung der Nachkommastellen im Ozonschichtabbaupotenzial OPD in der LEGEP Version verursacht.

Tabelle 56: Vergleich der Entsorgungsphase C3 und C4 zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Entsorgungsphase C3 und C4		Entwurfsplanung LEGEP 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung nach Leistungsverzeichnis LEGEP 2017 Ökobaudat 2016	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	2,77	2,66	-4,0
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0017	0,0017	-0,3
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0002	0,0002	-2,6
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0004	0,0004	-1,0
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,00	0,29	--
Primärenergie	Gesamtprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	-4,48	-6,65	48,6
	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	-4,18	-4,00	-4,2
	PE _{re} /PE _{ges}	0,07	0,40	500,7
	PE _{re} - erneuerbarer. Primärenergiebedarf			

Tabelle 56 zeigt, dass die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen ähnlich sind zwischen der Berechnung während der Entwurfsplanung und der Ausführung. Durch die fehlenden Verknüpfungen in der Instandhaltung hat dies jedoch auch sehr geringe Auswirkungen auf die Entsorgungsphase C3 und C4. Folglich ist zu erwarten, dass mit der Instandhaltung die ökologischen Werte der Ausführung bzgl. emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und Ressourcenverbrauch (Primärenergie) geringfügig größer werden.

Durch die Erweiterung der Nachkommastellen in der Software im Ozonschichtabbaupotenzial OPD konnte hier auch ein sehr kleines Ergebnis abgebildet werden. Die Unterschiede im negativen Gesamtprimärenergiebedarf bleiben immer noch nicht nachvollziehbar.

Tabelle 57: Vergleich des Recycling D zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Gebäudekonstruktion ohne Energieverbrauch im Betrieb B6		Entwurfsplanung LEGEPE 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung nach Leistungsverzeichnis LEGEPE 2017 Ökobaudat 2016	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	13,15	13,00	-1,1
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0337	0,0311	-7,8
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0039	0,0042	5,7
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0039	0,0038	-3,9
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	4,81	53,93	1021,2
Primärenergie	Gesamprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	153,42	147,28	-4,0
	Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	118,92	113,73	-4,4
	PE _{re} /PE _{ges}	0,22	0,23	1,3
	PE _{re} - erneuerbarer Primärenergiebedarf			

Tabelle 57 zeigt, dass sich das Ergebnis der Recyclinggewinne in Phase D trotz großer Verknüpfungslücken in der Instandhaltung B2/ B4 erhöht haben. Dies liegt an den höheren ökologischen Werten in der Herstellungsphase A1-A3. Werden diese Instandhaltungsanteile zukünftig mitbetrachtet sollte sich der Recyclinganteile in den Negativwerten nochmals erhöhen. Im Ozonschichtabbaupotenzial OPD waren die angegebenen Werte in LEGEP nicht plausibel. Folglich wird in der Ausführung nur der Wert 0 angegeben.

Tabelle 58: Vergleich der Gebäudekonstruktion (Phase A1-A3/ B2/ B4 C3 / C4 und D) zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Gebäudekonstruktion ohne Energieverbrauch im Betrieb B6		Entwurfsplanung LEGEPE 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung nach Leistungsverzeichnis LEGEPE 2017 Ökobaudat 2016	
		Ist-Wert	Ist-Wert	Abw. in %
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	13,15	13,00	-1,1
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0337	0,0311	-7,8
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0039	0,0042	5,7
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	0,0039	0,0038	-3,9
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻⁸ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	4,81	53,93	1021,2
Primärenergie	Gesamprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	153,42	147,28	-4,0
	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{re} / MJ	118,92	113,73	-4,4
	PE _{re} /PE _{ges}	0,22	0,23	1,3
	PE _{re} - erneuerbarer Primärenergiebedarf			

Das Gesamtergebnis von Tabelle 58 zwischen der Bewertung der Gebäudekonstruktion von Entwurfsplanung zur Ausführungsplanung zeigt fast keinen Unterschied über eine Lebensdauer von 50 Jahren. Nur das Ozonschichtabbaupotenzial ODP hat eine deutliche Abweichung im Ergebnis nach der Ausführung. Jedoch bleibt zu berücksichtigen, dass die Instandsetzung nicht vollständig abgebildet werden konnte. Folglich würde das Endergebnis der Ausführungsplanung geringfügig höher in den emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und dem Ressourcenbedarf (Primärenergie) gegenüber der Entwurfsplanung liegen.

2.5.2 Detailvergleich zwischen Gebäude und Betrieb

Tabelle 59: Vergleich der Gebäudekonstruktion (Phase A1-A3/ B2/ B4/ C3/ C4 und D) und dem Gebäudebetrieb für die Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.

Verhältnis zwischen Gebäude und Versorgung		Entwurfsplanung LEGE 2016 Ökobaudat 2016	Ausführung nach Leistungsverzeichnis LEGE 2017 Ökobaudat 2016	
		Gebäude	Gebäude	Versorgung
emissionsbedingte Umwelteinwirkungen	Treibhauspotenzial - GWP / kg _{CO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	33,2%	33,0%	67,0%
	Versauerungspotenzial - AP / kg _{SO2-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	43,4%	41,5%	58,5%
	Ozonbildungspotenzial - POCP / kg _{C2H4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	54,9%	56,3%	43,7%
	Überdüngungspotenzial - EP / kg _{PO4-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	48,1%	47,1%	52,9%
	Ozonschichtabbaupotenzial - ODP / ·10 ⁻³ kg _{R11-equiv.} /(m ² _{NRA} ·a)	23,4%	77,4%	22,6%
Primärenergie	Gesamprimärenergiebedarf - PE _{ges} / MJ	25,9%	25,1%	74,9%
	Nichtererneuerbarer Primärenergiebedarf - PE _{ne} / MJ	24,1%	23,3%	76,7%

Für den wichtigsten emissionsbedingten Umweltfaktor, das Treibhauspotenzial (s. Tabelle 59) bleibt das Verhältnis zwischen Gebäudekonstruktion und Versorgung bei ca. 1:2. Je nach emissionsbedingter Umweltauswirkung oder dem Ressourcenverbrauch (Primärenergie) kann in Tabelle 59 die prozentuale Verteilung abgelesen werden. Diese unterscheidet sich teilweise grundlegend zwischen den einzelnen ökologischen Faktoren. Bis auf das Ozonbildungspotenzial POCP und das Ozonschichtabbaupotenzial ODP ist der Versorgungsanteil höher als die Gebäudekonstruktion.

Die Bewertung der Energieträger für die Versorgung des Gebäudes ist immer auf ältere Energiedatensätze für den Strombedarf angewiesen (s. 2.2.2.4 ab Seite 103). Zukünftig werden sich durch den höheren Einsatz von regenerativen Energien die ökologischen Faktoren pro kWh sinken. Der ökologische Anteil der Gebäudekonstruktion wird somit zunehmen und der Anteil der Versorgung abnehmen.

2.6 Veränderungen in der DGNB Bewertung 2018 zu 2015

Die Ergebnisse der DGNB Bewertung 2018 wird sich im Bereich Ökobilanz deutlich verändern.

GEWICHTUNG DER KRITERIEN



Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude, Version 2015 (15.05.15)					
Themenfeld	Kriteriengruppe	Kriteriennummer	Kriterienbezeichnung	Bedeutungsfaktor	Anteil an der Gesamtbewertung
Ökologische Qualität (ENV)	Wirkungen auf globale und lokale Umwelt (ENV10)	ENV1.1	Ökobilanz - emissionsbedingte Umweltwirkungen	7	7,9%
		ENV1.2	Risiken für die lokale Umwelt	3	3,4%
		ENV1.3	Umweltverträgliche Materialgewinnung	1	1,1%
	Ressourceninanspruchnahme und Abfallaufkommen (ENV20)	ENV2.1	Ökobilanz - Ressourcenverbrauch	5	5,6%
		ENV2.2	Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	2	2,3%
		ENV2.3	Flächeninanspruchnahme	2	2,3%

Abbildung 54: Kriterienübersicht NBV15 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude).¹²⁹

Abbildung 54 zeigt die DGNB Kriterien der NBV (Neubau Büro- und Verwaltung) 2015. Hierbei war für unser Ökobilanz der Bereich ENV1.1 Ökobilanz – emissionsbedingte Umwelteinwirkungen und ENV2.1 Ökobilanz – Ressourcenverbrauch interessant. Diese beiden Bereiche machen mit 7,9 % für ENV1.1 und 5,6 % für ENV2.1 insgesamt 12,5 % in der DGNB Gesamtbewertung aus.


THEMENFELD	KRITERIENGRUPPE	KRITERIENBEZEICHNUNG
 ÖKOLOGISCHE QUALITÄT (ENV)	WIRKUNGEN AUF GLOBALE UND LOKALE UMWELT (ENV1)	ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes
		ENV1.2 Risiken für die lokale Umwelt
		ENV1.3 Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung
	RESSOURCEN-INANSPRUCHNAHME UND ABFALLAUFKOMMEN (ENV2)	ENV2.2 Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen
		ENV2.3 Flächeninanspruchnahme
		ENV2.4 Biodiversität am Standort

Abbildung 55: Kriterienübersicht NBV15 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude)¹³⁰

Im der neuen DGNB Bewertung von 2018 gibt es die ENV2.1 Ökobilanz Ressourcenverbrauch (Abbildung 55) nicht mehr. Die Primärenergien werden zukünftig vollständig im Punkt ENV1.1 der Ökobilanz des Gebäudes mitbetrachtet. Hierbei ist eine neue Verteilung der prozentualen Anteile vorgesehen.

¹²⁹ Kriterienübersicht NBV15 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude), Version 2015 (15.05.15)

¹³⁰ DGNB, Kriterienübersicht NBV18, Version 2018, https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/Nutzungsprofile/Kriterienuebersicht/Kriterienuebersicht_DGNB_System_Version2018.pdf?m=1516093268&, S. 25

Tabelle 60: Gewichtungsschlüssel der Umweltindikatoren nach DGNB 2018¹³¹.



G_{GWP}	G_{POCP}	G_{AP}	G_{EP}	G_{PENE}	G_{PEGES}	$G_{PENE/PEGES}$
40 %	10 %	10 %	10 %	15 %	10 %	5 %

In der neuen Bewertung (siehe Tabelle 60) liegen die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen bei 70 % (G_{GWP} , G_{POCP} , G_{AP} , G_{EP}) und die Primärenergie bei 30 % (G_{PENE}^{NE} , G_{PENE}^{GES} und $G_{PENE}^{NE} / G_{PENE}^{GES}$). In den emissionsbedingten Umwelteinwirkungen wird das Ozonschichtabbaupotenzial ODP folglich in der Bewertung der Ökobilanz der DGNB 2018 nicht mehr betrachtet. Bei diesem Wert wurden auch in den Auswertungen zur Umweltstation die größten Abweichungen festgestellt. Durch dieses neue Bewertungssystem wird der Anteil des Treibhauspotenzials (GWP) als wichtigster Faktor mit einem Anteil von 40 % gestärkt. Alle anderen emissionsbedingten Umweltfaktoren und die Primärenergiefaktoren werden deutlich abgeschwächt.

¹³¹ DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau, S. 66

Tabelle 61: Kriterienübersicht NBV18 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude)¹³².

THEMENFELD	KRITERIEN-GRUPPE	KRITERIUM	BÜRO	BILDUNG	WOHNEN	HOTEL	VERBRAUCHER-MARKT	SHOPPING-CENTER	GESCHÄFTS-HAUS	LOGISTIK	PRODUKTION
ÖKOLOGISCHE QUALITÄT (ENV)	WIRKUNGEN AUF GLOBALE UND LOKALE UMWELT (ENV1)	ENV1.1	8 9,5%	8 9,5%	8 9,5%	8 9,5%	8 9,5%	8 9,0%	8 9,5%	8 9,5%	8 9,5%
		ENV1.2	4 4,7%	4 4,7%	4 4,7%	4 4,7%	4 4,7%	4 4,5%	4 4,7%	4 4,7%	4 4,7%
		ENV1.3	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,3%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%
	RESSOURCEN-INANSPRUCHNAHME UND ABFALL-AUFKOMMEN (ENV2)	ENV2.2	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,3%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%
		ENV2.3	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%	3 3,4%	2 2,4%	2 2,4%	2 2,4%
		ENV2.4	1 1,2%	1 1,2%	1 1,2%	1 1,2%	1 1,2%	1 1,1%	1 1,2%	1 1,2%	1 1,2%

 Bedeutungsfaktor
 Anteil an der Gesamtbewertung

Im Vergleich zur DGNB 2015 (siehe Abbildung 54) nimmt z.B. der Bewertungsanteil für die Ökobilanz DGNB 2018 (siehe Tabelle 61) von 12,5 auf 9,5 % ab. Die anderen Bewertungskriterien wie „Risiken für die lokale Umwelt“ ENV1.2 und „Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung“ ENV1.3 werden prozentual zum Gesamtanteil aufgewertet. Neu hinzu kommt die Biodiversität am Standort ENV2.4 mit 1,2 % an der DGNB Gesamtauswertung.

Wie in Tabelle 61 sichtbar ist bei Shopping-Centern der Anteil der Ökobilanz 2018 mit 9,0 % geringfügig niedriger als bei anderen Gebäuden.

¹³² DGNB, Kriterienübersicht NBV18, Version 2018, https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/Nutzungsprofile/Kriterienuebersicht/Kriterienuebersicht_DGNB_System_Version2018.pdf?m=1516093268&, S. 27

2.7 Zusammenfassung

Die Umweltstation besitzt in der gebauten Variante mit passivhausähnlicher Gebäudehülle, Wärmepumpe, Eisspeicher und PV-Anlage eine hervorragende Umweltbilanz (ENV1.1 Ökobilanz - Emissionsbedingte Umwelteinflüsse 113,4 % + ENV2.1 Ökobilanz – Ressourcenverbrauch (Primärenergie) 81,8 %) mit dem Höchstergebnis von 100 % nach DGNB 2015 (NBV15), mit der Verwendung der Ökobaudat 2016. Zudem sind beide Kategorien (ENV1.1 und ENV2.1) mit der höchsten Auszeichnung Platin (≥ 80 % Erfüllungsgrad) bewertet.

Auch ohne die PV-Anlage erreicht dieses Gebäude in der Ökobilanz – emissionsbedingte Umwelteinwirkungen (ENV1.1) mit 97,4 % die höchste Kategorie. Durch den geringeren Anteil der regenerativen Energien ohne PV-Anlage ist die Einzelbewertung Ökobilanz – Ressourcenverbrauch mit 74,2 % in Gold einzuordnen. Werden beide Kategorien nach DGNB im Punkteverhältnis 7:5 zusammengerechnet erhält der Gesamterfüllungsgrad Ökobilanz mit 87,7 % wiederum die höchste Auszeichnung Platin (≥ 80 % Erfüllungsgrad).

Durch die detaillierte Eingabe nach Leistungsverzeichnispositionen konnten nur ein Teil der Instandhaltung und des Austausches von Bauteilen bzgl. der Lebensdauer durch das Programm berücksichtigt werden. Dies wird aber das Endergebnis nur geringfügig verschlechtern. Das Programm LEGEP wird durch die Anregung des ZAE Bayern in einer der nächsten Updates die Möglichkeit besitzen, eine vollständige Eingabe der Instandhaltung nach eigenen hinzugefügten Leistungspositionen auszuführen. Damit ist folglich eine vollständige Abbildung des Gebäudes unter korrekter Berücksichtigung der Instandhaltung möglich.

Werden die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und der Ressourceneinsatz (Primärenergie) in allen Phasen verglichen, zeigte sich zwischen der Vorplanung und der Ausführungsplanungsuntersuchung in fast allen ökologischen Faktoren (Ausnahme Ozonschichtabbaupotenzial (ODP)) ein nur sehr geringer Unterschied in den Zahlenwerten. Jedoch werden durch die Programmeinschränkung, welche die Instandhaltungsphase B2/ B4 zu großen Teilen nicht berücksichtigt hat, geringfügig schlechtere Werte im Gesamtergebnis erreicht.

Der Vergleich der emissionsbedingten Umwelteinwirkung zwischen der Planung und den detaillierten Leistungspositionen für die Herstellungsphase A1-A3 ist mit max. 19 % überschaubar. Jedoch weicht das Ozonbildungspotenzial (POCP) mit ca. 60 % und das Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) mit dem mehr als 9-fachen Wert ab. Die Absolutwerte der Herstellungsphase (A1-A3) sind in der detaillierten Berechnung nach Leistungsverzeichnispositionen in vielen ökologischen Faktoren gegenüber der LCA Berechnung der Vorplanung etwas höher. Im Ergebnis der Phase

D des Recyclings zwar zu erkennen, dass hier größere Gutschriften vorhanden sind, welche die ökologischen Kennwerte in der Gesamtberechnung wieder teilweise reduzieren.

Momentan besitzt der Großteil der Materialien nur ökologische Daten in den Phasen A1-A3. Die Anzahl der Datensätze im Bereich der Phase C und D muss deswegen deutlich erhöht werden, um das Recyclingpotenzial noch genauer abzubilden. Wenn möglich sollte dies aber nicht, wie oft praktiziert, mit ungenauen Pauschalen realisiert werden. Hier sind zukünftig genaue wissenschaftliche Untersuchungen notwendig. Stehen mehr belastbare Daten für die Phase D zur Verfügung, werden sich folglich auch die Gutschriften erhöhen.

In LEGEP wurden durch dieses Forschungsprojekt eine Vielzahl von Programmfehlern entdeckt und gemeinsam mit den Entwicklern behoben.

Für den Recyclingbeton war keine Produktdeklaration (EPD) verfügbar. Somit konnte auch dieser in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden. Jedoch ist durch die Mischungsverhältnisse des Betons (Laborberichte) zu erwarten, dass sich der wichtigste ökologische Faktor (Treibhauspotenzial) sehr ähnlich zu Normalbeton verhält. Die emissionsbedingten Umwelteinwirkungen und die Primärenergie bei der Betonherstellung ist sehr stark von der verwendeten Zementmenge (z.B. Treibhauspotenzialanteil am Beton von ca. 90-95%) abhängig und nicht wesentlich vom recycelten Gestein als Ersatz für Kies.

In diesem Projekt war es durch einige Importfehler der Daten aus LEGEP 2017 nicht möglich, die neue Ökobaudat 2017-I (in LEGEP auch Ökobaudat 2018 genannt) mit der neue LEGEP-Version 2018 zu berücksichtigen.

Der neue Ansatz der DGNB Bewertung 2018 reduziert den Anteil der Ökobilanz in der DGNB in vielen Bereichen von 12,5 % auf 9,5 % z.B. bei Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude deutlich. Durch die große Bedeutung der Ökologie ist diese Reduzierung in der DGNB 2018 völlig unverständlich. Das Ozonschichtabbaupotenzial ODP, mit der größten Abweichung in der Berechnung zwischen Vorplanung und den detaillierten Leistungsverzeichnissen, wird zukünftig nicht mehr in der DGNB-Bewertung betrachtet. Zum Untersuchungszeitpunkt (Januar 2019) war diese neue Bewertung DGNB 2018 noch nicht korrekt in LEGEP implementiert.

3 Installation und Durchführung Monitoring der aktiven innovativen Bauteile

3.1 Systembeschreibung

Die Abstimmung der benötigten technischen Monitoring - Komponenten und Schnittstellen für den Eisspeicher erfolgte mit der Firma Viessmann (Hersteller Eisspeichersystem), den Planern IB Hofer & Hölzl für Heizung, Lüftung und Klima und der Elektrische Gebäudeausrüstung VS planen & beraten GbR.

Die Heiz-/Kühlkomponente besteht aus der Sole/Wasser-Wärmepumpe, wobei die Sole das Wasser aus dem unterirdisch verbauten Eisspeicher darstellt. Das Wasser bzw. Eis des Eisspeichers dient je nach Betriebstemperatur zum Heizen und zum begrenzten, „endlichen“ Kühlen der Büro- und Seminarräume und des Erdgeschossfoyers. Weiterhin können die Solar-Luftabsorber auf dem Flachdach zur Wärmeerzeugung und zur Regeneration des Eisspeichers eingesetzt werden (s. Abbildung 56).

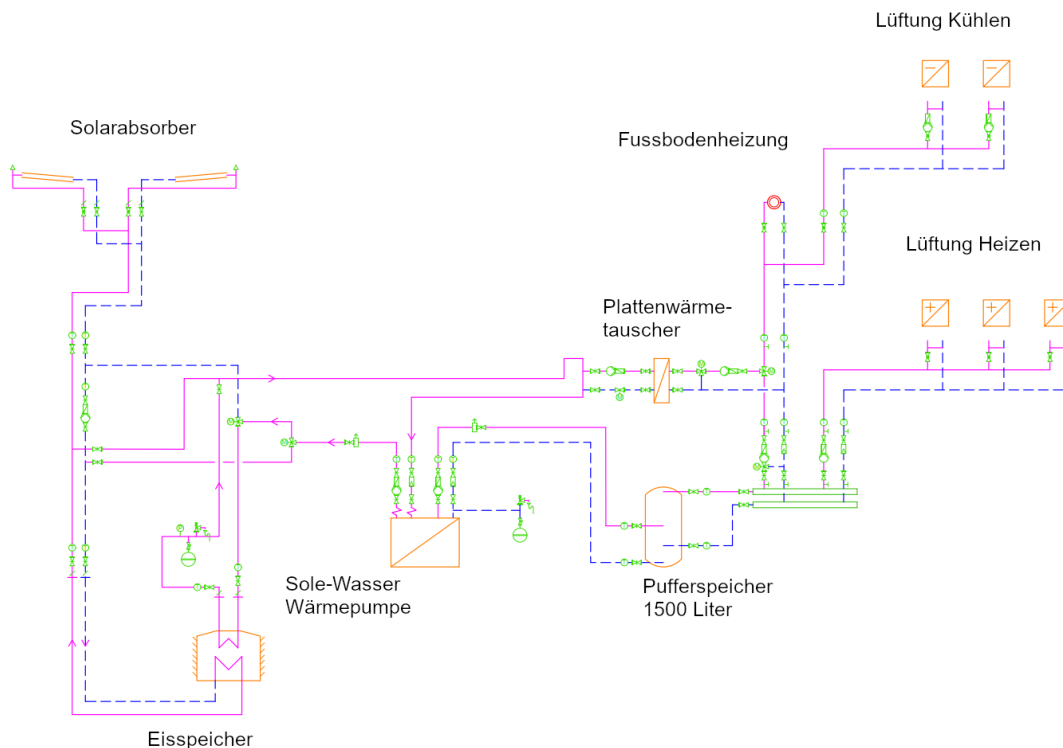


Abbildung 56: Systemübersicht der Wärme- und Kälteversorgungssystems der Eisspeicherheizung.

Als Heiz- und Kühlfläche wurde eine Fußbodenheizung /-kühlung mit auf die Rohrschlangen aufgesetzte Aluminiumlamellen verbaut. In die Fußbodenheizung eingebaute Bleche dienen der

Heizflächenvergrößerung und der gleichmäßigeren Wärmeverteilung. Hierdurch werden niedrigere Systemtemperaturen für die Heizung bzw. höheren Systemtemperaturen bei der Kühlung im Vergleich mit herkömmlicher Flächenheizung benötigt.

Weiterhin kann mit der Lüftungsanlage begrenzt gekühlt werden. Dies ist jedoch nur im Zulufttemperaturbereich oberhalb des Taupunkts möglich.

3.2 Inbetriebnahme

Beim Bauablauf kam es zu erheblichen Verzögerungen seitens der Bauausführung. Ursprünglich war die Eröffnung der Umweltstation im Frühjahr 2018 geplant; zeitgleich mit dem Beginn der Landesgartenschau in Würzburg. Die zwei wesentlichen Ursachen für die Verzögerung waren das Insolvenzverfahren über die Lüftungsfirma und die notwendige Neuausschreibung.

Ein weiterer Verzögerungspunkt war die Nichteinhaltung der vorgegebenen Planmasse für die Aussparung des Oberlichts über dem Treppenhaus der Umweltstation. Dieses Oberlicht wurde zu groß betoniert und konnte nachträglich nicht mehr korrigiert werden. Dies führte wiederum zu Änderungen der statischen Ansprüche an die Oberlichtkonstruktion. Erst nach dem Schließen des Oberlichtes und somit der Gebäudehülle, konnten die weiteren Ausbaugewerke ihre Leistungen beginnen.

Die Eisspeicherheizung lief zuvor provisorisch auf manueller Steuerung, da die Stellantriebe von der Fußbodenheizung nicht angesteuert wurden. Mehrere Wochen waren Monteure der Gewerke Heizung und Elektro (immer einzeln) vor Ort gewesen um den Fehler zu suchen und zu beheben. Am 20.11.2019 wurde ein gemeinsamer Termin von den Firmen und Ing. Büros anberaumt. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Elektrofirma sich mit dem Hersteller in Verbindung setzen musste, um Details der Programmierung zu klären. Während diesem Notbetrieb war kein sinnvolles Monitoring möglich.

Wegen der Verzögerungen im Bauablauf und der Inbetriebnahme der Eisspeicherheizung konnte der Regelbetrieb der Gebäudetechnik erst Anfang Dezember 2019 sichergestellt werden.

3.3 Monitoring

Für das Monitoring des Eisspeichers war es notwendig, die Betriebszustände und die Steuerung des Eisspeichers zu kennen. Ursprünglich sollten diese Daten über eine MSR (Mess-Steuer-Regel-Einheit) einfach zu exportieren sein. Jedoch wurde diese zentrale Steuereinheit im Projektverlauf vom Bauherrn aus Kostengründen gekürzt.

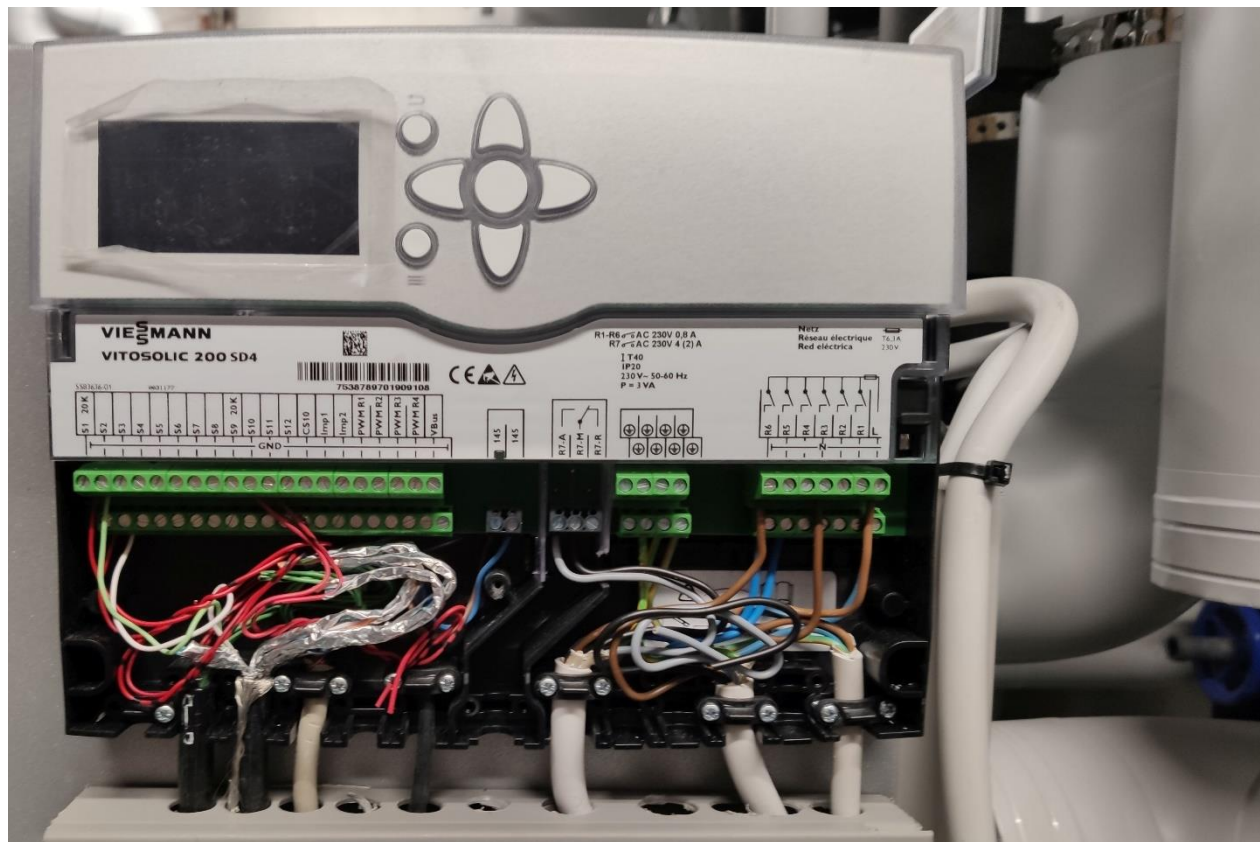


Abbildung 57: Vitosolic 200 für die Eisspeichersteuerung.

Die Vitosolic 200 Steuerung konnte laut der Firma Viessmann nur über eine RESOL Datenlogger DL3 ausgelesen werden. Grundsätzlich wird für die Steuerung des Eisspeichers, laut Viessmann, nur ein Temperatursensor benötigt. Aus wissenschaftlicher Sicht und zur Vermeidung von möglichen Kalibrierfehlern hat das ZAE Bayern hier auf drei Temperatursensoren bestanden. Ein zusätzlicher Radarsensor sollte für das Monitoring den Eisanteil im Tank bestimmen. Ebenso kann über die Steuerung der Solarabsorber auf dem Dach ausgelesen werden.

Am Tag der Inbetriebnahme wurde von der Firma Viessmann in Zusammenarbeit mit der Fa. Bechert festgestellt, dass die verbauten Sensoren nicht mit der Steuerungseinheit Vitosolic 200 kompatibel sind. Anstelle alle drei Sensoren auszutauschen, wurde dies offensichtlich nur für den einen benötigten Sensor im Eisspeichertank durchgeführt. Ebenso wurde im weiteren Projektverlauf festgestellt, dass trotz des vorhandenen Radarsensors im Tank, dieser nicht angeschlossen wurde. Der Bauherr sowie das ZAE Bayern wurden hiervon nicht in Kenntnis gesetzt.

Weitere Daten der Wärmepumpe werden über ein KNX-Gateway Vitogate 200 von der Wärmepumpe ausgelesen. Jedoch war es nicht möglich die Energiemengen über das KNX Gateway der

Wärmepumpe zu bestimmen. Jedoch wurden diese benötigt um einen Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu bestimmen. Deshalb wurden zwei zusätzliche Stromzähler (s. Abbildung 58) für die Wärmepumpe und die notwendigen Pumpen im Eisspeichersystem, installiert.

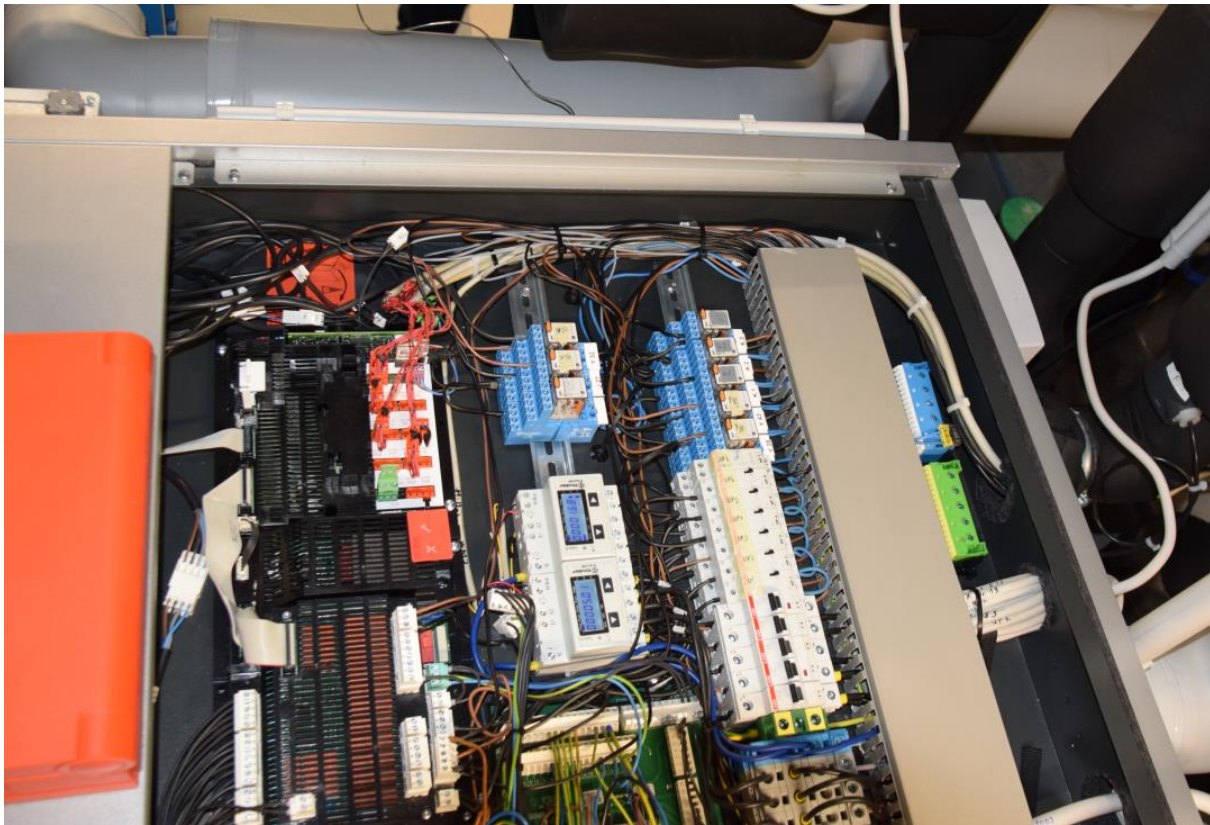


Abbildung 58: Verkabelung mit zwei zusätzlichen Elektrozählern (Hutschienenmodule mit Display) für die Wärmepumpe und die erforderlichen Pumpen im Eisspeichersystem.

Die benötigten Daten aus Ist- und Solltemperaturen der Räume und die Daten der Wetterstation werden als BACnet Datenpunkte aus der Gebäudeautomation übergeben.

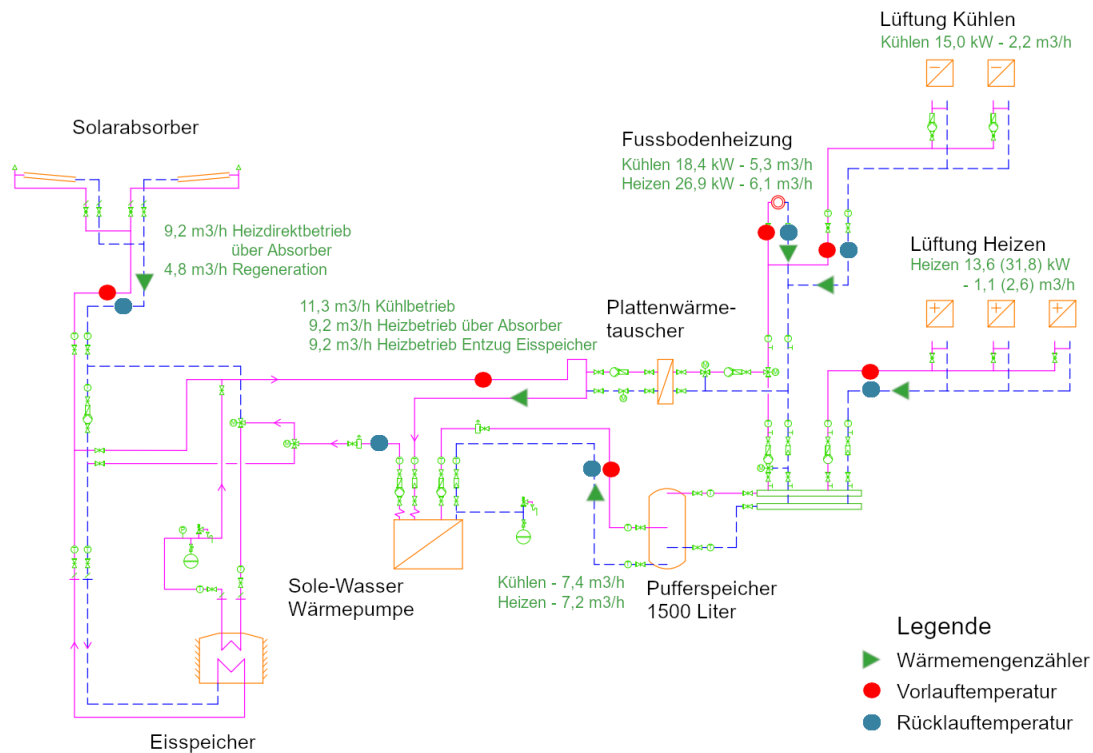


Abbildung 59: Monitoringübersicht des Wärme- und Kälteversorgungssystems der Eisspeicherheizung mit der Position der eingebauten Vor- und Rücklauftemperaturen und Wärmemengenzähler.

Die genaue Positionierung der Wärme- /Kältemengenzähler mit Vor- und Rücklauftemperatur wurde im Bauprozess festgelegt. Die ausführende Firma Bechert hat bei der Montage Passstücke eingesetzt, um im späteren Bauablauf eine einfache Montage der Wärmemengenzähler vornehmen zu können (s. Abbildung 59).



Abbildung 60: Wärmemengenzähler in der großen Ausführungsvariante (links) und der kleinen Ausführungsvariante (rechts).

Der Messdatenabruf konnte aus technischen und datenschutzrechtlichen Gründen nur per GSM/LTE an das ZAE durchgeführt werden. Bis auf den Zugriff auf die PV-Anlagen Daten, den nicht angeschlossenen Radarsensor und die beiden zusätzlichen Temperatursensoren im Tank, werden alle relevanten Daten zum Projektende geloggt.

Die vom ZAE-Bayern eingebauten Wärmemengenzähler konnten auf Ihre Funktionalität bis zum Projektende getestet werden. Somit konnte auch nachgewiesen werden, dass das Eisspeichersystem grundsätzlich im Betrieb ist. Dies zeigt auch beispielhaft Abbildung 61.

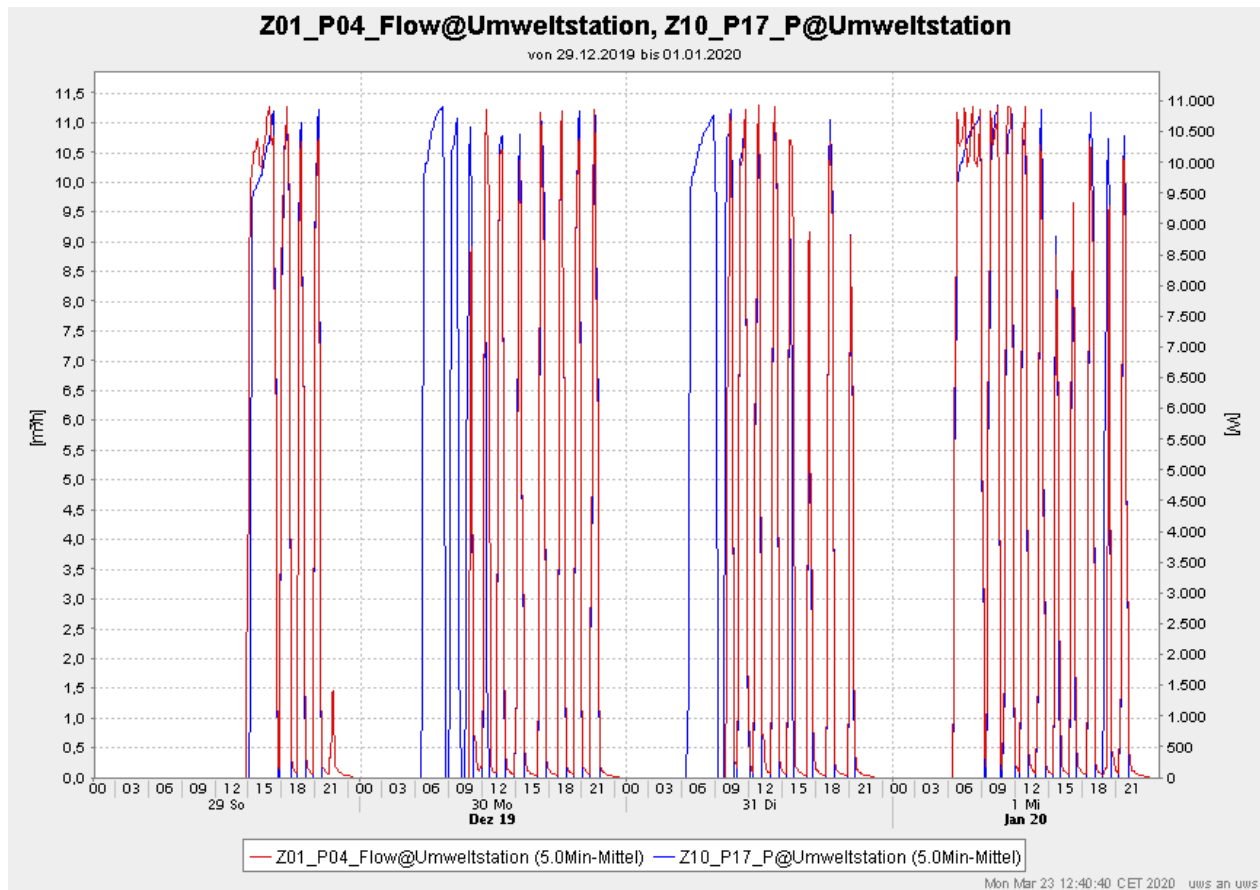


Abbildung 61: Funktionsnachweis des Eisspeichers. Dargestellt sind Durchflussmenge am Solarabsorber (blaue Linie, linke Achse) und Wirkleistung der Wärmepumpe (rote Linie, rechte Achse).

Abbildung 61 zeigt die Betriebszeiten der Wärmepumpe (blaue Linie) und die dazu benötigte Wirkleistung der Wärmepumpe. Die Durchflussmenge am Solarabsorber auf dem Dach der Umweltstation wird durch die rote Linie dargestellt. Wenn der Solarabsorber nicht durchflossen wird und die Wärmepumpe eine Wirkleistung zeigt, wird der Eisspeichertank als Wärmequelle verwendet.

Die Wetterdaten konnten erst Mitte Januar 2020 zum Projektende vom Gebäudeleitsystem übertragen werden. Ab diesem Zeitpunkt können auch die Schaltprozesse temperaturabhängig nachvollzogen werden.

4 Öffentlichkeitsarbeit

Eine Vorstellung der ersten Ergebnisse der LC-Analyse (auch aus dem Vorläuferprojekt „Erarbeitung eines innovativen Energie-, Ökologie- und Informationskonzepts für die Umweltstation der Stadt Würzburg (InnUmWü)“ gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt mit dem AZ: 33520/01-35) wurde auf der Eurosun 2018 in Rapperswil durchgeführt. Das Abstract „R. Kastner, M. Reim, Y. Yu, S. Weismann, Comparative analysis of life-cycle assessment tools (LCA), 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (Eurosun 2018), Rapperswil, Switzerland, 10.-13.09.2018“ wurde veröffentlicht.

Die Umweltstation der Stadt Würzburg wurde in zahlreichen wissenschaftlichen Vorträgen als Projektbeispiel erwähnt um die Bekanntheit dieses Projektes mit RC-Beton und Eisspeichersystem zu steigern.

Seit der Eröffnung der neuen Umweltstation der Stadt Würzburg im Mai wurden tausende von Besucher mit den Bildungsangeboten zur nachhaltige Entwicklung, erreicht. Darüber hinaus fanden in der Umweltstation zahlreiche öffentliche Vorträge, Vereinssitzungen und Gruppengespräche statt, die sich für eine nachhaltige Entwicklung der Stadtgesellschaft einsetzen. Im Folgenden wird eine Auswahl der stattgefundenen Veranstaltungen beschrieben.

Einweihung der neuen Umweltstation

Das neue Gebäude der Umweltstation der Stadt Würzburg wurde am 12. Mai 2019 feierlich vor ca. 250 Gästen eingeweiht. Neben zahlreichen Gästen aus Stadt und Region war auch der Bayerische Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz, Thorsten Glauber, sowie der Generalsekretär der DBU, Alexander Bonde, anwesend.



Abbildung 62: v.l.n.r.: Staatsminister Thorsten Glauber, Architekt Franz Balda, Werkleiter der Stadtreiniger Wolfgang Kleiner und Leiterin der Umweltstation Anja Knieper auf der Galerie der neuen Umweltstation (Foto: Georg Wagenbrenner).

Tag der offenen Tür

Am 25. Mai 2019 folgte mit einem Tag der offenen Tür die große Vorstellung der neuen Umweltstation für die gesamte Bürgerschaft. Neben dem Gebäude selbst, das im Rahmen von Hausführungen vorgestellt wurde, präsentierten die Mitarbeiter/-innen ihre Arbeit und stellten Angebote sowie Aufgaben der städtischen Umweltstation vor.



Abbildung 63: Jung und Alt machten sich am interaktiven Klimalehrpfad im Seminarraum der Umweltstation zu schaffen (Foto: Jakob Sänger).



Abbildung 64: Am Pflanzstand hinter dem Gebäude wurden fleißig Tontöpfe gestaltet und anschließend mit insektenfreundlichen Blühpflanzen für den eigenen Balkon bepflanzt (Foto: Jakob Sänger).

Umwelt-Erlebniswoche

In den ersten beiden Juliwochen 2019 besuchten ca. 2.500 Kindergarten- und Schulkinder sowie deren Begleitpersonen die Umwelt-Erlebniswoche. Neben zahlreichen Aktionsständen zu verschiedenen Themen rund um das Motto „Umwelt aktiv erleben“ wurde auch das neue Gebäude der Umweltstation in die Aktionswochen einbezogen. Neben Aktionsständen zu den Themen „Artenvielfalt“, „Klimawandel und Energiesparen“ sowie „Upcycling“ wurden, insbesondere den zahlreichen Lehrkräften, Hausführungen angeboten.



Abbildung 65: Auf Energiefahrrädern erradeln junge Besucher auf dem Balkon der neuen Umweltstation Strom zum Betrieb von Elektrogeräten (Foto: Jakob Sänger).

Hausfuhungen

Seit der Eröffnung der neuen Umweltstation wurden zahlreiche terminierte und spontane Hausfuhungen für interessierte Laien sowie Fachleute durchgeführt. Dabei war das Interesse an den innovativen Technologien „Recyclingbeton“ sowie „Eisspeicherheizung“ sehr groß.

Weiterhin wurde vom ZAE Bayern Poster für die Umweltstation zum Eisspeichersystem gestaltet. Später wurden diese durch eine digitale Visualisierung des Eisspeichersystems im Jahresverlauf ergänzt.

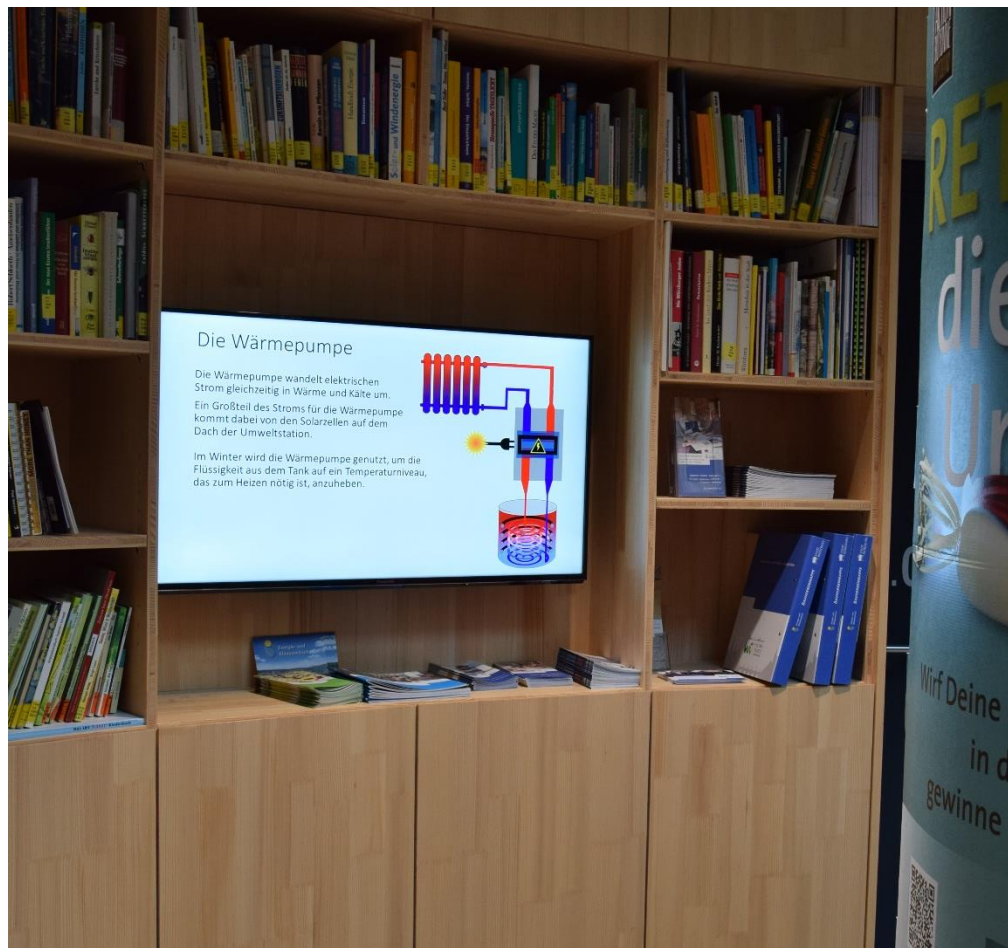


Abbildung 66: Präsentation des Eisspeichersystems mit Wärmepumpe als animierte Bildschirmpräsentation in der Umweltstation.

Diese Präsentation wird im Foyer der Umweltstation in einer Endlosschleife auf einem Monitor gezeigt (s. Abbildung 66).

Eine Kurzbeschreibung des Projekts wurde auf <https://www.zae-bayern.de/forschung/energieoptimiertegebaeude.html> veröffentlicht.

5 Danksagungen

Die Autoren des Teilprojektes „RC-Beton“ möchten sich insbesondere bei den Herren Dr. Alexander Hentschel (Tragwerksplaner Dr. Kreuz+Partner), Frank Sauer (ehem. GF Wüffert GmbH & Co. KG; RC-Betonlieferant), Steffen Beuerlein, Beuerlein GmbH Co. KG (RC-GK-Lieferant), Mitarbeitern des Baunternehmens Georg Göbel GmbH und sowie bei dem Team des Bauherren vertreten durch Frau Anja Knieper (Leiterin Umweltstation Würzburg), Herrn Hertlein und Herrn Jürgen Schmitt („Die Stadtreiniger“ Würzburg) für die konstruktive und zielführende Zusammenarbeit bedanken. Gleichwohl bedanken sich die Autoren bei Frau Christiane Grimm (Vertreterin des Fördermittelgebers der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)) und unserem Kooperationspartner in diesem Projekt Dr. Hans-Peter Ebert vom Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern).

Unser Dank gilt aber auch den Unternehmen, die im Vorfeld der Beauftragung Interesse an der Mitwirkung in diesem Projekt signalisiert haben, dies sind vor allem die Firma Balthasar Höhn Bauunternehmung GmbH & Co. KG und LZR Lenz Ziegler Reifenscheid GmbH.

Die Autoren des Teilprojektes „Eisspeicher“ möchten sich bei der Stadt Würzburg „Die Stadtreiniger“, der Brandenburgische Technische Universität Cottbus und dem Fördermittelgeber der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

Anhang – Einsatz von Recycling-Beton

Anhangverzeichnis:

Anhang 1: Übersicht angeschriebene Unternehmen im Raum Würzburg

Anhang 2: Ankündigung des Bauvorhabens und Informationen an die betreffenden Firmen

Anhang 3: Analysebericht 141117-78 von der isu umweltinstitut GmbH vom 03.11.2016

Anhang 4: Übersicht gemessene Druckfestigkeiten

Anhang 1: Übersicht angeschriebene Unternehmen im Raum Würzburg

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg



Fakultät II Umwelt und Naturwissenschaften

Arbeitsgebiet Bauliches Recycling

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke

Recyclingunternehmen in der Nähe von Würzburg

Unternehmen	Güteüberwachte Bauprodukte	Adresse	PLZ	Ort	Tel.
Würzburger Pflasterbau GmbH	u.a. RC Beton 0/80	Friedrich-König-Straße	97080	Würzburg	0931/98069-21
Baltasar Höhn Bauunternehmung GmbH & Co. KG	RC FSS-StB 0/45	Kitzinger Straße 101	97076	Würzburg	0931/2001851
Beuschlein Entsorgungsfachbetrieb GmbH	RC Beton 0/56	Alandsgrundweg 1	97704	Würzburg	09131/44477
TK Recycling GbmH	RC Beton 0/45	Am Wiesenweg 1	97262	Hausen	09367/983005
HAAF Firmengruppe GmbH & Co. KG	RC Mix 0/56	Mittlere Gasse 1	97268	Kirchheim	09366/980800
Emil Väth GmbH Bauschutt-Recycling	RC Erd-StB 0/56	Würzburger Straße 79	97854	Steinfeld	09359/242
Stockmann GmbH & Co. KG Fuchsstadt	RC Mix 0/56	Im Gründlein 4	97727	Fuchsstadt	09732/789990

Betonhersteller in der Nähe von Würzburg					
Unternehmen	Entfernung Umweltstation	Adresse	PLZ	Ort	Tel.
LZR Lenz-Ziegler-Reifenscheid GmbH	4	August - Gauer - Str. 9	97318	Kitzingen	0931/92142
Holcim Beton und Betonwaren GmbH	4	Südliche Hafestraße 13	97080	Würzburg	0931/970690
TBG Transportbeton Mainfranken GmbH & Co.KG	4	Südliche Hafestraße 6A	97080	Würzburg	0931/92933
Benkert Otto Baustoff- u. Betonwerke e.K.	12	Staustufe 20	97291	Thüngersheim	09364/80880
Transportbeton Beuschlein GmbH & Co.KG	11	Alandsgrundweg 1	97704	Würzburg	0931/72030
Heidelberger Beton GmbH	11	Hans - Kleider - Str. 9	97337	Dettelbach	0172/1300769

Anhang 2: Ankündigung des Bauvorhabens und Informationen an die betreffenden Firmen

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
Fakultät II Umwelt und Naturwissenschaften
Arbeitsgebiet Bauliches Recycling
Leiterin: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke



Cottbus, 24. Oktober 2016

An Recyclingunternehmen und Betonhersteller im Raum Würzburg

Neubau Umweltstation in Würzburg

Die Stadt Würzburg plant den Neubau der Umweltstation in Würzburg. Die Umweltstation dient als städtisches Zentrum für Umweltbildung, Umweltinformation und Abfall- sowie Energieberatung und konnte schon Besucher aus aller Welt an diesem Anlaufpunkt der Stadt begrüßen. Beim Neubau der Station soll der an die Besucher vermittelte Umweltgedanke ebenfalls im Vordergrund stehen.

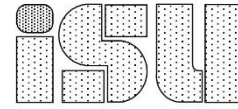
Die Konstruktionsunterlagen werden derzeit erarbeitet. Der Roh- und Ausbau wird unter Nachhaltigkeitsaspekten konzipiert. Die Tragkonstruktion besteht aus Beton. Erstmals soll in Würzburg anstelle von Normalbeton Recycling-Beton eingesetzt werden. D.h., die natürlichen Zuschläge > 2mm (Kiese, Splitte) sind durch rezyklierte Gesteinskörnungen der Körnungsgrößen 2/8, 8/16 und/oder 16/32 zu ersetzen. Um Sie rechtzeitig auf dieses Vorhaben aufmerksam zu machen, frage ich hiermit an, ob Ihr Unternehmen o.a. rezyklierte Gesteinskörnungen produziert bzw. bereit ist, diese Lieferkörnung zu produzieren. Gefordert wird der Liefertyp 1 nach Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Ausgabe 2010, Tab.1 (wie unten aufgeführt).

Sofern Sie fachliche Unterstützung von uns wünschen / benötigen, steht Ihnen Frau Prof. Mettke gern beratend zur Verfügung.

Kontaktdaten : apl. Prof. PD Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Einrichtung: BTU Cottbus – Senftenberg
Anschrift: Siemens-Halske-Ring 8
PLZ / Ort: 03046 Cottbus
Telefon: (0355) 69 2080
Fax: (0355) 69 3171
Email: mettke@b-tu.de
Internet: <https://www.b-tu.de/ag-baurecycling/>

isu umweltinstitut GmbH

Ingenieurbüro für Sanierungsplanungen
und Umweltanalysen



141117-78 (266a-Beton) Bericht.docx

Seite 1 von 4

I.S.U. GmbH * Sanderstraße 23-25 * 97070 Würzburg

Autobahndirektion Nordbayern
Dienststelle Würzburg
Sachbereich W24 – Planung und Bau

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Neugebauer

Ludwigkai 4

97072 Würzburg

- Notifizierte Untersuchungsstelle n. § 18 Bundes-Bodenschutzgesetz Zulassung gemäß VSU für die Probenahme von Feststoffen
- Sachverständiger n. § 18 Bundes-Bodenschutzgesetz
- Öffentlich bestellter u. vereidigter Sachverständiger f. Bodenschutz u. Altlasten
- Fachkunde gem. BGR 128 / TRGS 524 Arbeit in kontaminierten Bereichen
- Sachkunde gem. TRGS 519 (Asbest)
- Baustellenkoordinator gem. RAB 30 Anlage B und C

Ihr Zeichen
Herr Neugebauer

Ihre Nachricht vom
23.03.2014

Unser Zeichen
0051 / 141117

Direkte Durchwahl

Würzburg,
03.11.2016

Analysebericht 141117-78

Projekt: „BABA3 – Landesgrenze BY/BW – westl. Helmstadt“
6-streifiger Ausbau von Bau-km 258+600 bis Bau-km 267+100
Brückenbauwerk BW266a
Untersuchung von Beton gem. „Leitfaden – Anforderungen an die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken“

Kundennummer:	0051	Projektnummer:	141117
Ihr Auftrag vom:	23.03.2015	Ihre Zeichen:	Herr Neugebauer
Auftragsnummer:	-	Sachbearbeiter:	Herr Rückert
Probenahme:	Herr Rückert, 27.10.16	Laboreingang:	28.10.2016
Personen vor Ort:	-		
Probebezeichnung:	1610526-1 und -2		
Probenzuordnung:	Probenahmeprotokoll(e), Anlage 1 Beton aus BV "Brückenbauwerk BW266a"		
Beschreibung:	Abbruchbeton (nicht aufbereitet)		
Verortung:	an der Baustelle bei BW266a		
Analytik:	Agrolab Labor GmbH, Bruckberg, DAkkS D-PL-14289-01-00 Prüfbericht 2083139 vom 03.11.2016		
Analyseprogramm:	"Leitfaden – Anforderungen an die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken", Bayer. Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 15.06.2005		
Anlagen:	Anlage 1 - Probenahmeprotokoll(e) Anlage 2 - Prüfbericht(e) Labor		

Hausanschrift
isu umweltinstitut GmbH
Sanderstraße 23-25
97070 Würzburg
Fon 0931 13194
Fax 0931 14367

Geschäftsführer
Dipl. Geol. M. Appel
Dipl. Geogr. H. Rückert
HRB Würzburg 2918
e-mail: info@isu-umweltinstitut.de
internet: www.isu-umweltinstitut.de

Bankverbindung
Sparkasse Mainfranken-Würzburg
IBAN: DE51 7905 0000 0042 2325 38
BIC: BYLADEM1SWU

Mitgliedschaften
ITVA Ingenieurtechnischer Verband
Altlasten e.V.

Zusammenfassung und Bewertung

Die Bewertung erfolgt gemäß den in dem o.g. Leitfaden definierten Richtwerten.
Es gelten folgende Bewertungsstufen:

- RW 1 Recycling-Baustoffe, die die Richtwerte 1 einhalten, können in offener Einbauweise verwendet werden.
- RW 2 Bei Recycling-Baustoffen, die die Richtwerte 1 überschreiten und die Richtwerte 2 einhalten, ist der Einbau nur mit technischen Sicherungsmaßnahmen möglich.
- > RW 2 Bei Recycling-Baustoffen, die die Richtwerte 2 überschreiten, ist eine Verwertung ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht im Allgemeinen nicht möglich.

Die vorliegende Untersuchung dient einer ersten Einschätzung der Verwertungsmöglichkeit.

Gemäß den ermittelten Analysewerten ist festzustellen:

Die Phenol-Gehalte im Eluat überschreiten in beiden Proben den RW 1 – Richtwert für Recyclingbaustoffe.

Probe	Material	AVV-Nr.	Einstufung	Verwertungsmöglichkeit
1610526-1	Betonbruch vor Aufbereitung		RW 2*	eingeschränkt verwertungsfähig
1610526-2	Betonbruch vor Aufbereitung		RW 2*	eingeschränkt verwertungsfähig

* vermutete Einstufung nach Aufbereitung und Ruhephase.

Erläuterung (Zitat aus ZTV wwG-StBBy 05):
 7.2 Uneingeschränkt verwertungsfähiges Material
 7.2.1 Einbau in gebundenen Schichten
RW 1-Material kann in gebundenen Schichten uneingeschränkt verwendet werden.
 7.2.2 Uneingeschränkt offener Einbau
Wird RW 1-Material in technische Bauwerke eingebaut, ist ein offener Einbau außerhalb des statistischen Grundwasserschwankungsbereichs (über MHGW) möglich, sofern die Masse der RC-Baustoffe pro Baumaßnahme maximal 5.000 m³ beträgt.
Bei mehrfachem Einbau von RC-Baustoffen mit engem räumlichem Bezug (z.B. für Rohrgräben, Hinterfüllungen, Gründungen von Bauwerken im gleichen Baugebiet) sind maximal 10.000 m³ zulässig.



Dipl.-Geogr. H. Rückert
Sachverständiger nach § 18 BBodSchG (SG5)

Hausanschrift
isu umweltinstitut GmbH
Sanderstraße 23-25
97070 Würzburg
Fon 0931 13194
Fax 0931 14367

Geschäftsführer
Dipl. Geol. M. Appel
Dipl. Geogr. H. Rückert
HRB Würzburg 2918
e-mail: info@isu-umweltinstitut.de
internet: www.isu-umweltinstitut.de

Bankverbindung
Sparkasse Mainfranken-Würzburg
IBAN: DE51 7905 0000 0042 2325 38
BIC: BYLADEM1SWU

Mitgliedschaften
ITVA Ingenieurtechnischer Verband
Alllasten e.V.

Untersuchungsergebnisse

Analysewerte (mit Angabe der Richtwerte für Recyclingbaustoffe):

Analyseparameter	Methode	Probe 1610526-1	Probe 1610526-2	RW 1	RW 2	Toleranz in %	Einheit
Feststoff							
Trockensubstanz	DIN EN 11465	94,8	93,4				%
EOX	DIN 38414-S17	< 1,0	1,8	3	15	20	mg/kg TS
Kohlenwasserstoffe ¹⁾	DIN ISO 16703	63	87	300	1.000	20	mg/kg TS
PAK (EPA)							
Naphthalin	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Acenaphthen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Acenaphthylen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Fluoren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Phenanthren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Anthracen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Fluoranthren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Pyren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Benzo(a)anthracen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Chrysen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Benzo(b)fluoranthren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Benzo(k)fluoroanthren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Benzo(a)pyren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Dibenzo(a,h)anthracen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Benzo(g,h,i)perylen	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	DIN ISO 13877	<0,05	<0,05				mg/kg TS
PAK-Summe ²⁾		n.b.	n.b.	5	20		mg/kg TS

n.b.: nicht quantifizierbar.

- 1) Sofern Kohlenwasserstoffe auf Bitumenanteile zurückzuführen sind, kann ihre Bestimmung im Feststoff entfallen.
- 2) Sofern PAK-Werte auf Bitumenanteile zurückzuführen sind, ist eine uneingeschränkte Verwertung bis zu einem Wert von 10 mg/kg zulässig.

Hausanschrift
isu umweltinstitut GmbH
Sanderstraße 23-25
97070 Würzburg
Fon 0931 13194
Fax 0931 14367

Geschäftsführer
Dipl. Geol. M. Appel
Dipl. Geogr. H. Rückert
HRB Würzburg 2918
e-mail: info@isu-umweltinstitut.de
internet: www.isu-umweltinstitut.de

Bankverbindung
Sparkasse Mainfranken-Würzburg
IBAN: DE51 7905 0000 0042 2325 38
BIC: BYLADEM1SWU

Mitgliedschaften
ITVA Ingenieurtechnischer Verband
Altlasten e.V.



Analyseparameter	Methode	Probe 1610510-1	Probe 1610510-2	RW 1	RW 2	Toleranz in %	Einheit
Eluat	DIN 38414-S4						
Färbung		farblos	farblos				
Trübung		klar	klar				FNU
Geruch		geruchlos	geruchlos				
pH-Wert ³⁾	DIN 38404-C5	11,9	12,0				
Leitfähigkeit	EN 27888	1440	1840	2000	8000	5	µS/cm
Chlorid	EN ISO 15382	1,6	2,6	125	300	10	mg/l
Sulfat ⁴⁾	ISO 22743	< 2,0	< 2,0	250	1000	10	mg/l
Arsen	EN ISO 17294-2	< 5	< 5	10	60	20	µg/l
Blei	EN ISO 17294-2	< 5	< 5	40	200	10	µg/l
Cadmium	EN ISO 17294-2	< 0,5	< 0,5	2	10	20	µg/l
Chrom, gesamt	EN ISO 17294-2	< 5	< 5	50	150	10	µg/l
Kupfer	EN ISO 17294-2	< 5	< 5	50	300	10	µg/l
Nickel	EN ISO 17294-2	< 5	< 5	50	200	10	µg/l
Quecksilber	EN ISO 17294-2	< 0,2	< 0,2	0,5	2	20	µg/l
Zink	EN ISO 17294-2	< 50	< 50	100	600	10	µg/l
Phenole ⁵⁾	DIN EN ISO 14402	100	120	20	100	20	µg/l
Kohlenwasserstoffe ⁶⁾	DIN EN ISO 9377-2	< 100	< 100	100	600	20	µg/l

- 3) Für Recycling-Baustoffe typischer Bereich: 7,0 – 12,5 (kein Richtwert); bei Abweichungen im Rahmen von Eigenüberwachungsprüfungen ist der Fremdüberwacher einzuschalten.
- 4) Bei Bauschutt für gipshaltiges Material uneingeschränkte Verwertung bis zum Richtwert 2 unter der Bedingung zulässig, dass die Ca-Konzentration im Eluat mindestens die 0,43-fache Sulfat-Konzentration erreicht.
- 5) Bei bitumenhaltigen Recycling-Baustoffen ist eine uneingeschränkte Verwertung bis zum Richtwert 2 zulässig.
- 6) Nur zu bestimmen bei bitumenhaltigen Recycling-Baustoffen oder wenn die Feststoffanalyse mehr als 300 mg/kg Kohlenwasserstoffe ergibt.

Hausanschrift
isu umweltinstitut GmbH
Sanderstraße 23-25
97070 Würzburg
Fon 0931 13194
Fax 0931 14367

Geschäftsführer
Dipl. Geol. M. Appel
Dipl. Geogr. H. Rückert
HRB Würzburg 2918
e-mail: info@isu-umweltinstitut.de
internet: www.isu-umweltinstitut.de

Bankverbindung
Sparkasse Mainfranken-Würzburg
IBAN: DE51 7905 0000 0042 2325 38
BIC: BYLADEM1SWU

Mitgliedschaften
ITVA Ingenieurtechnischer Verband
Altlasten e.V.

Formblatt 3.2.2-18	Probenahmeprotokoll	Anlage:
---------------------------	----------------------------	----------------

Allgemeine Angaben

Projekt:	"BAB A3 - Landesgrenze BY/BW - westl. Helmstadt 6-streifiger Ausbau von Bau-km 258+600 bis Bau-km 267+100"		
Auftraggeber:	BAB-Direktion Nordbayern, Dienstst. Würzburg		
Herkunft des Materials:	Beton aus BV "Brückenbauwerk BW266a"		
Datum der Probenahme:	27.10.2016	Projektnummer:	141117
Uhrzeit:	10:15	Probenehmer:	Rückert
Anwesende Personen:			
Vermutete Schadstoffe:			

Angaben zum Haufwerk

Ort der Probenahme.	an der Baustelle bei BW266a		
Materialbeschreibung:	Abbruchbeton (nicht aufbereitet)		
Lagerungsform / Volumen:	frische Haufwerke, jeweils ca. 10-20 m3		
Lagerungsdauer:	1 Tage		
Einflüsse auf das Material:	Verkehrsemissionen		
Bemerkungen.	Material wird nur kurz an der Abbruchstelle zwischengelagert und dann abtransportiert		

Anzahl aller entnommener Proben

Anzahl der Einzelproben:	40-50	Mischproben:	2	Sammelproben:	
Anzahl der Sonderproben:		Begründung:			

Unterschrift Probenehmer:			
---------------------------	---	--	--

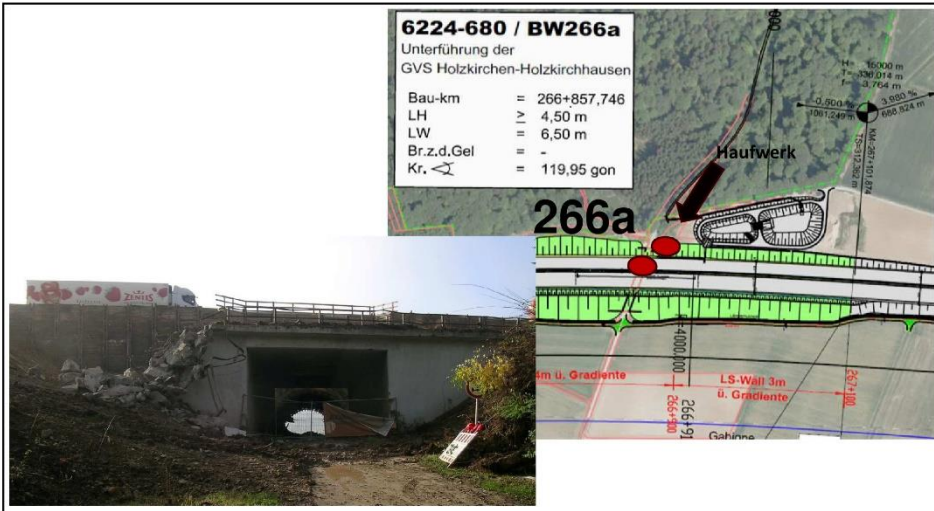
Formblatt 3.2.2-18

Probenahmeprotokoll

Anlage:

Probenahme

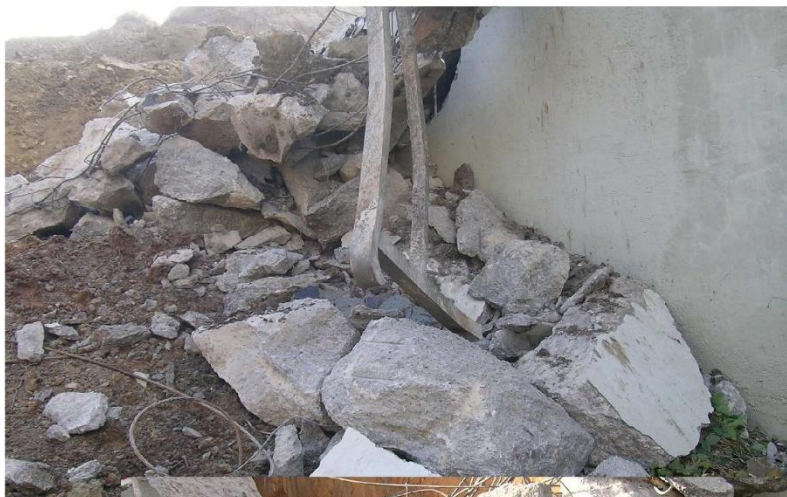
Probennummer:	1610526-1 und -2		RW:		HW:	
Probenahmeverfahren:	Stichproben mit Versuch einer repräsentativen Auswahl. Händisches Einsammeln von repräsentativen Einzelproben (Betonstücken).					
Materialbeschreibung, Korngröße:	Abbruchbeton, bewehrt, z.T. schwarzer Haftanstrich, Kiesanteile, teilweise Kupferfolienreste, Dichtbahnreste					
Farbe:	grau (sw)	Geruch:	betontypisch	Konsistenz:	dicht	
Art der Probe:	Bildung von Mischproben					
Probenvolumen pro Charge in l:	6-8	Charge-Bez.:		Volumen der Charge in m ³ :		
Proben-Gefäße Volumen in l:	PE-Eimer			Transport, Lagerung:	dunkel	
Probenvorbereitung:						
Entnahmegerätschaften:	Eimer					
Vor-Ort-Untersuchung:						
Bemerkungen zur Probenahme:						



Bildnachweis



Bildnachweis



AGROLAB Labor GmbH

Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, Germany
Fax: +49 (08765) 93996-28
www.agrolab.de



ISU Umweltinstitut GmbH
Sanderstr. 23-25
97070 Würzburg

Datum 02.11.2016
Kundennr. 27060260
Auftragsnr. 2083139

PRÜFBERICHT

Auftrag 2083139

Auftragsbezeichnung	141117		
Auftraggeber	27060260 ISU Umweltinstitut GmbH		
Probeneingang	28.10.16	Probenehmer	Auftraggeber

Sehr geehrte Damen und Herren,

anbei übersenden wir Ihnen die Ergebnisse der Untersuchungen, mit denen Sie unser Labor beauftragt haben.

Mit freundlichen Grüßen

AGROLAB Labor GmbH, Katharina Lietz, Tel. 08765/93996-84
Fax 08765/93996-28, E-Mail Katharina.Lietz@agrolab.de
Kundenbetreuung

DOC-0-6399279 DE P1



02.11.16 16:05
AG Landshut
HRB 7131
Ust/VAT-Id-Nr.:
DE 128 944 188

Geschäftsführer
Dipl.-Ing. Seb. Maier
Dr. Paul Wimmer



Seite 1 von 4

Durch die DAkks nach
DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes
Prüflaboratorium
Die Akkreditierung gilt
für die in der Urkunde
aufgeführten
Prüfverfahren.

AGROLAB Labor GmbH

Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, Germany
 Fax: +49 (08765) 93996-28
 www.agrolab.de



Auftrag 2083139

Analysennr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Probenehmer
614548	27.10.2016	1610526-1	Auftraggeber
614549	27.10.2016	1610526-2	Auftraggeber

	Einheit	614548 1610526-1	614549 1610526-2
Feststoff			
Analyse in der Gesamtfraktion		++	++
Backenbrecher		++	++
Trockensubstanz	%	94,8 *	93,4 *
Aussehen		Beton *	Beton *
Färbung		grau *	grau *
Geruch		materialtypisch *	materialtypisch *
EOX	mg/kg	<1,0	1,8
Kohlenwasserstoffe C10-C40 (GC)	mg/kg	63	87
Naphthalin	mg/kg	<0,05	<0,05
Acenaphthylen	mg/kg	<0,05	<0,30 ^{m)}
Acenaphthen	mg/kg	<0,05	<0,05
Fluoren	mg/kg	<0,05	<0,05
Phenanthren	mg/kg	<0,05	<0,05
Anthracen	mg/kg	<0,05	<0,05
Fluoranthren	mg/kg	<0,05	<0,05
Pyren	mg/kg	<0,05	<0,05
Benzo(a)anthracen	mg/kg	<0,05	<0,05
Chrysen	mg/kg	<0,05	<0,05
Benzo(b)fluoranthren	mg/kg	<0,05	<0,05
Benzo(k)fluoranthren	mg/kg	<0,05	<0,05
Benzo(a)pyren	mg/kg	<0,05	<0,05
Dibenz(ah)anthracen	mg/kg	<0,05	<0,05
Benzo(ghi)perylene	mg/kg	<0,05	<0,05
Indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/kg	<0,05	<0,05
PAK-Summe (nach EPA)	mg/kg	n.b.	n.b.
Eluat			
Eluaterstellung		++	++
pH-Wert		11,9	12,0
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	1440	1840
Färbung		farblos	farblos
Geruch		geruchlos	muffig
Trübung		klar	klar
Chlorid (Cl)	mg/l	1,6	2,6

DOC-04638273-DE-P2



02.11.18 16:08
 AG Landshut
 HRB 7131
 Ust/VAT-Id-Nr.:
 DE 128 944 188

Geschäftsführer
 Dipl.-Ing. Seb. Maier
 Dr. Paul Wimmer



Deutsche
 Akkreditierungsstelle
 D-PL-14289-01-00

Seite 2 von 4

Durch die DAkkS nach
 DIN EN ISO/IEC 17025
 akkreditiertes
 Prüflaboratorium.
 Die Akkreditierung gilt
 für die in der Urkunde
 aufgeführten
 Prüfverfahren.

AGROLAB Labor GmbH

Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, Germany
Fax: +49 (0)8765 93996-28
www.agrolab.de



Auftrag 2083139

	Einheit	614548 1610526-1	614549 1610526-2
Eluat			
Sulfat (SO ₄)	mg/l	<2,0	<2,0
Phenolindex	mg/l	0,10 ^{y)}	0,12 ^{y)}
Arsen (As)	mg/l	<0,005	<0,005
Blei (Pb)	mg/l	<0,005	<0,005
Cadmium (Cd)	mg/l	<0,0005	<0,0005
Chrom (Cr)	mg/l	<0,005	<0,005
Kupfer (Cu)	mg/l	<0,005	<0,005
Nickel (Ni)	mg/l	<0,005	<0,005
Quecksilber (Hg)	mg/l	<0,0002	<0,0002
Zink (Zn)	mg/l	<0,05	<0,05
Trübung nach GF-Filtration	NTU	3,7	2,7
Kohlenwasserstoffe (GC)	mg/l	<0,1	<0,1

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.

m) Die Nachweis-, bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da Matrixeffekte bzw. Substanzüberlagerungen eine Quantifizierung erschweren.

y) Die Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da die vorliegende Konzentration erforderte, die Probe in den gerätespezifischen Arbeitsbereich zu verdünnen.

Die Analysenwerte der Feststoffparameter beziehen sich auf die Trockensubstanz, bei den mit * gekennzeichneten Parametern auf die Originalsubstanz

Wir weisen auf folgende Methodenmodifikation hin: Die Untersuchung der organischen Komponenten (z.B. MKW, PAK, PCB, OCP,STV) aus dem DEV S4-Eluat erfolgt nach Glasfaserfiltration. Wird statt dessen eine Membranfiltration gewünscht, so ist dies ausdrücklich zu beauftragen.

Beginn der Prüfungen: 28.10.2016

Ende der Prüfungen: 02.11.2016

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände. Bei Proben unbekanntem Ursprungs ist eine Plausibilitätsprüfung nur bedingt möglich. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig.

**AGROLAB Labor GmbH, Katharina Lietz, Tel. 08765/93996-84
Fax 08765/93996-28, E-Mail Katharina.Lietz@agrolab.de
Kundenbetreuung**

Dieser elektronisch übermittelte Ergebnisbericht wurde geprüft und freigegeben. Er entspricht den Anforderungen der ISO/IEC 17025:2005 an vereinfachte Ergebnisberichte und ist mit der elektronischen Signatur gültig.

DOC-0-6394373-DE-F3



AG Landshut
HRB 7131
Ust/VAT-Id-Nr.:
DE 128 944 188

Geschäftsführer
Dipl.-Ing. Seb. Maier
Dr. Paul Wimmer



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14289-01-00

Seite 3 von 4

Durch die DAkkS nach
DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes
Prälaboratorium.
Die Akkreditierung gilt
für die in der Urkunde
aufgeführten
Prüfverfahren.

AGROLAB Labor GmbH

Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, Germany
Fax: +49 (0)8765) 93996-28
www.agrolab.de



Auftrag 2083139

Methodenliste

Eluat

DEV B1/2: Geruch

DIN EN ISO 14402: Phenolindex

DIN EN ISO 17294-2 (E 29): Arsen (As) Blei (Pb) Cadmium (Cd) Chrom (Cr) Kupfer (Cu) Nickel (Ni) Zink (Zn)

DIN EN ISO 7027 (C 2): Trübung nach GF-Filtration

DIN EN ISO 9377-2 (H 53): Kohlenwasserstoffe (GC)

DIN EN 1483 (E 12-4): Quecksilber (Hg)

DIN EN 27888 (C 8): elektrische Leitfähigkeit

DIN ISO 15923-1 (D 42): Chlorid (Cl) Sulfat (SO₄)

DIN 38404-5 (C 5): pH-Wert

DIN 38414-4 (S 4): Eluaterstellung

visuell: Trübung Färbung

Feststoff

Backenbrecher: Backenbrecher

DIN EN 14039: Kohlenwasserstoffe C10-C40 (GC)

DIN ISO 11465: Trockensubstanz

DIN 38414-17 (S 17): EOX

keine Angabe: Analyse in der Gesamtfraktion

Merkblatt LUA NRW Nr. 1: PAK-Summe (nach EPA)

organoleptisch: Geruch

visuell: Aussehen Färbung

keine Angabe: PAK-S4 Eluat Kommentar



Anhang 4: Übersicht gemessene Druckfestigkeiten

Prüftag	C20/25	C25/30	C30/37
18.04.17			45,9
20.04.17			41,6
26.04.17		33,9	
08.05.17			46,7
11.05.17			48,6
11.05.17			50,5
11.05.17			49,9
18.05.17			45,9
19.05.17	29		
26.05.17		39,3	
01.06.17		38,7	
02.06.17		35,2	
09.06.17		35,6	
14.06.17		35,2	
16.06.17		30,7	
16.06.17		32,1	
21.06.17		34,1	
29.06.17		34,4	
04.07.17			39,6
27.07.17			42,3
31.07.17			41,6
03.08.17			40,4
04.08.17			40,1
08.08.17			46,8
09.08.17		32,9	
10.08.17		34,2	
18.08.17		36,4	
30.08.17			38,1
30.08.17			39
07.09.17			
13.09.17			39,5
fcm = fck + 4		34	41
Mittelwert		34,8230769	43,53125
Mittelwert > fcm		✓	✓

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Visualisierung des Siegerentwurfes der geplanten Umweltstation der Stadt Würzburg. © balda architekten	7
Abbildung 2:	Ansicht der Umweltstation von außen. © Stadt Würzburg - Baureferat/FA Tiefbau	7
Abbildung 3:	Innenansicht der Umweltstation mit Begrünung und Baum. © ZAE Bayern ..	8
Abbildung 4:	Vogelperspektive der Umweltstation mit PV-Anlage und Solarabsorber auf dem Dach. © Stadt Würzburg - Baureferat/FA Tiefbau	8
Abbildung 5:	Umweltstation - Schnitt in Längsrichtung [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel] ..	10
Abbildung 6:	Umweltstation – Schnitt in Querrichtung [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel] ..	10
Abbildung 7:	Umweltstation – Isometrische Darstellung Umweltstation – Schnitt in Querrichtung	11
Abbildung 8:	Synopse Zusammensetzung Primärbeton mit RC-Beton [Mettke].....	13
Abbildung 9:	RC-GK Typ 1 Betonsplitt, Typ 2 Bauwerksplitt [Mettke].	16
Abbildung 10:	Beteiligte Bau- und Recyclingunternehmen bei der Erstellung des Rohbaus der Umweltstation Würzburg.	21
Abbildung 11:	Prallbrecher (gelb) zur Aufbereitung des Betonbruches [Steffen Beuerlein].	24
Abbildung 12:	Bestandteile der Produktions- und Konformitätskontrolle des Betons nach DIN EN 206-1:2001-07	34
Abbildung 13:	Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C20/25 Beton mit der RC-GK der Firma Feess	35
Abbildung 14:	Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C25/30 Beton mit der RC-GK der Firma Feess	36
Abbildung 15:	Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C30/37 Beton mit der RC-GK der Firma Feess	37
Abbildung 16:	Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C20/25 Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein	38
Abbildung 17:	Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C25/30 Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein	39

Abbildung 18:	Ergebnisse der erweiterten Erstprüfung für den C30/37 Beton mit der RC-GK der Firma Beuerlein	40
Abbildung 19:	Prüfung des Betons vor Auslieferung im Werk [Jacob]	41
Abbildung 20:	Schematische Darstellung der Mindestprüfhäufigkeit der Probenahmen zur Beurteilung der Konformität nach DIN EN 206-1, Tab. 13	41
Abbildung 21:	An Prüfkörpern gemessene Betondruckfestigkeiten nach 28 Tagen des C25/30	43
Abbildung 22:	An Prüfkörpern gemessene Betondruckfestigkeiten des C30/37	43
Abbildung 23:	Überprüfung des Ausbreitmaßes und Messung der Temperatur auf der Baustelle [Jacob]	44
Abbildung 24:	Einbau des Betons mit einem Kübel und Verdichtung des Betons mit einem Innenrüttler [Jacob]	45
Abbildung 25:	Messwerte Ausbreitmaß während der Baumaßnahme	45
Abbildung 26:	Überblick über die Systemgrenze des Primär- / RC-Betons [Mettke]	47
Abbildung 27:	Fließbild der Aufbereitung der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG	49
Abbildung 28:	Stoffstrom zur Herstellung der RC-GK für den RC-Beton	50
Abbildung 29:	Saugbagger in der Kiesgrube und Siebstrecke zur Trennung von Sand und Kies	51
Abbildung 30:	Haldenlagerung des Sandes und Prallmühle zur Aufbereitung des Kieses ..	52
Abbildung 31:	Kiesgewinnung der Wüffert GmbH & Co. KG	53
Abbildung 32:	Stoffstrom zur Herstellung des Kieses 2/16	54
Abbildung 33:	Energieaufwand der einzelnen Anlagenteile der Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG	56
Abbildung 34:	Vereinfachte Darstellung der Transportdistanzen der Gesteinskörnungen und für den Beton	58
Abbildung 35:	Energieaufwand zur Bereitstellung der Gesteinskörnungen	60
Abbildung 36:	CO ₂ e-Emissionen bei der Herstellung von 1 t Gesteinskörnung ohne Transport	63
Abbildung 37:	CO ₂ e-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 t Gesteinskörnung inkl. Transport	64

Abbildung 38:	Gesamt CO ₂ e-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 m ³ RC-/Normalbeton C 20/25 (Herstellung+ Transport)	77
Abbildung 39:	CO ₂ e-Emissionen bei der Herstellung von 1 m ³ RC-/Normalbeton C 20/25	77
Abbildung 40:	Gesamt CO ₂ e-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 m ³ RC-/Normalbeton C 30/37 (Herstellung+ Transport)	78
Abbildung 41:	CO ₂ e-Emissionen bei der Herstellung von 1 m ³ RC-/Normalbeton C 30/37	78
Abbildung 42:	Kommunikation zum Einsatz von RC-Beton [Mettke].....	82
Abbildung 43:	Bezeichnung und beschreibende Angaben der Module A bis D in Bezug auf die DIN EN 15978 aus der DGNB-Dokumentation.....	91
Abbildung 44:	Aufteilung der Pfosten-Riegel-Fassade in LEGEP	94
Abbildung 45:	Vergleich des Treibhauspotenzial (GWP), der Stromwerte Referenzgebäude-Zertifizierung nach DGNB Version und der Ökobaudat 2017.....	103
Abbildung 46:	Vergleich des Versauerungspotentials (AP) für die Stromwerte der Referenzgebäude-Zertifizierung nach DGNB Version und der Ökobaudat 2017.....	104
Abbildung 47:	Strukturierung der LV-Gliederung in LEGEP	107
Abbildung 48:	DGNB System bewertet nach dem Erfüllungsgrad	114
Abbildung 49:	Umwelteinträge nach Lebenszyklusphasen (ohne Baugrubenaushub).....	115
Abbildung 50:	Umwelteinträge nach Kostengruppen Herstellungsphase A1-A3 (DGNB-Grenzen ohne PV-Anlage).	117
Abbildung 51:	Umwelteinträge nach Kostengruppen Herstellungsphase A1-A3 (mit PV-Anlage).....	119
Abbildung 52:	LEGEP-Screenshot - Vergleich der Bewertung Referenzgebäude mit Ist-Gebäude nach dem Steckbrief ENV 1.1 (DGNB) Treibhauspotenzial kg CO ₂ äquivalent – V2015 ohne PV-Anlage.	119
Abbildung 53:	LEGEP-Screenshot - Vergleich der Bewertung Referenzgebäude mit Ist-Gebäude nach dem Steckbrief ENV 1.1 (DGNB) Treibhauspotenzial kg CO ₂ äquivalent – V2015 mit PV-Anlage.	121
Abbildung 54:	Kriterienübersicht NBV15 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude).....	131
Abbildung 55:	Kriterienübersicht NBV15 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude).....	131

Abbildung 56:	Systemübersicht der Wärme- und Kälteversorgungssystems der Eisspeicherheizung.	136
Abbildung 57:	Vitosolic 200 für die Eisspeichersteuerung.	138
Abbildung 58:	Verkabelung mit zwei zusätzlichen Elektrozählern (Hutschienenmodule mit Display) für die Wärmepumpe und die erforderlichen Pumpen im Eisspeichersystem.	139
Abbildung 59:	Monitoringübersicht des Wärme- und Kälteversorgungssystems der Eisspeicherheizung mit der Position der eingebauten Vor- und Rücklauftemperaturen und Wärmemengenzähler.....	140
Abbildung 60:	Wärmemengenzähler in der großen Ausführungsvariante (links) und der kleinen Ausführungsvariante (rechts).	141
Abbildung 61:	Funktionsnachweis des Eisspeichers. Dargestellt sind Durchflussmenge am Solarabsorber (blaue Linie, linke Achse) und Wirkleistung der Wärmepumpe (rote Linie, rechte Achse).	142
Abbildung 62:	v.l.n.r.: Staatsminister Thorsten Glauber, Architekt Franz Balda, Werkleiter der Stadtreiniger Wolfgang Kleiner und Leiterin der Umweltstation Anja Knieper auf der Galerie der neuen Umweltstation (Foto: Georg Wagenbrenner). ...	144
Abbildung 63:	Jung und Alt machten sich am interaktiven Klimalehrpfad im Seminarraum der Umweltstation zu schaffen (Foto: Jakob Sängner).....	145
Abbildung 64:	Am Pflanzstand hinter dem Gebäude wurden fleißig Tontöpfe gestaltet und anschließend mit insektenfreundlichen Blühpflanzen für den eigenen Balkon bepflanzt (Foto: Jakob Sängner).	145
Abbildung 65:	Auf Energiefahrrädern erradeln junge Besucher auf dem Balkon der neuen Umweltstation Strom zum Betrieb von Elektrogeräten (Foto: Jakob Sängner).	146
Abbildung 66:	Präsentation des Eisspeichersystems mit Wärmepumpe als animierte Bildschirmpräsentation in der Umweltstation.	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eckdaten zum Neubau der Umweltstation	9
Tabelle 2:	Ausgewählte bautechnische Parameter und geplante Betonmengen für den Neubau der Umweltstation [Dr. Kreuz+Partner, Beratende Ingenieure, Vortrag am 08.09.2017 in Würzburg, Referent Dr. Hentschel].....	11
Tabelle 3:	Überblick derzeit geltender Regelwerke für die Herstellung von Recycling-Beton [Mettke], Stand 06/2018.....	14
Tabelle 4:	Restriktionen zum Einsatz von RC-Beton	15
Tabelle 5:	Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen	16
Tabelle 6:	Höchstwerte für Eluat- und Feststoffparameter	17
Tabelle 7:	Recyclingunternehmen im Raum Würzburg, die auf das Anschreiben / die Bekanntmachung der Ausschreibung zum Neubau der Umweltstation reagiert / Interesse bekundet haben.....	18
Tabelle 8:	Betonunternehmen im Raum Würzburg, die auf das Anschreiben / die Bekanntmachung der Ausschreibung zum Neubau der Umweltstation reagiert / Interesse bekundet haben.....	19
Tabelle 9:	Übersicht zu den geplanten und zu den verbauten Mengen an RC-Betonen ...	20
Tabelle 10:	Untersuchungsergebnisse zur Umweltverträglichkeit am Betonbruch vor der Aufbereitung (zusammengefasst aus Prüfprotokollen der isu umweltinstitut GmbH).....	23
Tabelle 11:	Stoffliche Zusammensetzung der RC-GK 2/16 der Beuerlein GmbH & Co. KG... ..	25
Tabelle 12:	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 2/16 der Beuerlein GmbH & Co. KG	26
Tabelle 13:	Analyseergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung der RC-GK 2/16 der Beuerlein GmbH & Co. KG	27
Tabelle 14:	Stoffliche Zusammensetzung der RC-GK 2/16 der Heinrich Feess GmbH & Co. KG	28
Tabelle 15:	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 2/16 der Heinrich Feess GmbH & Co. KG	29
Tabelle 16:	Analyseergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung der RC-GK 2/16 der Heinrich Feess GmbH & Co. KG.....	30

Tabelle 17: Betonrezepturen C20/25, C25/30 und C30/37 mit RC-GK der Firma Feess GmbH & Co. KG	31
Tabelle 18: Betonrezepturen C20/25, C25/30 und C30/37 mit RC-GK der Firma Beuerlein GmbH & Co. KG	32
Tabelle 19: Synopse Ist- mit Maximalanteil der rezyklierten Gesteinskörnung der Rezepturen mit RC-GK	33
Tabelle 20: Konformitätskriterien für die Druckfestigkeit nach DIN EN 206-1 Tabelle 14	42
Tabelle 21: Berechnung des Energieverbrauches der eingesetzten Geräte	55
Tabelle 22: Berechnung des Energiebedarfes der eingesetzten Geräte	57
Tabelle 23: Energieaufwand zur Lieferung der Gesteinskörnungen per LKW vom Gewinnungsort bis zum Betonwerk.....	59
Tabelle 24: Übersicht zu Energieaufwendungen zur Bereitstellung der RC-GK, des Kieses und des Sandes.....	59
Tabelle 25: Aufschlüsselung der CO ₂ e-Emissionen bei Bereitstellung der Gesteinskörnungen - Fallbeispielrechnung	61
Tabelle 26: Zusammenfassende Aufschlüsselung der CO ₂ e-Emissionen bei Bereitstellung der Gesteinskörnungen.....	62
Tabelle 27: Eingesetzte Betonmengen und Mengen an RC-GK beim Bau der Umweltstation Würzburg	64
Tabelle 28: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C20/25 (Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG; Betonrezeptur s. Tabelle 18) aus energetischer Sicht	67
Tabelle 29: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C25/30 (Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG; Betonrezeptur s. Tabelle 18) aus energetischer Sicht	68
Tabelle 30: Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C30/37 (Fa. Beuerlein GmbH & Co. KG; Betonrezeptur s. Tabelle 18) aus energetischer Sicht	69
Tabelle 31: Energiebedarf für den eingesetzten RC-Beton (mit Berücksichtigung der „Sicherheitszulage“) beim Bauvorhaben der Umweltstation Würzburg.....	70
Tabelle 32: Darstellung der CO ₂ e - Emissionen für 1 m ³ RC- und Normalbeton (C20/25) ..	72
Tabelle 33: Darstellung der CO ₂ e - Emissionen für 1 m ³ RC- und Normalbeton (C25/30) ..	72

Tabelle 34: Darstellung der CO ₂ e – Emissionen für von 1 m ³ RC- und Normalbeton (C30/37)	74
Tabelle 35: Gegenüberstellung der CO ₂ e-Emissionen Normalbeton – zum RC-Beton.....	75
Tabelle 36: Systemgrenzen der Ökobilanz im DGNB System (berücksichtigt sind die Kostengruppen der DIN 276).	92
Tabelle 37: Übersicht der LCA Ergebnisse nach DGNB Neubauversion Büro und Verwaltungsgebäude (NBV2015).....	95
Tabelle 38: Bewertungssystem DGNB - Neubauversion Büro- und Verwaltungsgebäude (NBV15).....	95
Tabelle 39: Vergleich aller Werkzeuge für den Energie PLUS-Hausstandard mit Wärmepumpe und Eisspeicher nach DGNB-Erfüllungsgrad.	96
Tabelle 40: Bewertungssystem DGNB - Neubauversion Büro- und Verwaltungsgebäude (NBV15) – Vergleich der PLUS-Variante mit einer Pelletheizung.	97
Tabelle 41: Vergleich der Herstellungsphase A1-A3 zwischen den einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.	99
Tabelle 42: Vergleich der Nutzungsphase B2, B4 zwischen den einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.	100
Tabelle 43: Vergleich des Energieverbrauches im Betrieb B6 zwischen den einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.....	100
Tabelle 44: Vergleich der Entsorgung C und der Wiederverwertung, Rückgewinnung und des Recyclings der Phase D für die einzelnen Programmen SBS, eLCA und LEGEP.	101
Tabelle 45: Vergleich der Entsorgungsphase C und der Wiederverwertung, Rückgewinnung und des Recyclingphase D in LEGEP.	102
Tabelle 46: Übersicht der berücksichtigten Leistungsverzeichnisse (LVs) in der LCA- Software LEGEP.....	105
Tabelle 47: Übersicht Anzahl der betrachteten Elemente in LEGEP.....	106
Tabelle 48: Berücksichtigungsgrad der LV-Bereiche in LEGEP.....	107
Tabelle 49: Übersicht der Ergebnisse nach DGNB 2015.	114
Tabelle 50: Vergleich der Herstellungsphase (A1-A3) zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.	122

Tabelle 51: Vergleich der Herstellungsphase (A1-A3) in der detaillierten Ausführungsplanung ohne PV-Anlage, mit und ohne Eisspeicher.	123
Tabelle 52: Vergleich der Herstellungsphase (A1-A3) zwischen der detaillierten Ausführungsplanung mit und ohne PV-Anlage.....	124
Tabelle 53: Vergleich der Herstellungsphase zwischen der detaillierten Ausführungsplanung mit und ohne Baugrube und notwendiger Leitungsführung in KG 500 (außerhalb der DGNB).....	125
Tabelle 54: Vergleich der Nutzungsphase - Instandsetzungs- und Austauschphase B2/B4 zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.....	126
Tabelle 55: Vergleich der Nutzungsphase - Energieverbrauch im Betrieb B6 zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.....	126
Tabelle 56: Vergleich der Entsorgungsphase C3 und C4 zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.....	127
Tabelle 57: Vergleich des Recycling D zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.....	128
Tabelle 58: Vergleich der Gebäudekonstruktion (Phase A1-A3/ B2/ B4 C3 / C4 und D) zwischen der Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.....	129
Tabelle 59: Vergleich der Gebäudekonstruktion (Phase A1-A3/ B2/ B4/ C3/ C4 und D) und dem Gebäudebetrieb für die Entwurfsplanung nach Elementen und der detaillierten Ausführung nach LV-Positionen.....	130
Tabelle 60: Gewichtungsschlüssel der Umweltindikatoren nach DGNB 2018.....	132
Tabelle 61: Kriterienübersicht NBV18 (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude).....	133

Abkürzungsverzeichnis

AP	Versauerungspotenzial
BAB	Bundesautobahn
BayBO	Bayerische Bauordnung
BTU C-S	Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg
CEM III	Hochofenzement
CO ₂ e	Kohlendioxid-Äquivalent
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EP	Überdüngungspotenzial
FN	Fußnote
GWP	Treibhauspotenzial
LCA	Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)
M.-%	Masseprozent
NBV	Neubau Büro- und Verwaltung
PE	Primärenergie
POCP	Ozonbildungspotenzial
RC-Beton	Recycling-Beton resp. ressourcenschonender Beton
RC-GK	rezyklierte Gesteinskörnung
ODP	Ozonschichtabbaupotenzial
OK	Oberkante
OKF	Oberkante Fußboden
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
ZAE	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.