

Ökobilanz Betondecken

Eine vergleichende Analyse von
Spannbeton-Fertigdecken mit
Halbfertigteildecken und Massiv-
decken aus Ortbeton

Abschlussbericht

zur Studie im Auftrag der Unternehmen
DW SYSTEMBAU, ECHO, ELBE,
ESDELO, KETONIA, OBERNDORFER
und UNIVERSALBETON

Freiburg, im Januar 2010

Autorinnen:

Dr. Dietlinde Quack
Ran Liu

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 50 02 40

79028 Freiburg. Deutschland

Hausadresse

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg. Deutschland

Tel. +49 (0) 761 – 4 52 95-0

Fax +49 (0) 761 – 4 52 95-88

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland

Tel. +49 (0) 6151 – 81 91-0

Fax +49 (0) 6151 – 81 91-33

Büro Berlin

Novalisstraße 10

10115 Berlin. Deutschland

Tel. +49 (0) 30 – 40 50 85-0

Fax +49 (0) 30 – 40 50 85-388

Kritische Prüfung:

Dipl. Geogr. Florian Knappe (ifeu Heidelberg)

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell (TU Kaiserslautern)

Dipl. Ing. Claus Asam (Bundesinstitut für Bau-, Stadt-
und Raumforschung)

Zur Entlastung der Umwelt ist dieses Dokument für den
beidseitigen Druck ausgelegt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XV
Zusammenfassung	1
1 Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts	4
2 Methodik und verwendete Software	5
2.1 Ziele und Anwendungen der Studie	7
2.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens	8
2.2.1 Beschreibung der untersuchten Produktalternativen	8
2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit	10
2.2.3 Festlegung der Systemgrenzen	13
2.2.4 Datenerhebung und Anforderungen an die Datenqualität	16
2.2.5 Allokation	17
2.2.6 Berücksichtigte Wirkungskategorien	18
2.2.7 Kritische Prüfung	20
3 Systembeschreibung und Datengrundlage	20
3.1 Modellierung der Produktsysteme	20
3.1.1 Alternative 1: Spannbeton-Fertigdecke	20
3.1.1.1 Herstellung der Spannbeton-Fertigdecken	21
3.1.1.2 Transport der Spannbeton-Fertigdecken vom Werk zur Baustelle	29
3.1.1.3 Prozesse auf der Baustelle	30
3.1.2 Alternative 2: Halbfertigteildecke	34
3.1.2.1 Herstellung der Halbfertigteile	35
3.1.2.2 Transport der Halbfertigteile vom Werk zur Baustelle	36
3.1.2.3 Prozesse auf der Baustelle	37
3.1.3 Alternative 3: Ortbetondecken	39
3.1.3.1 Prozesse auf der Baustelle	39
3.2 Modellierung der Entsorgung der drei untersuchten Decken-Alternativen	41

4	Wirkungsabschätzung und Ergebnisdarstellung	43
4.1	Gesamtergebnisse	43
4.2	Beitragsanalysen	49
4.3	Sensitivitätsanalysen	58
4.3.1	Variation des Anteils an Primär- und Sekundärproduktion bei der Stahlherstellung	58
4.3.2	Variation der Transportentfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle	61
4.3.3	Einfluss von Menge und Qualität des eingesetzten Zements	66
4.3.3.1	Generelle Betrachtung: Verwendung verschiedener Datenmodule und Zementqualitäten	66
4.3.3.2	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Zement 2: Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke	69
4.3.4	Variation der Zementsorte im Halbfertigteil	72
4.3.5	Variation der Zementsorte für Prozesse auf der Baustelle (Transportbeton)	73
5	Auswertung und Diskussion	75
6	Literatur	78
7	Externes kritisches Gutachten	81
7.1	Herangezogene Normen und Prüfkriterien	81
7.2	Ablauf des kritischen Gutachtens	81
7.3	Ergebnis der kritischen Prüfung	82
7.3.1	Allgemeiner Eindruck	82
7.3.2	Übereinstimmung mit der Norm	82
7.3.3	Wissenschaftliche Begründung der Methodik und Stand der Ökobilanztechnik	83
7.3.4	Validität und Zweckmäßigkeit der Daten	85
7.3.5	Berücksichtigung des Ziels der Studie und der Einschränkungen bei der Auswertung	88
7.3.6	Transparenz und Stimmigkeit des Berichts	88
7.4	Fazit	88
8	Anhang	89
8.1	Strombereitstellungsmodule für Deutschland und Belgien	89
8.2	Datengrundlage für die Spannbeton-Fertigdecken-Produktion in den Werken BRESPA (Schneverdingen) und Echo (Houthalen)	89
8.3	Zusammenstellung der Rohdaten	90

8.3.1	Rohdaten bezogen auf DW Systembau, Werk BRESPA in Schneverdingen	90
8.3.2	Rohdaten bezogen auf Echo, Werk Houthalen (Belgien)	91
8.3.3	Zuordnung des Betons zu Festigkeitsklassen und Bestandteile eingesetzten Chemikalien	94
8.4	Modellierung der Spannbeton-Fertigdecke	95
8.4.1	Modellierung der Herstellung der Spannbeton-Fertigdecken-Elemente im Werk	95
8.4.1.1	Modellierung der Betonherstellung	95
8.4.1.2	Modellierung der Spannstahlritzen-Herstellung	96
8.4.1.3	Modellierung der Herstellung der Vorprodukte sowie von Hilfs- und Betriebsstoffen	97
8.4.1.4	Modellierung des Energieverbrauchs	99
8.4.1.5	Modellierung der Entsorgung	100
8.4.2	Modellierung der Prozesse auf der Baustelle	100
8.5	Modellierung der Halbfertigteildecke	101
8.5.1	Modellierung der Herstellung der Halbfertigteile im Werk	101
8.5.1.1	Modellierung der Betonherstellung	101
8.5.1.2	Modellierung der Betonstahl-Herstellung	101
8.5.1.3	Modellierung des Energieverbrauchs	101
8.5.2	Modellierung der Prozesse auf der Baustelle	102
8.6	Modellierung der Ortbetondecke	103
8.6.1	Modellierung der Prozesse bei der Herstellung und auf der Baustelle	103
8.6.2	Modellierung der Transportprozesse	103
8.7	Modellierung des End of life	104
8.8	Grundlagen für die Normierung	105
8.9	Ergebnisse	106
8.9.1	Gesamtergebnisse, nach Teilprozessen	106
8.9.2	Gesamtergebnisse, absolut	110
8.9.3	Gesamtergebnisse, normiert	112
8.9.4	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Anteil Primär- und Sekundärproduktion Stahl	113
8.9.5	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Entfernung Spannbeton-Fertigdecken- Werk zu Baustelle	114
8.9.6	Ergebnisse Sensitivitätsanalysen zum Zementeinsatz	116
8.9.7	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Halbfertigteil	116

8.9.8	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Beton auf der Baustelle	118
8.9.9	Auszüge aus der Statikberechnung von KHP	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Die vier Teilschritte einer Ökobilanz. Doppelpfeile stehen für ein iteratives Vorgehen.	6
Abbildung 2-2	Beispielhaftes Stoffstromnetz aus Umberto 5.5	7
Abbildung 2-3	Halbfertigteil	8
Abbildung 2-4	Elemente einer Spannbeton-Fertigdecke	9
Abbildung 2-5	Schnitt und Ansicht des Musterbürogebäudes	11
Abbildung 2-6	Schnitt des Musterbürogebäudes	11
Abbildung 2-7	Geschossdecken des Musterbürogebäudes (Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss)	12
Abbildung 2-8	Geschossdecken des Musterbürogebäudes (3. Obergeschoss)	12
Abbildung 2-9	Grenzen des untersuchten Systems. Nicht dargestellt sind die Transportprozesse, die jeweils an den Stellen mit Pfeilen auftreten. Die Nutzung des Gebäudes (hell hinterlegter Kasten) wurde nicht berücksichtigt. Etwaige Umbauten während der Standzeit wurden nicht berücksichtigt. H-FT: Halbfertigteil; TB: Transportbeton; SB-FT: Fertigteil.	15
Abbildung 3-1	Überblick über die bei der Bilanzierung berücksichtigten Teilprozesse bei der Alternative Spannbeton-Fertigdecken. Die weiß hinterlegten Teilprozesse sind außerhalb des untersuchten Systems.	21
Abbildung 3-2	Überblick über das Werksgelände von BRESPA in Schneverdingen (Deutschland) (ohne Sandgrube, Verwaltungsgebäude und alte Halle)	22
Abbildung 3-3	Flussdiagramm der Spannstahllitzen-Herstellung	25
Abbildung 3-4	Spannstahllitzen im Werk BRESPA	26
Abbildung 3-5	Die fertig produzierten Spannbeton-Fertigdecken mit Abdeckkappen (orange) lagern auf dem Lagerplatz innerhalb des Werksgeländes bevor sie auf die Baustelle transportiert werden. Foto aufgenommen am 20.02.2008 bei der Werkbesichtigung in Schneverdingen	27
Abbildung 3-6	Überblick über die bei der Bilanzierung berücksichtigten Teilprozesse bei der Alternative 2 Halbfertigteildecken. Die weiß hinterlegten Teilprozesse sind außerhalb des untersuchten Systems.	34
Abbildung 3-7	Ansicht eines Halbfertigteils (vereinfachte eigene Darstellung)	35
Abbildung 3-8	Flussdiagramm der Betonstahl-Herstellung	36
Abbildung 3-9	Überblick über die bei der Bilanzierung berücksichtigten Teilprozesse bei der Alternative 3 Ortbetondecke. Die weiß hinterlegten Teilprozesse sind außerhalb des untersuchten Systems.	39
Abbildung 4-1	Kumulierter Energieaufwand (KEA): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke	44
Abbildung 4-2	Treibhauspotential (GWP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke	45

Abbildung 4-3	Versauerungspotential (AP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke	46
Abbildung 4-4	Eutrophierungspotential (EP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke	47
Abbildung 4-5	Photooxidantienpotential (POCP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke	48
Abbildung 4-6	Beitragsanalyse für den kumulierten Energieaufwand, absolute Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	50
Abbildung 4-7	Beitragsanalyse für den kumulierten Energieaufwand, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	51
Abbildung 4-8	Beitragsanalyse für das Treibhauspotential, absolute Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	52
Abbildung 4-9	Beitragsanalyse für das Treibhauspotential, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	53
Abbildung 4-10	Beitragsanalyse für das Versauerungspotential, absolute Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Trennmittel, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	54
Abbildung 4-11	Beitragsanalyse für das Versauerungspotential, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	55
Abbildung 4-12	Beitragsanalyse für das Eutrophierungspotential, absolute Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	55
Abbildung 4-13	Beitragsanalyse für das Eutrophierungspotential, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	56
Abbildung 4-14	Beitragsanalyse für das Photooxidantienpotential, absolute Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	57
Abbildung 4-15	Beitragsanalyse für das Photooxidantienpotential, relative Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).	58

Abbildung 4-16	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation des Anteils an Primär- und Sekundärproduktion bei der Stahlherstellung“ für den kumulierten Energieaufwand. Spannbeton-Fertigdecke: Links ist der Base Case dargestellt. Für die Sensitivitätsanalyse wurden folgende Annahmen getroffen: 100 Prozent Primärstahl, Halbfertigteil- und Ortbetondecke: 100 Prozent Sekundärstahl.	60
Abbildung 4-17	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation des Anteils an Primär- und Sekundärproduktion bei der Stahlherstellung“ für das Treibhauspotential. Spannbeton-Fertigdecke: Links ist der Base Case dargestellt. Für die Sensitivitätsanalyse wurden folgende Annahmen getroffen: 100 Prozent Primärstahl, Halbfertigteil- und Ortbetondecke: 100 Prozent Sekundärstahl.	61
Abbildung 4-18	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für den kumulierten Energieaufwand. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.	62
Abbildung 4-19	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Treibhauspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.	64
Abbildung 4-20	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Versauerungspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.	64
Abbildung 4-21	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Eutrophierungspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.	65
Abbildung 4-22	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Photooxidantienpotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.	65
Abbildung 4-23	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Reduzierung der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke“ für alle untersuchten Kategorien.	70
Abbildung 4-24	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke“ für den kumulierten Energieaufwand (KEA).	71
Abbildung 4-25	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke“ für das Treibhauspotential.	71
Abbildung 4-26	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation der Zementsorte im Halbfertigteil“ für das Treibhauspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Zementsorte nicht variiert. Dargestellt ist jeweils der Base Case sowie für die Halbfertigteildecke ganz rechts die Sensitivitätsanalyse.	72
Abbildung 4-27	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation der Zementsorte im Halbfertigteil“ für das Photooxidantienpotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Zementsorte nicht variiert. Dargestellt ist jeweils der Base Case sowie für die Halbfertigteildecke ganz rechts die Sensitivitätsanalyse.	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Überblick über die Deckenflächen der verschiedenen untersuchten Alternativen. Die Unterschiede von 0,9 m ² sind rechnerisch bedingt.	13
Tabelle 2-2	Zusammenstellung der in den jeweiligen Alternativen verbauten Mengen an Stahl und Beton. Die Angabe der Mengen erfolgt auch für den Beton in Tonnen, da die Inputdaten in dieser Einheit und nicht als Volumen (m ³) angegeben waren. Eine Umrechnung von Tonnen auf Kubikmeter war anhand der vorliegenden Daten nicht möglich.	13
Tabelle 2-3	Überblick über die Verhältnisse der Materialmengen in den betrachteten Alternativen. Die Werte für die Spannbeton-Fertigdecke sind jeweils auf 100 % gesetzt.	13
Tabelle 2-4	Überblick über die im Werk BRESPA, Schneverdingen im Jahr 2007 produzierten Flächen an verschiedenen Deckentypen. Die in der vorliegenden Studie bilanzierten Spannbeton-Fertigdecke basiert auf der 200 mm Hohlplatte (gelb markierte Zeile).	18
Tabelle 2-5	Überblick über die im Werk Echo, Houthalen im Jahr 2007 produzierten Flächen an verschiedenen Deckentypen. Die in der vorliegenden Studie bilanzierten Spannbeton-Fertigdecke basiert auf der 200 mm Hohlplatte (enthalten in VS 18-20, gelb markierte Zeile).	18
Tabelle 3-1	Betonausgangsstoffe für die Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung in den Werken BRESPA und Echo	23
Tabelle 3-2	Überblick über die Zugfestigkeit verschiedener Stähle und die Bezeichnung von Spannstählen.	24
Tabelle 3-3	Überblick über die Anteile der Begleitelemente in den Spannstahlstützen. Quelle: Allgemeine bausaufsichtliche Zulassung, Z-12.3-6	24
Tabelle 3-4	Überblick über die Betonzusatzmittel sowie Abdeckkappen, die in der Bilanzierung der Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung berücksichtigt wurden.	27
Tabelle 3-5	Energieinput in den Werken BRESPA, Schneverdingen und Echo, Houthalen bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m ² Deckenfläche	28
Tabelle 3-6	Abfälle in den Werken Schneverdingen und Houthalen bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m ² Deckenfläche	29
Tabelle 3-7	Modellierungsgrundlage der Transporte der Spannbeton-Fertigdecken vom Werk zur Baustelle.	30
Tabelle 3-8	Materieller Input auf der Baustelle bezogen auf die funktionelle Einheit von 3.558 m ² Deckenfläche	31
Tabelle 3-9	Vergleich des Dieserverbrauchs von LKW und Fahrmischer	31
Tabelle 3-10	Ermittlung des Stromverbrauch des Kranes für Verlegung der Deckenelemente bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m ² Deckenfläche.	32
Tabelle 3-11	Ermittlung des Stromverbrauchs für den Kran beim Betonieren mit Betonsilo.	33
Tabelle 3-12	Überblick über die der Berechnung zugrunde gelegten Transportparameter der Halbfertigteile auf die Baustelle.	37

Tabelle 3-13	Materieller Input für Halbfertigteildecke auf der Baustelle bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m ² Deckenfläche	37
Tabelle 3-14	Ermittlung des Stromverbrauchs des Krans für die Verlegung der Halbfertigteile	38
Tabelle 3-15	Ermittlung des Stromverbrauchs der Pumpe für das Betonieren bei der Halbfertigteildecke	38
Tabelle 3-16	Materieller Input für die Ortbetondecke auf der Baustelle bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m ² Deckenfläche	40
Tabelle 3-17	Ermittlung des Stromverbrauchs der Betonpumpe für das Betonieren bei der Ortbetondecke	41
Tabelle 3-18	Ermittlung des Energieverbrauches beim Abriss des Gebäudes	42
Tabelle 4-1	In den drei Alternativen verbaute Menge an Beton und Stahl relativ zur Alternative Spannbeton-Fertigdecke, die 100 Prozent gesetzt ist.	52
Tabelle 4-2	Anteil der End-of-Life Prozesse am Gesamtergebnis ohne Gutschriften.	54
Tabelle 4-3	Relation der Ergebnisse des Base Case und der Sensitivitätsanalyse für den kumulierten Energieaufwand.	60
Tabelle 4-4	Einfluss der Transportentfernung zwischen Spannbeton-Fertigteil-Werk und Baustelle auf das Ergebnis für den kumulierten Energieaufwand in Relation zum Ergebnis für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke im Base Case (167 Kilometer).	63
Tabelle 4-5	Vergleich der Umweltauswirkungen aus der Herstellung von 1.000 kg Zement nach verschiedenen Datenquellen. Absolutwerte	67
Tabelle 4-6	Vergleich der Umweltauswirkungen aus der Herstellung von 1.000 kg Zement nach verschiedenen Datenquellen. Relative Werte, Durchschnittszement (2000) ist 100 Prozent gesetzt.	67
Tabelle 4-7	Überblick über die Anteile an Zementklinker sowie andere Hauptbestandteile verschiedener Zementqualitäten. Tabelle entnommen aus PE International 2007	68
Tabelle 4-8	Überblick über die Umweltauswirkungen verschiedener Zementqualitäten. Tabelle entnommen aus PE International 2007.	69
Tabelle 4-9	Vergleich der Umweltauswirkungen bei Verwendung von CEM III Zement auf der Baustelle mit dem jeweiligen Base Case für alle Deckenalternativen.	74
Tabelle 8-1	Zusammensetzung des Kraftwerksparks für die Strombereitstellung beim EU-Strommix sowie für die Länder Deutschland und Belgien (Frischknecht und Emmenegger 2003).	89
Tabelle 8-2	Gesamtproduktion von DW Systembau im Werk BRESPA Schneverdingen im Jahr 2007 in Quadratmeter produzierte Deckenfläche. Im Werk werden sowohl Hohldecken (Anteil: 98,8 Prozent) als auch Massivdecken (Anteil: 1,2 Prozent) hergestellt.	89
Tabelle 8-3	Gesamtproduktion von Echo, Werk Houthalen (Belgien) im Jahr 2007 in Quadratmeter produzierte Deckenfläche. Neben Decken wurden auch Balken hergestellt (Anteil: 4,2 Prozent).	90
Tabelle 8-4	Materieller Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (485.575 m ² Deckenfläche) bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen	90

Tabelle 8-5	Energie Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (485.575 m ² Deckenfläche) bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen	91
Tabelle 8-6	Abfälle bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (485.575 m ² Deckenfläche) bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen	91
Tabelle 8-7	Transport der Materialien zu DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen	91
Tabelle 8-8	Materieller Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m ² Deckenfläche) bei Echo, Werk Houthalen (Belgien)	91
Tabelle 8-9	Energie Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m ² Deckenfläche) bei Echo, Werk Houthalen (Belgien)	92
Tabelle 8-10	Transport der Materialien zu Echo, Werk Houthalen	93
Tabelle 8-11	Abfälle bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m ² Deckenfläche) von Echo, Werk Houthalen (Belgien)	93
Tabelle 8-12	Output: prozessbedingte atmosphärische Emissionen bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m ² Deckenfläche) von Echo, Werk Houthalen (Belgien)	93
Tabelle 8-13	Zuordnung des Betons zu Festigkeitsklassen nach der alten und der neuen Norm (Normal- und Schwerbeton)	94
Tabelle 8-14	Überblick über die Bestandteile der von DW Systembau und Echo in den Werke BRESPA Schneverdingen resp. Houthalen (Belgien) verwendeten Chemikalien	94
Tabelle 8-15	Für die Modellierung verwendete Datensätze für die Betonherstellung bei DW Systembau im Werk BRESPA Schneverdingen	95
Tabelle 8-16	Für die Modellierung verwendete Datensätze für die Betonherstellung im Werk Echo	95
Tabelle 8-17	Datensätze der Antransportprozesse der Betonherstellung bezogen auf DW Systembau und Echo in den Werke BRESPA Schneverdingen resp. Houthalen (Belgien)	96
Tabelle 8-18	Datensätze zur Vorkette: Spannstahllitzen-Herstellung (Quelle: EcoInvent 2.0)	96
Tabelle 8-19	Datensätze zum Antransport der Spannstahllitzen (Quelle: EcoInvent 2.0)	96
Tabelle 8-20	Datensätze zu den Vorketten der Vorprodukte sowie Hilfs- und Betriebsstoffe bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen (Quelle: EcoInvent 2.0)	97
Tabelle 8-21	Datensätze zu den Vorketten der Vorprodukte sowie Hilfs- und Betriebsstoffe bei Echo im Werk Houthalen (Belgien) (Quelle: EcoInvent 2.0)	98
Tabelle 8-22	Datensätze zu den Antransportprozessen der Vorprodukte bzw. Betriebsstoffe zu DW Systembau in das Werk BRESPA Schneverdingen (Quelle: EcoInvent 2.0)	98
Tabelle 8-23	Datensätze zu den Antransportprozessen der Vorprodukte bzw. Betriebsstoffe zu Echo in das Werk Houthalen (Belgien) (Quelle: EcoInvent 2.0)	99
Tabelle 8-24	Datensätze zur Energiebereitstellung bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen (Quelle: EcoInvent 2.0)	99

Tabelle 8-25	Datensätze zur Energiebereitstellung Echo im Werk Houthalen (Belgien) (Quelle: Ecolnvent 2.0)	99
Tabelle 8-26	Datensätze zur Modellierung der Entsorgung bei DW Systembau und Echo in den Werken BRESPA Schneverdingen resp. Houthalen (Belgien) (Quelle: Ecolnvent 2.0)	100
Tabelle 8-27	Datensätze zu den Vorprodukten auf der Baustelle (Quelle: Ecolnvent 2.0)	100
Tabelle 8-28	Datensätze zum Antransport der Vorprodukte auf die Baustelle (Quelle: Ecolnvent 2.0)	100
Tabelle 8-29	Datensätze zur Herstellung von Beton C25/30	101
Tabelle 8-30	Datensätze der Betonstahl-Herstellung (Quelle: Ecolnvent 2.0)	101
Tabelle 8-31	Datensätze zur Herstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe (Quelle: Ecolnvent 2.0, ausgenommen Beton C25/30)	102
Tabelle 8-32	Datensätze zum Antransport der Vorprodukte auf die Baustelle	102
Tabelle 8-33	Datensätze zur Herstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe (Quelle: Ecolnvent 2.0, ausgenommen Beton C25/30)	103
Tabelle 8-34	Datensätze zur Bereitstellung von Strom (Quelle: Ecolnvent 2.0)	103
Tabelle 8-35	Datensätze zum Antransport des Transportbetons auf die Baustelle	103
Tabelle 8-36	Datensätze und Annahmen zur Transportentfernung beim Antransport der Vorprodukte auf die Baustelle	104
Tabelle 8-37	Überblick über die für die Modellierung des End-of-Life verwendeten Datenmodule	104
Tabelle 8-38	Datensätze zu Entsorgungsprozessen	104
Tabelle 8-39	Datensätze zur Energiebereitstellung	104
Tabelle 8-40	Überblick über die für die Normierung auf per-Capita-Basis verwendete Grundlage. Geografischer Bezug: Deutschland	105
Tabelle 8-41	Überblick über die für die Normierung auf Haushalt-Basis verwendete Grundlage (Quelle: Quack und Rüdener 2007). Die Daten beziehen sowohl die Herstellung, Nutzung als auch die Entsorgung durch den jährlichen Konsum eines statistischen Durchschnittshaushalts in 10 Produktfeldern ein.	105
Tabelle 8-42	Beitragsanalyse Spannbeton-Fertigdecke für alle betrachteten Wirkungskategorien	106
Tabelle 8-43	Beitragsanalyse Halbfertigteildecke für alle betrachteten Wirkungskategorien	108
Tabelle 8-44	Beitragsanalyse Ortbetondecke für alle betrachteten Wirkungskategorien	109
Tabelle 8-45	Gesamtergebnisse absolut für alle drei betrachteten Alternativen und alle Wirkungskategorien	110
Tabelle 8-46	Überblick über die für die Gesamtergebnisse, ihre Relation zur Alternative Spannbeton-Fertigdecke sowie die entsprechende Anzahl an Äquivalenz-Personen (Normierung per Capita) bzw. Äquivalenz-Haushalte Normierung per Haushalt	112
Tabelle 8-47	Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse Anteil Primär- und Sekundärproduktion Stahl. Variiert wurde nur die Stahlproduktion: Spannbeton-Fertigdecke: 100 % Primärstahl; Halbfertigteildecke und Ortbetondecke: 100 % Sekundärstahl.	113

Tabelle 8-48	Überblick über die Ergebnisse der Spannbeton-Fertigdecke zur Sensitivitätsanalyse Transport zwischen Werk und Baustelle für alle betrachteten Wirkungskategorien. Variiert wurde nur die Entfernung für die Spannbeton-Fertigdecke. Die Ergebnisse der anderen Deckenalternativen wurden nicht variiert.	114
Tabelle 8-49	Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke. Variiert wurde nur die Zementmenge für die Spannbeton-Fertigdecke.	116
Tabelle 8-50	Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Halbfertigteil. Variiert wurde nur die Zementsorte im Halbfertigteil.	116
Tabelle 8-51	Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Beton auf der Baustelle.	118

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BE	Belgien
bspw.	beispielsweise
BST 500M	Betonsstahlmatten
BST 500S	Betonstabstahl
bzw.	beziehungsweise
CO₂	Kohlendioxid
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
EG	Erdgeschoss
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
HF-D	Halbfertigteildecke
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Standard Organization
k.A.	Keine Angabe
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kWh	Kilowattstunde
LKW	Lastkraftwagen
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
MJ	Megajoule
OB-D	Ortbetondecke
SB-D	Spannbeton-Fertigdecke
TWh	Terawattstunden (Tera = 10¹²)
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Zusammenfassung

Spannbeton-Fertigdecken weisen bei grundsätzlich ähnlicher Funktionalität wie Halbfertigteil- und Ortbetondecken einen deutlich geringeren Anteil an Beton und Stahl pro Quadratmeter Deckenfläche auf. Aufgrund dieser Eigenschaft liegt es nahe zu vermuten, dass die Umweltauswirkungen der Spannbeton-Fertigdecken insgesamt signifikant geringer sind als bei den beiden vorgenannten Wettbewerbsprodukten am Markt. Dem steht entgegen, dass es vergleichsweise wenige Werke gibt, die Spannbeton-Fertigdecken herstellen, die Entfernungen zur Baustelle also signifikant höher sind als bei den Alternativdeckensystemen. Betrachtet werden müssen außerdem der Herstellungsaufwand der Spannbeton-Fertigteile sowie die gegenüber Betonstahl aufwendigere Herstellung von Spannstaht.

Vor diesem Hintergrund haben die Unternehmen DW SYSTEMBAU, ECHO, ELBE, ESDELO (Echo-Gruppe), KETONIA, OBERNDORFER und UNIVERSALBETON das Öko-Institut damit beauftragt, eine vergleichende Ökobilanz für die drei am Markt relevantesten Betondecken-Systeme durchzuführen: Im Zentrum stand dabei der Vergleich der lebenswegübergreifenden Umweltauswirkungen von Spannbeton-Fertigdecken, Halbfertigteildecken und Ortbetondecken.

Die Untersuchung erfolgte auf Basis der Ökobilanz-Methodik (gemäß DIN EN ISO 14040 / 14044). Da eine Veröffentlichung der Ergebnisse von Anfang an angestrebt war, wurde die Studie durch ein externes kritisches Gutachten eines Teams von drei Experten begleitet. Es handelte sich dabei um Dipl. Geogr. Florian Knappe (ifeu Heidelberg), Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell (Technische Universität Kaiserslautern) und Dipl. Ing. Claus Asam (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung).

Die Ökobilanz der funktionellen Einheit „*Bereitstellung der in einem definierten, dreistöckigen Musterbürogebäude¹ erforderlichen Deckenflächen über einen Zeitraum von 50 Jahren*“ für die drei Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke kommt zum Ergebnis, dass die Alternative Halbfertigteildecke in den betrachteten Wirkungskategorien außer dem Eutrophierungspotential insgesamt die größten Umweltauswirkungen besitzt. Demgegenüber ist das Verhältnis zwischen den beiden anderen Alternativen nicht so eindeutig: Beim kumulierten Energieaufwand sind die Werte für die Spannbeton-Fertigdecke niedriger und beim Treibhauspotential liegen sie in der gleichen Größenordnung wie bei der Ortbetondecke. Allerdings sind die Ergebnisse für die Ortbetondecke in den Wirkungskategorien Versauerungspotential und Photooxidantienpotential leicht sowie für das Eutro-

¹ Das Musterbürogebäude basiert auf einem Entwurf des Kompetenzzentrums ZIP Integriertes Planen und Bauen der ehemaligen imbau GmbH, Neu-Isenburg, unter Leitung von Architekt Holger C. Heilmann (leanfield), Heilmann (2000)

phierungspotential signifikant niedriger als für die Spannbeton-Fertigdecke. Die wichtigsten Beiträge kommen aus der Bereitstellung des Betons, hier vor allem des Zementes, und aus der des Stahls.

Für den Zement gilt, dass die Spannbeton-Fertigteile für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke mit einer Zementsorte hergestellt werden, die einen sehr hohen Klinkeranteil aufweist (CEM I Zement) und zudem ein vergleichsweise großer Anteil Zement eingesetzt wird. Demgegenüber wurde im Base Case davon ausgegangen, dass die beiden anderen Alternativen mit Durchschnittszement, der dem Klinkeranteil nach einem CEM II Zement entspricht, hergestellt werden. Aufgrund des geringeren Klinkeranteils dieses Zements ist insbesondere dessen Treibhauspotential geringer als der des CEM I Zementes (siehe hierzu auch Nemuth und Kreißig 2007). Entsprechend wirkt sich dies auf die absoluten und relativen Beiträge des Zementes bei den untersuchten Alternativen aus.

Die beiden zum Zementeinsatz durchgeführten Sensitivitätsanalysen setzen an zwei Stellen an: Zum einen zeigen sie, dass die Spannbeton-Fertigdecke ihre Bilanz verbessern kann, indem die Menge des eingesetzten Zementes reduziert wird. Im konkreten Fall ist eine Reduktion der Zementmenge um 12,6 Prozent technisch machbar und führt insgesamt zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen um zwischen knapp 3 und knapp 5 Prozent. Ein kompletter Wechsel auf CEM II Zement ist dagegen technisch nicht möglich. Umgekehrt wurde für die Halbfertigteildecke geprüft, welchen Einfluss es auf das Ergebnis hätte, wenn für die Herstellung des Halbfertigteils CEM I Zement anstatt wie im Base Case angenommen Durchschnittszement eingesetzt wird. Es zeigte sich, dass sich die Bilanz für die Halbfertigteildecke nochmals erkennbar verschlechtern würde.

Es wurde außerdem geprüft, welchen Einfluss ein Wechsel auf CEM III Zement für den auf der Baustelle eingesetzten Beton (bei der Spannbeton-Fertigdecke für den Fugenverguss) hätte. Hier zeigen die Ergebnisse, dass für die Spannbeton-Fertigdecke keine Vorteile bestünden, da bereits ein Magerbeton eingesetzt wird. Für die beiden anderen Alternativen dagegen führt der Wechsel von Durchschnittszement auf CEM III Zement zu erkennbaren Reduktionen der Umweltauswirkungen. Allerdings muss hierbei angemerkt werden, dass die ermittelten Unterschiede zum Teil auf die unterschiedlichen Datenquellen zurückzuführen sind.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass sowohl die Zementsorte als auch die eingesetzte Zementmenge einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben: Je weiter die Menge des eingesetzten Zementes reduziert werden kann und je geringer der Klinkeranteil des eingesetzten Zementes ist, umso geringer sind die Umweltauswirkungen.

Für den verwendeten Stahl gilt, dass er ebenfalls wesentlich zum Ergebnis beiträgt (Base Case, Beitrag zwischen 8 und 63 Prozent). Bei der Spannbeton-Fertigdecke wird Spannstahl eingesetzt, der einen höheren Aufwand bei der Stahlverarbeitung besitzt (z.B. Wärmebehandlung) und für den unklar ist, zu welchen Anteilen er typischerweise aus Primär- resp. Sekundärstahl hergestellt wird. Bei den beiden anderen Alternativen wird Betonstahl

eingesetzt, der zumindest in Deutschland zu praktisch 100 Prozent aus Sekundärmaterial produziert wird. Die Sensitivitätsanalyse zur Variation des Primär- resp. Sekundäranteils kam allerdings zum Ergebnis, dass dieser Einfluss nur geringfügig ist. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass für das Recycling von Primärstahl eine Gutschrift erteilt werden kann, während es sich beim Recycling von Sekundärstahl um Closed-Loop-Recycling handelt, für das keine Gutschrift erteilt werden kann. Der höhere Aufwand bei der Stahlverarbeitung spiegelt sich darin wider, dass der deutlich geringere Materialeinsatz in der Spannbeton-Fertigdecke nicht voll auf das Ergebnis schlägt.

Neben Beton und Stahl spielen bei der Spannbeton-Fertigdecke und der Halbfertigteildecke auch die Prozesse zur Herstellung der jeweiligen Fertig- bzw. Halbfertigteile und deren Transport vom Werk auf die Baustelle eine Rolle. Letzteres ist insbesondere bei der Spannbeton-Fertigdecke von Interesse, da es deutschlandweit relativ wenige Werke gibt, die Spannbeton-Fertigteile herstellen und die Distanzen mit durchschnittlich 167 Kilometern deutlich höher sind als bei den beiden anderen Alternativen. Eine entsprechende Sensitivitätsanalyse zur Variation der Transportdistanzen zeigte allerdings, dass sich das Verhältnis zur Halbfertigteildecke erst nach einer deutlichen und nach Aussage von Branchenvertretern eher unwahrscheinlichen Erhöhung der Distanzen umkehrt. Dennoch ist die von der Branche gewählte Lösung, die Zulieferung über möglichst baustellennahe Werke zu veranlassen, sinnvoll.

Der in der Spannbeton-Fertigdecke deutlich geringere Materialeinsatz an Beton und Stahl schlägt nicht in der vielleicht erwarteten Weise auf den ökobilanziellen Vergleich zur Halbfertigteil- und Ortbetondecke durch. Dies hat mehrere Gründe: Der geringeren Menge stehen zum einen umweltbelastendere Qualitäten gegenüber (eine Zementsorte mit höherem Klinkeranteil), zum anderen aber auch aufwendigere Verarbeitungsprozesse (Stahlverarbeitung, Herstellung der Spannbeton-Fertigteile) gegenüber. Hinzukommt der Transport, der an sich einen relativ kleinen Effekt hat, die Bilanz aber dennoch relativ verschlechtert.

1 Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts

Spannbeton-Fertigdecken weisen bei grundsätzlich ähnlicher Funktionalität wie Halbfertigteil- und Ortbetondecken einen deutlich geringeren Anteil an Beton und Stahl pro Quadratmeter Deckenfläche auf. Aufgrund dieser Eigenschaft liegt es nahe zu vermuten, dass die Umweltauswirkungen der Spannbeton-Fertigdecken insgesamt signifikant geringer sind als bei den beiden vorgenannten Wettbewerbsprodukten am Markt. Dem steht entgegen, dass es vergleichsweise wenige Werke gibt, die Spannbeton-Fertigdecken herstellen, die Entfernungen zur Baustelle also signifikant höher sind als bei den Alternativdeckensystemen. Betrachtet werden müssen außerdem der Herstellungsaufwand der Spannbeton-Fertigteile sowie die gegenüber Betonstahl aufwendigere Herstellung von Spannstaahl.



Vor diesem Hintergrund haben die Unternehmen DW SYSTEMBAU, ECHO, ELBE, ESDELO (Echo-Gruppe), KETONIA, OBERNDORFER und UNIVERSALBETON das Öko-Institut damit beauftragt, eine vergleichende Ökobilanz für die drei am Markt relevantesten Betondecken-Systeme durchzuführen: Im Zentrum stand dabei der Vergleich der lebenswegübergreifenden Umweltauswirkungen von Spannbeton-Fertigdecken, Halbfertigteildecken und Ortbetondecken.

Die Untersuchung erfolgte auf Basis der Ökobilanz-Methodik (gemäß DIN EN ISO 14040 / 14044). Da eine Veröffentlichung der Ergebnisse von Anfang an angestrebt war, wurde die Studie durch ein externes kritisches Gutachten eines Teams von drei Experten begleitet. Es handelte sich dabei um Dipl. Geogr. Florian Knappe (ifeu Heidelberg), Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell (Technische Universität Kaiserslautern) und Dipl. Ing. Claus Asam (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung).

Der Bericht ist folgendermaßen aufgebaut:

Nach der Zusammenfassung enthält Kapitel 1 den Hintergrund der durchgeführten Studie. In Kapitel 2 wird die Methodik der Studie sowie die verwendete Software erläutert, insbesondere wird auf die Zielsetzung und den Untersuchungsrahmen der Studie eingegangen. Dazu gehören u.a. eine detaillierte Beschreibung der untersuchten Produktalternativen, die Festlegung der funktionellen Einheit, auf deren Basis der Vergleich durchgeführt wird, und Angaben zu den Systemgrenzen, zur Datenerhebung, Datenqualität, den angewandten

Allokationsregeln² sowie den berücksichtigten Wirkungskategorien. In Kapitel 3 wird detailliert auf die konkreten, der Studie zugrunde gelegten Annahmen und die verwendete Datengrundlage eingegangen. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in Kapitel 4 dargestellt. Die Ergebnisdarstellung ist in die Unterkapitel Gesamtergebnis, Beitragsanalysen und Sensitivitätsanalysen sowie die Datenqualitätsprüfung untergliedert. In Kapitel 5 erfolgt die Auswertung.

Kapitel 6 enthält das Literaturverzeichnis; in Kapitel 7 ist das externe kritische Gutachten zur Ökobilanz dargestellt. Weitere Details der Sachbilanz und zur Modellierung sind im Anhang, Kapitel 8, aufgeführt.

2 Methodik und verwendete Software

Die Studie wurde gemäß der Ökobilanz-Methodik durchgeführt, die durch DIN EN ISO 14040:2006-10 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen sowie DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen standardisiert ist. In einer Ökobilanz werden möglichst umfassend der gesamte Produktlebensweg und die zugehörigen ökologischen Auswirkungen erfasst und die während des Lebenswegs auftretenden Stoff- und Energieumsätze und die daraus resultierenden potentiellen Umweltbelastungen quantifiziert. Bei der Ökobilanz handelt es sich um eine systematische, lebenswegübergreifende Methode, mit der die umweltseitigen Auswirkungen von Produkten und Prozessen in vier Teilschritten erfasst und analysiert werden (siehe auch Abbildung 2-1):

1. Zieldefinition

Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens

2. Sachbilanz

Zusammenstellung umweltrelevanter Inputs und Outputs

3. Wirkungsabschätzung

Abschätzung der potentiellen Umweltauswirkungen und Gewichtung der verschiedenen Wirkungskriterien gegeneinander (nur in besonderen Fällen)

4. Auswertung

Zusammenfassung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend der Zieldefinition

² Eine Allokation (dt. Zuordnung) von Input- und Outputflüssen ist dann erforderlich, wenn es sich um einen Prozess mit mehreren Produkten handelt (z.B. Erdölraffination).

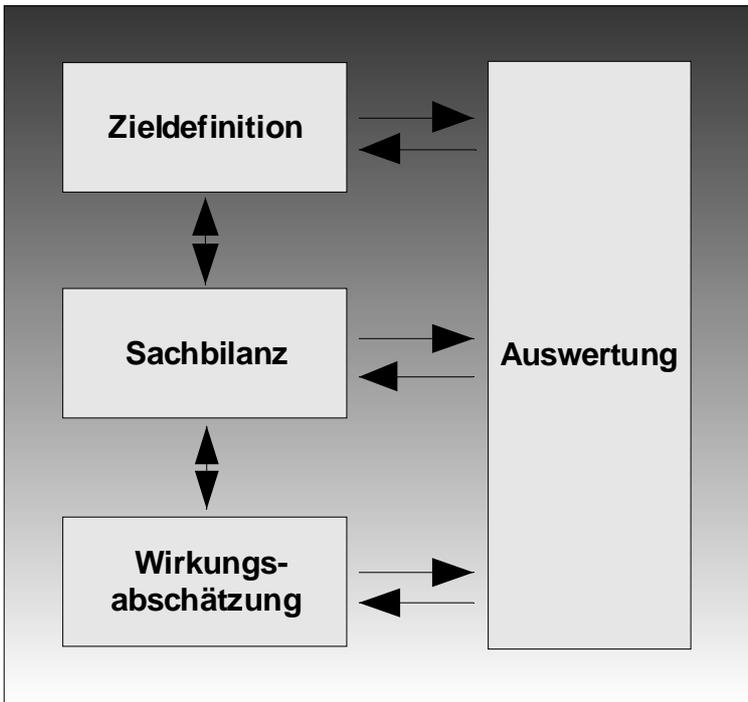


Abbildung 2-1 Die vier Teilschritte einer Ökobilanz. Doppelpfeile stehen für ein iteratives Vorgehen.

Dabei werden die Umweltauswirkungen der zu untersuchenden Produkte von der Rohstoffgewinnung über Transport, Herstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung erfasst und ausgewertet.

Zur Erstellung der Ökobilanz wurde das Softwaretool Umberto 5.5 verwendet, einer auf dem Konzept der Stoffstromnetze basierenden Software. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein beispielhaftes Stoffstromnetz in Umberto.

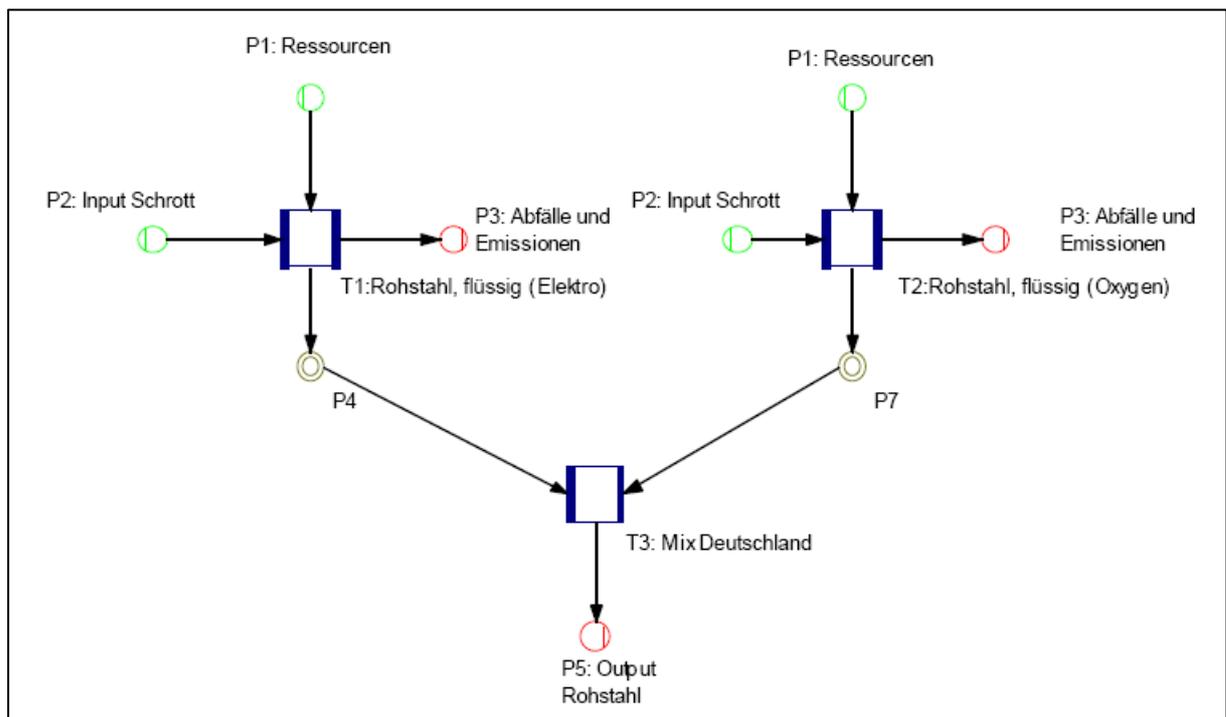


Abbildung 2-2 Beispielhaftes Stoffstromnetz aus Umberto 5.5

Alle innerhalb des Untersuchungsrahmens und der Systemgrenzen befindlichen Input- und Outputströme wurden in Umberto modelliert. Auf dieser Basis wurden dann eine Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung erstellt.

2.1 Ziele und Anwendungen der Studie

Im Rahmen der Untersuchung wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Das zentrale Untersuchungsziel der Studie bestand darin, die potenziellen Umweltauswirkungen von Spannbeton-Fertigdecken sowie von Halbfertigteildecken und Ortbetondecken zu ermitteln. Dies sollte auf der methodischen Grundlage einer normkonformen Ökobilanz erfolgen.
- Die Ökobilanz sollte so durchgeführt werden, dass Unterschiede zwischen den untersuchten Betondecken-Typen dargestellt und entsprechende Optimierungspotenziale ausgewiesen werden können.

Entsprechend der genannten Ziele gibt es zwei Hauptanwendungen der vergleichenden Ökobilanz: Zum einen liegt sie beim Auftraggeber intern in der Optimierung von Produktionsprozessen und Produkt. Zum anderen dient sie der externen Kommunikation der Ergebnisse an Kunden.

2.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

2.2.1 Beschreibung der untersuchten Produktalternativen

Im Wohnungs- und Verwaltungsbau stellen Betondecken die für Deckenelemente am häufigsten eingesetzte Variante dar. Dabei lässt sich bei den am häufigsten eingesetzten Varianten unterscheiden zwischen Halbfertigteildecken, Ortbetondecken und Spannbeton-Fertigdecken. Es sind zwar keine Marktstatistiken verfügbar, aber nach Einschätzungen von Experten der Branche liegen die Anteile der aktuell verbauten Deckentypen bei über 50 Prozent für Halbfertigteildecken, weniger als 50 Prozent für Ortbetondecken und ca. 4 bis 5 Prozent für Spannbeton-Fertigdecken. Weitere Bauarten mit mengenmäßig kleinen Anteilen sind z.B. Hohlkörperdecken oder Stahlverbunddecken.

Die drei Deckentypen lassen sich folgendermaßen beschreiben:

Halbfertigteildecken

Bei einer Halbfertigteildecke wird ein vorgefertigtes Halbfertigteil vom Werk auf die Baustelle transportiert und durch das Aufbringen einer Ortbetonschicht und einer entsprechenden Bewehrung im Ortbeton auf der Baustelle fertig gestellt. In der hier vorliegenden Untersuchung handelt es sich um ein Halbfertigteil von 7 cm Dicke, das mit einem Ortbeton von 18 cm versehen wird. Das Fertigteil ist werksseitig bereits mit Betonstahl sowie mit den für die Montage notwendigen biegesteifen Gitterträgern bewehrt. Eine Schalung und Stützen sind nur in Randbereichen erforderlich.

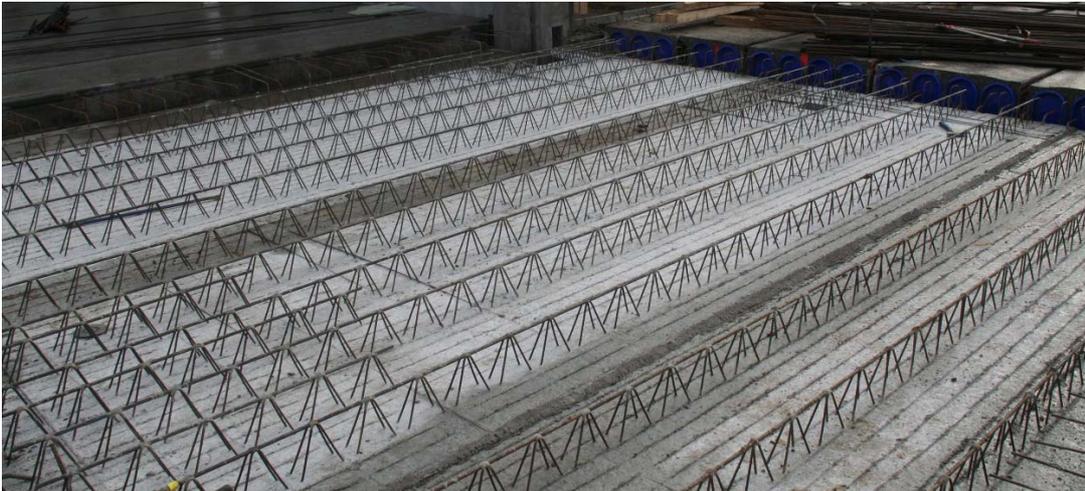


Abbildung 2-3 Halbfertigteil³

³ Dieses Bild basiert auf dem Bild Elementdecke aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und steht unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation. Der Urheber des Bildes ist Störfix.

Ortbetondecken

Bei Ortbetondecken wird der Beton direkt auf der Baustelle verarbeitet. Die Decke wird hergestellt, indem auf der Baustelle aus speziellen Stützen, Trägern und Platten eine Schalungsfläche erstellt wird, auf der die Bewehrungen verlegt und fixiert werden, und auf der Baustelle Transportbeton eingebracht wird.

Spannbeton-Fertigdecken

Spannbeton-Fertigdecken werden in Beton-Fertigteilwerken als Deckenelemente von ca. 1,20 Meter Breite und variabler Länge fertig hergestellt. Der Begriff „Spannbeton“ bezieht sich dabei darauf, dass in den Beton werksmäßig vorgespannte Stahldrähte oder Stahllitzen eingebracht werden. Dies verringert die Verformung und erhöht die Tragfähigkeit der Decke. Die Deckenelemente werden vom Werk auf die Baustelle transportiert und können dort direkt eingebaut werden. Fertig gestellt wird die Decke, indem die Fugen und etwaige Randbereiche (z.B. Ringanker) mit Ortbeton vergossen werden. Eine Schalung ist nur in Randbereichen erforderlich.



Abbildung 2-4 Elemente einer Spannbeton-Fertigdecke

2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion des untersuchten Systems spiegelt die geforderten Gebrauchseigenschaften wider. Für alle untersuchten Varianten sollten die Funktionen gleich sein, Abweichungen müssen entsprechend erläutert und ggf. kompensiert werden.

Die Funktion des Systems kann für die hier vorliegende Studie folgendermaßen beschrieben werden:

„Die für Decken in einem Bürogebäude üblichen Anforderungen an Schallschutz, Brandschutz sowie die auf das Mustergebäude bezogenen erforderlichen technischen Eigenschaften bezüglich Statik werden erfüllt.“

Einer besonderen Erläuterung bedarf an dieser Stelle der Schallschutz, da die Spannbeton-Fertigdecke aufgrund ihrer Hohlräume eine geringere Masse aufweist und somit grundsätzlich eine geringere Schallschutzleistung erreichen kann als die anderen Deckentypen. Allerdings ist das für den hier durchgeführten Vergleich nicht relevant, da die untersuchte Spannbeton-Fertigdecke ebenso wie die beiden anderen Varianten dennoch die im Bürobau anzuwendende Norm für erhöhten Schallschutz (DIN 4109) erfüllt.

Die drei untersuchten Varianten können vor diesem Hintergrund von ihrer Funktion her als gleichwertig angesehen und direkt verglichen werden.

Gemäß ISO 14040 dient eine funktionelle Einheit dazu, einen quantifizierten Bezug zu schaffen, auf den Input und Outputflüsse in der Ökobilanz bezogen und auf dessen Basis verschiedene Varianten verglichen werden können.

Für den ökobilanziellen Vergleich der drei Deckenvarianten wird die funktionelle Einheit folgendermaßen definiert:

„Bereitstellung der in einem definierten, dreistöckigen Musterbürogebäude⁴ erforderlichen Deckenflächen über einen Zeitraum von 50 Jahren.“

Aspekte einer Umnutzung innerhalb der Standzeit von 50 Jahren werden nicht beleuchtet.

⁴ Das Musterbürogebäude basiert auf einem Entwurf des Kompetenzzentrums ZIP Integriertes Planen und Bauen der ehemaligen imbau GmbH, Neu-Isenburg, unter Leitung von Architekt Holger C. Heilmann (leanfield), Heilmann (2000)

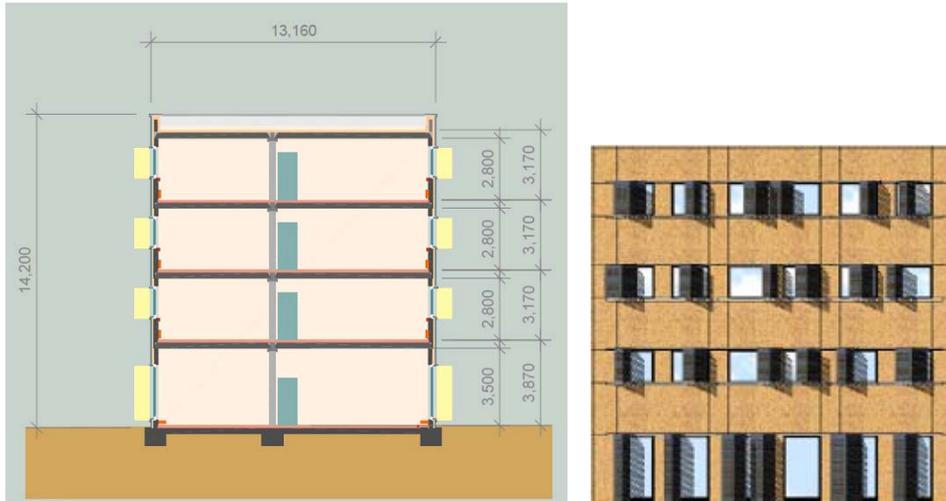


Abbildung 2-5 Schnitt und Ansicht des Musterbürogebäudes

Auf der nachfolgenden Seite (Abbildung 2-6 bis Abbildung 2-8) sind die Geschosdecken und Schnitte nochmals detaillierter dargestellt.

Auszüge aus der detaillierten Statikberechnung befinden sich im Anhang (Kapitel 8.9.9).

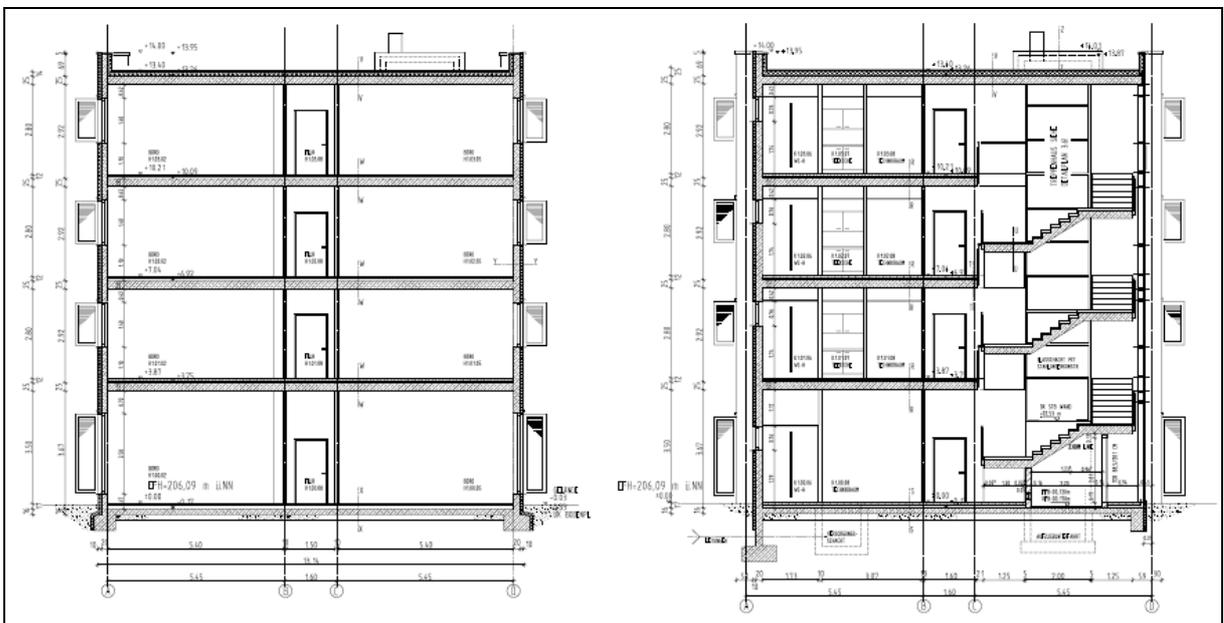


Abbildung 2-6 Schnitt des Musterbürogebäudes

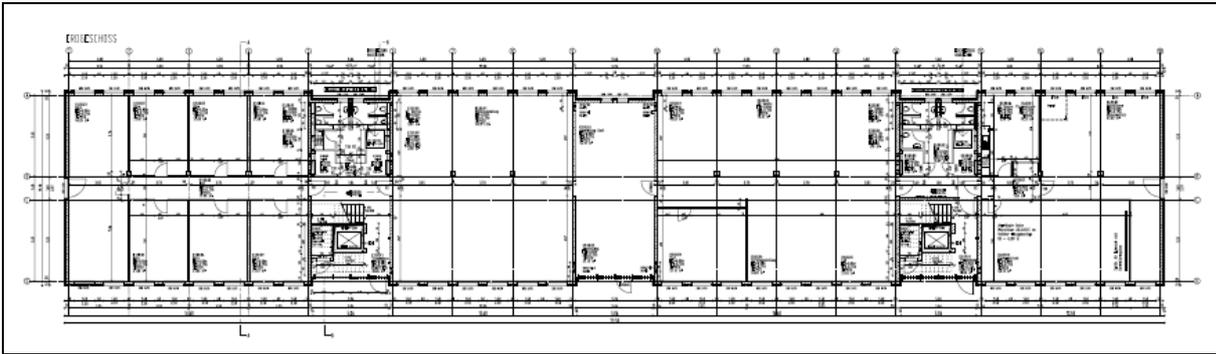


Abbildung 2-7 Geschossdecken des Musterbürogebäudes (Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss)

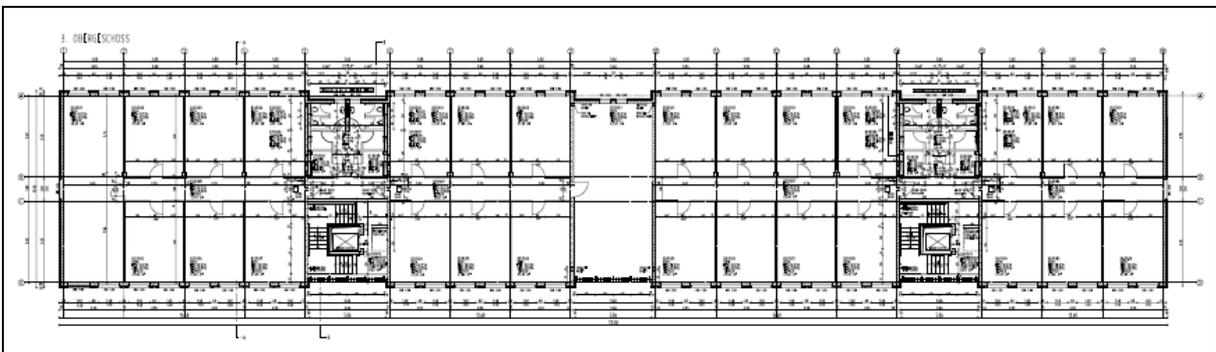


Abbildung 2-8 Geschossdecken des Musterbürogebäudes (3. Obergeschoss)

Für die unterschiedlichen Deckentypen wurden die jeweils erforderlichen Flächen und Massen von einem Ingenieurbüro⁵ (Halbfertigteil- und Ortbetondecke) bzw. der Firma DW Systembau (Spannbeton-Fertigdecke) für das Musterbürogebäude errechnet. Sie sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Spannbeton-Fertigdecken als Einfeldträger ausgebildet werden, wohingegen bei der Halbfertigteil- und Ortbetondecke in der Statischen Berechnung eine Durchlaufwirkung über dem Mittelunterzug unterstellt wurde.

⁵ Statikberechnungen von König und Heinisch Planungsgesellschaft mbH Dortmund

Tabelle 2-1 Überblick über die Deckenflächen der verschiedenen untersuchten Alternativen. Die Unterschiede von 0,9 m² sind rechnerisch bedingt.

	Spannbeton-Fertigdecke	Halbfertigteildecke	Ortbetondecke
Gesamtdicke der fertigen Decke	20 cm	25 cm	25 cm
Gesamtfläche	3.558,3 m ²	3.557,2 m ²	3.557,2 m ²
EG	876,9 m ²	877,7 m ²	877,5 m ²
1.OG	876,9 m ²	877,7 m ²	877,5 m ²
2.OG	876,9 m ²	877,7 m ²	877,5 m ²
3.OG	927,6 m ²	924,1 m ²	924,9 m ²

Tabelle 2-2 Zusammenstellung der in den jeweiligen Alternativen verbauten Mengen an Stahl und Beton. Die Angabe der Mengen erfolgt auch für den Beton in Tonnen, da die Inputdaten in dieser Einheit und nicht als Volumen (m³) angegeben waren. Eine Umrechnung von Tonnen auf Kubikmeter war anhand der vorliegenden Daten nicht möglich.

Alternative	Beton [t]	Stahl [t]
<i>Spannbeton-Fertigdecke</i>	1.114,9	16,7
davon im Fertigteil	991,6	12,6 <i>Spannstahl</i>
davon auf der Baustelle	123,3	4,1 <i>Betonstahl</i>
<i>Halbfertigteildecke</i>	2.087,3	80,6
davon im Halbfertigteil	584,4	32,9 <i>Betonstahl</i>
davon auf der Baustelle	1.502,9	47,7 <i>Betonstahl</i>
<i>Ortbetondecke</i>	2.087,3	64,4
davon auf der Baustelle	2.087,3	64,4 <i>Betonstahl</i>

Tabelle 2-3 Überblick über die Verhältnisse der Materialmengen in den betrachteten Alternativen. Die Werte für die Spannbeton-Fertigdecke sind jeweils auf 100 % gesetzt.

Alternative	Relation Beton	Relation Stahl
Spannbeton-Fertigdecke	100,0 %	100,0 %
Halbfertigteildecke	187,2 %	482,9 %
Ortbetondecke	187,2 %	385,0 %

2.2.3 Festlegung der Systemgrenzen

Idealerweise sollten alle Material- und Energie-Inputs bis dahin zurückverfolgt werden, wo sie dem System Umwelt entnommen werden, genauso wie alle Outputflüsse entsprechend dem Ziel und dem Anwendungsbereich bis zum System Umwelt verfolgt werden sollten. In der Realität werden Abschneidekriterien definiert, um die Systemgrenzen zu setzen. Die Abschneidekriterien müssen klar dargestellt und begründet werden und im Einklang mit dem

Ziel der Studie stehen. Mit der Festlegung der Systemgrenzen wird letztlich bestimmt, welche Prozesse des betrachteten Produktsystems in die ökobilanzielle Betrachtung aufgenommen werden und welche nicht. Grundsätzlich ist angestrebt, den gesamten Lebensweg – von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung – einzubeziehen und mit entsprechenden Prozessmodulen abzubilden. Wichtig ist, dass die ergebnisrelevanten Prozesse berücksichtigt werden bzw. etwaige Lücken transparent dargestellt und in der Interpretation entsprechend berücksichtigt werden. Für die hier vorliegende Studie bedeutet dies den Einbezug folgender Prozesse:

- Rohstoffabbau: z.B. Gewinnung von Sand und anderen Betonzuschlagsstoffen.
- Herstellung der Vorprodukte, Hilfs- und Betriebsstoffe: z.B. Herstellung von Zement, Betonzusatzstoffen, Trennmittel inkl. jeweilige Vorketten.
- Bereitstellung von Strom und Wärme inkl. der jeweiligen Vorketten.
- Herstellungsprozesse der Halbfertigteile und Fertigteile.
- Transportprozesse: Transport der Halbfertigteile und Fertigteile sowie des Transportbetons vom jeweiligen Werk auf die Baustelle; Transport der Vorprodukte, Hilfs- und Betriebsstoffe.
- Prozesse auf der Baustelle: Vorketten für z.B. Schalungen, Ortbeton und Fugenverguss. Baustellenprozessen, wie z.B. Kranbetrieb.
- End-of-Life: Abrissprozesse und ein etwaiges Recycling.

Grafisch lässt sich das untersuchte System folgendermaßen darstellen:

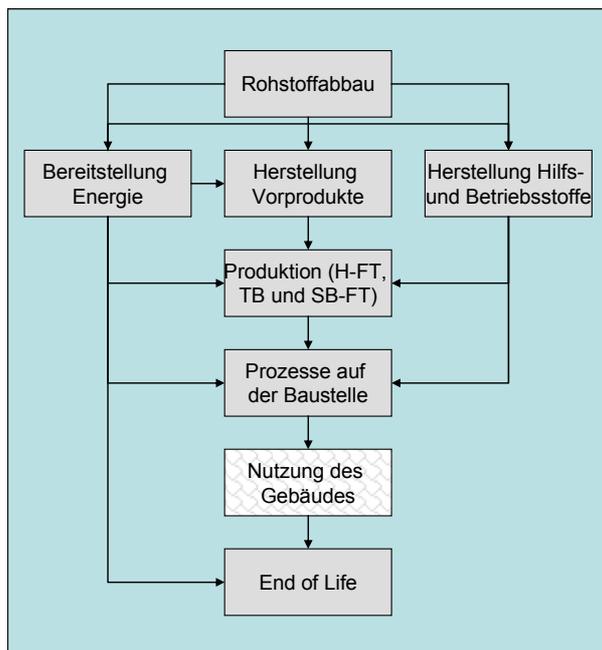


Abbildung 2-9 Grenzen des untersuchten Systems. Nicht dargestellt sind die Transportprozesse, die jeweils an den Stellen mit Pfeilen auftreten. Die Nutzung des Gebäudes (hell hinterlegter Kasten) wurde nicht berücksichtigt. Etwaige Umbauten während der Standzeit wurden nicht berücksichtigt. H-FT: Halbfertigteil; TB: Transportbeton; SB-FT: Fertigteil.

In den entsprechenden Kapiteln sind die Prozesse für die einzelnen Deckenalternativen nochmals detaillierter dargestellt.

Nicht berücksichtigt wurden folgende Prozesse:

- Da für keine der untersuchten Alternativen während der angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren Instandhaltungsarbeiten anfallen, wurden in der Untersuchung keine Aufwendungen während der Nutzungsphase berücksichtigt.
- Der Heizwärmebedarf während der Nutzungsphase wurde nicht berücksichtigt.
- Es wurden keine anderen Bauteile als die Decken, wie z.B. Innen- und Außenwände oder Hausinstallationen in der Untersuchung betrachtet. Ein möglicher Effekt auf das Fundament – aufgrund der geringeren Masse von Spannbeton-Fertigdecken könnte es sein, dass das Fundament geringer dimensioniert werden muss als bei den beiden anderen Alternative - wurde damit ebenfalls vernachlässigt. Die Erwartung ist hier aber, dass der Effekt bei einem dreistöckigen Bürogebäude noch verhältnismäßig gering ist und damit eine Vernachlässigung berechtigt ist. Bei anderen Gebäudetypen wird er dagegen gezielt genutzt und ist ein starkes Argument für den Einsatz von Spannbeton-Fertigteilen.
- Ebenso wurden keine Beschichtungen – z.B. Estrich, Wärmedämmung, zusätzlicher Schallschutz, Anstrich – der eigentlichen Betondecken berücksichtigt. Hintergrund

hierfür war, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten auftreten würde, es würden in jedem Fall die gleichen Maßnahmen ergriffen.

- Verpackungen von z.B. Betonhilfsmitteln, Zement oder Zuschlagstoffen werden nicht berücksichtigt.
- Die Herstellung und die Entsorgung der Investitionsgüter (sogenanntes Capital Equipment) werden generell nicht erfasst (z.B. Energie- und Stoffaufwand bei der Herstellung der Anlagen zur Herstellung von Betonfertigteilen oder von Betonpumpen, die auf der Baustelle eingesetzt werden).

2.2.4 Datenerhebung und Anforderungen an die Datenqualität

Zur Sicherstellung der für die Untersuchung erforderlichen Datenbasis müssen an die zugrunde gelegten Daten entsprechende Anforderungen gestellt werden. Generell wurden sowohl generische als auch spezifische Daten verwendet. Entsprechend der in Ökobilanzen üblichen Praxis wurden auch hier für die im Fokus stehenden Prozesse spezifische Daten verwendet (z.B. Herstellung der Spannbetonfertigteile und des Transportbetons) und für die jeweiligen Vorketten generische Daten (z.B. Bereitstellung von Strom). Solche Datensätze stammen im Allgemeinen aus der Literatur, verfügbaren Datenbanken und Ermittlungen durch Experten. Darüber hinaus werden die generischen Datensätze grundsätzlich so ausgewählt, dass sie sowohl vom zeitlichen und räumlichen Bezug als auch vom bilanzierten Objekt dem in dem zu untersuchenden System auftretenden möglichst nahe kommen.

Laut ISO 14040 sollten die Daten folgende Aspekte berücksichtigen:

– den zeitbezogenen Erfassungsbereich

Als zeitlicher Bezug wurde das Jahr 2007 festgelegt. Entsprechend wurden spezifische Daten für das Jahr 2007 verwendet (z.B. Produktionsjahr 2007 für Spannbeton-Fertigteildecken). Es wurde ebenfalls angestrebt, sich für die in den Modulen verwendeten allgemeinen Datensätze soweit wie möglich an 2007 zu orientieren. Sind keine allgemeinen Daten mit Bezugsjahr 2007 verfügbar, so wurde darauf geachtet, dass die Datenmodule nicht älter als 10 Jahre (entspricht Bezugsjahr 1997) sind. Die konkreten Datenquellen und Bezugsjahre werden in den entsprechenden Kapiteln zu den Modulen detailliert dargestellt.

– den geographischen Erfassungsbereich

Die Daten beziehen sich grundsätzlich auf europäische Rahmenbedingungen. Für die Strombereitstellung wurden länderspezifische Daten zugrunde gelegt (z.B. belgischer Strommix für das belgische Spannbeton-Fertigdecken-Werk von Echo). Die spezifischen Daten der Herstellung von Spannbeton-Fertigdecken sowie die Antransporte der Betriebs- und Hilfsstoffe und die Transporte der Deckenelemente auf die Baustelle wurden in zwei Mitgliedsunternehmen der Spannbeton-Fertigdecken-Branche erhoben: Werk BRESPA in Schnever-

dingen (Deutschland) und Werk Echo in Houthalen (Belgien). Die Transportbetonherstellung entspricht der Situation in Deutschland, auch bezüglich der durchschnittlichen Entfernung und Transportmittel zwischen Transportbetonwerk und Baustelle.

– den technologischen Erfassungsbereich

Die einbezogenen Daten einschließlich ihre Vor- und Nachketten sollen den aktuellen Stand der Technik sowie die derzeitigen Rahmenbedingungen gut widerspiegeln. Dies trifft sowohl für die Spannbeton-Fertigdecken-Produktion (z.B. sowohl Gleitfertiger als auch Extruder) als auch auf die Herstellung von Transportbeton zu. Die generischen Daten entsprechen einem mittleren Stand der Technik.

Insgesamt liegen der Untersuchung damit Daten zugrunde, mit der die Fragestellung und Zielsetzung in angemessener Qualität verfolgt werden kann. Wo vor dem Hintergrund von Datenlücken Annahmen getroffen werden mussten, wurde dies transparent dargestellt und – sofern es sich um ergebnissensitive Annahmen handelte – Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Zu den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen siehe Kapitel 5.

2.2.5 Allokation

Eine Allokation ist dann erforderlich, wenn es sich um ein System handelt, welches Eingänge aus anderen Produktionssystemen oder Ausgänge in andere Produktionssysteme hat (z.B. Erdölraffination, Recycling). Im vorliegenden Fall trifft dies auf die Spannbeton-Fertigdecken-Produktion in den Werken BRESPA und Echo zu. In beiden Fällen wurden Primärdaten eines Produktionsjahres erhoben, in dem aber mehrere unterschiedliche Deckentypen hergestellt wurden und keine Zuordnung von Input- und Outputflüssen auf die in dieser Studie untersuchte 20 cm Hohldecke möglich war. Vor diesem Hintergrund wurde jeweils die gesamte Jahresproduktion als Output in Quadratmeter Deckenfläche erfasst und die jeweiligen Energieflüsse nach Quadratmeter produzierter Deckenfläche alloziert. Nach Einschätzungen der jeweiligen Experten hat die unterschiedliche Deckendicke keinen Effekt auf die zuzuordnenden Energieflüsse. Eher spielen andere Aspekte wie z.B. Außentemperatur oder gewollte Schnelligkeit des Abbindens, die in einem unterschiedlichen Einsatz der Bahnheizung resultieren, eine Rolle. Dies ist dann aber unabhängig von dem produzierten Deckentyp (Massiv- oder Hohldecke) und der Deckendicke. Die eingesetzte Menge an Spannstahl und Beton ist spezifisch für den untersuchten Deckentyp (20 cm Hohldecke) in die Bilanz eingeflossen. Die beiden nachstehenden Tabellen geben einen Überblick über die im Jahr 2007 in den Werken BRESPA, Schneverdingen und Echo, Houthalen produzierten Flächen an verschiedenen Deckentypen.

Tabelle 2-4 Überblick über die im Werk BRESPA, Schneverdingen im Jahr 2007 produzierten Flächen an verschiedenen Deckentypen. Die in der vorliegenden Studie bilanzierten Spannbeton-Fertigdecke basiert auf der 200 mm Hohlplatte (gelb markierte Zeile).

Deckentyp	Menge	Einheit	Anteil an produzierter Fläche
150 und 180 mm Hohlplatte	87.481	m ²	18,02 %
200 und 220 mm Hohlplatte	157.506	m ²	32,44 %
265, 320 und 400 mm Hohlplatte	234.715	m ²	48,34 %
150 und 180 mm Massivplatte	5.873	m ²	1,21 %
Summe	485.575	m ²	100,00 %

Tabelle 2-5 Überblick über die im Werk Echo, Houthalen im Jahr 2007 produzierten Flächen an verschiedenen Deckentypen. Die in der vorliegenden Studie bilanzierten Spannbeton-Fertigdecke basiert auf der 200 mm Hohlplatte (enthalten in VS 18-20, gelb markierte Zeile).

Deckentyp	Menge	Einheit	Anteil an produzierter Fläche
VS 12 – 15	370.835	m ²	31,6 %
VS 18 – 20	406.186	m ²	34,7 %
VS 24 / SC 27	230.133	m ²	19,6 %
SC 32 – 40	115.467	m ²	9,9 %
Ecn Balken	49.584	m ²	4,2 %
Summe	1.172.205	m ²	100,0 %

2.2.6 Berücksichtigte Wirkungskategorien

In der Wirkungsabschätzung sollen die potenziellen Umweltwirkungen auf der Basis der Ergebnisse der Sachbilanz ermittelt werden. Im Allgemeinen werden dabei die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft, wobei versucht wird, die hieraus resultierenden potenziellen Wirkungen zu erkennen.

In Übereinstimmung mit dem Ziel und Untersuchungsrahmen wurden im Rahmen der Wirkungsabschätzung dieser Studie folgende Wirkungskategorien betrachtet:

Primärenergieverbrauch (kumulierter Energieaufwand, KEA) in MJ-Äquivalente

Der KEA stellt den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen dar, der alle nicht-erneuerbaren und erneuerbaren Energieverbräuche als Primärenergiewerte ausweist.

Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) in kg CO₂-Äquivalente

Unter dem Treibhauseffekt wird die klimarelevante Veränderung der Atmosphäre durch den anthropogenen Beitrag von Treibhausgasemissionen verstanden, die zu einer Erwärmung der Erde führt. Zur Erfassung des Treibhauspotentials werden die in der Sachbilanz erfassten

Treibhausgase mit sogenannten Charakterisierungsfaktoren⁶ multipliziert, die ihre Klima-relevanz in Relation zu CO₂ mit dem Charakterisierungsfaktor 1 abbilden und die einzelnen Beiträge addiert. Auf diese Weise wird das Treibhauspotential in Form von CO₂-Äquivalenten errechnet. Die Charakterisierungsfaktoren (GWP-100) stammen aus der Veröffentlichung des Assessment Reports von IPCC im Jahr 2007 (IPCC 2007).

Photooxidantienbildung (Sommersmogpotential) in kg C₂H₄-Äquivalenten

Die photochemische Bildung von Ozon in bodennahen Luftschichten ist das Resultat der Reaktion von Stickoxiden (NO_x) mit flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen (VOC) unter dem Einfluss von UV-Licht. Dieser Vorgang wird auch als Sommersmog bezeichnet. Dabei wirkt NO_x als Katalysator. Die Ozonbildung ist nicht linear mit der NO_x-Konzentration korreliert. Zur quantitativen Erfassung des Sommersmogs wird das photochemische Ozonbildungspotential (POCP) definiert. Als Leitindikator wird Ethen verwendet. Die Charakterisierungsfaktoren sind der Datenbank CML-IA des Institute of Environmental Sciences der Universität Leiden entnommen (CML 2008).

Eutrophierungspotential in kg PO₄-Äquivalenten

Die übermäßige Anreicherung von Böden und Gewässern mit Nährstoffen meist in Form von Stickstoff- und Phosphorverbindungen wird als Eutrophierung oder Überdüngung bezeichnet. Die relevanten Luft- und Wasseremissionen werden in Form von Phosphat-Äquivalenten quantifiziert. Die Charakterisierungsfaktoren sind der Datenbank CML-IA des Institute of Environmental Sciences der Universität Leiden entnommen (CML 2008).

Versauerungspotential in kg SO₂-Äquivalenten

Die wichtigsten Substanzen, die zu einer Erniedrigung des PH-Wertes von Niederschlagswasser führen und damit ein Versauerungspotential besitzen, sind Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃). Schwefeldioxid dient als Leitindikator für die Quantifizierung des Versauerungspotential. Der Gesamtbeitrag wird als Summe der einzelnen Emissionen und ihrem jeweiligen Versauerungspotenzial ermittelt. Die Charakterisierungsfaktoren sind der Datenbank CML-IA des Institute of Environmental Sciences der Universität Leiden entnommen (CML 2008)..

⁶ Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung der zugeordneten Sachbilanzergebnisse in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird [DIN EN ISO 14044]

2.2.7 Kritische Prüfung

Im Rahmen der Studie wurde für die vergleichende Ökobilanz eine begleitende externe kritische Prüfung nach ISO 14040 durchgeführt. Der Prüfungsausschuss bestand aus drei Gutachtern: Es handelte sich dabei um Dipl. Geogr. Florian Knappe (ifeu Heidelberg), Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell (Technische Universität Kaiserslautern) und Dipl. Ing. Claus Asam (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung).

Der abschließende Bericht der Gutachter befindet sich in Kapitel 7.

3 Systembeschreibung und Datengrundlage

3.1 Modellierung der Produktsysteme

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die Prozessmodellierung sowie die Datengrundlage für die drei untersuchten Decken-Typen beschrieben.

3.1.1 Alternative 1: Spannbeton-Fertigdecke

Abbildung 3-1 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzraumes für das Musterbürogebäude für die Alternative 1 Spannbeton-Fertigdecken.

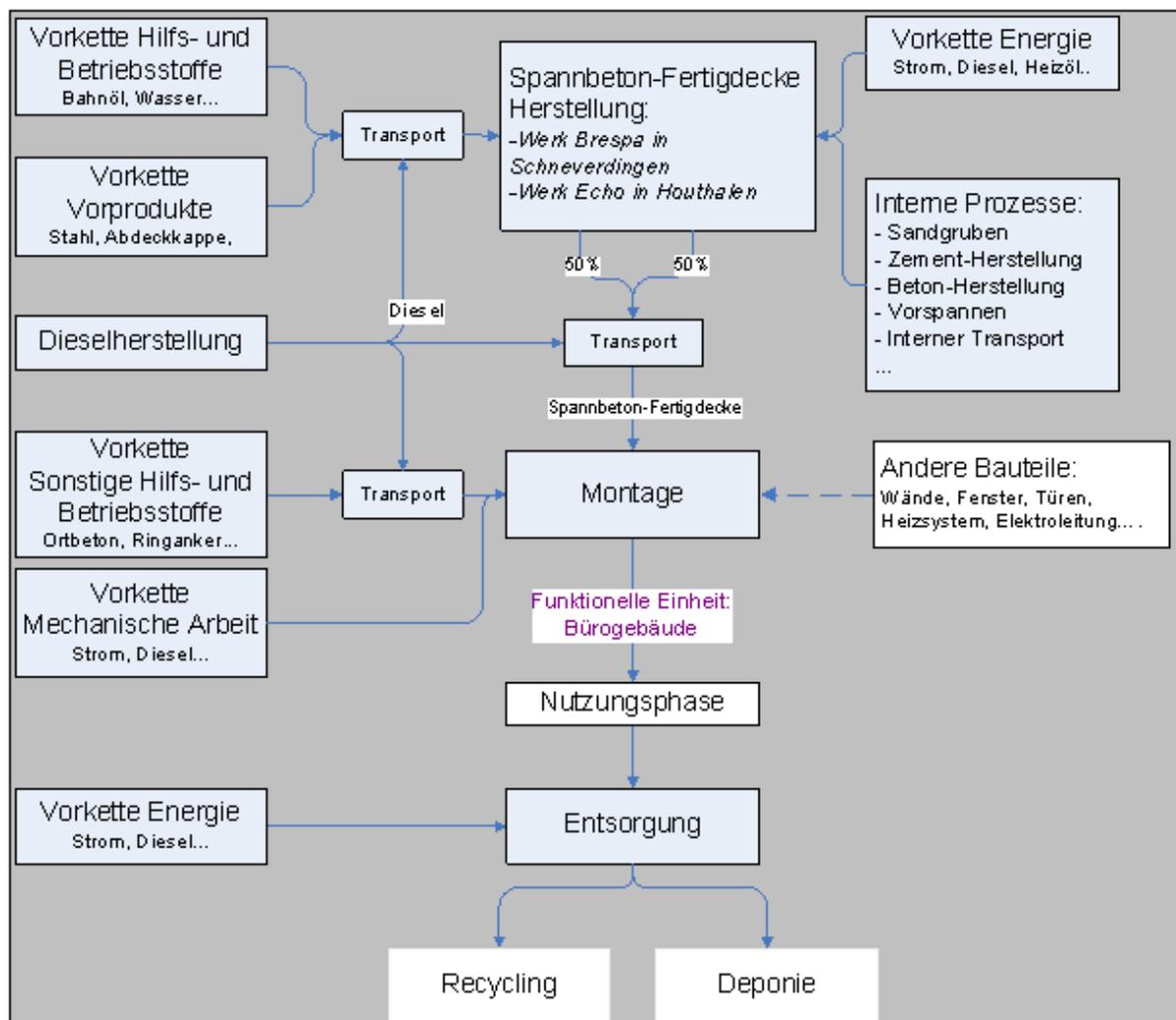


Abbildung 3-1 Überblick über die bei der Bilanzierung berücksichtigten Teilprozesse bei der Alternative Spannbeton-Fertigdecken. Die weiß hinterlegten Teilprozesse sind außerhalb des untersuchten Systems.

3.1.1.1 Herstellung der Spannbeton-Fertigdecken

Allgemeines

Die spezifischen Primärdaten der Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung wurden in zwei Werken von Mitgliedsunternehmen des Bundesverbandes für Spannbeton-Fertigdecken e.V. erhoben, um möglichst repräsentative Daten zugrunde legen zu können. Die zwei Werke sind BRESPA (DW Systembau) in Schneverdingen (Deutschland) und Echo in Houthalen (Belgien). Beide Hersteller produzieren derzeit etwa je 40 Prozent des Marktvolumens der Mitgliedsunternehmen des Bundesverbandes für Spannbeton-Fertigdecken e.V. an Spann-

beton-Fertigdecken. In der Modellierung wurden die Daten der beiden Werke mit je 50 Prozent gewichtet.

Abbildung 3-2 gibt einen Überblick über das Werksgelände von BRESPA in Schneverdingen, das im Rahmen der Untersuchung besucht werden konnte. Es können folgende Prozesse unterschieden werden: Sandgewinnung aus der werkseigenen Sandgrube; die Anmischung des Betons aus Zement, Wasser, Zuschlagstoffen etc.; die Spannbeton-Fertigdeckenherstellung selbst mit Extrudern und Gleitfertigern; die Wasseraufbereitung sowie interne Transporte und die Lagerung der fertigen Decken.

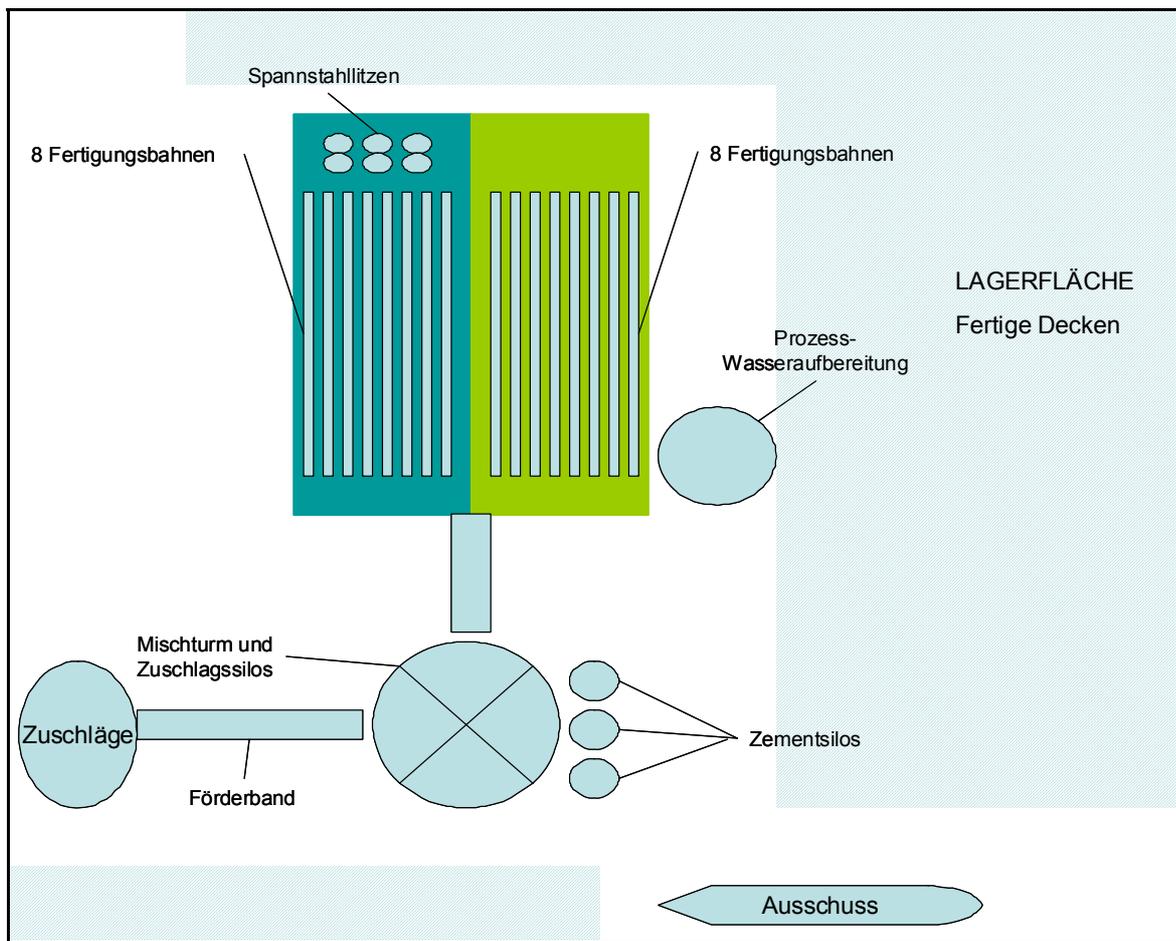


Abbildung 3-2 Überblick über das Werksgelände von BRESPA in Schneverdingen (Deutschland) (ohne Sandgrube, Verwaltungsgebäude und alte Halle)

Die Spannbeton-Fertigdecken werden mit Extrudern und Gleitfertigern auf beheizbaren Stahlbahnen als Hohlquerschnitte mit der erforderlichen Dicke und Spannbewehrung gefertigt. Nach der entsprechenden Aushärtungszeit des Betons werden die Deckenelemente auf die gewünschte Länge gesägt und auf dem Werksgelände zwischengelagert. Die Decken eines Bauvorhabens werden dann je nach Umfang in ein oder mehreren LKW-Ladungen auf die jeweilige Baustelle transportiert.

Die primären Rohdaten aus den Werken BRESPA und Echo sind im Anhang 8.3 dargestellt.

Betonherstellung

Beton bezeichnet einen wichtigen mineralischen Baustoff im Bauwesen. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass das Frischbetongemisch sehr leicht verarbeitet werden kann, durch die Erhärtung aber monolithische Bauteile entstehen. Nach DIN EN 206-1:2000 ist Beton wie folgt definiert: Beton ist ein Baustoff, der durch Mischen von Zement sowie grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser (sog. Zugabewasser), mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln (z.B. Verflüssiger) und Zusatzstoffen (z.B. Kalksteinmehl) erzeugt wird. Er erhält seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements.

Im Bauwesen werden eine ganze Reihe verschiedener Betone eingesetzt. Sie unterscheiden sich nach ihrer Zusammensetzung (z.B. eingesetzter Zement, Zuschlagstoffe, Wasser/Zementverhältnis) und werden nach ihren Eigenschaften in unterschiedliche Festigkeitsklassen, Expositionsklassen und Konsistenzklassen eingeteilt. Entsprechend ihrer Eigenschaften kann der Einsatzbereich unterschiedlich sein.

Der in Spannbeton-Fertigdecken verwendete Beton hat die Druckfestigkeitsklasse C45/55.

Der Beton für die Spannbeton-Fertigdecken wird jeweils werkseitig hergestellt. Die Ausgangsstoffe des Betons sind in Tabelle 3-1 gezeigt.

Tabelle 3-1 Betonausgangsstoffe für die Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung in den Werken BRESPA und Echo

Ausgangsstoffe	Werk BRESPA in Deutschland	Werk Echo in Belgien
Zement	Zement CEM I 52,5 R (angeliefert)	Zement CEM I 52.5 N (angeliefert)
	Zement CEM IIAS 42,5 R (angeliefert)	Zement CEM I 52.5 R (angeliefert)
Gesteinskörnung	Kies / Splitt, Korngröße 2/8 und 8/16 (angeliefert)	Splitt, Korngröße 2/12 (angeliefert)
	Sand (aus eigener Sandgrube)	Sand, Korngröße 0/2 (angeliefert)
	-	Kalkstein, Korngröße 2/6 und 6/14 (angeliefert)
Zusatzmittel	Betonverflüssiger	Betonverflüssiger
Anmachwasser	Grundwasser (eigene Förderung)	Grundwasser (eigene Förderung)

Das Werk BRESPA hat anders als das Werk Echo eine eigene Sandgrube. Nach dem Abbau wird der Sand mit LKW von der Sandgrube zum Beton-Misch-Silo transportiert. Der Dieselverbrauch des Sandabbaus ist bereits in der gesamten Verbrauchsmenge an Diesel enthalten. Im Gegensatz dazu bezieht das Werk Echo seinen Sand per Schiffstransport über den Hafen Antwerpen. Nach dem Umschlag im Hafen wird der Sand mit dem Binnenschiff weiter nach Lummen geliefert und von dort aus schließlich mit LKW ca. 25 km weiter ins Werk Echo gefahren.

Die übrigen Vorprodukte, Hilfs- und Betriebsstoffe werden von verschiedenen Lieferanten angeliefert. Welche Datenmodule jeweils für die Herstellung dieser Vorprodukte etc. verwendet wurden und wie die Transporte berücksichtigt wurden, ist in Anhang 8.4.1 dargestellt. Bei der Bilanzierung der Betonzusatzmittel wurde folgendermaßen verfahren: Basierend auf den Angaben des Sicherheitsdatenblatts wurden jeweils die wirksamen chemischen Bestandteile modelliert. Details zur Modellierung finden sich in Tabelle 8-14 im Anhang 8.3.3 und in Anhang 8.4.1.1.

Vorkette: Spannstahlilitzenherstellung

Für die Herstellung der Spannbeton-Fertigdecken werden kaltgezogene Spannstahlilitzen und –Drähte verwendet. Es handelt sich dabei um hochfeste Stähle. Im konkreten Fall haben die Spannstahlilitzen eine Zugfestigkeit von 1770 N/mm² (ST 1570/1770 N/mm² gemäß bauaufsichtlicher Zulassung). Deren 0,1 % – Dehngrenze fp0,1k nach DIN 1045-1:2008-08 beträgt 1.500 N/mm². Die Zugfestigkeit von Betonstählen bewegt sich im Unterschied dazu deutlich darunter im Bereich von 550 N/mm² (vgl. Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2 Überblick über die Zugfestigkeit verschiedener Stähle und die Bezeichnung von Spannstählen.

	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Zugfestigkeit und Streckgrenze der Spannstähle
Reines Eisen	~180	<p>St 1570 / 1770</p> <p>Spannstahl ← Zugfestigkeit in N/mm²</p>
Betonstähle	550	
Spannstähle	600-2.000	
Kaltgezogene Stähle	2.000-4.000	

Tabelle 3-3 zeigt die Anteile der Begleitelemente in den Spannstahlilitzen (Allgemeine bausaufsichtliche Zulassung, Z-12.3-6). Bei dem verwendeten Stahl handelt es sich um un- oder niedriglegierten Stahl.

Tabelle 3-3 Überblick über die Anteile der Begleitelemente in den Spannstahlilitzen. Quelle: Allgemeine bausaufsichtliche Zulassung, Z-12.3-6

Anteile der Begleitelemente in Massenprozent			
C	Si	Mn	P und S
0,70-0,90	0,15-0,30	0,60-0,90	≤0,035

Die für die Spannstahlilitzenherstellung erforderlichen Prozesse sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

Die wichtigsten Verfahren zur Stahlherstellung sind das Windfrischverfahren, Siemens-Martin-Verfahren, Sauerstoff-Ausblas-Verfahren und Elektro Stahl-Verfahren, wobei das Ausgangsmaterial der Spannstahlilitzen im Sauerstoffblas- oder Elektro Stahlverfahren hergestellt

wird (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Z-12.3-6). Anschließend werden der Stahl durch Kaltziehen zu Einzeldrähten verarbeitet und weiter zu Litzen verseilt. Um eine ausreichend niedrige Relaxation zu erhalten, erfährt die fertige Litze nochmals eine Wärmebehandlung. Abschließend werden die Spannstahllitzen in Ringe gewickelt und auf LKW zu den Werken BRESPA bzw. Echo transportiert.

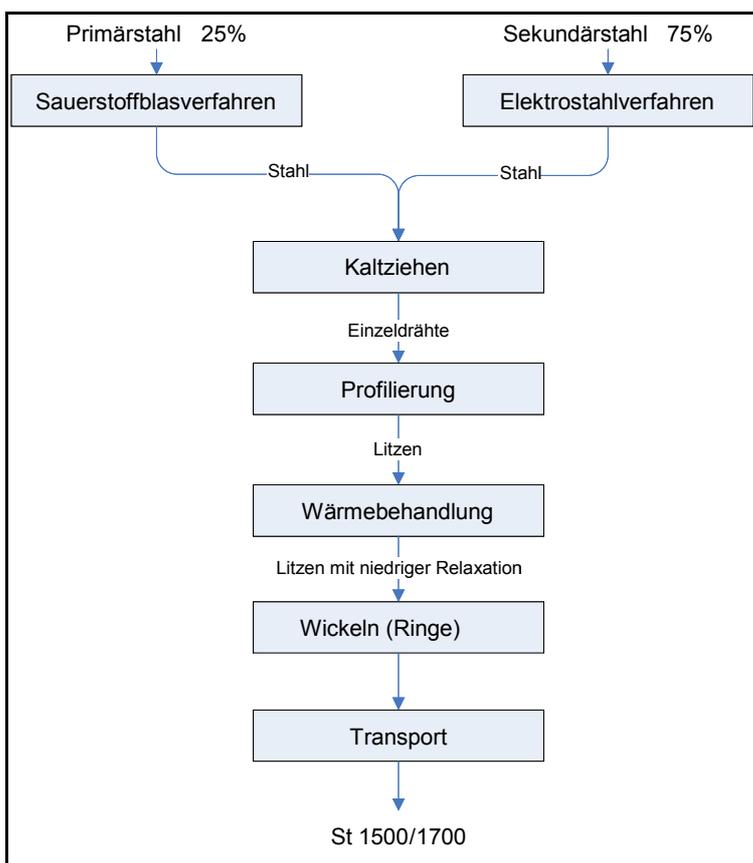


Abbildung 3-3 Flussdiagramm der Spannstahllitzen-Herstellung

Die verwendeten Datensätze wurden der Datenbank EcoInvent 2.0 entnommen und die entsprechenden Module sind im Anhang 8.4.1.2 aufgelistet. Der Anteil Primär- und Sekundärstahl auf der Inputseite lässt sich für die Spannstahllitzenherstellung nicht ermitteln, da keine entsprechenden Statistiken erhoben werden. Für Betonstahl dagegen, der in den beiden anderen Alternativen eingesetzt wird, ist klar, dass der Sekundäranteil innerhalb Deutschlands auf 100 % gesetzt werden kann. Ein Drittel des Betonstahls wird importiert. Für diesen Importanteil ist unklar, wie hoch der Sekundäranteil ist. Vor diesem Hintergrund wurde für alle drei Alternativen im Base Case angenommen, dass der Input aus 75 % Primär- und 25 % Sekundärstahl besteht⁷. In einer Sensitivitätsanalyse wurde dann überprüft,

⁷ Hauke (2009) hat für Baustahl in Deutschland Anteile von 75 % Elektrostahl und 25 % Oxygenstahl angegeben. Zwar handelt es sich dabei nicht speziell um Betonstahl, dennoch erscheint der Ansatz in

welchen Effekt es auf das Ergebnis hat, wenn man dies variiert: 100 % Primäranteil bei der Alternative Spannbeton-Fertigdecken und 100 % Sekundäranteil bei den beiden anderen Alternativen.

Zu beachten ist außerdem, dass der Prozess „Wickeln“ schon im Datensatz „Kaltziehen“ mitbilanziert ist. Der Teilprozess „Verlitzten“, d.h. das Verseilen mehrerer Einzeldrähte, konnte nicht modelliert werden, da keine entsprechenden Daten verfügbar waren. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss auf das Gesamtergebnis vernachlässigbar ist, da es sich um einen mechanischen und keinen thermischen Prozess handelt.



Abbildung 3-4 Spannstahlrollen im Werk BRESPA

Vorkette: Vorprodukte und Hilfs- bzw. Betriebsstoffe

Betrachtet werden weiterhin die Hilfs- bzw. Betriebsstoffe sowie die erforderlichen Vorprodukte (siehe Tabelle 3-4). Die Hohlräume der Spannbeton-Fertigdecken (siehe Abbildung 3-5) werden mit Abdeckkappen resp. Verschlusskappen verschlossen, damit beim Betonieren des Ringankers kein Vergussbeton eindringen kann. Diese Kappen wurden bei der Bilanzierung berücksichtigt. Darüber hinaus können die Hohlräume in den Deckenplatten für Elektro- oder Installations-Leerrohre genutzt werden. Letzteres wurde in der Bilanzierung aber nicht berücksichtigt

Ermangelung konkreter Zahlen und unter Ergänzung der in Kapitel 4.3.1 dargestellten Sensitivitätsanalyse als zielführend.

Tabelle 3-4 Überblick über die Betonzusatzmittel sowie Abdeckkappen, die in der Bilanzierung der Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung berücksichtigt wurden.

Werk BRESPA		Werk Echo	
Bezeichnung	Material /Inhaltstoffe	Bezeichnung	Material /Inhaltstoffe
Trennmittel/Schalöl	Addiment Trennmittel TR1	Bahnöl	VSE T75
-	-	Curing Compound	EH01
Abdeckkappen	Polypropylen	Abdeckkappen	Polypropylen
-	-	Betoclean	Naphtha (Erdöl)



Abbildung 3-5 Die fertig produzierten Spannbeton-Fertigdecken mit Abdeckkappen (orange) lagern auf dem Lagerplatz innerhalb des Werksgeländes bevor sie auf die Baustelle transportiert werden. Foto aufgenommen am 20.02.2008 bei der Werkbesichtigung in Schneverdingen

Transportprozesse der Vorprodukte sowie Hilfs- und Betriebsstoffe

Neben der Herstellung der Vorprodukte, werden auch die Transportprozesse der Vorprodukte sowie Hilfs- bzw. Betriebsstoffe vom jeweiligen Lieferanten in die Werke berücksichtigt. Mangels spezifischer Daten wurde generell angenommen, dass die Transporte der Vorprodukte auf der Hinfahrt eine Auslastung von 100 %, auf der Rückfahrt eine Auslastung von 0 % aufweisen. Dies entspricht einem Gesamtauslastungsgrad von 50 %. Die Transportprozesse sind in den Tabelle 8-22 (bezogen auf das Werk BRESPA) und Tabelle 8-23 (bezogen auf das Werk Echo) mit ihren jeweiligen Entfernungen und den verwendeten Datensätzen aufgelistet.

Energieverbrauch bei der Spannbeton-Fertigdeckenproduktion

Der Energieverbrauch im Werk konnte nur als gesamte Verbrauchsmenge erhoben werden. Diese umfasst alle Energieaufwendungen der Betriebsmaschinen, z.B. Gabelstapler, Radlader und Drahtziehmaschinen und der Produktionsprozesse. Ebenso umfasst die Verbrauchsmenge auch die Bahnheizung und die Heizung der Gebäude (Energieträger Heizöl). Beim Dieselverbrauch sind Dienstreisen enthalten. Der Verbrauch an Energieträgern und Strom in beiden Werken ist in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5 Energieinput in den Werken BRESPA, Schneverdingen und Echo, Houthalen bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m² Deckenfläche

Energie Input	Einheit	Schneverdingen	Houthalen
Strom	kWh	8.673,29	495,42
Diesel	kg	539,66	-
Heizöl	kg	1.876,34	493,56
Erdgas	kWh	-	1.654,97
Flüssiggas Propan	kg	8,45	-

Im Werk BRESPA in Schneverdingen wird Strom mit Mittelspannung bezogen und im Werk auf Niederspannung transformiert. Dementsprechend wird für die Strombereitstellung (Mittelspannung) der entsprechende generische Datensatz mit räumlichem Bezug Deutschland aus der Ökobilanz-Datenbank EcoInvent verwendet. Des Weiteren werden die direkten Emissionen während der Übertragung von Mittelspannung auf Niederspannung einbezogen. Die Referenzdaten stammen aus Frischknecht und Emmenegger (2003).

Aufgrund der zu Deutschland unterschiedlichen steuerrechtlichen Situation wird im Werk Echo in Belgien nicht zwischen Diesel und Heizöl unterschieden. In Tabelle 3-5 ist deshalb nur ein Wert für Heizöl angegeben. Dieser umfasst sowohl Heizöl für die Bahnheizung etc. als auch für den Einsatz als Kraftstoff in Fahrzeugen.

Eine tabellarische Übersicht der verwendeten Datensätze ist im Anhang 8.4.1.4 zusammengestellt.

Abwasser und Abfälle

Beide Werke sind mit einer internen Wasseraufbereitung ausgestattet, die eine weitgehende Kreislaufführung des Wassers ermöglicht. Das Prozesswasser wird im Werk BRESPA durch Zugabe von Flockungsmittel gereinigt und dem Prozess größtenteils wieder zugegeben. Modelliert wurden die Vorkette, die Herstellung und der Transport des Flockungsmittels sowie Energieaufwendungen durch Pumpen etc..

Über das Werk Echo lagen keine entsprechenden Informationen zur Wasseraufbereitung und dem Einsatz z.B. von Flockungsmitteln vor.

Der Ausschuss aus der Spannbeton-Fertigdeckenproduktion wird im Straßenbau (Werk BRESPA) bzw. in Recyclingwerken (Werk Echo) wiederverwendet (siehe Anhang 8.4.1.5). Anfallender Spannstahlschrott wird werkstofflich recycelt. In der Bilanz wird eine entsprechende Gutschrift erteilt. Das im Werk BRESPA anfallende Holz wird zu einem Anteil von 50 Prozent in einer Müllverbrennungsanlage verbrannt und zu 50 Prozent wiederverwendet. Auf der Grundlage des Strommixes Deutschland wird für den in der Müllverbrennungsanlage gewonnenen Strom eine Gutschrift erteilt.

Tabelle 3-6 Abfälle in den Werken Schneverdingen und Houthalen bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m² Deckenfläche

Bezeichnung	Einheit	Werk BRESPA	Werk Echo
Abfall Beton	m ³	-	9,41
Ausschuss Decken	m ³	6,86	4,58
Spannstahl (Schrott)	kg	1169	k.A.
Holz	kg	373	k.A.

Die prozessbedingten Emissionen des Werks Echo wurden bereits im Rahmen einer früheren Studie erhoben.

3.1.1.2 Transport der Spannbeton-Fertigdecken vom Werk zur Baustelle

Für den Transport der Spannbeton-Fertigdecken vom Werk auf die Baustelle wurden die für das Werk BRESPA sowie das Werk Echo ermittelten durchschnittlichen Transportdistanzen angenommen. Diese sind in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7 Modellierungsgrundlage der Transporte der Spannbeton-Fertigdecken vom Werk zur Baustelle.

Name	Entfernung (einfach)	Auslastungsgrad	Datenmodul	zeitlicher und geographischer Bezug	Quelle
Werk BRESPA	174 km ⁸	50 %	Betrieb, Lkw >32t, EURO3	2005 / RER	EcoInvent 2.0
Werk Echo	159 km ⁹				
Mittelwert	167 km				

Die Anlieferung vom Werk zur Baustelle umfasst nicht nur die Spannbeton-Fertigdecke selbst, sondern auch Zubehör (z.B. Ringanker und Stahlwechsel) sowie Hilfswerkzeuge (z.B. Holzträger und Trägerzange). Auf den LKW sind eine zur Geometrie der Fertigteile passende Trägerzange und Montagetraversen angebracht. Diese Hilfswerkzeuge werden nach der Montage wieder ins Werk mitgenommen. Es wird angenommen, dass die Auslastung 50 % beträgt. Um alle für die funktionelle Einheit erforderlichen Spannbeton-Fertigteile auf die Baustelle zu transportieren, werden 48 Fahrten (Hin- und Rückfahrt = 1 Fahrt) mit einem LKW (40t zulässiges Gesamtgewicht) benötigt.

3.1.1.3 Prozesse auf der Baustelle

Folgende Prozesse auf der Baustelle werden in der Bilanzierung berücksichtigt:

- Herstellung und Antransport der in Tabelle 3-8 genannten Komponenten
- Stromverbrauch: Ablade- und Umlagerungsprozesse der Deckenelemente mit Hilfe eines Krans und das Betonieren mittels Kran und Betonsilo.

⁸ Die gemittelte Entfernung stammt aus allen drei Werksstandorten von BRESPA (Standorte: Schneverdingen, Huissen und Chemnitz) und bezieht sich auf das Jahr 2007. E-Mail vom 28.05.2008 von Herrn H. Fach, DW Systembau.

⁹ Die gemittelte Entfernung stammt aus den Transporten zu den jeweiligen deutschen Baustellen. E-Mail vom 29.05.2008 von Herrn J. Bloemen, Echo.

Tabelle 3-8 Materieller Input auf der Baustelle bezogen auf die funktionelle Einheit von 3.558 m² Deckenfläche

Materielle Input auf der Baustelle	Menge	Einheit	Anmerkungen zur Modellierung
Transportbeton (für Fugenverguss und Ringbalken)	112.041	kg	wird mit Fahrmischer auf die Baustelle transportiert.
Stahl			
Ringanker	4.023	kg	wird zunächst ins Werk BRESPA und dann zusammen mit den Deckenelementen auf die Baustelle transportiert.
Stahlwechsel	83	kg	
Gummi: Deckenauflegerstreifen	55	kg	
Holz	60	kg	Randbohlen und Randschalungen. Annahme: 50-malige Wiederverwendung.

Herstellung und Transport des Ortbetons

Beim Vergussbeton für den Ringbalken und die Fugen der Spann beton-Fertigdecke handelt es sich um Transportbeton mit der Druckfestigkeitsklasse C20/25. Für die Herstellung des Transportbetons wurden die Daten aus der Veröffentlichung „Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton“ des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. von November 2007 verwendet.

Der Antransport erfolgt mit Fahrmischern, für die aber keine spezifischen Datenmodule verfügbar waren. Vor diesem Hintergrund wurden für die Modellierung folgende Annahmen getroffen: Die direkten Emissionsfaktoren während des Transports basieren auf einem LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 20-28 Tonnen. Allerdings verbraucht ein Fahrmischer wegen des Rührwerks mehr Diesel als ein normaler LKW und hat 4 Achsen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 32 Tonnen. Dies wurde entsprechend der nachfolgenden Tabelle in der Modellierung berücksichtigt.

Tabelle 3-9 Vergleich des Dieserverbrauchs von LKW und Fahrmischer

Transportmittel	Dieserverbrauch	Einheit	Quelle
LKW, zul. Gesamtgewicht 28 t	0,246	kg/km	Ecolvent 2.0
Fahrmischer	0,4032	kg/km	Dieserverbrauch des Fahrmischers (inkl. aller betonspezifischen Prozessen wie z.B. Drehen) für 100 km: 48 Liter. Mündl. Mitteilung Dr. Olaf Aßbrock, Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. vom 29.09.2009

Entsprechend den Angaben des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) in seinem Jahresbericht 2006 wird angenommen, dass die Transportentfernung zwischen Transportbetonwerk und Baustelle durchschnittlich 20 km beträgt. Es wird weiter angenommen, dass das Fahrzeug bei der Hinfahrt 100 Prozent und bei der Rückfahrt

0 Prozent ausgelastet ist, im Durchschnitt also eine Auslastung von 50 Prozent angenommen werden kann.

Schalung

Vor dem Betonieren des Ringankers müssen Randbohlen angebracht werden. Diese können grundsätzlich aus Holz, Kunststoff, Metall oder Verbundmaterialien bestehen und mehrfach verwendet werden (i.d.R. zwischen 2 und 50 Mal, teilweise aber auch bis zu 100-500 Mal)¹⁰.

Für die Berechnungen in der hier vorliegenden Studie wurde generell – für alle drei Alternativen und alle Schalungen - angenommen, dass sie aus Holz sind und 50 Mal wiederverwendet werden.

Stromverbrauch

Berücksichtigt wird der Stromverbrauch eines Krans für die Verlegung der Deckenelemente und der Stromverbrauch einer Betonpumpe für das Betonieren.

Die max. Traglast des zugrunde gelegten Krans beträgt 80 Tonnen. Als passender Referenz-Kran wurde der LTM 1080/1 mit 6-Zylinder-Turbodiesel Kranmotor von der Firma Liebherr angenommen. Der für die Verlegung der Deckenelemente erforderliche Stromverbrauch wurde wie folgt bestimmt (Tabelle 3-10):

Tabelle 3-10 Ermittlung der Stromverbrauch des Kranes für Verlegung der Deckenelemente bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m² Deckenfläche.

Parameter	Menge	Erläuterungen und Quelle
Kran max. Traglast	80 Tonnen	Werk BRESPA
Leistung des Referenz-Kranes	320 kW	Angaben der Firma Liebherr zum Kranmodell LTM 1080/1
Durchschnittl. Montagezeit	60 m ² /Std.	Technische Broschüre DW Systembau (2005)
Gesamtmontagezeit	59 Std.	Verlegung: 59 Stunden, Leistungsaufnahme 10 % der maximalen Leistung.
Gesamtstromverbrauch	2.528 kWh	Annahme Anfahrt./Rückfahrt: 4 Stunden, Leistungsaufnahme 50 % der maximalen Leistung: Stromverbrauch: 640 kWh Verlegung: 59 Stunden, Leistungsaufnahme 10 % der maximalen Leistung: Stromverbrauch: 1.888 kWh LPM GmbH

Dabei ist zu beachten, dass eine genaue Erfassung der Kranstundenansätze schwierig ist. Denn die Leistung ist von vielen Faktoren abhängig, beispielsweise sind die Betriebszeiten durch unterschiedliche Wegstrecken und Schwenkwinkel oder überlappenden Tätigkeiten eines Kranes variabel. Dennoch werden die Angaben von DW Systembau zum durchschnitt-

¹⁰ Siehe das Zement-Merkblatt Hochbau der Bauberatung Zement „Schalung für Beton“ o.J.

lichen Aufwand und der typischen Traglast des Krans sowie den anhand eines Referenzkrans ermittelten Verbrauchsdaten als belastbar eingeschätzt.

Das Betonieren erfolgt mit Hilfe eines Betonsilos, das mit einem Kran an die entsprechende Stelle gehoben wird. Die Betonierleistung beträgt 100 m² in 45 Minuten. Tabelle 3-11 zeigt die Berechnung des Stromverbrauches für das Betonieren.

Tabelle 3-11 Ermittlung des Stromverbrauches für den Kran beim Betonieren mit Betonsilo.

Parameter	Menge	Erläuterungen und Quelle
Volumen des Ortbetons	49,32 m ³	Werk BRESPA, Email vom 21.01.2009
Leistung Referenzkran	320 kW	Angaben der Firma Liebherr zum Kranmodell LTM 1080/1
Betonierleistung	133 m ² /Std.	LPM GmbH
Zeitaufwand	26,52 Std.	Leistungsaufnahme: 10 % der maximalen Leistung des Betonsilos.
Gesamtstromverbrauch	848,64 kWh	Betonieren: 26,52 Stunden, Leistungsaufnahme 10 % der maximalen Leistung: Stromverbrauch: 848,64 kWh LPM GmbH

Herstellung des Ortbetons

Beim Ortbeton handelt es sich um Transportbeton mit der Druckfestigkeitsklasse C20/25.

3.1.2 Alternative 2: Halbfertigteildecke

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzraumes für das Musterbürogebäude für die Alternative 2 Halbfertigteildecken.

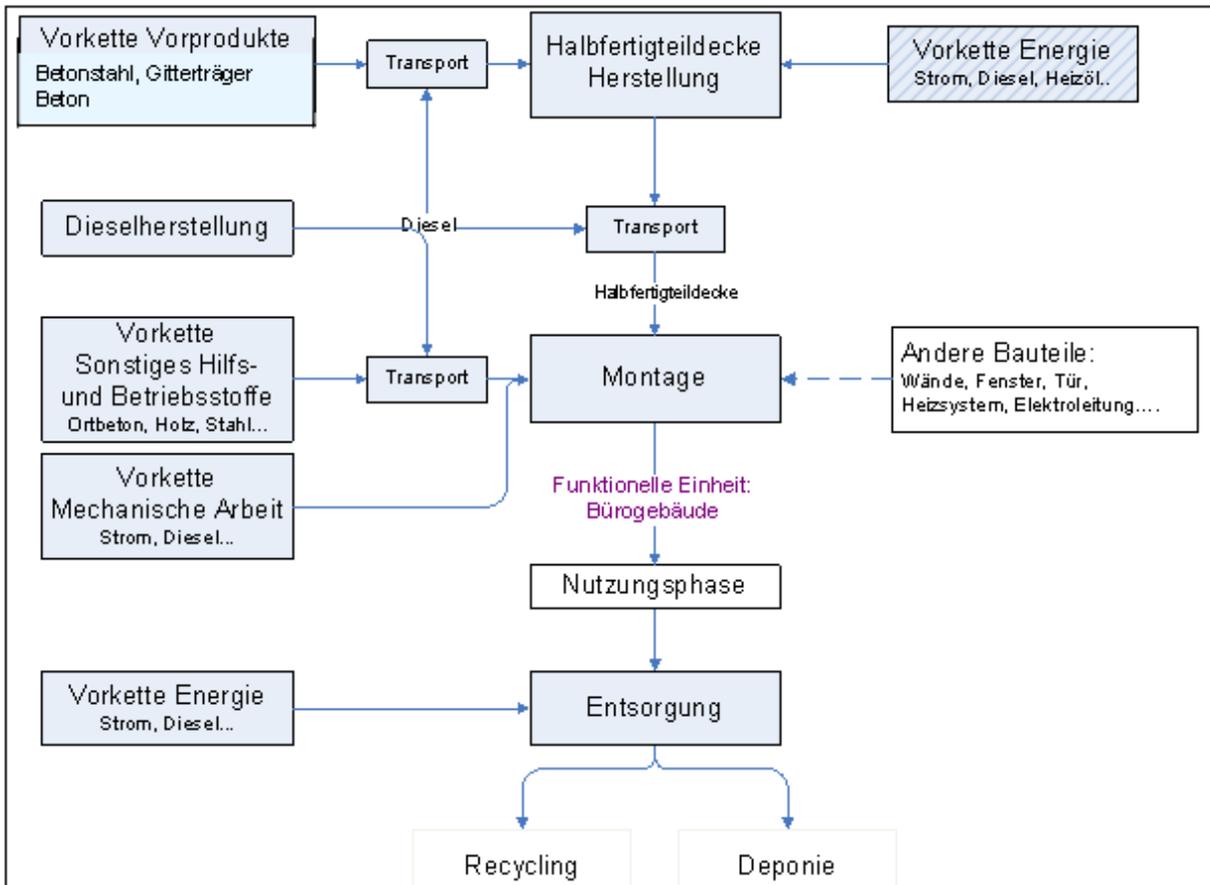


Abbildung 3-6 Überblick über die bei der Bilanzierung berücksichtigten Teilprozesse bei der Alternative 2 Halbfertigteildecken. Die weiß hinterlegten Teilprozesse sind außerhalb des untersuchten Systems.

3.1.2.1 Herstellung der Halbfertigteile

Für die Herstellung von Halbfertigteildecken werden Halbfertigteile eingesetzt, die in der hier vorliegenden Studie 7 cm Dicke aufweisen und bereits mit einem Teil des für die fertige Decke erforderlichen Bewehrungsstahls versehen sind (siehe nachfolgende Abbildung 3-7).

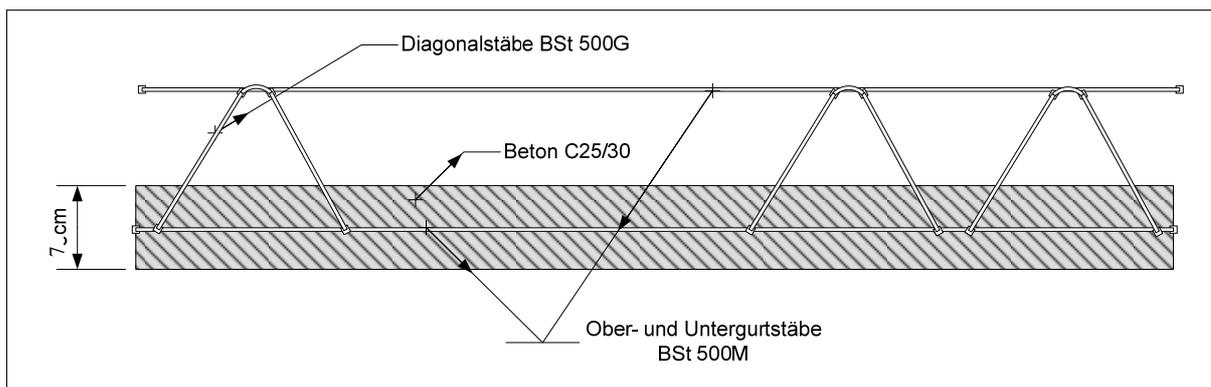


Abbildung 3-7 Ansicht eines Halbfertigteils (vereinfachte eigene Darstellung)

Im Rahmen der Studie wurde intensiv versucht, von verschiedenen Herstellern Primärdaten für die Herstellung dieser Halbfertigteile zu bekommen. Leider waren diese Versuche nicht erfolgreich. Darüber hinaus sind weder in der Literatur noch in einschlägigen Ökobilanzdatenbanken entsprechende Datenmodule verfügbar.

Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, dass in einer ersten Näherung für die Herstellung der Halbfertigteile der gleiche Energieverbrauch sowie Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen wie bei der Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung angenommen wird. Die relevante Bezugsgröße für die Fertigteilproduktion ist Volumen Beton in der Decke. Die Vorketten wurden selbstverständlich unter Berücksichtigung der im Halbfertigteil verwendeten Beton- und Stahlmengen und -Qualitäten berechnet. Dieses Vorgehen ist bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend zu berücksichtigen.

Die Halbfertigteile bestehen aus Beton der Festigkeitsklasse C25/30, in dem Betonstahl BSt. 500/550 sowie geschweißte Gitterträger verlegt sind.

Herstellung des Betonstahls für die Armierung der Halbfertigteile

Auf Details der Stahlherstellung wurde bereits in Kapitel 3.1.1.1 näher eingegangen. Abbildung 3-8 zeigt ein Flussdiagramm mit den verschiedenen berücksichtigten Teilprozessen.

Die detaillierten Datensätze befinden sich im Anhang 8.5.1.2.

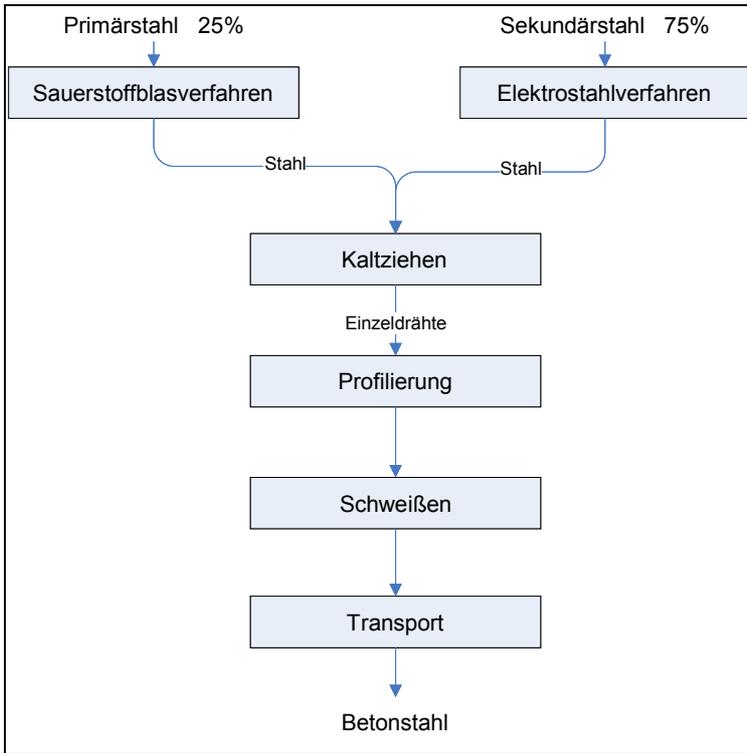


Abbildung 3-8 Flussdiagramm der Betonstahl-Herstellung

3.1.2.2 Transport der Halbfertigteile vom Werk zur Baustelle

Da keine spezifischen Hersteller-Daten für die Halbfertigteilproduktion verfügbar waren, konnte auch die durchschnittliche Transportentfernung zwischen Halbfertigteilwerk und Baustelle nicht erhoben werden. Da es deutlich mehr Werksstandorte gibt, an denen Halbfertigteile produziert werden, als solche, an denen Spannbeton-Fertigdecken hergestellt werden, ist davon auszugehen, dass die durchschnittliche Transportentfernung zur Baustelle für Alternative 2 kürzer ist als für Alternative 1 angenommen (einfache Entfernung: 167 km). Allerdings auch wieder weiter als zwischen Transportbetonwerk und Baustelle (20 km).

Für die Berechnung wird deshalb eine mittlere Entfernung von 83,5 km angenommen.

Für den Transport der Halbfertigteile auf die Baustelle sind 26 Fahrten notwendig. Der Transport erfolgt mittels LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 32 Tonnen und einer Auslastung von 50 %.

Tabelle 3-12 Überblick über die der Berechnung zugrunde gelegten Transportparameter der Halbfertigteile auf die Baustelle.

Anzahl der Fahrten	Entfernung (Einfach)	Auslastungsgrad	Datensätze	Zeitbezug/ Ortbezug	Quelle der Datensätze
26	83,5 km	50 %	Betrieb, Lkw>32t, EURO3	2005 / RER	EcoInvent 2.0

3.1.2.3 Prozesse auf der Baustelle

Auf der Baustelle werden die folgenden Prozesse betrachtet:

- Herstellung und Antransport der in Tabelle 3-13 genannten Komponenten
- Stromverbrauch: Ablade- und Umlagerungsprozesse der Halbfertigteile mit Hilfe eines Krans und das Betonieren Pumpe.

Tabelle 3-13 Materieller Input für Halbfertigteildecke auf der Baustelle bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m² Deckenfläche:

Materielle Input auf der Baustelle	Menge	Einheit	Anmerkungen zur Modellierung
Transportbeton C25/30	1.502.877	kg	Wird mit Fahrmischer auf die Baustelle transportiert.
Betonstahl	47.691	kg	
Trennmittel	5,4	kg	Handelsname: Relax B2; biologisch abbaubar Dichte: ca.0,88kg/dm ³ Verbrauch: bei unbehandelter Holzschalung: ca. 40ml/m ²
Holz	362	kg	Für Deckenrandschalung und Stützen. Wird 50 Mal wiederverwendet.
Fugenmörtel	7.956	kg	Handelsname: ARDUMUR 828 auf Gips- und Kunststoffbasis. Die Berücksichtigung des Fugenmörtels stellt eine geringfügige, aber nicht ergebnisrelevante Abweichung vom Vorgehen bei den beiden anderen Decken-Alternativen dar.

Schalung

Vor dem Betonieren müssen Deckenrandschalungen und Joche angebracht werden. Diese können grundsätzlich aus Holz, Kunststoff, Metall oder Verbundmaterialien bestehen und mehrfach verwendet werden (i.d.R. zwischen 2 und 50 Mal, teilweise aber auch bis zu 100-500 Mal)¹¹.

Für die Berechnungen in der hier vorliegenden Studie wurde generell – für alle drei Alternativen und alle verwendeten Schalungen - angenommen, dass sie aus Holz sind und 50 Mal wiederverwendet werden. Für Gerüststützen, die in der Regel aus Metall sind, lagen keine Angaben vor. Diese konnten deshalb nicht berücksichtigt werden.

¹¹ Siehe das Zement-Merkblatt Hochbau der Bauberatung Zement „Schalung für Beton“ o.J.

Herstellung und Transport des Ortbetons

Sind die Halbfertigteile eingebracht, werden Randschalungen und Stützen angebracht, die erforderlichen Bewehrungen aus Betonstahl hinzugefügt sowie eine Schicht von 18 cm Ortbeton aufgebracht.

Beim Ortbeton handelt es sich um Transportbeton mit der Druckfestigkeitsklasse C25/30. Für die Herstellung des Transportbetons wurden die Daten aus der Veröffentlichung „Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton“ des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. von November 2007 verwendet.

Der Transportbeton wird mit Fahrmischer auf die Baustelle transportiert. Zur Berechnung siehe Kapitel 3.1.1.3.

Stromverbrauch

Berücksichtigt wird der Stromverbrauch eines Kranes für die Verlegung der Halbfertigteile und für die Betonförderung mittels Pumpe. Grundsätzlich erfolgt die Berechnung nach dem gleichen Prinzip wie in Kapitel 3.1.1.3 für die Spannbeton-Fertigdecke dargestellt.

Tabelle 3-14 Ermittlung des Stromverbrauchs des Krans für die Verlegung der Halbfertigteile

Parameter	Menge	Quelle
Kran max. Traglast	80 Tonnen	Werk BRESPA
Leistung des Referenz-Kranes	320 kW	Firma Liebherr: LTM 1080/1
Gesamte Montagezeit	32 Std.	Email Herr Fach vom 21.01.2009
Gesamter Stromverbrauch	1.984 kWh	Annahme Anfahrt./Rückfahrt: 4 Stunden, Leistungsaufnahme 50 % der maximalen Leistung: Stromverbrauch: 640 kWh Verlegung: 32 Stunden, Leistungsaufnahme 10 % der maximalen Leistung: Stromverbrauch: 1024 kWh Materialverteilung (z.B. Stützen): 10 Stunden, 10 % Leistungsaufnahme der maximalen Leistungsaufnahme: 320 kWh LPM GmbH

Tabelle 3-15 Ermittlung des Stromverbrauchs der Pumpe für das Betonieren bei der Halbfertigteildecke

Parameter	Menge	Quelle
Die Volumen des Ortbetons	640,30 m ³	Deisen GmbH
Pumpenleistung	50 m ³ /Std.	
Betonierleistung	150 m ² /Std.	LPM GmbH
Zeitaufwand	23,5 Std.	
Leistung einer Referenz-Betonpumpe	90 kW	Betonpumpe bei 50 bar Betondruck (Bisani 2005)
Der gesamte Stromverbrauch	2.115 kWh	Betonieren: 23,5 Stunden bei voller Leistungsaufnahme der Betonpumpe, Stromverbrauch: 2115 kWh

3.1.3 Alternative 3: Ortbetondecken

Abbildung 3-9 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzraumes für das Musterbürogebäude für die Alternative 3 Ortbetondecke.

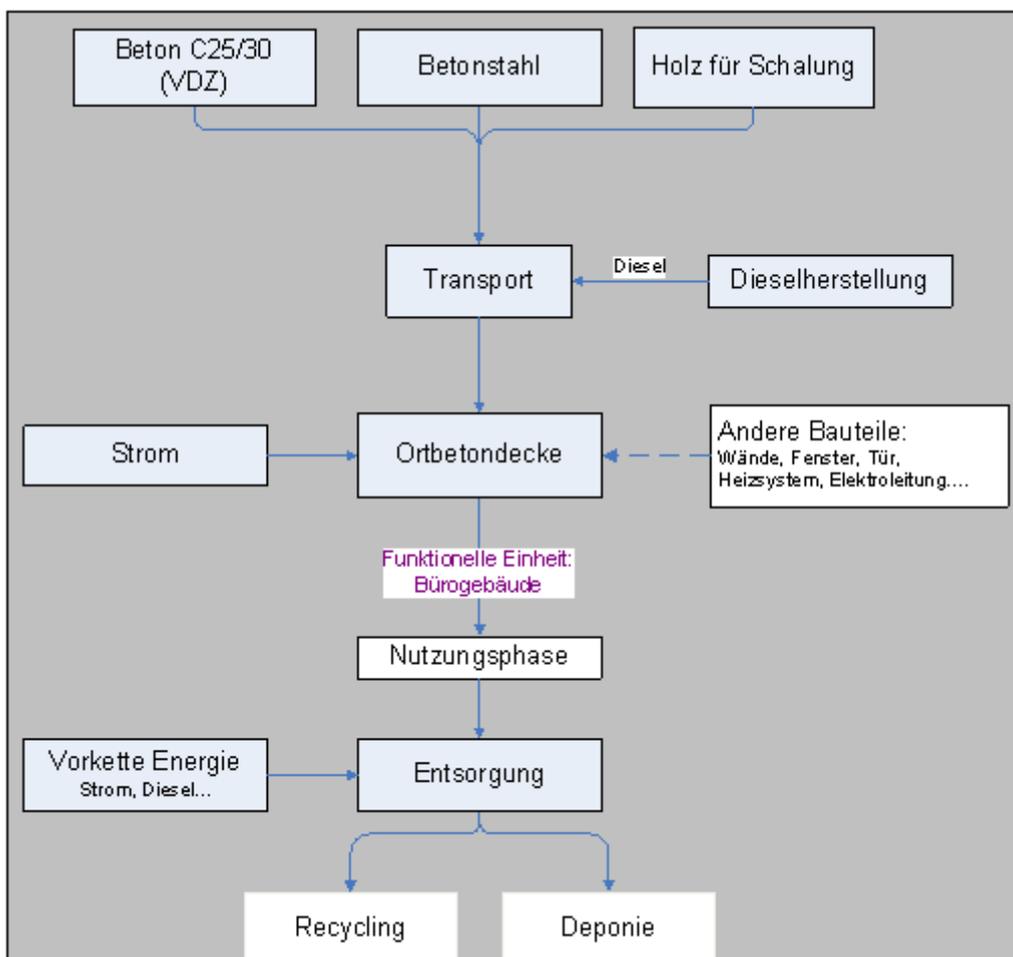


Abbildung 3-9 Überblick über die bei der Bilanzierung berücksichtigten Teilprozesse bei der Alternative 3 Ortbetondecke. Die weiß hinterlegten Teilprozesse sind außerhalb des untersuchten Systems.

3.1.3.1 Prozesse auf der Baustelle

Ortbetondecken werden aus Transportbeton der Druckfestigkeitsklasse C25/30 sowie Betonstahl 500S in verschiedenen Durchmessern und Betonstahlmatten 500M auf der Baustelle hergestellt. Für die folgenden Prozesse lagen keine spezifischen Daten vor:

- Trennmittel: es wurde das gleiche Schalöl wie bei der Halbfertigteildecke angenommen.
- Betonieren: es wurde gleichen Annahmen zu Pumpenleistung etc. wie für die Halbfertigteildecke angenommen).

- Biegen und Schneiden des Betonstahls auf der Baustelle, außerdem Betrieb Rüttelmaschine für die Festigung des Betons.

Betrachtet werden auf der Baustelle die folgenden Prozesse:

- Herstellung und Antransport der in Tabelle 3-16 genannten Komponenten
- Stromverbrauch: Betonieren mit Pumpe.

Tabelle 3-16 Materieller Input für die Ortbetondecke auf der Baustelle bezogen auf die funktionelle Einheit von 3558 m² Deckenfläche

Materieller Input auf der Baustelle	Menge	Einheit	Anmerkungen zur Modellierung
Transportbeton C25/30	2.087.329	kg	wird mit Fahrmischer auf der Baustelle transportiert.
Betonstahl	64.302	kg	
Schalöl	125,24	kg	Annahme: Relax B2 (wie bei der Halbfertigteildecke)
Holz	167	kg	1. Deckenschalung: 3.368 m ² 2. Deckenrandschalung: 189,2 m ² Wiederverwendung: 50 Mal

Herstellung und Transport des Ortbetons

Beim Ortbeton handelt es sich um Transportbeton mit der Druckfestigkeitsklasse C25/30. Für die Herstellung des Transportbetons wurden die Daten aus der Veröffentlichung „Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton“ des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. von November 2007 verwendet.

Der Transportbeton wird mit Fahrmischer auf die Baustelle transportiert. Zur Berechnung siehe Kapitel 3.1.1.3.

Herstellung des Betonstahls

Die Modellierung erfolgt in gleicher Weise wie bei der Halbfertigteildecke. Das Schweißen der Betonstahlmatten konnte mangels Daten nicht berücksichtigt werden.

Schalung

Vor dem Betonieren müssen Decken- und Randschalungen sowie Stützen angebracht werden. Diese können grundsätzlich aus Holz, Kunststoff, Metall oder Verbundmaterialien bestehen und mehrfach verwendet werden (i.d.R. zwischen 2 und 50 Mal, teilweise aber auch bis zu 100-500 Mal)¹².

¹² Siehe das Zement-Merkblatt Hochbau der Bauberatung Zement „Schalung für Beton“ o.J.

Für die Berechnungen in der hier vorliegenden Studie wurde generell – für alle drei Alternativen und Schalungen – angenommen, dass sie 50 Mal wiederverwendet werden. Daten zu Gerüststützen, die in der Regel aus Metall sind, lagen nicht vor.

Stromverbrauch

Die Betonförderung erfolgt auf der Baustelle mit einer Betonpumpe, deren Pumpenleistung in der gleichen Größenordnung wie bei der Halbfertigteildecke liegt. Allerdings muss mehr Beton aufgebracht werden. Tabelle 3-17 zeigt die Berechnung des Stromverbrauches der Betonpumpe für das Betonieren.

Tabelle 3-17 Ermittlung des Stromverbrauchs der Betonpumpe für das Betonieren bei der Ortbetondecke

Parameter	Menge	Quelle
Die Volumen des Ortbetons	869,3 m ³	Deisen GmbH
Pumpenleistung ab	50 m ³ /Std.	
Betonierleistung	150 m ² /Std.	LPM GmbH
Zeitaufwand	23,5 Std.	
Leistung einer Referenz-Betonpumpe	90 kW	Betonpumpe bei 50 bar Betondruck (Bisani 2005)
Der gesamte Stromverbrauch	2.115 kWh	Betonieren: 23,5 Stunden bei voller Leistungsaufnahme der Betonpumpe, Stromverbrauch: 2115 kWh

3.2 Modellierung der Entsorgung der drei untersuchten Decken-Alternativen

Aufgrund der angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren wie sie über die funktionelle Einheit definiert ist, ist es sehr schwierig, Vorhersagen darüber zu treffen, wie das End-of-Life des Musterbürogebäudes im Allgemeinen und der darin eingebauten Decken im Speziellen aussieht. Die Spannweite der denkbaren Prozesse liegt dabei – nach heutigem Stand der Technik – zwischen dem selektiven Rückbau des Gebäudes, bei dem die Deckenelemente der Spannbeton-Fertigdecke einzeln herausgenommen und in einem anderen Bauvorhaben eingesetzt werden könnten. Alternative ist der Komplettabbruch mit der Abrissbirne, bei dem allenfalls ein werkstoffliches Recycling mit Zerkleinerung und Trennung z.B. von mineralischen und metallischen Bestandteilen aber keine Weiterverwendung stattfinden kann.

Aufgrund des heute bei derartigen Bürogebäuden üblichen Vorgehens wird in der hier vorliegenden Studie angenommen, dass ein Abriss ohne Weiterverwendung von Bauteilen stattfindet. Zukünftig könnte sich dies aber ändern, wenn sich durch steigende Rohstoffpreise die Weiterverwendung von Bauteilen als wirtschaftlich interessant darstellt.

Für die Modellierung bedeutet dies Folgendes:

- Berücksichtigung der Prozesse beim Abriss des Gebäudes.
- Berücksichtigung der Recyclingprozesse (Zerkleinerung, Klassierung etc.)
- Berücksichtigung der Gutschriften aus der Einsparung primärer Rohstoffe (mineralisch und metallisch)

Die nachfolgende Tabelle zeigt die verwendeten Datenmodule im Überblick.

Berücksichtigt werden der Energieaufwand beim Abriss des Gebäudes und der Stromverbrauch durch einen herkömmlichen mechanischen Prallbrecher für die Zerkleinerung des Betonbruches. Ein Teil des Bauschutts wird deponiert. Stahlschrott wurde vereinfachend bei allen drei Alternativen so modelliert, dass 100 % dem Recycling zugeführt wird. Eine Gutschrift wird jeweils für den Anteil an Primärstahl erteilt, der im System verwendet und recycelt wird. Im Base Case sind das 25 %. Für den Anteil an Sekundärstahl, der in das System fließt, wird – gemäß der gängigen Praxis in Ökobilanzen – keine Gutschrift erteilt, da es sich um Closed-Loop-Recycling handelt.

Tabelle 3-18 Ermittlung des Energieverbrauches beim Abriss des Gebäudes

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Datenquelle
Dieserverbrauch beim Abriss eines Gebäudes	0,3	kwh/m ³	EcoInvent 2.0 Report No.7 life cycle inventories of building products
Stromverbrauch beim Abriss eines Gebäudes	10	MJ/m ³	EcoInvent 2.0 Report No.7 life cycle inventories of building products
Höhe des Musterbürogebäudes	14,2	m	Leanoffice (Heilmann 2008)
Grundfläche des Musterbürogebäudes	927	m ²	Angenommen wie die Fläche von 3. OG des Mustergebäudes
Volumen des Musterbürogebäudes	13.163	m ³	
Gesamt-Dieserverbrauch beim Abriss des Gebäudes	3.949	kWh	Bezogen auf gesamtes Gebäude
Gesamt-Stromverbrauch beim Abriss des Gebäudes	131.634	MJ	Bezogen auf gesamtes Gebäude
Stromverbrauch bei der Zerkleinerung von Betonbruch	1,5	kWh/t Betonbruch	Doka 2000
Gesamt-Stromverbrauch bei der Zerkleinerung des Betonbruches (Spannbeton-Fertigdecke)	1.671	kWh	Berechnet entsprechend der in Alternative 1 Spannbeton-Fertigdecke enthaltenen Betonmenge
Gesamt-Stromverbrauch bei der Zerkleinerung des Betonbruches (Halbfertigteildecke)	3.131	kWh	Berechnet entsprechend der in Alternative 2 Halbfertigteildecke enthaltenen Betonmenge
Gesamt-Stromverbrauch bei der Zerkleinerung des Betonbruches (Ortbetondecke)	3.131	kWh	Berechnet entsprechend der in Alternative 3 Ortbetondecke enthaltenen Betonmenge

4 Wirkungsabschätzung und Ergebnisdarstellung

Die Sachbilanzergebnisse sind teilweise im Anhang dargestellt, der überwiegende Teil ist jedoch als elektronischer Anhang im Excel-Format verfügbar.

Nachfolgend werden die Wirkungsbilanz-Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs dargestellt. Zunächst werden dabei die Gesamtergebnisse gezeigt, danach werden die Ergebnisse der Beitragsanalysen dargestellt.

4.1 Gesamtergebnisse

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-5) sind die Gesamtergebnisse der drei verglichenen Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke für den kumulierten Primärenergieverbrauch (KEA), sowie die Wirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential und Ozonbildungspotential (POCP) dargestellt.

Insgesamt fallen die Ergebnisse für die Alternative Halbfertigteildecke am höchsten aus, weisen also für alle betrachteten Wirkungskategorien die größten Umweltauswirkungen auf.

Die Alternative Spannbeton-Fertigdecke hat signifikant geringere Umweltauswirkungen als die Alternative Halbfertigteildecke. Eine Ausnahme stellt die Wirkungskategorie Eutrophierungspotential dar, für die das Ergebnis der Halbfertigteildecke leicht besser ausfällt.

Die Ortbetondecke weist für die Wirkungskategorien Versauerungspotential und Eutrophierungspotential die signifikant geringsten Umweltauswirkungen auf. Für die Wirkungskategorie Photooxidantienpotential sind die Auswirkungen gegenüber der Spannbeton-Fertigdecke ebenfalls geringer, allerdings ist der Unterschied nicht signifikant.

Die Ergebnisse wurden zur Veranschaulichung der Größenordnung per Capita und pro Haushalt normiert, wobei sich die Normierung per Capita an den jeweiligen jährlichen Gesamtemissionen bzw. -auswirkungen in Deutschland orientiert, die auf die Bevölkerung umgelegt wurden. Die Normierung pro Haushalt orientiert sich an den jährlichen Auswirkungen aus dem Konsums eines statistischen Durchschnittshaushalts in Deutschland (vgl. dazu Tabelle 8-40 und

Tabelle 8-41 im Anhang sowie Quack und Rüdener 2007).

Der **kumulierte Primärenergieaufwand** (siehe Abbildung 4-1) für die funktionelle Einheit beträgt 1.890 GJ für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke, 2.665 GJ für die Alternative Halbfertigteildecke und 2.147 GJ für die Alternative Ortbetondecke. Normiert auf den gesamten jährlichen Primärenergieverbrauch in Deutschland ergibt sich daraus ein Äquivalenzwert von 11 bis 16 Personen (Normierung per Capita) bzw. 8 bis 12 Haushalten (Normierung per Haushalt) (Zur Berechnung vgl. Tabelle 8-40 und Tabelle 8-41).

Der kumulierte Primärenergieaufwand für die Halbfertigteildecke ist um 41 Prozent höher als derjenige für die Spannbeton-Fertigdecke, sie benötigt damit etwa ein Drittel mehr Primärenergie als die Spannbeton-Fertigdecke. Das Ergebnis für die Ortbetondecke liegt 14 Prozent höher als das der Spannbeton-Fertigdecke. Aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsprozesse verteilen sich die einzelnen Teilbeiträge unterschiedlich auf die Prozesse im jeweiligen Werk bzw. auf die Baustelle. Bei der Spannbeton-Fertigdecke resultieren die größten Beiträge aus der Herstellung des Fertigteils einschließlich der jeweiligen Vorketten (z.B. Zementherstellung) und – zu einem sehr viel geringeren Anteil – aus den Transporten zwischen Werk und Baustelle. Bei den anderen beiden Alternativen liegen die größten Beiträge bei den Prozessen auf der Baustelle einschließlich der jeweiligen Vorketten (Herstellung Betonstahl und Transportbeton).

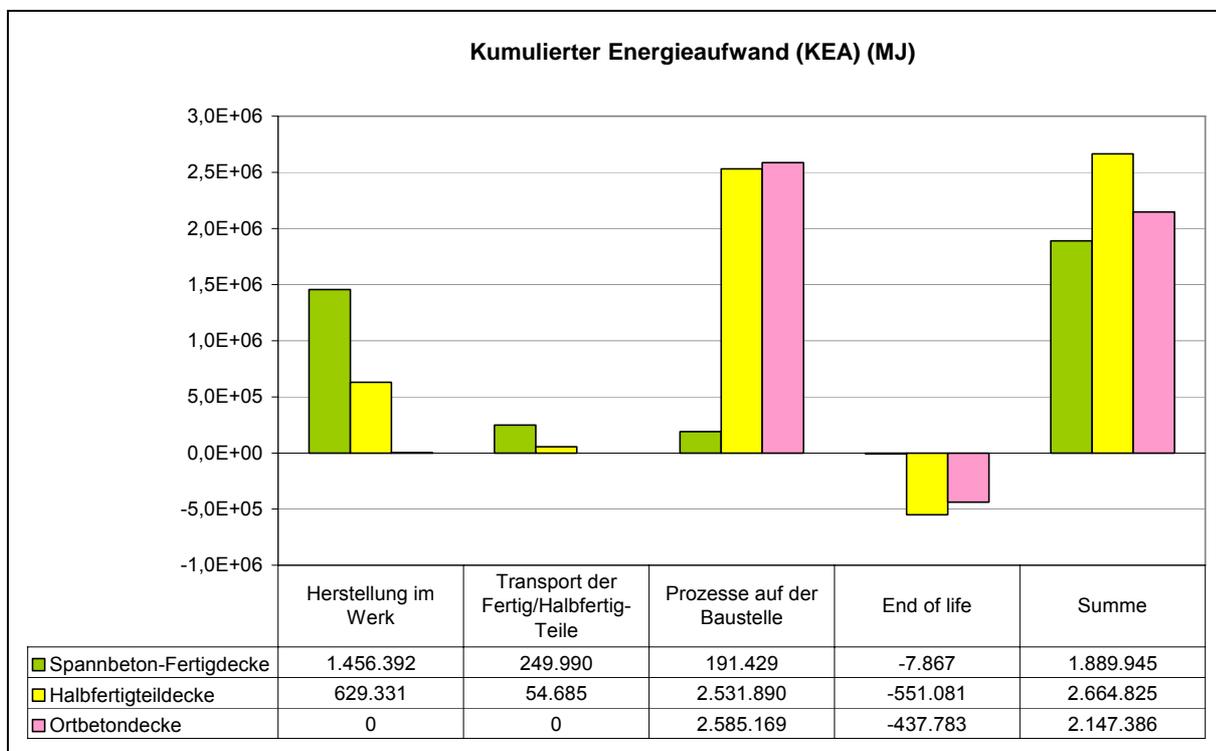


Abbildung 4-1 Kumulierter Energieaufwand (KEA): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke

Hierbei ist zu beachten, dass die Kategorie „Prozesse auf der Baustelle“ auch die jeweiligen Vorketten zur Bereitstellung des Transportbetons (z.B. Produktion Beton, Herstellung Zement, Antransport zur Baustelle) beinhalten. Die „Herstellung im Werk“ bezieht sich nur auf die auf die Herstellung der Fertig- und Halbfertigteile.

Das **Treibhauspotential** für die funktionelle Einheit beträgt 263 Tonnen CO_{2e} für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke, 333 Tonnen CO_{2e} für die Alternative Halbfertigteildecke und 268 Tonnen CO_{2e} für die Alternative Ortbetondecke (siehe Abbildung 4-2). Normiert auf das gesamte jährliche Treibhauspotential in Deutschland ergibt sich daraus ein Äquivalenzwert von 21 bis 27 Personen (Normierung per Capita) bzw. 16 bis 20 Haushalten (Normierung per Haushalt) (Zur Berechnung vgl. Tabelle 8-40 und Tabelle 8-41).

Das Treibhauspotential für die Halbfertigteildecke ist um 27 Prozent höher als dasjenige für die Spannbeton-Fertigdecke. Das Treibhauspotential der Ortbetondecke liegt mit einem um 2 Prozent höheren Wert in der gleichen Größenordnung wie das der Spannbeton-Fertigdecke. Das Gesamtbild ist ähnlich wie für den kumulierten Energieaufwand: Bei der Spannbeton-Fertigdecke dominieren die Prozesse im Werk inkl. deren Vorketten. Bei den anderen beiden Alternativen fallen hingegen die Prozesse auf der Baustelle stärker ins Gewicht.

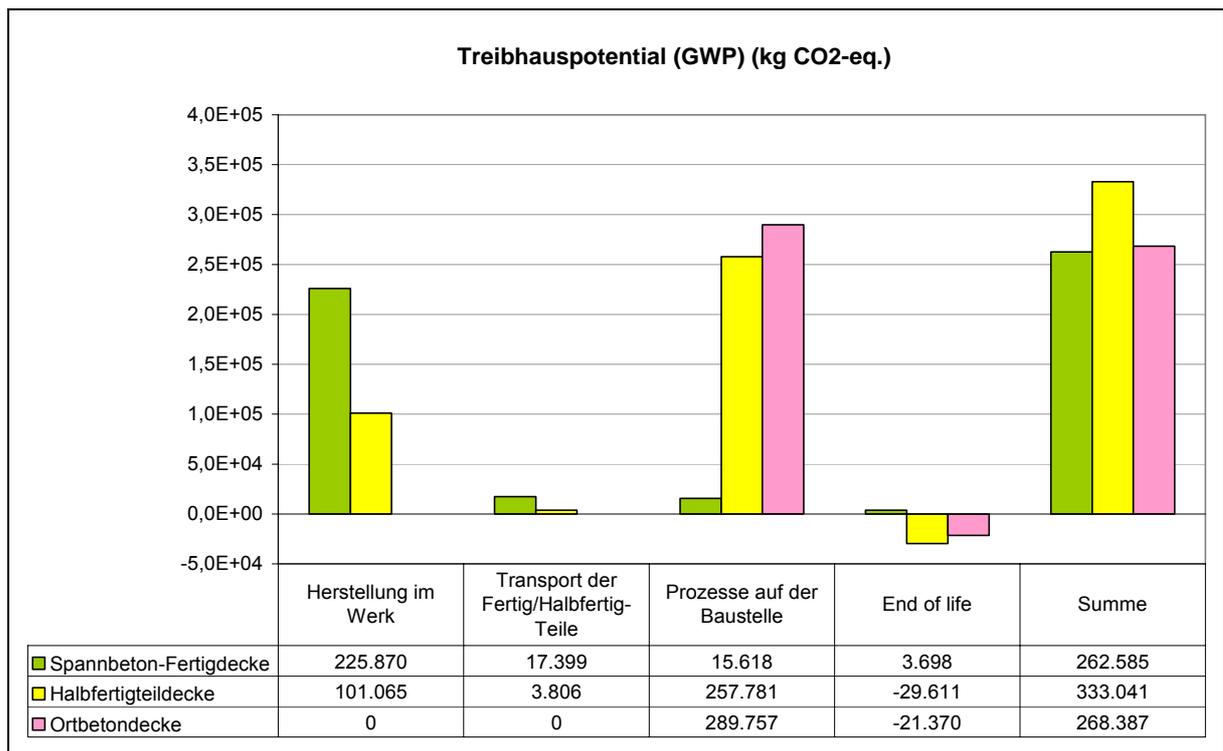


Abbildung 4-2 Treibhauspotential (GWP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke

Das **Versauerungspotential** (siehe Abbildung 4-3) für die funktionelle Einheit beträgt 0,78 Tonnen SO_{2e} für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke, 0,83 Tonnen SO_{2e} für die Alternative Halbfertigteildecke und 0,62 Tonnen SO_{2e} für die Alternative Ortbetondecke. Normiert auf das gesamte jährliche Versauerungspotential in Deutschland ergibt sich daraus ein Äquivalenzwert von 23 bis 30 Personen (Normierung per Capita) bzw. 12 bis 16 Haushalten (Normierung per Haushalt) (Zur Berechnung vgl. Tabelle 8-40 und Tabelle 8-41).

Das Versauerungspotential für die Halbfertigteildecke ist um 7 Prozent höher als derjenige für die Spannbeton-Fertigdecke. Das Ergebnis für die Ortbetondecke weist dagegen einen um 21 Prozent geringeren Wert als die Spannbeton-Fertigdecke auf.

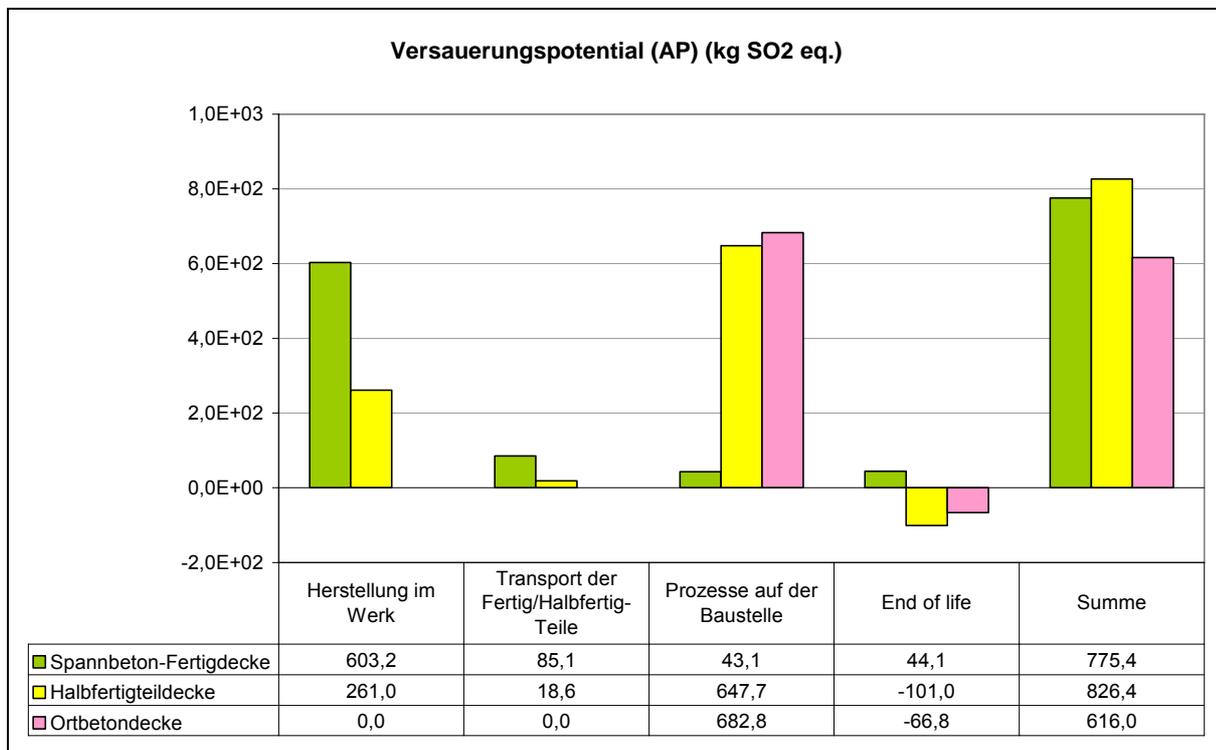


Abbildung 4-3 Versauerungspotential (AP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke

Das **Eutrophierungspotential (EP)** für die funktionelle Einheit beträgt 126 kg PO_{4e} für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke, 115 kg PO_{4e} für die Alternative Halbfertigteildecke und 90 kg PO_{4e} für die Alternative Ortbetondecke (siehe Abbildung 4-4). Normiert auf das gesamte jährliche Eutrophierungspotential in Deutschland ergibt sich daraus ein Äquivalenzwert von 22 bis 31 Personen (Normierung per Capita) bzw. von 22 bis 31 Haushalten (Normierung per Haushalt) (Zur Berechnung vgl. Tabelle 8-40 und Tabelle 8-41).

Das Eutrophierungspotential für die Halbfertigteildecke ist um 8 Prozent geringer als dasjenige für die Spannbeton-Fertigdecke. Der Wert für die Alternative Ortbetondecke fällt dagegen 28 Prozent geringer aus.

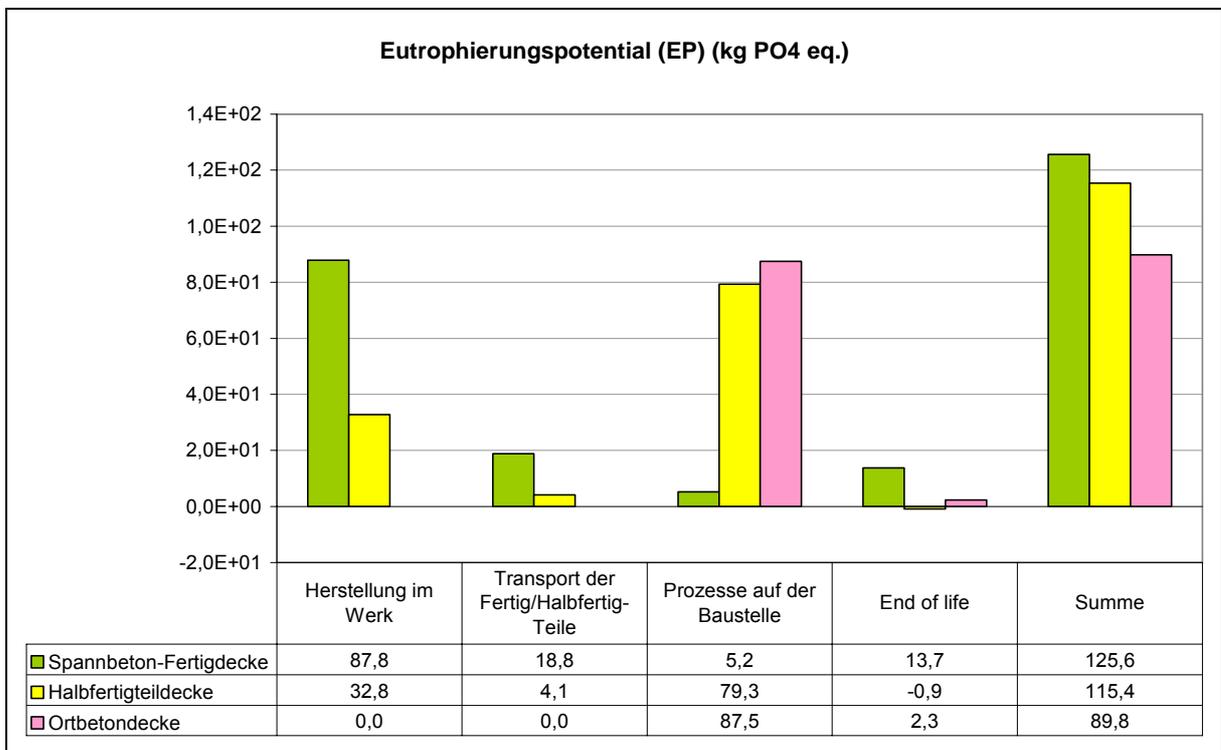


Abbildung 4-4 Eutrophierungspotential (EP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke

Das **Photooxidantienpotential (POCP)** für die funktionelle Einheit beträgt 44 kg C₂H_{4e} für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke, 52 kg C₂H_{4e} für die Alternative Halbfertigteildecke und 40 kg C₂H_{4e} für die Alternative Ortbetondecke (siehe Abbildung 4-5). Normiert auf das gesamte jährliche Photooxidantienpotential in Deutschland ergibt sich daraus ein Äquivalenzwert von 2 bis 3 Personen (Normierung per Capita) bzw. 3 bis 4 Haushalten (Normierung per Haushalt) (Zur Berechnung vgl. Tabelle 8-40 und Tabelle 8-41).

Das Photooxidantienpotential für die Halbfertigteildecke ist um 19 Prozent höher als derjenige für die Spannbeton-Fertigdecke, die der Alternative Ortbetondecke ist dagegen um 10 Prozent geringer.

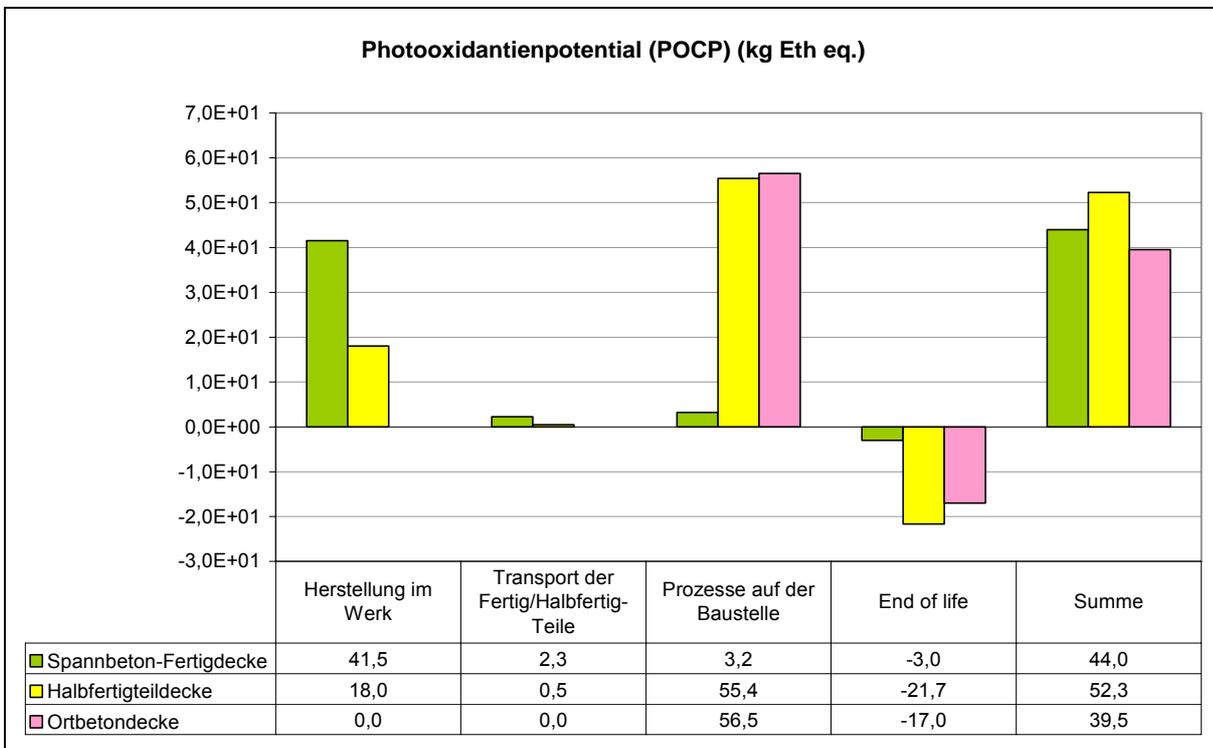


Abbildung 4-5 Photooxidantienpotential (POCP): Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs der drei Betondecken-Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke

4.2 Beitragsanalysen

Um die ergebnisrelevanten Prozesse zu identifizieren, werden nachfolgend ausgewählte Beitragsanalysen dargestellt, die zeigen sollen, welchen Anteil beispielsweise die Materialien Zement und Beton sowie Stahl oder auch die Transporte haben.

Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA), siehe Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7

Die Beiträge zum Gesamtergebnis lassen sich in vier Kategorien einteilen:

- Beton (inkl. Zement),
- Stahl (Primär- und Sekundärstahlproduktion sowie Verarbeitung),
- Energieverbrauch und
- Sonstiges: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Trennmittel, Schalungen), End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Die Beitragsanalyse für den kumulierten Primärenergieaufwand zeigt, dass die beiden relevantesten Teilprozesse die Vorketten von Betonstahl und Spannstahllitzen und die Bereitstellung des Betons inkl. der Zementherstellung sind. Sie machen je nach Alternative 24 bis 52 Prozent bzw. 31 bis 42 Prozent des Gesamtergebnisses aus. Die Bereitstellung des Zementes ist mit einem Anteil von 26 Prozent der bedeutendste Einzelprozess für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke. Für die anderen beiden Alternativen ist die Bereitstellung des Betonstahls am relevantesten. Der Energieverbrauch spielt mit zwischen 1 und 8 Prozent nur eine untergeordnete Rolle.

An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass weder Primär- noch Sekundärdaten für die Herstellung der Halbfertigteile verfügbar waren, sondern in einer ersten Näherung die Energieverbräuche aus der Spannbeton-Fertigdecken-Produktion sowie die abgeschätzten Aufwendungen für das Schweißen des Stahls in den Halbfertigteilen zugrunde gelegt wurden. Vor diesem Hintergrund müssen die Ergebnisse zwar vorsichtig interpretiert werden. Aufgrund des geringen Beitrags zum Gesamtergebnis weist der damit verbundene Fehler aber nur eine geringe Ergebnisrelevanz auf. Selbst bei einer Halbierung oder einer Verdoppelung der Herstellungsaufwendungen würde sich das Verhältnis zwischen Halbfertigteildecke und Spannbeton-Fertigdecke nicht signifikant ändern. Nichts desto trotz wäre es zu begrüßen, wenn hier zukünftig mit spezifischen Primärdaten nachgebessert werden könnte.

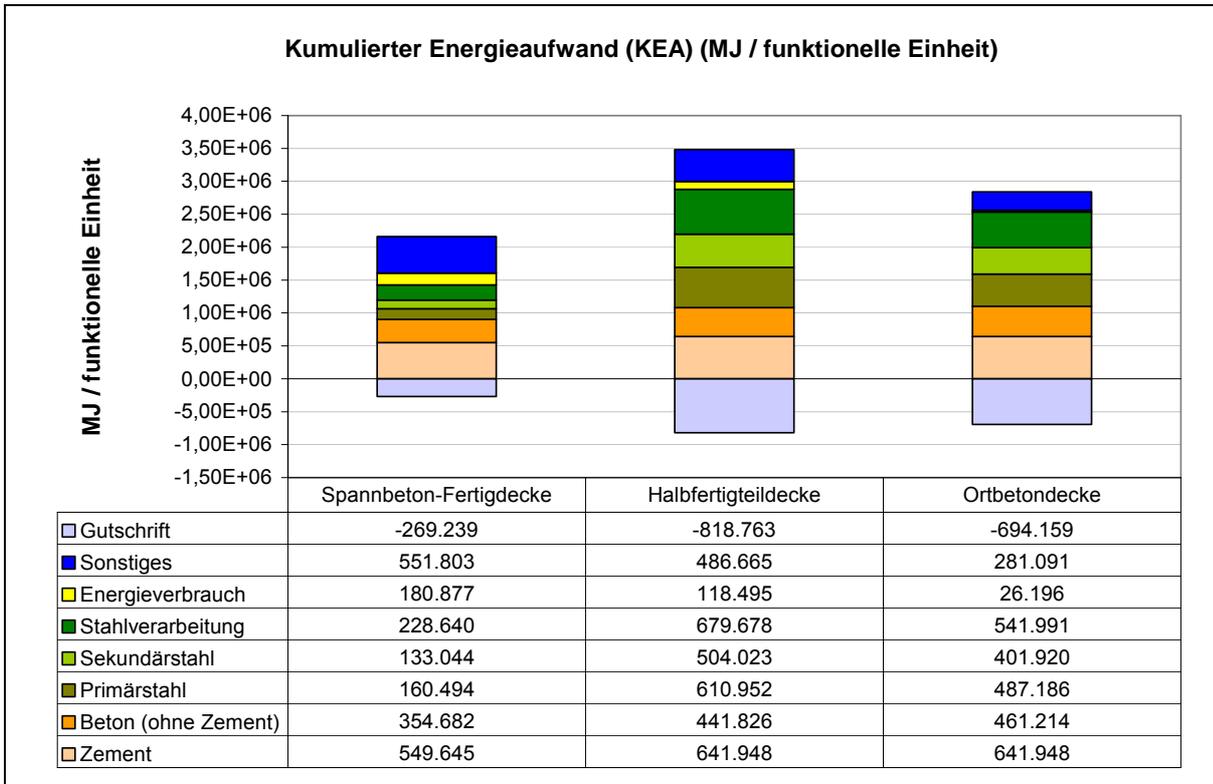


Abbildung 4-6 Beitragsanalyse für den kumulierten Energieaufwand, absolute Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Unter den Punkt „Sonstiges“ sind auch die Transporte eingeordnet. Dies erklärt, dass der Anteil bei der Spannbeton-Fertigdecke hier am höchsten ist. Aufgrund der geringen Anzahl an Spannbeton-Fertigdecken-Werken wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss einer Vergrößerung der Distanz zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle geprüft. Siehe hierzu Kapitel 4.3.2.

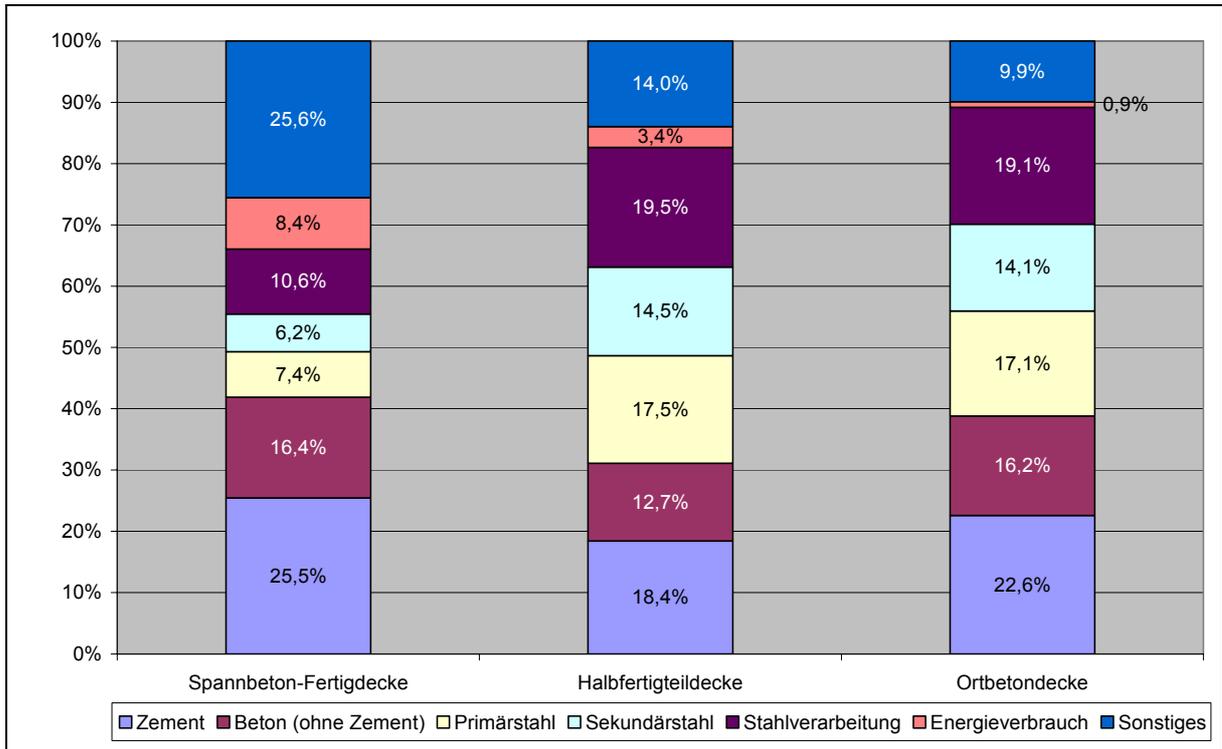


Abbildung 4-7 Beitragsanalyse für den kumulierten Energieaufwand, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Treibhauspotential, siehe Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9

Die Ergebnisse für das Treibhauspotential sehen grundsätzlich ähnlich aus wie für den kumulierten Primärenergieaufwand, weswegen die grundsätzlichen Ergebnisse an dieser Stelle nicht nochmals wiederholt werden sollen. Ergänzend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sowohl die Stahl- als auch die Betonmengen, die in den verschiedenen Alternativen enthalten sind, unterschiedlich sind und eine wesentliche Ursache für die jeweils absolut und relativ unterschiedlichen Beiträge darstellen. Dies ist in nachfolgender Tabelle 4-1 ersichtlich. Die auf den Einsatz qualitativ unterschiedlicher Zemente und unterschiedlicher Zementmengen zurückzuführenden Abweichungen zwischen den Alternativen werden im Rahmen von zwei Sensitivitätsanalysen untersucht. Sie sind in den Kapiteln 4.3.3.1 und 4.3.3.2 dargestellt.

Tabelle 4-1 In den drei Alternativen verbaute Menge an Beton und Stahl relativ zur Alternative Spannbeton-Fertigdecke, die 100 Prozent gesetzt ist.

Alternative	Betonmenge	Stahlmenge
Spannbeton-Fertigdecke	100,0 %	100,0 %
Halbfertigteildecke	187,2 %	482,9 %
Ortbetondecke	187,2 %	385,0 %

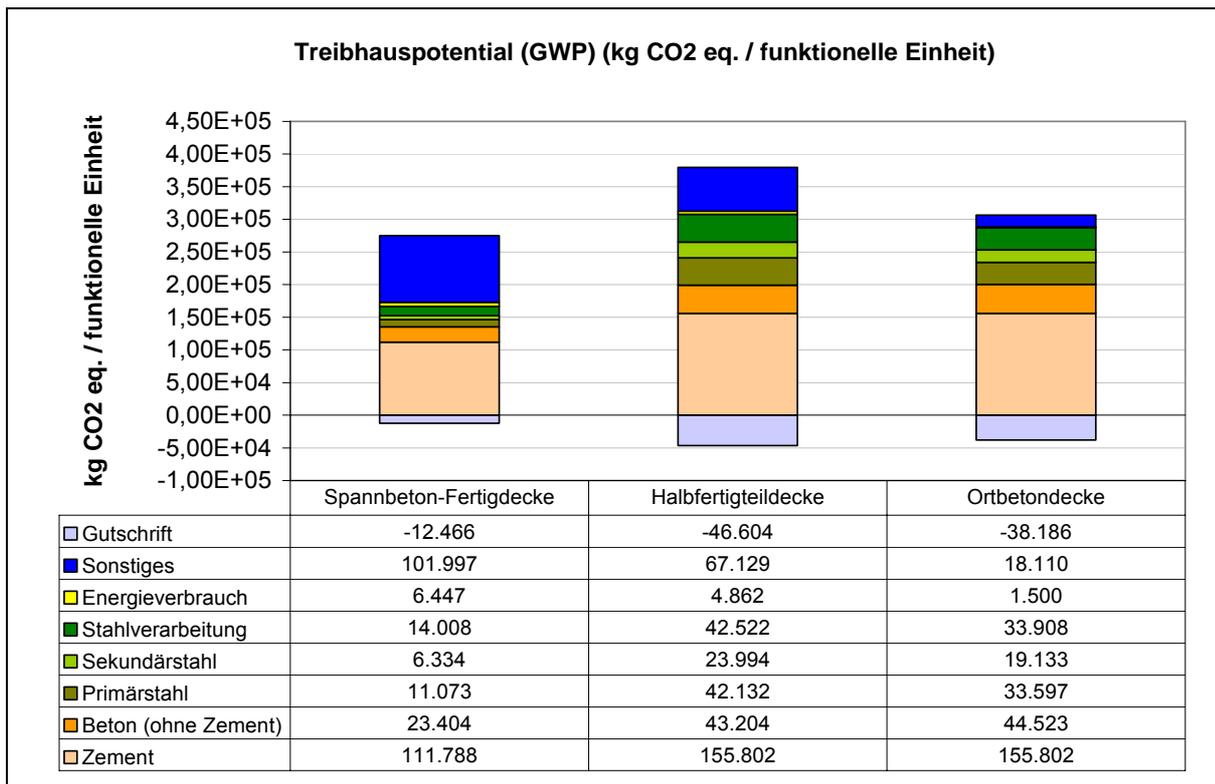


Abbildung 4-8 Beitragsanalyse für das Treibhauspotential, absolute Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Im Vergleich zum Primärenergieaufwand fällt auf, dass der Anteil des Zementes am Gesamtergebnis mit 41 bis 52 Prozent deutlich höher ist.

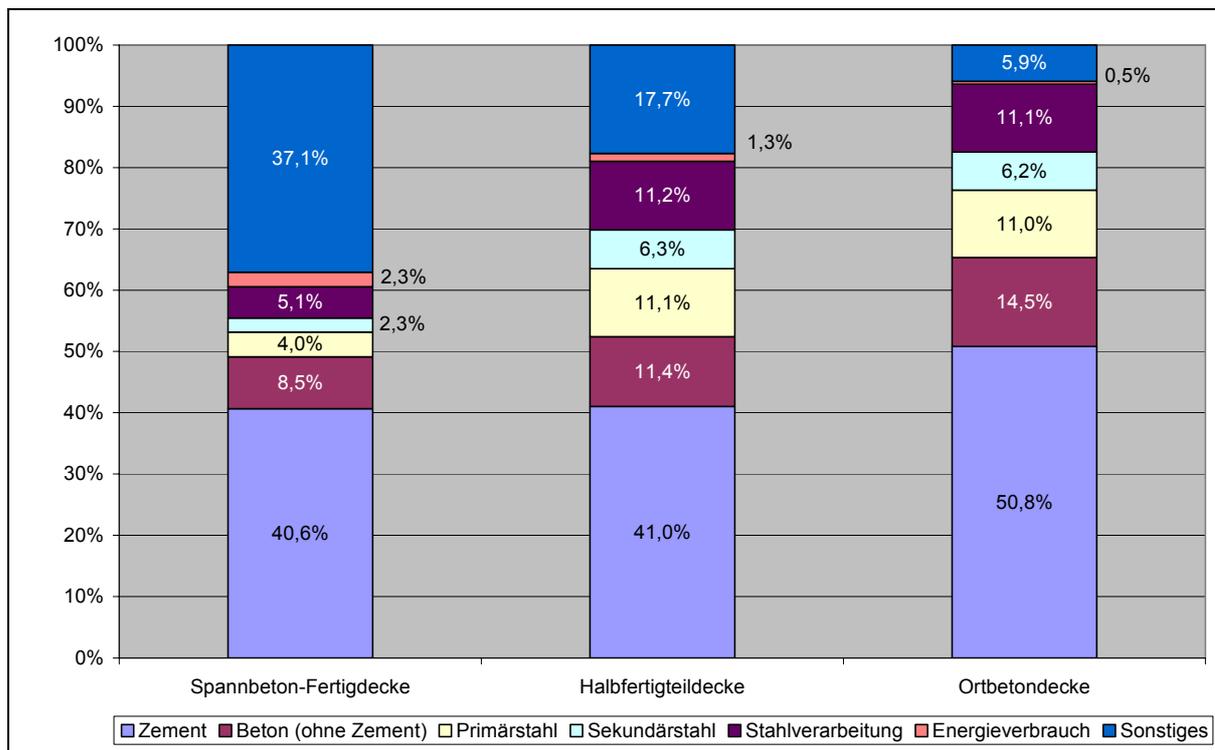


Abbildung 4-9 Beitragsanalyse für das Treibhauspotential, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Der Vollständigkeit halber sind nachfolgend noch die übrigen Wirkungskategorien dargestellt. Man erkennt, dass die Prozesse, die unter Sonstiges zusammengefasst sind, beim Versauerungs- und Eutrophierungspotential einen größeren Beitrag leisten als bei den beiden vorangegangenen Wirkungskategorien.

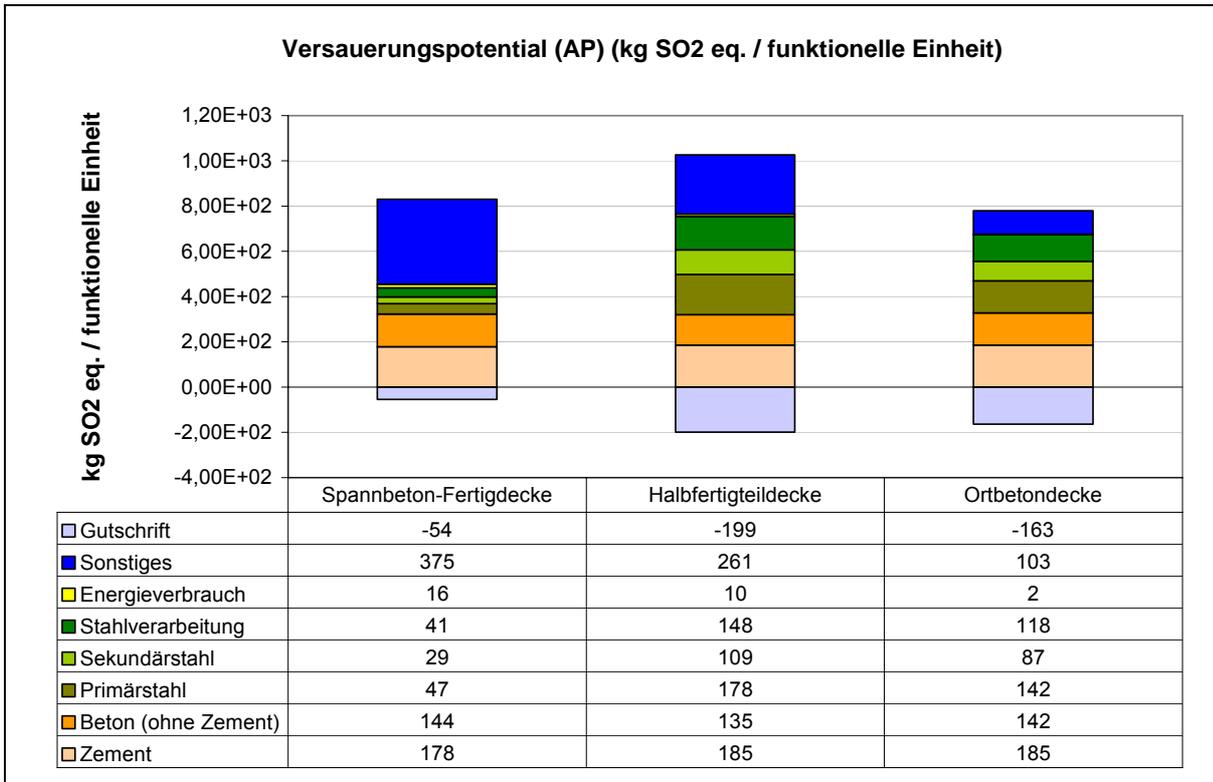


Abbildung 4-10 Beitragsanalyse für das Versauerungspotential, absolute Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Trennmittel, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Es fällt auf, dass insbesondere für die Wirkungskategorien Versauerungspotential und Eutrophierungspotential der Anteil der unter Sonstiges zusammengefassten Prozesse relativ hoch ist. Neben den Transporten und den sonstigen Materialien fallen hier vor allem auch die Prozesse des End-of-Life ins Gewicht. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über deren Anteile am Gesamtergebnis. Für die Wirkungskategorien Versauerungspotential und Eutrophierungspotential ist der Anteil mit zwischen 9,4 und 18,6 Prozent vergleichsweise am höchsten.

Tabelle 4-2 Anteil der End-of-Life Prozesse am Gesamtergebnis ohne Gutschriften.

	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Spannbeton-Fertigdecke	11,0 %	5,6 %	11,4 %	15,0 %	4,8 %
Halbfertigteildecke	7,4 %	4,4 %	9,4 %	14,6 %	3,2 %
Ortbetondecke	9,0 %	5,5 %	12,4 %	18,6 %	4,2 %

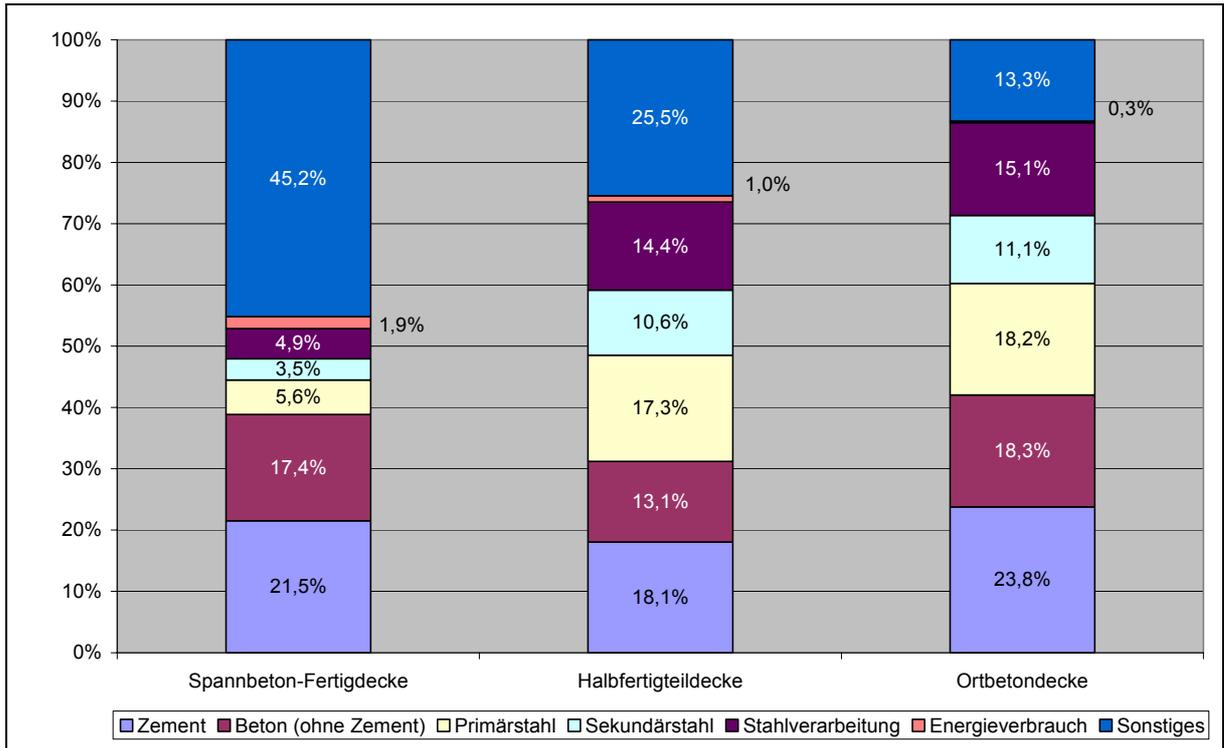


Abbildung 4-11 Beitragsanalyse für das Versauerungspotential, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

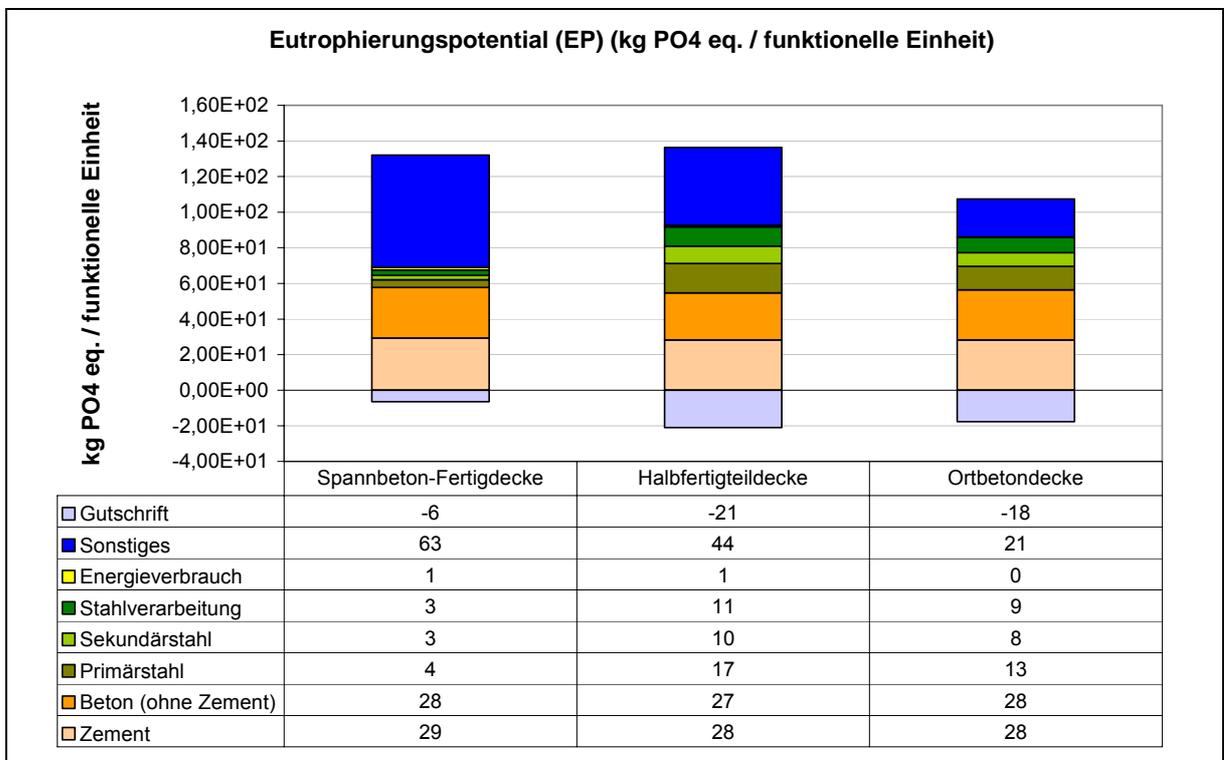


Abbildung 4-12 Beitragsanalyse für das Eutrophierungspotential, absolute Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

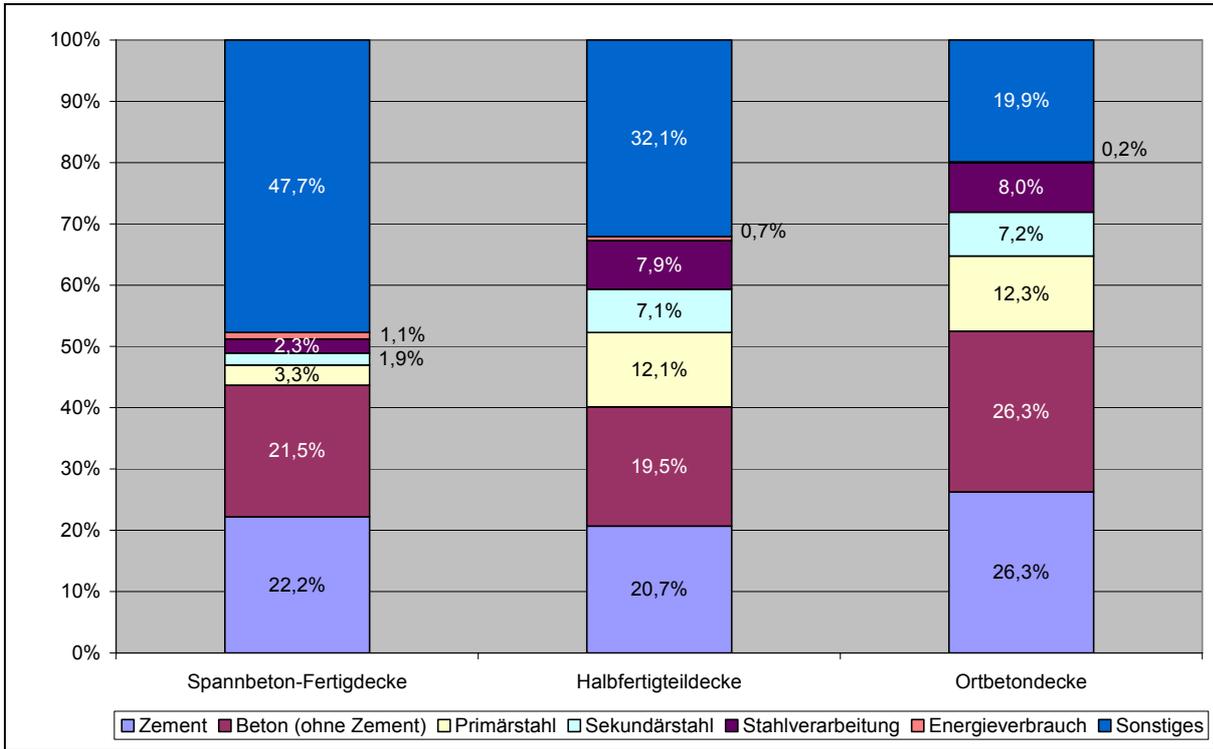


Abbildung 4-13 Beitragsanalyse für das Eutrophierungspotential, relative Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

Photooxidantienpotential, siehe Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15

Auch für das Photooxidantienpotential fällt auf, dass die Ergebnisse grundsätzlich ähnlich ausfallen wie für den Primärenergieaufwand. Im Unterschied dazu und vor allem auch im Unterschied zum Treibhauspotential erkennt man jedoch, dass insbesondere bei den Alternativen Halbfertigteildecke und Ortbetondecke die Stahlherstellung mehr Gewicht hat und die Zementherstellung demgegenüber zurücktritt.

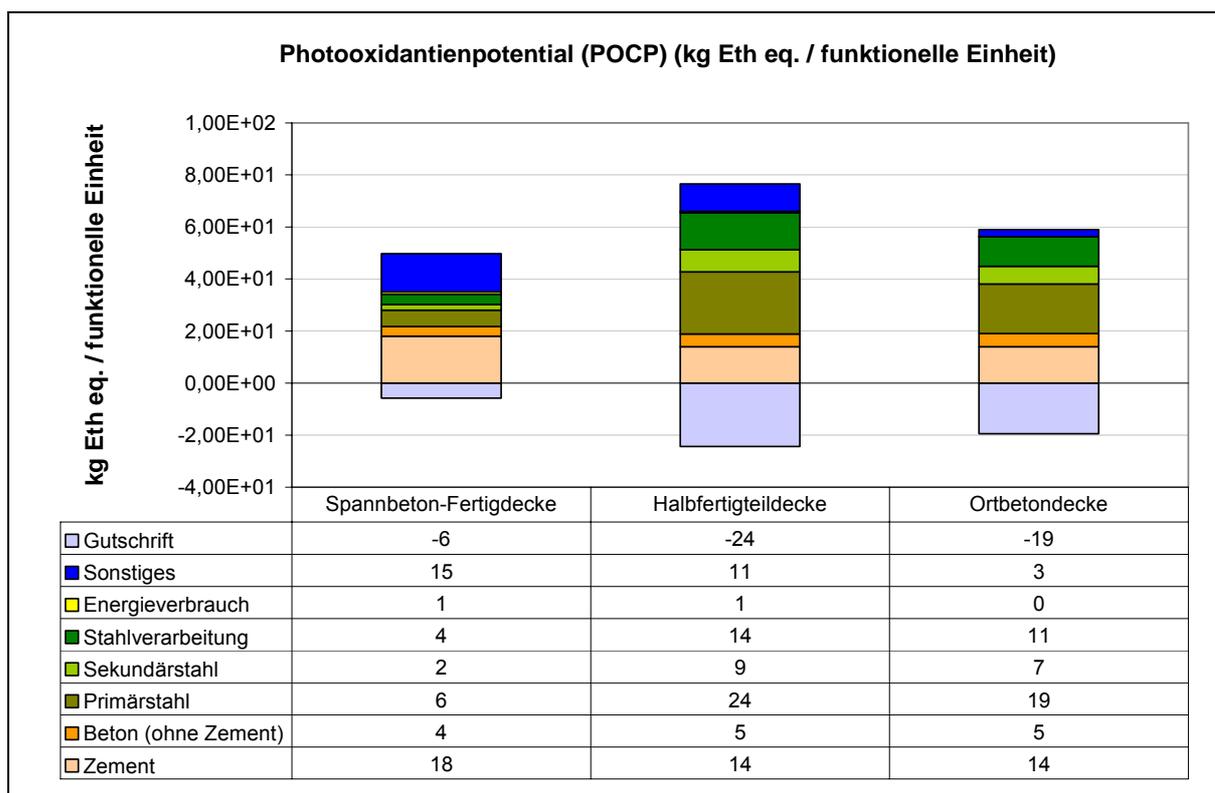


Abbildung 4-14 Beitragsanalyse für das Photooxidantienpotential, absolute Beiträge. Darstellung ohne Gutschriften. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

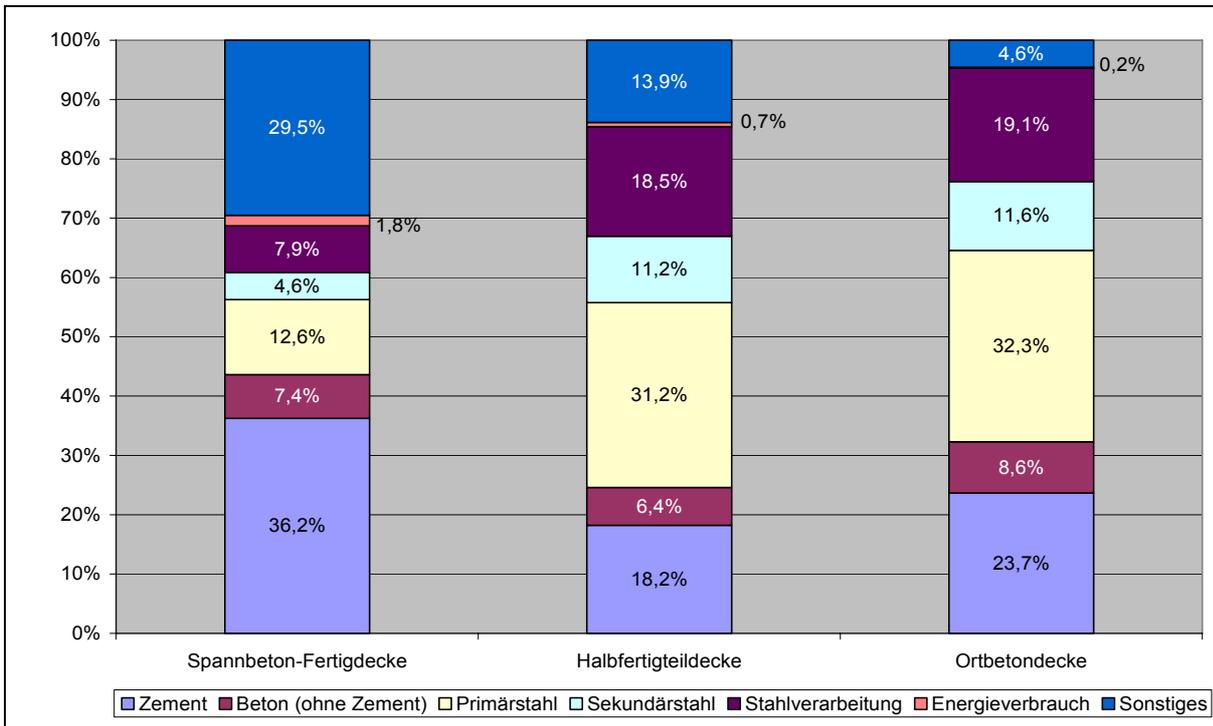


Abbildung 4-15 Beitragsanalyse für das Photooxidantienpotential, relative Beiträge. Unter Sonstiges fallen: Transporte, sonstige Materialien (z.B. Abdeckkappen, Schalungen) und End-of-Life-Prozesse (ohne Gutschriften).

4.3 Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalysen dienen dazu, für ergebnisrelevante Module der Bilanz, für die eine Unsicherheit bezüglich der verwendeten Daten besteht, zu prüfen, welchen Einfluss andere Annahmen auf das Ergebnis haben. Nachfolgend sind ausgewählte und für die vorliegende Studie relevante Sensitivitätsanalysen dargestellt, die detaillierten Ergebnisse befinden sich jeweils im Anhang in Kapitel 8.9.5 bis 8.9.6.

4.3.1 Variation des Anteils an Primär- und Sekundärproduktion bei der Stahlherstellung

Die Ergebnisse zeigen, dass die in den Alternativen eingesetzte Menge an Beton- und Spannstahl ergebnisrelevant ist. Zudem kann ergänzt werden, dass zwischen den in der Spannbeton-Fertigdecke sowie der Halbfertigteildecke und Ortbetondecke möglicherweise ein Unterschied bezüglich des Anteils an Stahl aus Primär- resp. Sekundärproduktion besteht. Für Betonstahl kann ein hoher Anteil Sekundärproduktion angenommen werden. Recherchen haben ergeben, dass der in Deutschland produzierte Betonstahl praktisch voll-

ständig aus Elektro Stahl, d.h. Sekundärproduktion, stammt¹³. Etwa ein Drittel des verarbeiteten Betonstahls wird importiert. Für den Importanteil ist der Sekundäranteil nicht bekannt, der Stahl stammt aber sicherlich auch teilweise aus Sekundärproduktion. Für Spannstahl liegen keine Zahlen zum Primär- und Sekundäranteil vor. Nach Einschätzung von Experten ist es aber möglich, dass der Anteil Primärproduktion bei der Spannstahlherstellung höher ist.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse geprüft, welchen Einfluss es hat, wenn der Anteil Primär- und Sekundärmaterial variiert wird. Konkret wird für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke der Worst Case angenommen, d.h. dass der Spannstahl zu 100 Prozent aus Primärproduktion stammt. Für die beiden anderen Alternativen wird demgegenüber der Best Case angenommen, d.h. dass der Betonstahl zu 100 Prozent aus Sekundärproduktion stammt. Gutschriften für das Recycling am Ende des Lebensweges werden wie folgt erteilt: Bei der Spannbeton-Fertigdecke ersetzt der recycelte Spannstahl Primärstahl und wird – abzüglich des Recyclingprozesses – entsprechend gutgeschrieben. Bei den beiden anderen Alternativen handelt es sich um Closed-Loop-Recycling, so dass am Ende des Lebensweges keine Gutschrift erteilt werden kann. Dies entspricht der gängigen Praxis bei Ökobilanzen.

Die Ergebnisse für den kumulierten Energieaufwand sind in Abbildung 4-16 dargestellt und zeigen, dass die geänderten Anteile Sekundär- und Primärstahl die Unterschiede zwischen der Spannbeton-Fertigdecke und den beiden anderen Alternativen nicht grundsätzlich verändert. Der Absolutwert des Ergebnisses ist leicht höher, die Unterschiede zum Base Case sind aber nur gering.

¹³ Mündl. Mitteilung Dr. Joerg Mörsch, Institut für Stahlbetonbewehrung e.V. Oktober 2009, siehe auch Hauke (2009)

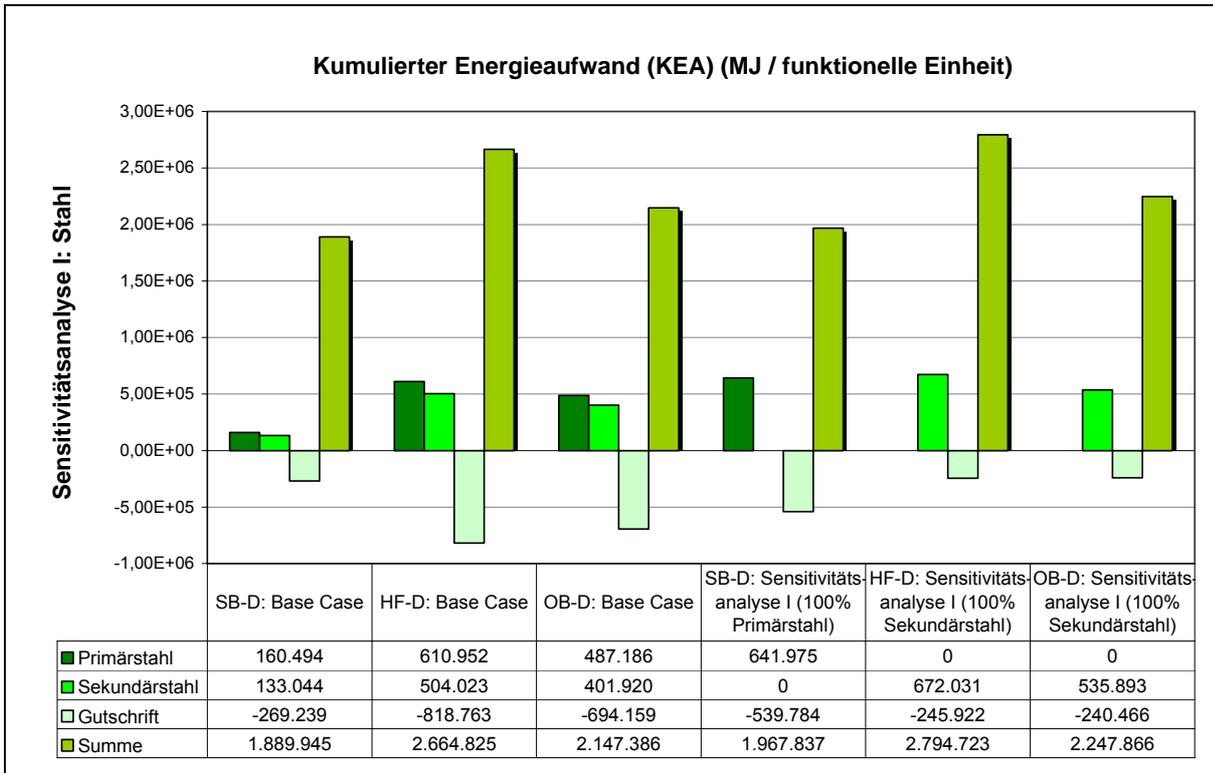


Abbildung 4-16 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation des Anteils an Primär- und Sekundärproduktion bei der Stahlherstellung“ für den kumulierten Energieaufwand. Spannbeton-Fertigdecke: Links ist der Base Case dargestellt. Für die Sensitivitätsanalyse wurden folgende Annahmen getroffen: 100 Prozent Primärstahl, Halbfertigteil- und Ortbetondecke: 100 Prozent Sekundärstahl.

Die nachfolgende Tabelle zeigt dies am Beispiel des kumulierten Energieaufwandes nochmals deutlicher. Für den kumulierten Energieaufwand ist der Unterschied im Base Case und in der Sensitivitätsanalyse Sekundär-/Primärstahl ähnlich groß. Die Alternative Spannbeton-Fertigdecke (Spannstahl aus 100 Prozent Primärproduktion) schneidet beim kumulierten Energieaufwand gegenüber den beiden anderen Alternativen sowohl im Base Case als auch in der Sensitivitätsanalyse (Betonstahl zu 100 Prozent aus Sekundärproduktion) signifikant besser ab.

Tabelle 4-3 Relation der Ergebnisse des Base Case und der Sensitivitätsanalyse für den kumulierten Energieaufwand.

KEA			
	Base Case	Sensitivitätsanalyse	Sensitivitätsanalyse
Spannbeton-Fertigdecke	100,0 %	104,1 %	100,0 %
Halbfertigteildecke	141,0 %	147,9 %	142,0 %
Ortbetondecke	113,6 %	118,9 %	114,2 %

Beim Treibhauspotential, für das die Ergebnisse in Abbildung 4-17 dargestellt sind, sieht es grundsätzlich ähnlich aus wie für den kumulierten Energieaufwand, allerdings sind die Unterschiede geringer. Das gleiche gilt für die übrigen Wirkungskategorien, die an dieser Stelle nicht näher ausgeführt sind. Im Anhang (Kapitel 0) sind die Ergebnisse dargestellt.

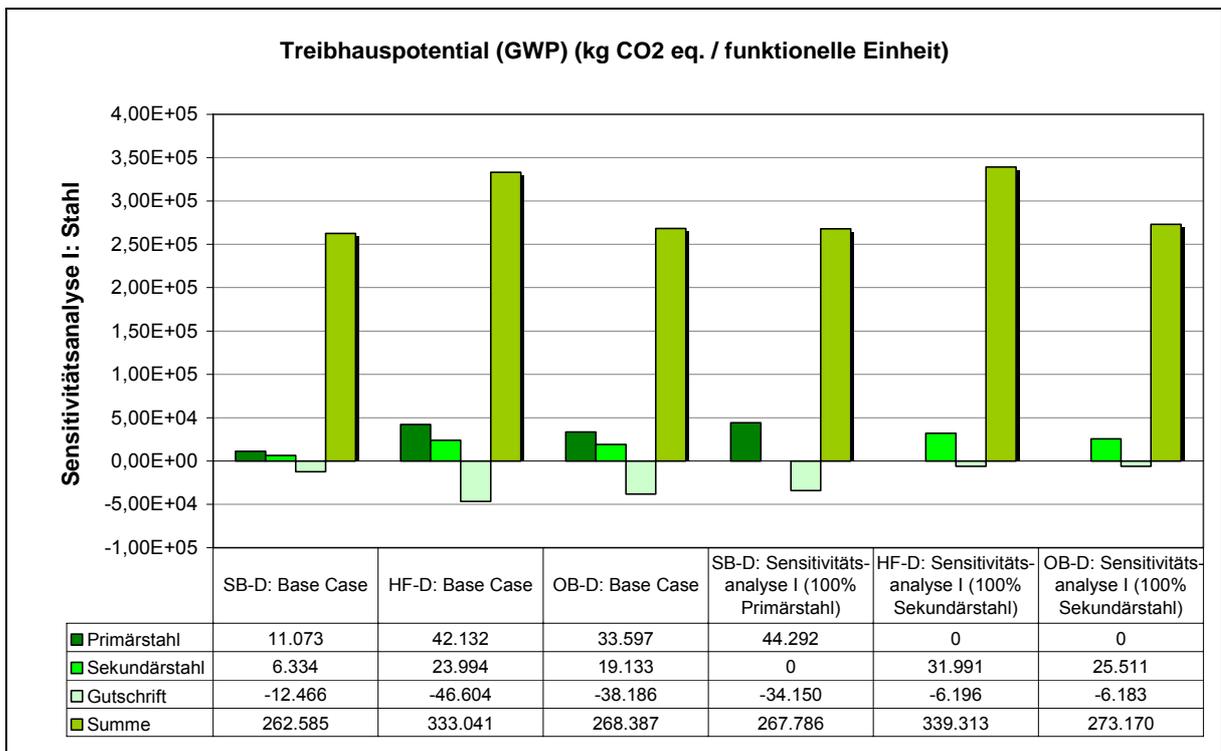


Abbildung 4-17 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation des Anteils an Primär- und Sekundärproduktion bei der Stahlherstellung“ für das Treibhauspotential. Spannbeton-Fertigdecke: Links ist der Base Case dargestellt. Für die Sensitivitätsanalyse wurden folgende Annahmen getroffen: 100 Prozent Primärstahl, Halffertigteil- und Ortbetondecke: 100 Prozent Sekundärstahl.

4.3.2 Variation der Transportentfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle

Die Auswahl der Sensitivitätsanalyse „Transportentfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ erfolgte vor dem Hintergrund von Vorüberlegungen zur Durchführung der Studie. Da es vergleichsweise wenige Standorte gibt, an denen Spannbeton-Fertigdecken hergestellt werden, sind die Transportdistanzen zu den Baustellen deutlich länger als z.B. im Fall der Ortbetondecke für den Antransport des Transportbetons. Außerdem sind Extremfälle konstruierbar, bei denen in Norddeutschland hergestellte Spannbeton-Fertigteile nach Süddeutschland geliefert werden. Dies ist zwar nach Aussagen von Experten aktuell nicht der Fall, die Transportentfernung soll aber dennoch hinsichtlich ihrer Relevanz für das Ergebnis der Spannbeton-Fertigdecke geprüft werden. Beim Base

Case haben die Transporte der Fertigteile bei der Spannbetondecke einen Anteil von knapp 5 Prozent (POCP) bis knapp 15 Prozent (Eutrophierungspotential) am Gesamtergebnis. Nachfolgend ist die Analyse beispielhaft für die beiden Kategorien kumulierter Primärenergieaufwand und Treibhauspotential dargestellt (siehe Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19). Der Anteil der Transporte liegt bei knapp 7 Prozent (GWP) bis 13 Prozent (KEA). Bei der Halbfertigteildecke liegt der Beitrag des Transports der Halbfertigteile vom Werk auf die Baustelle bei knapp einem bis vier Prozent.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Transportentfernung um den Faktor 1,5 bis 5 ansteigen könnte, bevor der Wert der Spannbeton-Fertigdecke den der Ortbetondecke bzw. Halbfertigteildecke erreicht. Beim kumulierten Primärenergieaufwand ist diese Grenze bei einer Distanz von mehr als 330 Kilometern (Ortbetondecke) bzw. 670 Kilometern (Halbfertigteildecke) einfache Entfernung zur Baustelle erreicht, beim Treibhauspotential bei mehr als 835 Kilometern (Halbfertigteildecke). Damit wäre es beispielsweise aus Umweltgesichtspunkten nicht empfehlenswert, Spannbeton-Fertigdeckenelemente innerhalb von Deutschland von Nord- nach Süddeutschland zu transportieren. Entsprechend ist der geübte Ansatz, die Spannbeton-Fertigdeckenelemente jeweils vom nächstgelegenen Werk auf eine Baustelle zu transportieren aus Umweltsicht beizubehalten.

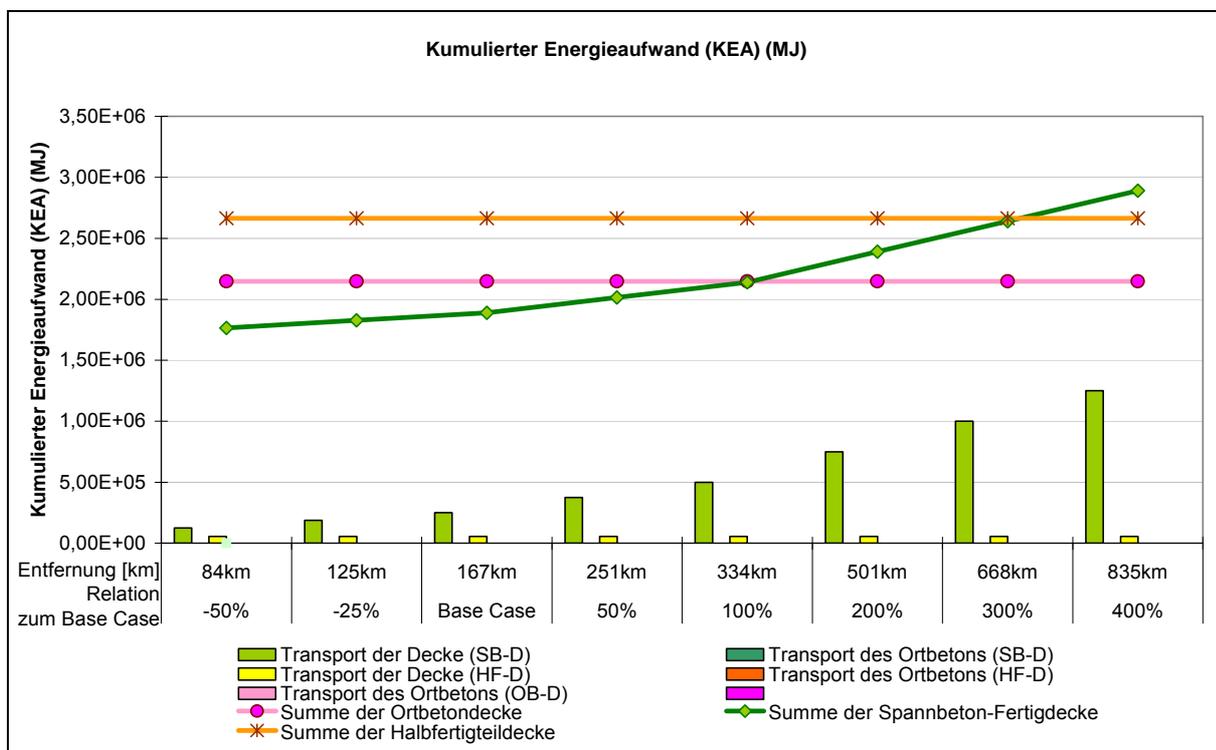


Abbildung 4-18 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für den kumulierten Energieaufwand. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.

In Tabelle 4-4 ist der Einfluss der Variation der Transportentfernung auf Gesamtergebnis für den kumulierten Energieaufwand dargestellt. Man erkennt, dass eine Vervierfachung der Entfernung zwischen Werk und Baustelle zu einer Erhöhung des Gesamtergebnisses um 53 Prozent führt. Wird die Entfernung halbiert, so reduziert sich das Gesamtergebnis für den kumulierten Energieaufwand um 6 Prozent.

Tabelle 4-4 Einfluss der Transportentfernung zwischen Spannbeton-Fertigteil-Werk und Baustelle auf das Ergebnis für den kumulierten Energieaufwand in Relation zum Ergebnis für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke im Base Case (167 Kilometer).

Entfernung Spannbeton-Fertigteil-Werk – Baustelle [km]	Entfernung in Relation zum Base Case [Prozent]	KEA gesamt: Relation des Ergebnisses zum Base Case [Prozent]
84 km	-50 %	93,4 %
125 km	-25 %	96,7 %
167 km	Base Case	100,0 %
251 km	50 %	106,6 %
334 km	100 %	113,2 %
501 km	200 %	126,5 %
668 km	300 %	139,7 %
835 km	400 %	152,9 %

Für das Treibhauspotential und die übrigen Wirkungskategorien (siehe Abbildung 4-19 bis Abbildung 4-22) sieht das Ergebnis anders aus, da die Unterschiede zwischen der Spannbeton-Fertigdecke und der Ortbetondecke nur gering sind, resp. die Ortbetondecke besser abschneidet als die Spannbeton-Fertigdecke. Im Vergleich zur Halbfertigteildecke können – abgesehen vom Eutrophierungspotential – die Transportentfernungen der Spannbeton-Fertigteile ebenfalls gegenüber der ermittelten Durchschnittsentfernung erhöht werden, bis der Break-Even-Punkt erreicht ist.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen dies nochmals anschaulich für die unterschiedlichen Wirkungskategorien.

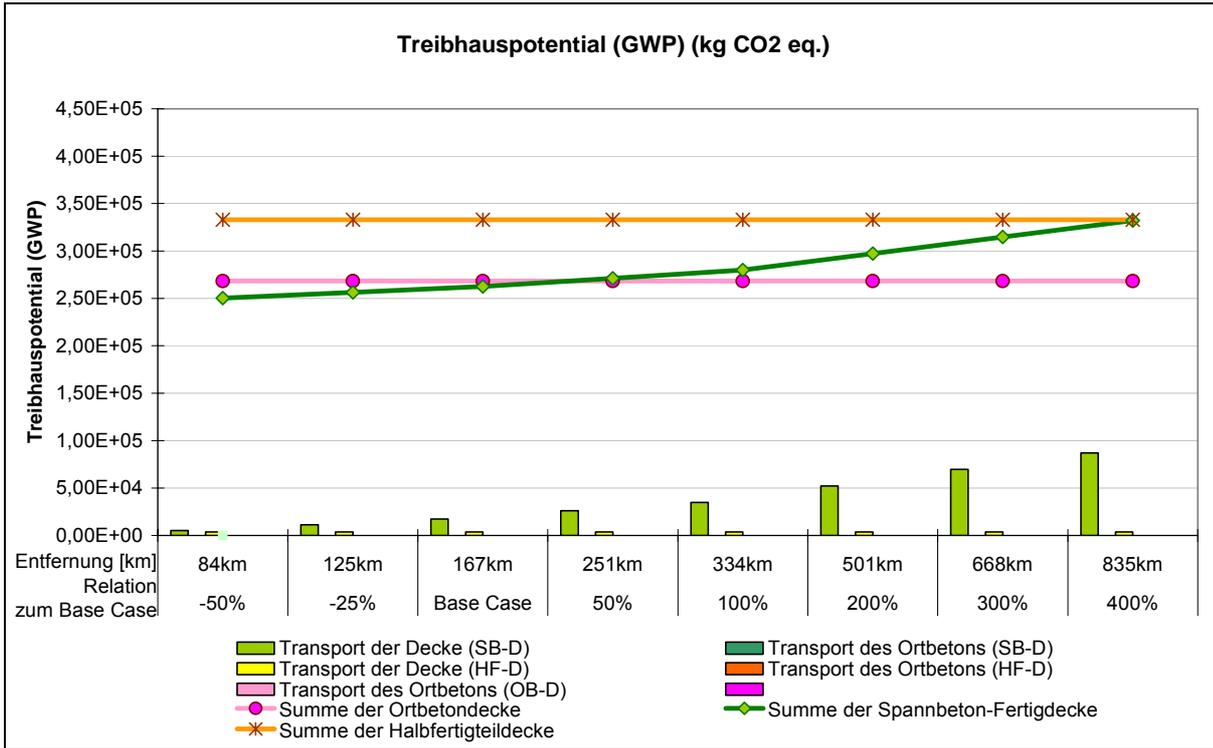


Abbildung 4-19 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Treibhauspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.

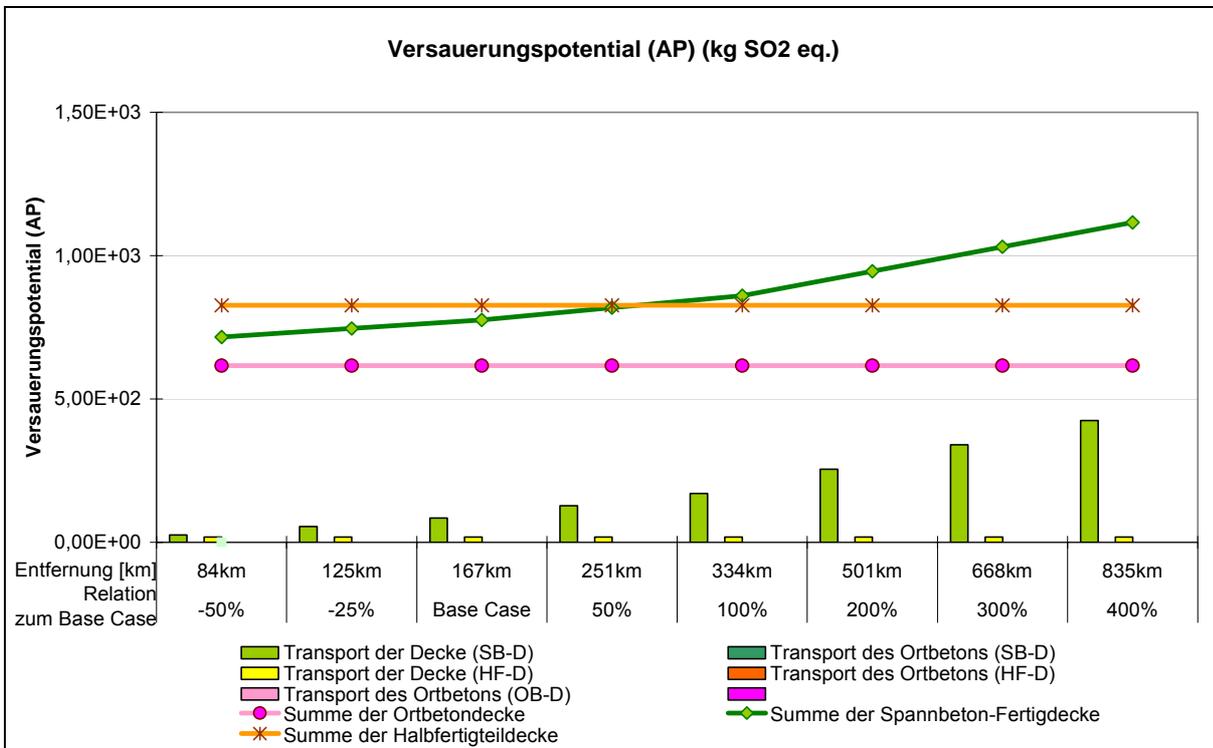


Abbildung 4-20 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Versauerungspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.

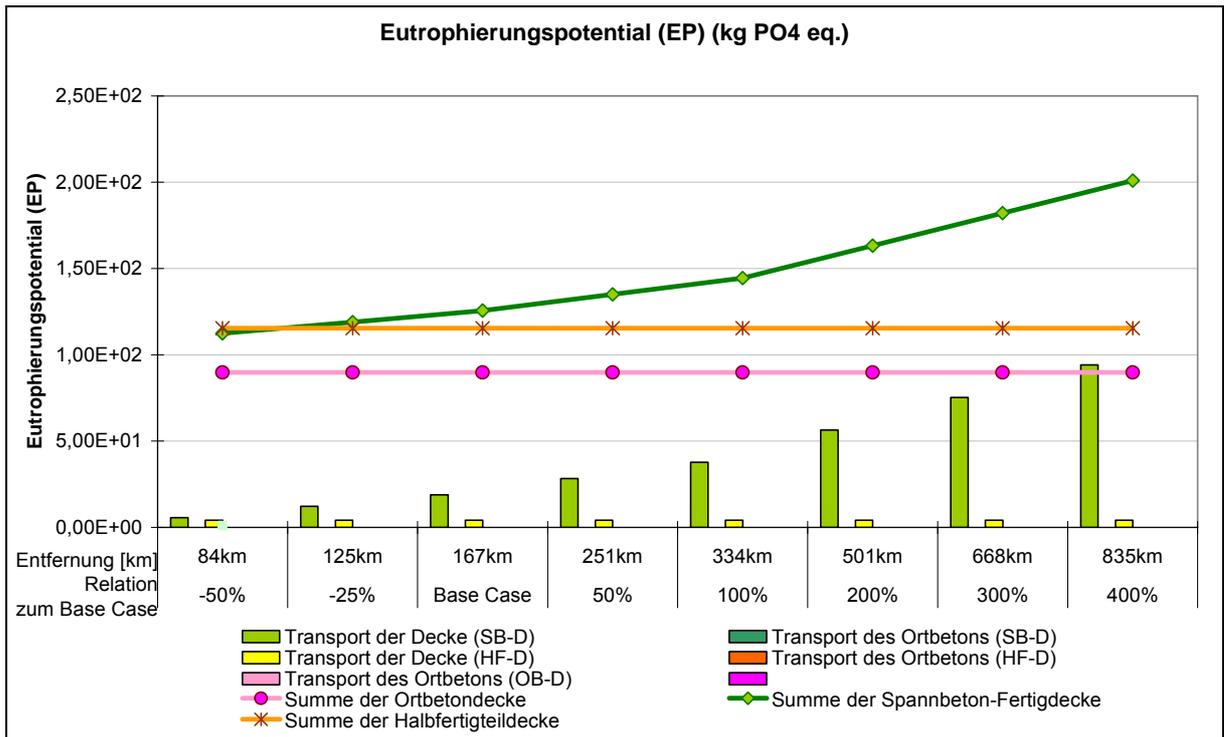


Abbildung 4-21 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Eutrophierungspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.

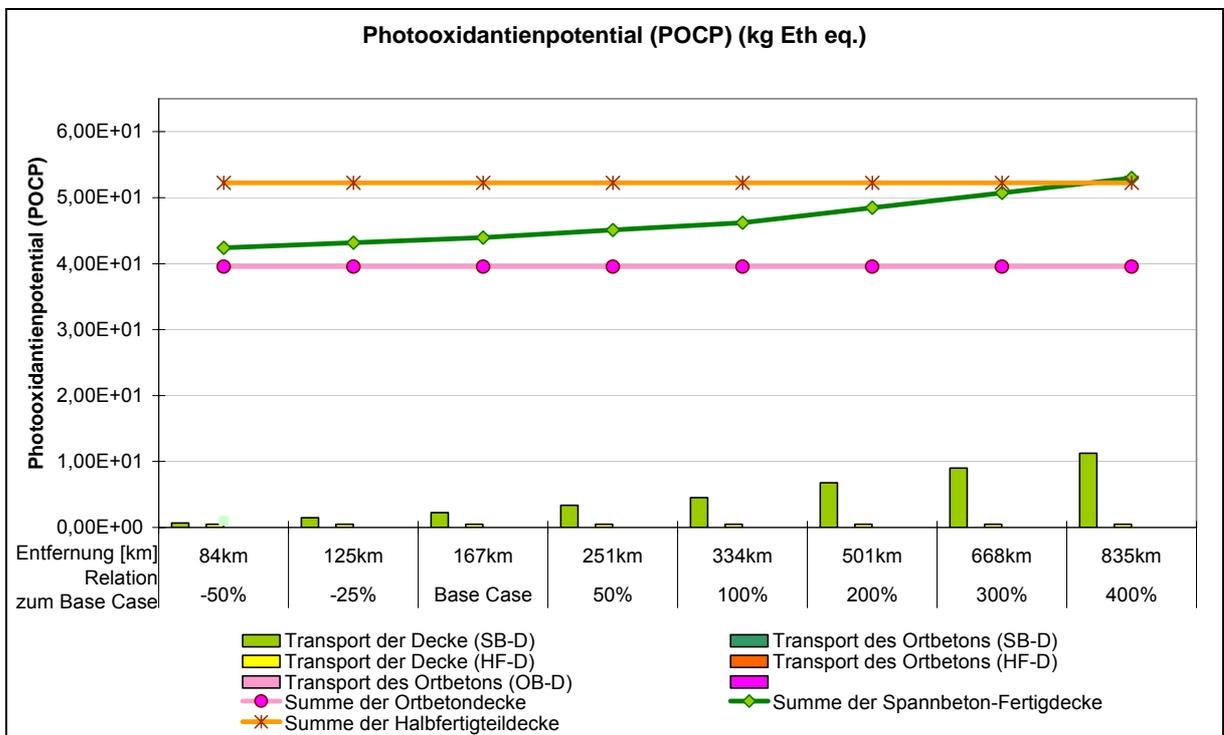


Abbildung 4-22 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Entfernung zwischen Spannbeton-Fertigdecken-Werk und Baustelle“ für das Photooxidantienpotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Transportentfernung nicht variiert.

4.3.3 Einfluss von Menge und Qualität des eingesetzten Zements

Die Beitragsanalysen haben gezeigt, dass Zement signifikant zum Ergebnis beiträgt und deshalb ergebnisrelevant ist. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll im Rahmen von Sensitivitätsanalysen, hier verschiedene Aspekte zu prüfen:

1. Generelle Betrachtung: Welche Unterschiede treten durch die Verwendung unterschiedlicher Datenmodule für die Zementherstellung auf? Insbesondere wurde die Ergebnisrelevanz der Datenmodule verglichen, die in der Ökobilanz-Datenbank EcolInvent verfügbar sind und die Baustoffprofile, die vom VDZ erhoben wurden.
2. Sensitivitätsanalyse Zement 2: Welcher Umweltentlastungseffekt ist durch die Reduktion der Zementmenge insbesondere bei der Spannbeton-Fertigdecken-Produktion möglich? Da die eingesetzte Menge Zement hier relativ hoch ist, besteht nach Einschätzung von Experten noch Spielraum nach unten, ohne dass die Qualität und Funktionalität des Bauteils damit reduziert wird.
3. Welchen Einfluss auf das Ergebnis hat es, wenn auf der Baustelle, d.h. im Transportbeton statt Durchschnittszement CEM III Zement eingesetzt wird.

4.3.3.1 Generelle Betrachtung: Verwendung verschiedener Datenmodule und Zementqualitäten

Für die Herstellung von Zement sind verschiedene Datenmodule verfügbar, die unterschiedliche Umweltauswirkungen zeigen. Tabelle 4-5 gibt einen Überblick über das für die Studie relevante Spektrum. Es fällt auf, dass die Datenquelle zum Durchschnittszement aus dem Jahr 2000 durchweg höhere Werte aufweist als die übrigen Datenmodule. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Prozesse der Zementherstellung seit dem Jahr 2000 optimiert wurden. Zudem kann es auch systematische Unterschiede zwischen verschiedenen Datenquellen geben, die einen Quervergleich schwierig machen. Vor diesem Hintergrund wurde auch darauf verzichtet, die drei Decken-Alternativen auf der Basis unterschiedlicher Datensätze zu berechnen.

Tabelle 4-5 Vergleich der Umweltauswirkungen aus der Herstellung von 1.000 kg Zement nach verschiedenen Datenquellen. Absolutwerte

Pro 1000kg Zement	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)	Quelle
Durchschnittszement (2007)	2.776,38	673,83	0,80	0,12	0,06	VDZ 2007
Durchschnittszement (2000)	4.355,00	872,00	1,68	0,20	0,07	Eyerer und Reinhardt 2000
Portlandzement CEM I 42.5	3.656,95	815,30	1,10	0,16	0,04	EcolInvent 2.0
Portlandzement CEM I 52.5	3.879,68	824,75	1,12	0,17	0,04	EcolInvent 2.0
Portlandhüttenzement	3.400,56	698,15	0,97	0,14	0,04	EcolInvent 2.0

Tabelle 4-6 Vergleich der Umweltauswirkungen aus der Herstellung von 1.000 kg Zement nach verschiedenen Datenquellen. Relative Werte, Durchschnittszement (2000) ist 100 Prozent gesetzt. Die Berechnungen der Ökobilanz wurden mit den Daten des Durchschnittszement (2007) sowie Daten von EcolInvent 2.0 durchgeführt.

Pro 1000kg Zement	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)	Quelle
Durchschnittszement (2007)	63,8 %	77,3 %	47,6 %	60,0 %	85,7 %	VDZ 2007
Durchschnittszement (2000)	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	Eyerer und Reinhardt 2000
Portlandzement CEM I 42.5	84,0 %	93,5 %	65,5 %	80,0 %	57,1 %	EcolInvent 2.0
Portlandzement CEM I 52.5	89,1 %	94,6 %	66,7 %	85,0 %	57,1 %	EcolInvent 2.0
Portlandhüttenzement	78,1 %	80,1 %	57,7 %	70,0 %	57,1 %	EcolInvent 2.0

Ein zweiter Punkt, der nachfolgend diskutiert werden soll, ist die Zementqualität. PE International (2007) hat gezeigt, dass vor allem der Anteil an Zementklinker einen wesentlichen Einfluss auf die Umweltauswirkungen von Zement hat. Je höher der Anteil umso höher die Umweltauswirkungen. Nachfolgende Tabelle zeigt einen Überblick über den Zementklinkeranteil verschiedener Zemente. Zemente werden nach der europäischen Norm für Normalzemente DIN EN 197-1 in fünf Hauptzementarten (CEM I-IV) eingeteilt. Die Abkürzungen beziehen sich auf die Hauptzementart (CEM I-IV), den Zementklinkeranteil (A entspricht dabei einem hohen Anteil, B einem niedrigeren) und den anderen Hauptbestandteilen zusammen (z.B. S entspricht Hüttsand).

Tabelle 4-7 Überblick über die Anteile an Zementklinker sowie andere Hauptbestandteile verschiedener Zementqualitäten. Tabelle entnommen aus PE International 2007

Hauptzementarten	Bezeichnung (Normalzementarten)		Anteil Zementklinker [Masse-%]	Andere Hauptbestandteile
CEM I	Portlandzement	CEM I	95 - 100	keine
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S CEM II/B-S	80 - 94 65 - 79	Hüttsand (S)
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	90 - 94	Silicastaub (D)
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-Q CEM II/B-Q	80 - 94 65 - 79 80 - 94 65 - 79	natürliche (P) bzw. natürlich getemperte (Q) Puzzolane
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V CEM II/B-V CEM II/A-W CEM II/B-W	80 - 94 65 - 79 80 - 94 65 - 79	kieselsäurehaltige (V) bzw. kalkreiche (W) Flugasche
	Portlandschieferzement	CEM II/A-T CEM II/B-T	80 - 94 65 - 79	Gebrannter Schiefer (T)
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L CEM II/B-L CEM II/A-LL CEM II/B-LL	80 - 94 65 - 79 80 - 94 65 - 79	Kalkstein (L bzw. LL)
	Portlandkompositzement	CEM II/A-M CEM II/B-M	80 - 94 65 - 79	können alle Zuschlagstoffe enthalten
	CEM III	Hochofenzement	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35 - 64 20 - 34 5 - 19
CEM IV	Puzzolanzement	CEM IV/A CEM IV/B	65 - 89 45 - 64	Silicastaub, Puzzolane, Flugasche
CEM V	Kompositzement	CEM V/A CEM V/B	40 - 64 20 - 38	Hüttsand, Silicastaub, Puzzolane, Flugasche

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die in PE International (2007) ermittelten Umweltauswirkungen verschiedener ausgewählter Zementsorten. Beispielhaft seien diese anhand des Treibhauspotentials erläutert. Mit 239,6 kg CO_{2e} sind die Auswirkungen bei CEMIII/B am geringsten. Er weist einen Klinkeranteil von nur 26 Prozent auf

Auch für die übrigen Wirkungskategorien gilt das gleiche, der Beitrag der anderen Hauptbestandteile, z.B. Kalkstein versus Hüttsand spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 4-8 Überblick über die Umweltauswirkungen verschiedener Zementqualitäten. Tabelle entnommen aus PE International 2007.

	CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/B
<i>Klinkeranteil</i>	95%	83%	83%	68%	47,5%	26%
ADP [kg Sb-Äqv.]	1,49	1,33	1,33	1,13	0,85	0,56
EP [kg Phosphat-Äqv.]	0,16	0,14	0,14	0,12	0,09	0,05
ODP [kg R11-Äqv.]	1,4E-05	1,3E-05	1,3E-05	1,2E-05	9,9E-06	7,8E-06
POCP [kg Ethen-Äqv.]	0,16	0,14	0,14	0,12	0,09	0,05
GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	697,4	614,7	614,6	511,1	369,6	239,6
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	1,19	1,05	1,05	0,88	0,65	0,41

4.3.3.2 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Zement 2: Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke

Für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke besteht nach Aussage von DW Systembau die grundsätzliche Möglichkeit, die Menge des eingesetzten Zements zu verringern. Es ist aktuell technisch machbar, die bislang eingesetzte Zementmenge um 12,6 Prozent zu reduzieren. Um zu prüfen, welche Umweltentlastungseffekte eine Reduzierung der Zementmenge hätte, wurde deshalb im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die eingesetzte Zementmenge in 4-er Schritten zwischen 0 und 20 Prozent reduziert.

Die detaillierten Ergebnisse dazu sind in Anhang 8.9.6 dargestellt.

Tatsächlich ist der Umweltentlastungseffekt beim Treibhauspotential und beim Photooxidantienpotential mit jeweils 8,1 Prozent für eine 20-prozentige Reduktion am größten. Abbildung 4-23 zeigt im Vergleich dazu auch die Auswirkungen einer Reduzierung der eingesetzten Zementmenge für die anderen betrachteten Kategorien.

Je 4 Prozent Reduktionsschritt beim Zement reduziert sich die Umweltbelastung im Vergleich zum Base Case um zwischen 0,9 Prozent (Versauerungspotential und Eutrophierungspotential) und 1,6 Prozent (Treibhauspotential, Photooxidantienpotential).

Insgesamt hat die Analyse gezeigt, dass der Ansatz, eine Umweltentlastung über die Reduzierung der Zementmenge zu erreichen, lohnenswert ist, so lange die notwendige Qualität der Spannbeton-Fertigdecke noch erreicht wird. Die aktuell technisch machbare Reduktion der Zementmenge um 12,6 Prozent ermöglicht immerhin eine Reduktion der Umweltauswirkungen um zwischen knapp 3 und 5 Prozent je nach Wirkungskategorie. Die fehlende Menge Zement kann nach Angaben des Herstellers durch Flugasche und eine Anpassung der Fertiger ermöglicht werden.

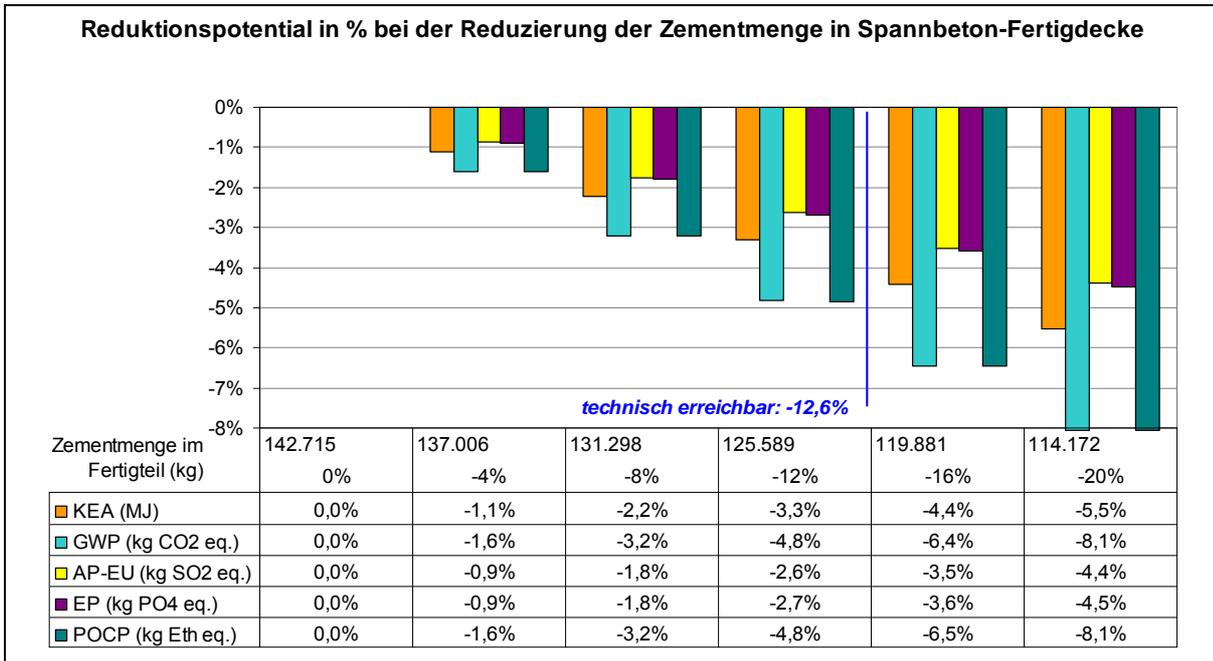


Abbildung 4-23 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Reduzierung der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke“ für alle untersuchten Kategorien.

Nachfolgend sind die Einzelergebnisse der Spannbeton-Fertigdecke für den kumulierten Energieaufwand und das Treibhauspotential im Vergleich zu den anderen untersuchten Alternativen dargestellt. Für die beiden anderen Alternativen – dargestellt in den beiden rechten Balken – wurde die Zementmenge nicht variiert. Die angegebenen Prozentzahlen beziehen sich auf die Reduktion, d.h. wenn 0 % angegeben ist, bedeutet dies, dass die Zementmenge nicht reduziert wurde. Die angegebene Zementmenge (in kg) bezieht sich nur auf das Spannbeton-Fertigteil und das Halbfertigteil.

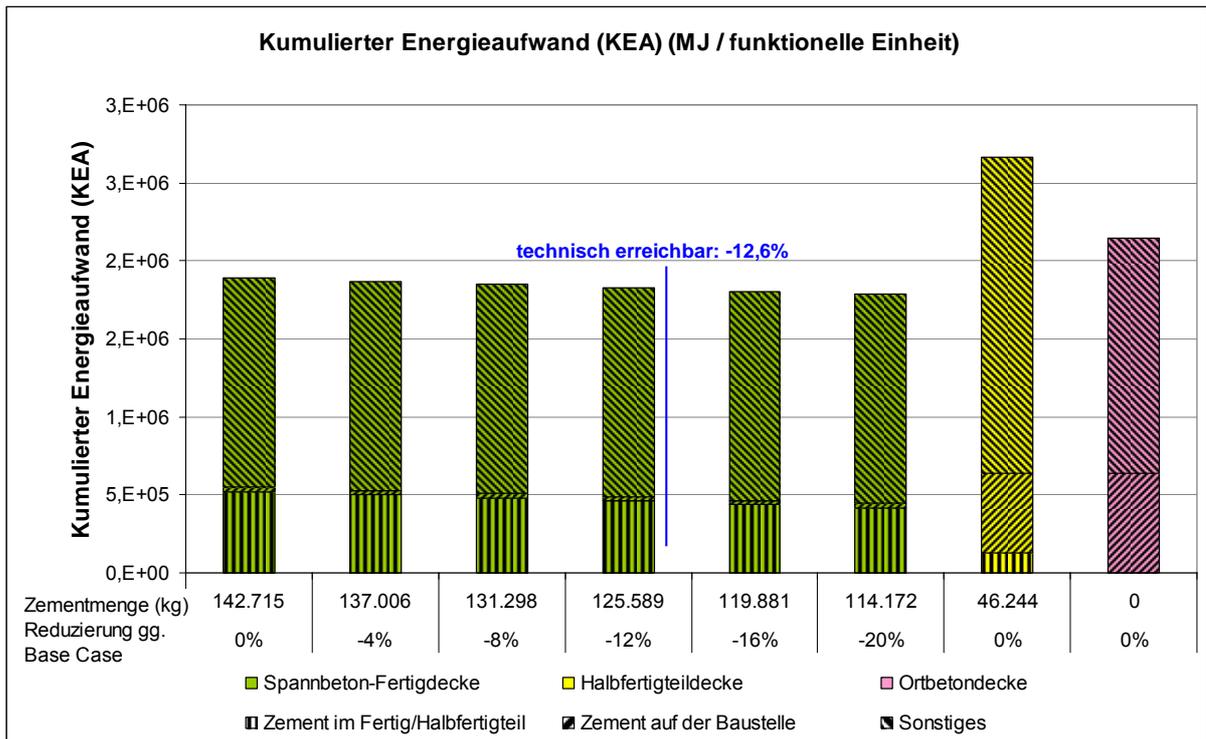


Abbildung 4-24 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke“ für den kumulierten Energieaufwand (KEA).

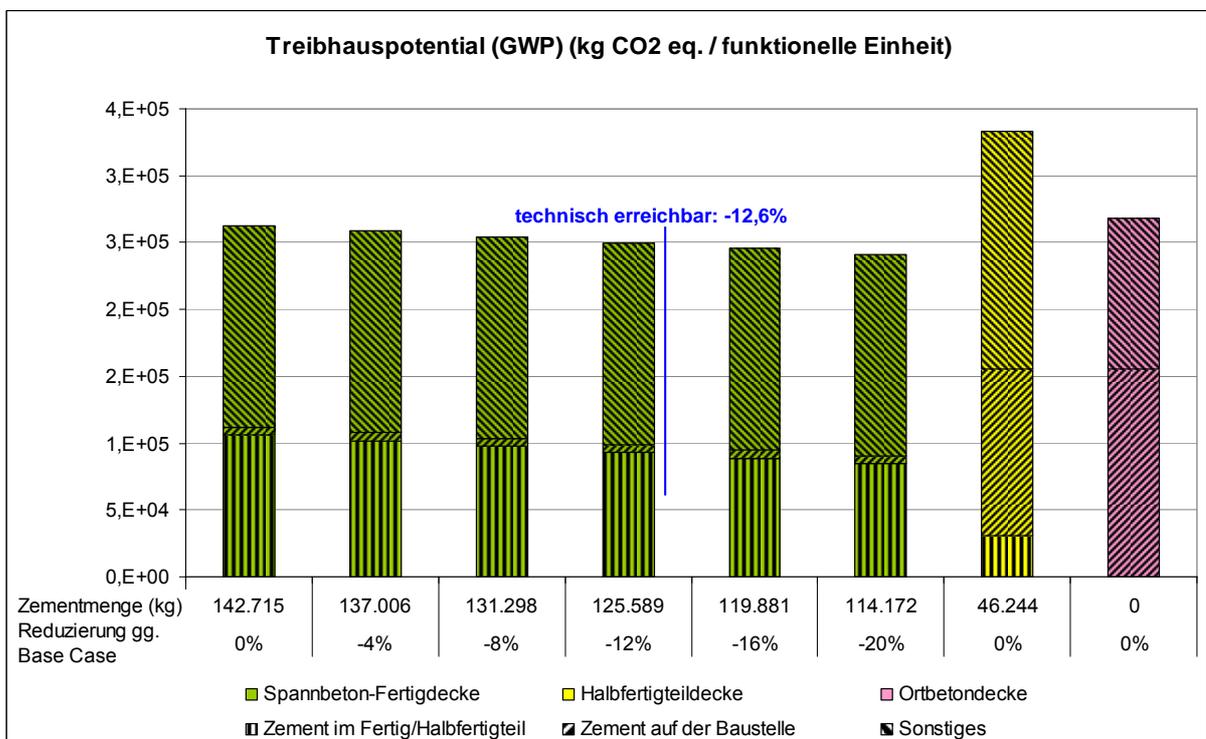


Abbildung 4-25 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke“ für das Treibhauspotential.

4.3.4 Variation der Zementsorte im Halbfertigteil

Wie in Kapitel 3 beschrieben wurde, waren für die vergleichende Ökobilanz weder Primär- noch Sekundärdaten verfügbar, die die Produktion der Halbfertigteile abbilden würden.

Die Ergebnisse müssen deshalb vor diesem Hintergrund interpretiert werden. Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse ist angesichts der gänzlich fehlenden Daten zwar schwierig, dennoch hilft sie, einzuschätzen, ob der Beitrag der Halbfertigteilproduktion ergebnisrelevant sein könnte oder eher nicht.

Folgender Ansatz wurde gewählt:

Ausgehend von der Basisvariante, für die angenommen wurde, dass das Halbfertigteil mit einem Durchschnittszement hergestellt wird, wird untersucht, wie sich das Ergebnis verändert, wenn statt dessen ein CEM I Zement eingesetzt wird. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

Die Verwendung der anderen, umweltbelastenderen Zementsorte hat nur einen geringen Effekt, beispielsweise liegt das Gesamtergebnis auf der Basis des CEM I Zements für das Treibhauspotential knapp ein Prozent, das für das Photooxidantienpotential knapp 6 Prozent über dem des Basisszenarios auf der Basis von Durchschnittszement.

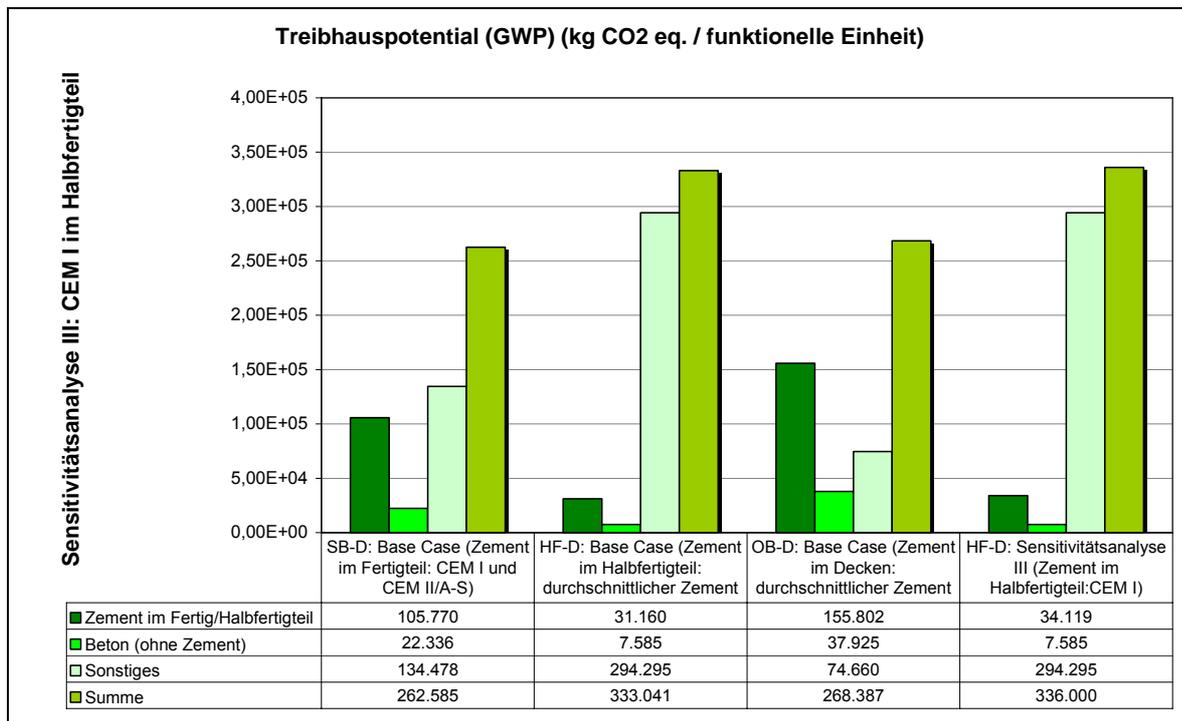


Abbildung 4-26 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation der Zementsorte im Halbfertigteil“ für das Treibhauspotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Zementsorte nicht variiert. Dargestellt ist jeweils der Base Case sowie für die Halbfertigteildecke ganz rechts die Sensitivitätsanalyse.

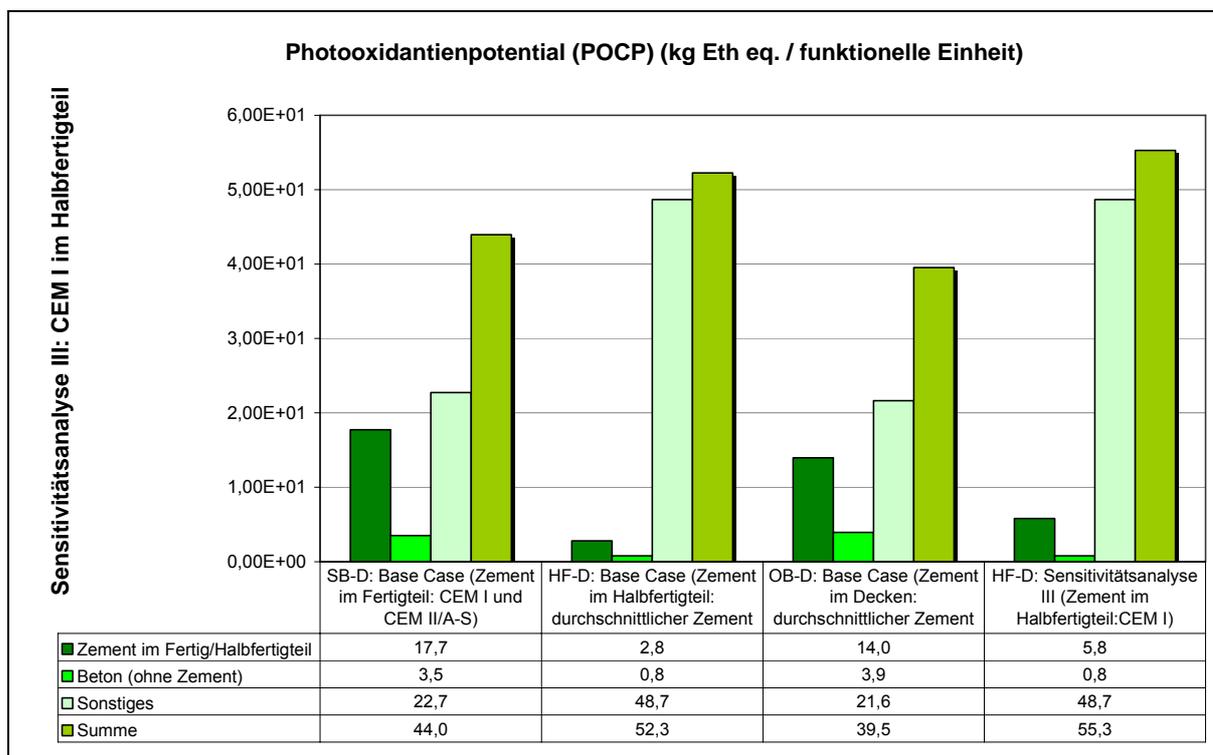


Abbildung 4-27 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse „Variation der Zementsorte im Fertigteil“ für das Photooxidantienpotential. Für die beiden anderen Alternativen wurde die Zementsorte nicht variiert. Dargestellt ist jeweils der Base Case sowie für die Fertigteildecke ganz rechts die Sensitivitätsanalyse.

4.3.5 Variation der Zementsorte für Prozesse auf der Baustelle (Transportbeton)

In einer letzten Sensitivitätsanalyse zur Variation der Zementsorte in dem auf der Baustelle verwendeten Beton (Transportbeton). Statt des im Base Case angenommenen Durchschnittzementes (Fertigteildecke und Ortbetondecke) bzw. Magerbetons (Spannbeton-Fertigteildecke), der nach seinem Klinkergehalt einem CEM II Zement entspricht, wurde für die Sensitivitätsanalyse angenommen, dass ein CEM III Zement verwendet werden kann. Die damit ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 4-9 dargestellt und zeigen, dass für die beiden Alternativen Fertigteildecke und Ortbetondecke je nach Wirkungskategorie eine Umweltentlastung zwischen 6 und 24 Prozent gegenüber dem Base Case erreicht werden kann. Am größten ist die Umweltentlastung für das Treibhauspotential. Eine Ausnahme stellt die Wirkungskategorie Photooxidantienpotential dar, für die sich die Umweltbelastungen gegenüber dem Base Case leicht erhöhen. Allerdings muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass diese Unterschiede auch allein schon durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Datensätzen für die Vorketten des Zements herrühren können, das sie zu Inkonsistenzen führt. Dies gilt in ähnlicher Weise für die Ergebnisse für die Spannbeton-Fertigteildecke.

Für die Spannbeton-Fertigdecke gestaltet sich das Ergebnis anders: aufgrund des im Base Case zugrunde gelegten Magerbetons kommt es bei Verwendung eines CEM III Zements für den Transportbeton auf der Baustelle zu einer leichten Erhöhung der Umweltbelastungen. Allerdings sind derart geringe Veränderungen von unter einem Prozent bis maximal 1,6 Prozent nicht aussagekräftig. Zumal auch hier das Problem durch die Verwendung unterschiedlicher Datensätze besteht.

Tabelle 4-9 Vergleich der Umweltauswirkungen bei Verwendung von CEM III Zement auf der Baustelle mit dem jeweiligen Base Case für alle Deckenalternativen.

Alternative	Berechnung	Zementsorte für Beton auf der Baustelle (Quelle)	KEA	GWP	AP	EP	POCP
SB-D	Base Case	Portlandkalksteinzement (EcoInvent 2001)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
SB-D	Sens. II	CEM III (Nemuth und Kreißig 2007)	100,3 %	100,3 %	100,2 %	100,2 %	101,6 %
HF-D	Base Case	Durchschnittszement (VDZ 2007)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
HF-D	Sens. II	CEM III (Nemuth und Kreißig 2007)	93,8 %	84,3 %	94,8 %	94,4 %	101,4 %
OB-D	Base Case	Durchschnittszement (VDZ 2007)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
OB-D	Sens. II	CEM III (Nemuth und Kreißig 2007)	90,5 %	75,6 %	91,3 %	91,0 %	102,3 %

5 Auswertung und Diskussion

Die Ökobilanz der funktionellen Einheit „Bereitstellung der in einem definierten, dreistöckigen Musterbürogebäude¹⁴ erforderlichen Deckenflächen über einen Zeitraum von 50 Jahren“ für die drei Alternativen Spannbeton-Fertigdecke, Halbfertigteildecke und Ortbetondecke kommt zum Ergebnis, dass die Alternative Halbfertigteildecke in den betrachteten Wirkungskategorien außer dem Eutrophierungspotential insgesamt die größten Umweltauswirkungen besitzt. Demgegenüber ist das Verhältnis zwischen den beiden anderen Alternativen nicht so eindeutig: Beim kumulierten Energieaufwand sind die Werte für die Spannbeton-Fertigdecke niedriger und beim Treibhauspotential liegen sie in der gleichen Größenordnung wie bei der Ortbetondecke. Allerdings sind die Ergebnisse für die Ortbetondecke in den Wirkungskategorien Versauerungspotential und Photooxidantienpotential leicht sowie für das Eutrophierungspotential signifikant niedriger als für die Spannbeton-Fertigdecke. Hintergrund dieser Einschätzung zur Unterscheidung zwischen „leichten“ bzw. „signifikanten“ Unterschieden ist die typische Genauigkeit von Werten in den Kategorien kumulierter Energieaufwand und Treibhauspotential (Einschätzung: Abweichungen von $\geq 10\%$ sind signifikant) bzw. den übrigen drei Wirkungskategorien (Einschätzung: Abweichung von $\geq 20\%$ sind signifikant).

Die wichtigsten Beiträge kommen aus der Bereitstellung des Betons, hier vor allem des Zementes, und aus der des Stahls.

Für den Zement gilt, dass die Spannbeton-Fertigteile für die Alternative Spannbeton-Fertigdecke mit einer Zementsorte hergestellt wird, die einen sehr hohen Klinkeranteil aufweist (CEM I Zement) und zudem ein vergleichsweise großer Anteil Zement eingesetzt wird. Demgegenüber wurde im Base Case davon ausgegangen, dass die beiden anderen Alternativen mit Durchschnittszement, der dem Klinkeranteil nach einem CEM II Zement entspricht, hergestellt werden. Aufgrund des geringeren Klinkeranteils dieses Zements ist insbesondere dessen Treibhauspotential geringer als der des CEM I Zementes (siehe hierzu auch Nemuth und Kreißig 2007). Entsprechend wirkt sich dies auf die absoluten und relativen Beiträge des Zementes bei den untersuchten Alternativen aus.

Die beiden zum Zementeinsatz durchgeführten Sensitivitätsanalysen setzen an zwei Stellen an: Zum einen zeigen sie, dass die Spannbeton-Fertigdecke ihre Bilanz verbessern kann, indem die Menge des eingesetzten Zementes reduziert wird. Im konkreten Fall ist eine Reduktion der Zementmenge um 12,6 Prozent technisch machbar und führt insgesamt zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen um zwischen knapp 3 und knapp 5 Prozent. Ein kompletter Wechsel auf CEM II Zement ist technisch dagegen nicht möglich. Umgekehrt wurde für die Halbfertigteildecke geprüft, welchen Einfluss es auf das Ergebnis hätte, wenn

¹⁴ Das Musterbürogebäude basiert auf einem Entwurf des Kompetenzzentrums ZIP Integriertes Planen und Bauen der ehemaligen imbau GmbH, Neu-Isenburg, unter Leitung von Architekt Holger C. Heilmann (leanfield), Heilmann (2000)

für die Herstellung des Halbfertigteils CEM I Zement statt wie im Base Case angenommen Durchschnittszement eingesetzt wird. Es zeigt sich, dass sich die Bilanz für die Halbfertigteildecke nochmals erkennbar verschlechtern würde.

Es wurde außerdem geprüft, welchen Einfluss ein Wechsel auf CEM III Zement für den auf der Baustelle eingesetzten Beton (bei der Spannbeton-Fertigdecke für den Fugenverguss) hat. Hier zeigten die Ergebnisse, dass für die Spannbeton-Fertigdecke keine Vorteile bestehen, da bereits ein Magerbeton eingesetzt wird. Für die beiden anderen Alternativen dagegen führt der Wechsel von Durchschnittszement auf CEM III Zement zu erkennbaren Reduktionen der Umweltauswirkungen. Allerdings muss hierbei angemerkt werden, dass die ermittelten Unterschiede zum Teil auf die unterschiedlichen Datenquellen zurückzuführen sind.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass sowohl die Zementsorte als auch die eingesetzte Zementmenge einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben: je weiter die Menge des eingesetzten Zementes reduziert werden kann und je geringer der Klinkeranteil des eingesetzten Zementes ist, umso geringer sind die Umweltauswirkungen.

Für den verwendeten Stahl gilt, dass er ebenfalls wesentlich zum Ergebnis beiträgt (Base Case, Beitrag zwischen 8 und 63 Prozent). Bei der Spannbeton-Fertigdecke wird Spannstahl eingesetzt, der einen höheren Aufwand bei der Stahlverarbeitung besitzt (z.B. Wärmebehandlung) und für den unklar ist, zu welchen Anteilen er typischerweise aus Primär- resp. Sekundärstahl hergestellt wird. Bei den beiden anderen Alternativen wird Betonstahl eingesetzt, der zumindest in Deutschland zu praktisch 100 Prozent aus Sekundärmaterial produziert wird. Die Sensitivitätsanalyse zur Variation des Primär- resp. Sekundäranteils kam allerdings zum Ergebnis, dass der Einfluss nur geringfügig ist. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass für das Recycling von Primärstahl eine Gutschrift erteilt werden kann, während es sich beim Recycling von Sekundärstahl um Closed-Loop-Recycling handelt, für das keine Gutschrift erteilt werden kann. Der höhere Aufwand bei der Stahlverarbeitung spiegelt sich darin wieder, dass der deutlich geringere Materialeinsatz in der Spannbeton-Fertigdecke nicht voll auf das Ergebnis durchschlägt.

Neben Beton und Stahl spielen bei der Spannbeton-Fertigdecke und der Halbfertigdecke auch die Prozesse zur Herstellung der jeweiligen Fertig- bzw. Halbfertigteile und deren Transport vom Werk auf die Baustelle eine Rolle. Letzteres ist insbesondere bei der Spannbeton-Fertigdecke von Interesse, da es deutschlandweit relativ wenige Werke gibt, die Spannbeton-Fertigteile herstellen und die Distanzen mit durchschnittlich 167 Kilometern deutlich höher sind als bei den beiden anderen Alternativen. Eine entsprechende Sensitivitätsanalyse zur Variation der Transportdistanzen zeigte allerdings, dass sich das Verhältnis zur Halbfertigteildecke erst nach einer deutlichen und nach Aussage von Branchenvertretern eher unwahrscheinlichen Erhöhung der Distanzen umkehrt. Dennoch ist die von der Branche gewählte Lösung, die Zulieferung über möglichst baustellennahe Werke zu veranlassen, sinnvoll.

Der in der Spannbeton-Fertigdecke deutlich geringere Materialeinsatz an Beton und Stahl schlägt nicht in der vielleicht erwarteten Weise auf den ökobilanziellen Vergleich zur Halbfertigteil- und Ortbetondecke durch. Dies hat mehrere Gründe:

Der geringeren Menge stehen zum einen umweltbelastendere Qualitäten gegenüber (eine Zementsorte mit höherem Klinkeranteil), zum anderen aber auch aufwendigere Verarbeitungsprozesse (Stahlverarbeitung, Herstellung der Spannbeton-Fertigteile) gegenüber. Hinzukommt der Transport, der an sich einen relativ kleinen Effekt hat, aber dennoch die Bilanz relativ verschlechtert.

Folgende Empfehlungen können zur Optimierung der betrachteten Umweltauswirkungen bei allen drei Alternativen gegeben werden:

(1) Spannbeton-Fertigdecken

- Reduktion der Zementmenge im Spannbeton-Fertigteil auf die technisch notwendige Mindestmenge, derzeit kann damit 12,6 Prozent weniger Zement eingesetzt werden.
- Prüfung, inwiefern die Prozesse zur Spannbeton-Fertigteilproduktion noch verbessert und Umweltauswirkungen reduziert werden können (z.B. Bahnheizung).
- Beibehaltung der Praxis, sehr weite Transporte der Spannbeton-Fertigteile auf die Baustelle, zu vermeiden.

(2) Halbfertigteildecken

- Verwendung von CEM III Zement auf der Baustelle, soweit technisch machbar.
- Keine Verwendung von CEM I Zement für die Herstellung der Halbfertigteile.

(3) Ortbetondecke

- Verwendung von CEM III Zement auf der Baustelle, soweit technisch machbar.

6 Literatur

- Bisani 2006 Bisani, Karl. Fachhochschule München, Fachbereich 02 Bauingenieurwesen, Skript zur Vorlesung, am 12.12.2008 abgerufen unter http://www.bau.hm.edu/FK02/fakultat/personen/professoren/prof-bisani/studieninhalte-downloads/baustelleneinrichtungsplanung/be_skript_kap_89.pdf
- CML 2008 Institute of Environmental Sciences, Leiden University (CML). CML-IA is a database that contains characterisation factors for life cycle impact assessment (LCIA). Website: <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- DW Systembau 2005 Technische Broschüre von DW Systembau. 2005
- Eyerer und Reinhardt 2000 Eyerer, Peter; Reinhardt, Hans-Wolf. Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung, Birkhäuser Verlag. 2000
- Forum Motor-Talk 2008 am 14.11.2008 abgerufen unter <http://www.motor-talk.de/forum/lebensdauer-typische-lkw-anwendungen-spritverbrauch-t1809488.html>
- Frischknecht und Emmenegger 2003 Frischknecht, Rolf; Faist Emmenegger, Mireille. Strommix und Stromnetz. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (Hrsg. Dones, R.). Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. 2003 abgerufen unter: www.ecoinvent.ch.
- Doka 2000 Doka, Gabor. Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien – Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen von Gebäuden, Eidgenössische Technische Hochschule ETH. Zürich, CH. 2000
- GEMIS 4.42 2007 Software Gesamt-Emissionsmodell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.42 . Stand 2007. Öko-Institut e.V. www.gemis.de
- Hauke 2009 Hauke, Bernhard. Zur Ressourceneffizienz und Ökobilanzierung von Baustahl in geschlossenen industriellen Kreisläufen. Bauingenieur. Band 84, S. 313-317. Juli / August 2009
- Heilmann 2000 Musterbürogebäude: Entwurf des Kompetenzzentrums ZIP Integriertes Planen und Bauen der ehemaligen imbau GmbH, Neulsenburg, unter Leitung von Architekt Holger C. Heilmann (leanfield). 2000
- IPCC 2007 Intergovernmental panel on climate change (IPCC), Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Chapter 2: Changes in Atmos-

- pheric Constituents and in Radiative Forcing. 2007
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- Nemuth und Kreißig 2007 Nemuth, Silke; Kreißig, Johannes. Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszyklusdaten. Netzwerk Lebenszyklusdaten. Arbeitskreis Werkstoff im Bauwesen. PE International. Leinfelden-Echterdingen. 2007
- Quack und Rüdener 2007 Quack, Dietlinde; Rüdener, Ina; Stoffstromanalyse relevanter Produktgruppen – Energie- und Stoffströme der privaten Haushalte in Deutschland im Jahr 2005. Freiburg 2007
- VDZ 2007 Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Forschungsinstitut der Zementindustrie. Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbetone der Druckfestigkeitsklassen C20/25, C25/30 und C30/37. Herausgeber: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB). Technischer Bericht TB-BTe 2135/2007

7 Externes kritisches Gutachten

Die zu prüfende Ökobilanz „Ökobilanz Betondecken. Eine vergleichende Analyse von Spannbeton-Fertigdecken mit Halbfertigteildecken und Massivdecken aus Ortbeton“ wurde vom Öko-Institut Freiburg („Ersteller“) im Auftrag von sieben Unternehmen der Spannbeton-Fertigdecken Branche („Auftraggeber“) erarbeitet. Weil die vorliegende Ökobilanz den Anspruch erhebt, mit den internationalen Normen ISO EN 14040 und 14044 überein zu stimmen, vergleichende Aussagen zum Umweltverhalten der untersuchten Systeme enthält und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden soll, ist eine „kritische Prüfung“ erforderlich. Die kritische Prüfung wurde parallel zum Verlauf der Ökobilanz durchgeführt und startete mit deren Scoping-Phase.

7.1 Herangezogene Normen und Prüfkriterien

Der Prüfung werden die internationalen Normen ISO EN DIN 14040 (2006) und ISO EN DIN 14044 (2006) zu Grunde gelegt.

Geprüft wird nach den in der LCA-Rahmennorm 14040 vorgegebenen Kriterien, ob

- *die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit dieser internationalen Norm übereinstimmen;*
- *die bei der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet sind und dem Stand der Ökobilanz-Technik entsprechen;*
- *die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind;*
- *die Auswertungen und die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Ökobilanz berücksichtigen;*
- *der Bericht transparent und in sich stimmig ist.*

7.2 Ablauf des kritischen Gutachtens

Die Auftaktbesprechung zum Projekt erfolgte am 23. Januar 2009 zu einem Zeitpunkt, zu dem seitens der Ersteller Daten gesichtet waren, mit der eigentlichen Ökobilanz aber noch nicht begonnen worden war. Es wurden gemeinsam die zu bilanzierenden Systeme besprochen und Systemgrenzen festgelegt. Außerdem wurden die Datenlage zu den drei Systemen analysiert und Festlegungen zu den zu verwendenden Datensätzen getroffen.

Die Diskussion und erste Analyse der drei Systeme zur Herstellung von Betondecken diente auch der Identifikation der Hauptumweltbeiträge und daraus abgeleitet der zu verwendenden Umweltwirkungskategorien.

Auf Basis erster Bilanzierungsergebnisse bzw. eines ersten Entwurfs des Berichts erfolgte eine erste kritische Begutachtung. Die Rückmeldungen zur vorgelegten Massenbilanz für die drei Systeme führte zur Beauftragung eines externen Statik-Gutachtens zur Statischen Berechnung der Geschossdecken und einer Dachdecke eines Musterbürogebäudes durch das Büro KHP König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH in Dortmund.

Am 29. September 2009 erfolgte eine weitere Besprechung in einem um jeweils einen Vertreter des Bundesverbandes der Deutschen Transportindustrie BTB und des Vereins deutscher Zementwerke e.V. erweiterten Personenkreis. Zu diesem Termin wurden die Ergebnisse des Statik-Gutachtens (s.o.) sowie die überarbeiteten Ergebnisse zur Ökobilanz vorgestellt und diskutiert. Am 2. Dezember wurde eine zweite Entwurfsfassung des Endberichts der Ökobilanz zur Abstimmung vorgelegt, mit dem 17. Dezember eine Dritte, die auch die Grundlage für das abschließende kritische Gutachten war.

Der Ersteller der Ökobilanz zeigte sich über den ganzen geschilderten Prozess jederzeit offen für die Möglichkeit, gegebenenfalls die Anmerkungen und Kritikpunkte aus der kritischen Begutachtung in der Bearbeitung des Berichts zu berücksichtigen.

7.3 Ergebnis der kritischen Prüfung

7.3.1 Allgemeiner Eindruck

Die Studie macht einen guten allgemeinen Eindruck. Der zentrale Gegenstand der Studie ist nachvollziehbar herausgearbeitet und allgemein verständlich dargestellt.

Der Bericht macht auch den auf fachlich hohem Niveau befindlichen Umgang des Erstellers sowohl mit der Methode der Ökobilanzierung als auch mit dem Thema der Untersuchung deutlich.

7.3.2 Übereinstimmung mit der Norm

Die Studie erhebt den Anspruch, dass die Erstellung nach den internationalen Normen ISO REN 14040 und 14044 erfolgte. Dieser Anspruch wurde unserer Einschätzung nach erfüllt.

Den in den genannten Normen festgelegten hohen Anforderungen für vergleichende Ökobilanzen, deren Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, wurde – soweit für die Gutachter anhand des Berichts und der bereit gestellten Informationen erkennbar – Rechnung getragen.

7.3.3 Wissenschaftliche Begründung der Methodik und Stand der Ökobilanztechnik

Betondecken in Gebäuden werden in Deutschland mengenmäßig im Wesentlichen als Halfertigdecken und Massivdecken aus Ortbeton hergestellt. Zu den alternativen Deckensystemen gehören die Spannbeton-Fertigdecken. Diese drei Systeme wurden im Rahmen der Ökobilanz untersucht. Die Ökobilanz beleuchtet die Stärken und Schwächen dieser Systemalternativen aus ökologischer Sicht. weitere Systeme wie Stahlverbunddecken, Hohlkörperdecken, Decken aus Fertigteil-PI-Platten etc. wurden nicht untersucht, da sie mengenmäßig weit hinter den Massiv- und Halfertigteildecken zurückbleiben.

Mit der vorliegenden Ausarbeitung sollen Planer bzw. Bauherren Informationen an die Hand bekommen, um vor der Ausschreibung der Bauleistungen Alternativen der Herstellung von Betondecken abwägen zu können. Als funktionelle Einheit wurde daher als typische Aufgabenstellung der Praxis ein Bürogebäude ausgewählt mit einer Bestandszeit von 50 Jahren. Das architektonische und statische Konzept für das Gebäude wurde so gewählt, dass alle drei untersuchten Systeme in der Baupraxis auch tatsächlich Alternativen darstellen und entsprechend eingesetzt werden könnten. Da die damit verbundenen Massen an Stahl und Beton das Bilanzierungsergebnis ganz wesentlich beeinflussen, wurde für die Mengenermittlung mit der Arbeit des Büros KHP¹⁵ eine externe Expertise eingeholt. Nach Einschätzung der CR-Gutachter sind das architektonische Konzept und die Massenermittlung plausibel. Sie stellen eine gute Grundlage für einen praxisnahen Vergleich dar.

In eine Umweltbilanzierung einbezogen werden sollten grundsätzlich alle Prozesse der betrachteten Produktsysteme von der Rohstoffgewinnung bis zur Beseitigung und damit der gesamte Lebensweg. Dies bedeutet auch, dass alle Material- und Energieinputs bis dahin zurückverfolgt werden, wo sie dem System Umwelt entnommen werden. Dies geht in aller Regel mit verhältnismäßigem Aufwand nicht für alle Inputmassenströme. Es werden daher Abschneidekriterien festgelegt. Bei sehr kleinen Massenströmen und aus Umweltsicht unkritischen Prozessen kann die Einbeziehung von Vorketten aus Praktikabilitätsgründen unterbleiben (Abschneidekriterien). Wichtig ist, dass alle ergebnisrelevanten Prozesse berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall war dies bis auf die Verpackungen nicht notwendig.

Außerhalb der Systemgrenzen liegt die Nutzungsphase der Gebäude. Die Deckensysteme erfüllen alle die gleichen Anforderungen bspw. an den Trittschall oder den Brandschutz. Zudem wird weder die Beheizung der Gebäude noch die Unterhaltung der Gebäudedecken durch die Wahl der Systemalternativen beeinflusst. Auch die Investitionsgüter, d.h.

¹⁵ König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH, Statische Berechnung. Standsicherheitsnachweis und Mengenermittlung für eine Geschossdecke und eine Dachdecke eines Musterbürogebäudes, Dortmund September 2009

insbesondere die Produktions- und Transportmittel wurden nicht in die Bilanzierung aufgenommen. Angesichts der Lebenszeiten und der damit verbundenen Durchsatzleistungen ist der mit ihrer Herstellung verbundene spezifische Aufwand bzw. die damit verbundene Umweltlast bei den diskutierten Deckenflächen und damit Materialmengen zu vernachlässigen.

Die Festlegung der Systemgrenzen ist aus Sicht der CR-Gutachter plausibel.

Für die Wirkungsabschätzung werden von der Norm nur allgemeine Vorschriften zum methodischen Vorgehen gemacht, nicht jedoch bestimmte Wirkungskategorien und Indikatoren vorgegeben. Es ist deshalb wichtig, sich aus den systemimmanenten Belastungspfaden der diskutierten Produktalternativen die relevanten Wirkungskategorien abzuleiten. Die für die Ökobilanz vom Ersteller ausgewählten Wirkungskategorien entsprechen durchaus der auch in der internationalen Ökobilanzpraxis gängigen Vorgehensweise und der Charakteristik der bilanzierten Produkte.

Die Wirkungskategorie Eutrophierung wurde nicht nach Belastungswegen in Eutrophierung aquatisch und terrestrisch aufgeteilt. Dies ist jedoch grundsätzlich sinnvoll, da unterschiedliche Umweltmedien betroffen sind und sich auch die Emissionsquellen in den Produktionsprozessen unterscheiden. Für das Bilanzierungsergebnis spielt das bei der vorliegenden Untersuchung aber keine Rolle, das aufgezeigte Ergebnis Eutrophierung gesamt dürfte vor allem aus dem Anteil terrestrisch d.h. über den Emissionspfad Luft resultieren.

Quecksilberemissionen in die Luft sind für die Zementherstellung ein spezifischer Belastungspfad, von dem ein humantoxisches Gefährdungspotenzial ausgeht. Die Emissionen können sich jedoch deutlich nach Art des eingesetzten Zementes und je nach Produktionsstandort unterscheiden. Beide Randbedingungen sind nicht durch die betrachteten Systemalternativen von Betondecken vorgegeben. Wohl aber durch die unterschiedlichen verwendeten Betonsorten die Zementmenge. Bei der Auswertung und Diskussion der Bilanzierungsergebnisse wird der Aspekt Hg-Emissionen auch qualitativ nicht aufgegriffen.

Im Rahmen der Bilanzierung waren auch Allokationen notwendig. Dies betrifft zum einen zur Abbildung des Herstellungsprozesses der Spannbeton-Fertigdecken. In den beiden relevanten Werken werden unterschiedliche Deckentypen hergestellt, ohne dass sich die Daten diesen unterschiedlichen Produkten zuordnen ließen. Die vorgenommene Allokation über die Deckenfläche ist nachvollziehbar und plausibel.

Systembezogene Allokationen wurden auch notwendig, da das Produkt Betonstahl nach dem Gebrauch einen Zusatznutzen erbringt, d.h. in der Frage Gutschriften, der über den in der funktionellen Einheit abgebildeten Nutzen hinausgeht. Mit Abriss des Bürogebäudes zum

Lebenszeitende fällt Bauschutt in Form von Betonbruch sowie Betonstahl an. Sowohl die Metalle als auch die mineralischen Bestandteile des Bauschutts lassen sich aufbereiten und in den Wirtschaftskreislauf zurückführen. Bei den Metallen dürfte dies eng erfolgen können, d.h. über die Elektrostahlerzeugung direkt wieder in die Herstellung von bspw. Betonstählen. Die Herstellung von Betonstählen in Deutschland erfolgt mit Hilfe von Sekundärmaterial. In diesen Fällen handelt es sich um ein closed loop.

Nicht bei allen in Deutschland auf dem Markt befindlichen Betonstählen, gerade aber bei den vorgespannten Stählen in den Spannbeton-Fertigdecken, ist dies unbedingt zu erwarten. In diesen Fällen stellt sich die Frage, wie der mit der Vermarktung dieser Altmetalle verbundene Nutzen den Produktsystemen zugeordnet werden kann. Die Verwertung des Altmetalls ersetzt Prozesse zur Herstellung von Neumaterial. Dieser Nutzen wird bilanztechnisch in Form einer Gutschrift angerechnet.

Durch die CR-Gutachter wurde angeregt, die Allokation nach zwei Ansätzen durchzuführen. Bei dem 50/50-Ansatz wird der Nutzen der Sekundärmaterialien im Verhältnis 50:50, also paritätisch, zwischen den abgebenden System und dem aufnehmenden System aufgeteilt. Dies lässt sich nicht allein aus wissenschaftlichen Erkenntnissen begründen, sondern stellt eine Konvention dar. Zur Beurteilung der Ergebnisrelevanz wird daher auch eine 100:0-Allokation angewandt, d.h. die Gutschrift wird vollständig dem abgebenden System angerechnet. In Abhängigkeit vom Allokationsansatz sind bestimmte Lenkungswirkungen zu erwarten. So wird bei der 50:50-Methode sowohl dem abgebenden als auch dem aufnehmendem System der gleiche Anreiz zum verstärkten Recycling gegeben. Bei der 100%-Methode wird der Anreiz fast ausschließlich dem abgebenden System gegeben.

Die Ersteller haben stattdessen die Frage der Stahlherkunft (primär oder sekundär) sowie die Rückführung der Altstähle in den Wirtschaftskreislauf im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung durch zwei Szenarien berücksichtigt. Da die Bilanzierungs-Ergebnisse detailliert dokumentiert sind, lässt sich auch die Konsequenz einer 50:50-Zuordnung auf das Bewertungsergebnis ablesen.

Zusammenfassend kann bestätigt werden, dass die im Rahmen dieser Studie angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet und technisch zutreffend sind.

7.3.4 Validität und Zweckmäßigkeit der Daten

Wie in jeder Ökobilanz mussten auch in dieser Arbeit Annahmen getroffen werden und Daten aus verschiedenen Quellen, z.B. aus eigenen Datenerhebungen der Auftraggeber oder Literatur, verwendet werden. Für das Ergebnis der Ökobilanz sind einige Prozesse und damit die zugrunde liegenden Datensätze entscheidend.

Einer dieser Prozesse ist die Zementproduktion. Insbesondere für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt beeinflusst diese das Bewertungsergebnis deutlich. Die Menge Klinker bzw. der Anteil Portlandzement am Zementbedarf und damit die Zementsorte spielen hierbei eine große Rolle. Die Informationen zu Zementsorte und -menge für die Fertigdecke wurde Herstellerangaben entnommen. Die verwendeten Datensätze beeinflussen das Ergebnis tendenziell zu Ungunsten der Systemalternative Fertigdecke. Eine gewisse Ausnahme besteht in den verwendeten Datensätzen zu den spezifischen Umweltwirkungen der Herstellung der verschiedenen Zementsorten. Wie im Vergleich der Tabellen 4-5 und 4-8 entnommen werden kann, liegen die Umweltlasten des Durchschnittzements nach VDZ relativ nahe an denen für CEM I gemäß PE International. Dies zeigt, dass im Referenzjahr 2004 noch ein relativ hoher Anteil CEM I im Transportbeton verwendet wurde. Dies dürfte sich heute aus der Diskussion CO₂-Minderung sowie aus Kostengründen deutlich verändert haben, während bei den Spannbetondecken auch heute noch v.a. CEM I verwendet zu werden scheint.

Die Sensitivität der Datensätze wird von den Erstellern ausführlich erläutert und geprüft.

Gerade für die Wirkungskategorien Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sind die Stahlerzeugung und -verarbeitung bestimmende Prozesse. Die Ergebnisse werden demnach deutlich von den für die Systemalternativen angesetzten Stahlmengen, die Stahlarten sowie den unterschiedlichen Verarbeitungsaufwand bestimmt. Die angesetzten Stahlmengen unterscheiden sich systemimmanent deutlich. Sie wurden aus Massenermittlungen aus externen Gutachten abgeleitet und sind plausibel. Die eingesetzten Stähle unterscheiden sich möglicherweise unter den Systemalternativen. Im Basis-Szenario wird über alle Systemalternativen ein Anteil von 75 % Primärstahl und 25 % Sekundärstahl angenommen. Die Datensätze zur Abbildung der Herstellung sind EcoInvent 2.0 entnommen. Die Annahmen zu den Stahlarten sind sensitiv. Entsprechend wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt und in Tabelle 1-47 dokumentiert.

Nimmt man den gegenüber dem Basisfall nicht weniger wahrscheinlichen Fall an, dass konventioneller Betonstahl über das Elektrostahlverfahren und damit aus Sekundärmaterial hergestellt wird, während Spannstähle ausschließlich aus Primärmaterial stammen, dann verschieben sich die Relationen zwischen den Systemalternativen zu Ungunsten der Fertigteildecken. Dies gilt insbesondere dann, wenn man für die „Gutschriften“ die 50:50-Regel anwendet, das den erzielbaren Substitutionserfolg nur zu 50 % dem ausschließlich aus Primärmaterial bestehenden Produkt Fertigdecke zuordnet.

Unter Sonstiges sind einige Prozesse und ihre Umweltwirkungen zusammen gefasst. Adressiert „Sonstiges“ in der Regel eher auf unbedeutende sonstige Prozesse, sind diese im vorliegenden Fall teilweise für das Bilanzierungsergebnis sehr bedeutend. Dies gilt vor allem für die Transportketten sowie die Prozesse zu end of life. Die Sensitivität der Transport-

distanzen der Fertigprodukte wurde vom Ersteller ausführlich beleuchtet. Zu beachten sind darüber hinaus die großen Transportdistanzen auf der Straße für die Zuschlagstoffe für die Betonherstellung im System Fertigteildecke, sowie die in diesem Falle konservative Annahme einer 50 %igen Auslastung, d.h. einer Leerrückfahrt. Bei den angesetzten Distanzen von 85 bis 145 km ist dies in der Realität kaum zu erwarten.

Generell lässt sich sagen: Mussten Annahmen an ergebnisrelevanten Stellen getroffen werden, wurde die Sensitivität dieser Annahmen über entsprechende Sensitivitätsbetrachtungen überprüft.

Für Halbfertigdecken liegen kaum Daten und Informationen vor. Die Ergebnisse für dieses System sind unter einem deutlichen Vorbehalt zu sehen. Allerdings wurden die Abschätzungen vorsichtig getroffen und sind durchaus plausibel. Die Aussagen sind in der Tendenz deshalb sicherlich korrekt.

Im Bericht sind nur beschränkt Daten und Rechenwerte im Sinne einer Sachbilanz dokumentiert. Die Angaben zu den Datensätzen beschränken sich im Wesentlichen auf die Benennung der Datenquellen. Die meisten dieser Quellen sind den Gutachtern bekannt und öffentlich zugänglich. Es kann davon ausgegangen werden, dass die vom Ersteller verwendeten Datensätze eine angemessene Auswahl für die Umsetzung der betrachteten Produktlebenswege darstellen. Ein Abgleich der Datensätze mit den Datenbanken wurde im Rahmen des CR nicht durchgeführt. Auch ein Einblick in die eigentliche Berechnung bzw. Prüfung der Algorithmen fand nicht statt.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass „die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind.“

7.3.5 Berücksichtigung des Ziels der Studie und der Einschränkungen bei der Auswertung

Es gelang sehr gut, die grundlegenden Einflussfaktoren für die ökobilanziellen Festlegungen sowie die Ergebnisse in verständlicher Form darzustellen und damit den Anforderungen der Norm nachzukommen. Es kann gesagt werden, dass der Bogen von der Zielsetzung über die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung bis hin zur Auswertung konsistent gespannt wurde.

7.3.6 Transparenz und Stimmigkeit des Berichts

Der Endbericht ist gut lesbar und in sich stimmig. Das Öko-Institut hat die gewählte Modellierung transparent erklärt und begründet und geht auch auf Einschränkungen und Grenzen ein. Die Datengrundlage, deren Qualität sowie die getroffenen Annahmen sind ausreichend dokumentiert und die Berechnungen grundsätzlich nachvollziehbar.

Die Transparenz in Bezug auf die Originaldaten ist gegeben. Die relevanten Daten werden benannt. Zudem sind für weitere Datensätze die Quellenangaben umfassend dargestellt.

Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse erlaubt eine Zuordnung der berechneten Umweltwirkungen zu den Lebenswegstufen, aus denen die Effekte vorwiegend zu erwarten sind. Damit wird gleichzeitig auch eine empfohlene Dominanzanalyse durchgeführt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in verständlicher Form und bereitet bei der Begutachtung keine Schwierigkeiten. Insgesamt kann die Transparenz und Stimmigkeit der Studie positiv beurteilt werden.

7.4 Fazit

Die Studie wird von den Gutachtern in allen Teilen als normgerecht beurteilt. Das System Spannbetondecke weist tendenziell Vorteile gegenüber den Halbfertigdecken auf. Gegenüber der weiteren Systemalternative der Herstellung der Decken auf der Baustelle über Ortbeton bestehen keine signifikanten Vorteile. Dies ist nicht immer systemimmanent, sondern den gewählten Randbedingungen geschuldet. Die Ökobilanz zeigte deutlich Ansatzpunkte zur Systemoptimierung auf.

8 Anhang

8.1 Strombereitstellungsmodule für Deutschland und Belgien

Tabelle 8-1 Zusammensetzung des Kraftwerksparks für die Strombereitstellung beim EU-Strommix sowie für die Länder Deutschland und Belgien (Frischknecht und Emmenegger 2003).

	EU (UCTE) [%]	Deutschland [%]	Belgien [%]
Fossile Energieträger	41,29	56,79	34,50
Wasserkraft	13,66	4,42	1,65
Sonstige erneuerbare Energien	1,19	1,84	0,89
Kernkraft	33,83	27,73	46,63
Abfälle	0,62	0,49	1,20
Importanteil	9,41	8,73	15,13
Summe	100	100	100

8.2 Datengrundlage für die Spannbeton-Fertigdecken-Produktion in den Werken BRESPA (Schneverdingen) und Echo (Houthalen)

Tabelle 8-2 Gesamtproduktion von DW Systembau im Werk BRESPA Schneverdingen im Jahr 2007 in Quadratmeter produzierte Deckenfläche. Im Werk werden sowohl Hohldecken (Anteil: 98,8 Prozent) als auch Massivdecken (Anteil: 1,2 Prozent) hergestellt.

Deckentyp	Menge	Einheit	Anteil an produzierter Fläche
150 und 180 mm Hohlplatte	87.481	m ²	18,02 %
200 und 220 mm Hohlplatte	157.506	m ²	32,44 %
265, 320 und 400 mm Hohlplatte	234.715	m ²	48,34 %
150 und 180 mm Massivplatte	5.873	m ²	1,21 %
Summe	485.575	m ²	100,00 %

Tabelle 8-3 Gesamtproduktion von Echo, Werk Houthalen (Belgien) im Jahr 2007 in Quadratmeter produzierte Deckenfläche. Neben Decken wurden auch Balken hergestellt (Anteil: 4,2 Prozent).

Gesamtproduktion (Menge in Jahresproduktion)	Menge	Einheit
VS 12 – 15	370.835	m ²
VS 18 – 20	406.186	m ²
VS 24 / SC 27	230.133	m ²
SC 32 – 40	115.467	m ²
Ecn Balken	49.584	m ²
Summe	1.172.205	m ²

8.3 Zusammenstellung der Rohdaten

8.3.1 Rohdaten bezogen auf DW Systembau, Werk BRESPA in Schneverdingen

Tabelle 8-4 Materieller Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (485.575 m² Deckenfläche) bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen

Materieller Input	Menge	Einheit
Sand aus der eigenen Sandgrube	60.583	t
Weserkies, Korngröße 2-8	55.566	t
Weserkies, Korngröße 8-16	28.733	t
Zement, Spezifikation: CEM I 52,5 R	16.556	t
Zement, Spezifikation: CEM IIAS 42,5 R	6.428	t
Spannstahl (St 1570/1770)	2.920	t
Abdeckkappen (Polypropylen)	23.500	kg
-Deckenauflagerstreifen (Gummi)	27.990	kg
Betonverflüssiger (ADVA Flow375(BV/FM))	18.055	ltr
Bahnöl, Spezifikation (Addiment Trennmittel TR1)	12.000	ltr
Flockungsmittel (Spezifikation: 2530)	150	kg
Grundwasser (eigene Förderung)	41.274	m ³

Tabelle 8-5 Energie Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (485.575 m² Deckenfläche) bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen

Energie Input	Menge	Einheit
Elektrizität, Mittelspannung aus Stromnetz (Transformation auf Niederspannung in Werk)	1.191	MWh
Flüssiggas Propan	1160	kg
Heizöl EL (inkl. Heizung Büro)	306.733	ltr
Diesel (inkl. für Dienstfahrzeuge)	88.220	ltr

Tabelle 8-6 Abfälle bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (485.575 m² Deckenfläche) bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen

Abfälle	Menge	Einheit	Beseitigung/Recycling
Ausschuss Decken	1.873	m ³	Wird geschreddert für den Straßenbau
Holz (Stapelhölzer)	434	m ³	Teils Entsorgung auf den Baustellen, teils durch das Werk
Spannstahl	319	t	Wird als Schrott verkauft

Tabelle 8-7 Transport der Materialien zu DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen

Anlieferung der Material	Distanz [km]	Transportmittel und zul. Gesamtgewicht
Sand aus eigener Sandgrube	0,25	Lkw 15 t
Weserkies, Korngröße 2-8 (gemittelte Entfernung)	145	Lkw 28 t
Weserkies, Korngröße 8-16	145	Lkw 28 t
Zement, Spezifikation: CEM I 52,5 R	269	Lkw 27 t
Zement, Spezifikation: CEM IIAS 42,5 R	91	k.A.
Spannstahl, alle Spannstähle St 1570/1770	800	Lkw 24 t
Betonverflüssiger, Spezifikation: ADVA Flow375(BV/FM)	300	Lkw

8.3.2 Rohdaten bezogen auf Echo, Werk Houthalen (Belgien)

Tabelle 8-8 Materieller Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m² Deckenfläche) bei Echo, Werk Houthalen (Belgien)

Materieller Input	Menge	Einheit
Sand 0/2	101.943,00	t
Splitt 2/12	110.430,00	t
Kalkstein 2/6 und 6/14	40.549,00	t
Zement CEM I 52.5	38.552,00	t

Materieller Input	Menge	Einheit
Zement CEM I 52.5 N	19.586,00	t
Zement CEM I 52.5 R	18.966,00	t
Spannstahl	4.087,80	t
Spannstahl 5 mm FEP 1770	506,95	t
Spannstahl 7 mm FEP 1670	1.419,92	t
Spannstahl 9.3 mm Litzen FEP 1770	920,36	t
Spannstahl 12.5 mm Litzen FEP 1770	1.240,57	t
Abdeckkappe	17.667,44	kg
Kappen Styropor 4cm (169.854 St.)	1.813,80	kg
Kappen Styropor Vakuum gezogen (684.930 St.)	15.853,64	kg
Euromix 20 Flussiger	11.737,44	kg
Euromix 20 Flussiger	11.232,00	Liter
Euromix 20 Flussiger, Dichte, 1040-1050kg/m3	1.045,00	kg/m3
Bahnöl VSE T75	56.162,90	kg
Bahnöl VSE T75	66.074,00	Liter
Bahnöl VSE T75, Dichte	0,85	kg/l
Betoclean	13.156,30	kg
Betoclean	15.478,00	Liter
Betoclean, Dichte	0,85	kg/l
Curing Compound EH01	1.212,00	kg
Curing Compound EH01	12.000,00	Liter
Curing Compound EH01, Dichte	0,10	kg/l
Grundwasser (eigene Förderung)	9.556,00	m³

Tabelle 8-9 Energie Input bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m² Deckenfläche) bei Echo, Werk Houthalen (Belgien)

Energetischer Input	Menge	Einheit
Elektrizität, aus Stromnetz (Niederspannung)	164.227,00	kWh
Erdgas*	548.612,00	kWh
Heizöl	163.611,00	kg
Heizöl für Gabelstapler, Radlader	156.745,68	kg
Heizöl für Gabelstapler, Radlader	186.602,00	Liter
Heizöl für Drahtziehmaschine im Produktionsprozess	6.865,32	kg
Heizöl für Drahtziehmaschine im Produktionsprozess	8.173,00	Liter
Diesel = Heizöl EL, Dichte	0,84	kg/l

Tabelle 8-10 Transport der Materialien zu Echo, Werk Houthalen

Anlieferung der Material	Distanz [km]	Transportmittel
Sand 0/2 (Meeressand)	350 km	Per Schiff zum Hafen Antwerpen
	148 km	Von Antwerpen mit dem Schiff nach Lummen (B).
	25 km	LkW (von Lummen aus mit ins Werk.)
Splitt 2/12	85 km	LkW
Kalkstein 2/6 und 6/14	85 km	LkW
Zement CEM I 52.5	45 km	LkW

Tabelle 8-11 Abfälle bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m² Deckenfläche) von Echo, Werk Houthalen (Belgien)

Abfälle	Volumen	Einheit	Verbleib
Ausschuss Decken	3.018,12	m ³	Recyclingwerk
Abfall Beton	6197,54	m ³	Recyclingwerk

Tabelle 8-12 Output: prozessbedingte atmosphärische Emissionen bezogen auf die gesamte Jahresproduktion 2007 (1.172.205 m² Deckenfläche) von Echo, Werk Houthalen (Belgien)

Anorganische Stoffe und Verbindungen, Stäube und Partikel	Menge	Einheit
Ammoniak (NH ₃)	28	t
Chlorwasserstoff (HCl)	979	t
Fluor	27	g
Fluorwasserstoff (HF)	118	kg
Kohlendioxid (CO ₂), fossile und mineralische Quellen	42.199	t
Kohlenmonoxid (CO)	139	t
Lachgas, Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	137,1	kg
Schwefeldioxid (SO ₂)	43,1	t
Schwefeloxide, gemessen als SO ₂	4,7	t
Metalle	46,8	kg
Staub, Partikel	2.743	t
andere anorganische Stoffe und Verbindungen	26,3	t
Organische Stoffe und Verbindungen	Menge	Einheit
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	0,457	kg
Dioxine und Furane	11,8	mg
Flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC)	9,8	t
Methan (CH ₄)	22,4	t
aromatische Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzol)	0,806	kg
Aldehyde	0,806	kg
andere flüchtige Kohlenwasserstoffe (z.B. Ethanol)	3,07	kg

8.3.3 Zuordnung des Betons zu Festigkeitsklassen und Bestandteile eingesetzten Chemikalien

Tabelle 8-13 Zuordnung des Betons zu Festigkeitsklassen nach der alten und der neuen Norm (Normal- und Schwebeton)

B	5	10	15	25	35	45	55
C	8/10	8/10	12/15	20/25	30/37	35/45	45/55

Tabelle 8-14 Überblick über die Bestandteile der von DW Systembau und Echo in den Werke BRESPA Schneverdingen resp. Houthalen (Belgien) verwendeten Chemikalien

Handelsname	Chemische Charakterisierung	Dicht bei 20°C	Wirksamer Bestandteil	Anteil	Quelle
ADVA Flow375	Polycarboxylat	1,06g/cm ³	Polycarboxylat	30±1,5 %	Produktdatenblatt von GRACE, Lieferant des Werks BRESPA
Addiment Trennmittel TR1 (Bahnöl)	Modifiziertes Mineralöl	0,84 g/l	mit Wasserstoff behandelte leichte paraffin-haltige Erdöl-Destillate	25-50 %	Sicherheitsdatenblatt zugesendet von Werk BRESPA
			Ethoxyliertes Isononylphenol	0,1-1 %	
NR/SBR	Natur-Styrolbutadien-kautschuk				Sicherheitsdatenblatt zugesendet von Werk BRESPA
BV-Admixture for concrete: Esce Euromix 20		1040-1050 kg/m ³	Polyacrylsäure-Derivat		Sicherheitsdatenblatt zugesendet von Werk Echo
Bahnöl VSE T75	Aliphatische Kohlenwasserstoffe	0,85 kg/l	Naphtha	25 %	Sicherheitsdatenblatt zugesendet von Werk Echo
Betoclean/E	Aliphatische Kohlenwasserstoffe	0,85 kg/l	Naphtha	20 %	Sicherheitsdatenblatt zugesendet von Werk Echo
Curing Compound EH01	Polymer	0,101 kg/l	Polymer acrylate	k.A.	Sicherheitsdatenblatt zugesendet von Werk Echo

8.4 Modellierung der Spannbeton-Fertigdecke

8.4.1 Modellierung der Herstellung der Spannbeton-Fertigdecken-Elemente im Werk

8.4.1.1 Modellierung der Betonherstellung

Tabelle 8-15 Für die Modellierung verwendete Datensätze für die Betonherstellung bei DW Systembau im Werk BRESPA Schneverdingen

Bezeichnung	Datensätze	Zeitbezug	Geographischer Bezug	Quelle
Zement CEM I 52,5 R	Portlandzement	2004	Deutschland	Nemuth und Kreißig 2007
Zement CEM IIAS 42,5 R	Portlandhüttenzement	2004	Deutschland	Nemuth und Kreißig 2007
Kies 2/8 und 8/16	Rundkies, ab Abbau	2001	Schweiz / Deutschland	Ecolinvent 2.0
Betonverflüssiger, ADVA Flow375	Polycarboxylate, 40 % aktive Substanz, ab Werk	1998	Europa	Ecolinvent 2.0
Sand (aus eigener Sandgrube)	Der Dieselverbrauch ist in der Modellierung des Gesamtverbrauchs eingeschlossen. Die Nutzungsfläche wurde dem Referenzdatensatz "Sand, ab Abbau" entnommen.			

Tabelle 8-16 Für die Modellierung verwendete Datensätze für die Betonherstellung im Werk Echo

Ausgangsstoffe	Datensätze	Zeitbezug	Geographischer Bezug	Quelle
Zement CEM IIAS 52,5 R	Portlandhüttenzement	2004	Deutschland	Nemuth und Kreißig 2007 Anpassung: Strommix Belgien
Kies 2/8 und 8/16	Rundkies, ab Abbau	2001	Schweiz	Ecolinvent 2.0
Kalkstein	Kalkstein, gebrochen, gewaschen	2002	Schweiz	Ecolinvent 2.0
Sand	Sand, ab Abbau	2001	Schweiz	Ecolinvent 2.0
Betonverflüssiger, Euromix 20	Polycarboxylate, 40 % aktive Substanz, ab Werk	1998	Europa	Ecolinvent 2.0

Tabelle 8-17 Datensätze der Antransportprozesse der Betonherstellung bezogen auf DW Systembau und Echo in den Werke BRESPA Schneverdingen resp. Houthalen (Belgien)

Transportgüte	Entfernung (einfach) [km]		Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
	Werk BRESPA	Werk Echo			
Zement CEM I 52,5 R	91	45	Transport, Lkw 16-32t, EURO3	2005	RER
Zement CEM IIAS 42,5 R	269	-	Transport, Lkw 16-32t, EURO3	2005	RER
Kies 2/8 und 8/16	145	85	Transport, Lkw 16-32t, EURO3	2005	RER
Kalkstein	-	85	Transport, Lkw 16-32t, EURO3	2005	RER
Sand	-	350	Betrieb, Frachter Übersee	2000	GLO
	-	148	Betrieb, Frachter Binnengewässer	2000	RER
	0,25	25	Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Betonverflüssiger	300	17,3	Transport, Lkw 3.5-16t, Flottendurchschnitt	2005	RER

Für alle Transporte wird angenommen, dass der Auslastungsgrad 50 % beträgt, d. h. Hin- fahrt: 100 % und Rückfahrt: 0 %.

8.4.1.2 Modellierung der Spannstahlritzen-Herstellung

Tabelle 8-18 Datensätze zur Vorkette: Spannstahlritzen-Herstellung (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Prozesse	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Primärstahl-Herstellung	Blasstahl, niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
Sekundärstahl-Herstellung	Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
Kaltziehen	Sheet walzen, Stahl	2002	RER
Profilierung	Profil walzen, Stahl	2002	RER
Wärmebehandlung	Wärmebehandlung, Kaltfließpressen, Stahl	2007	RER

Tabelle 8-19 Datensätze zum Antransport der Spannstahlritzen (Quelle: Ecolnvent 2.0)

	Entfernung (einfach)[km]	Datensatz	Zeitbezug	geographischer Bezug
DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen	800	Transport, Lkw 20-28 t, Flottendurchschnitt	2005	CH
Echo, Werk Houthalen (Belgien)	88 ^{a)}			

a) Transport wurde nach dem Standort des Lieferanten in GoogleEarth ermittelt. Zwischen "Nedri, Groot Egtenrayseweg 13, Niederlande" und "Donderslagweg 25, B-3530 Houthalen (Belgien)

Für alle Transporte wird angenommen, dass der Auslastungsgrad 50 % beträgt, d. h. Hinfahrt: 100 % und Rückfahrt: 0 %

8.4.1.3 Modellierung der Herstellung der Vorprodukte sowie von Hilfs- und Betriebsstoffen

Tabelle 8-20 Datensätze zu den Vorketten der Vorprodukte sowie Hilfs- und Betriebsstoffe bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen (Quelle: EcoInvent 2.0)

Name	Prozesse	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Bahnöl/Schalöl: Addiment Trennmittel TR1	Herstellung (37,5 %)	light fuel oil, at regional storage	2000	RER
	Herstellung (0,5 %)	Phenoxy-Verbindungen, ab Regionallager	1987	RER
Deckenauflegerstreifen: NR/SBR	Herstellung	Dichtmasse auf Kautschukbasis, ab Werk	2003	DE
Abdeckkappen	Herstellung	Polypropylen-Granulat, ab Werk	2001	RER
	Formbildung	Tiefziehen, mit Kalandrieren	1997	RER
Ringanker (BSt 500S)	Stahlherstellung (63 %)	Blasstahl, niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Stahlherstellung (37 %)	Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Kaltziehen	Sheet walzen, Stahl (=Kalt walzen)	2002	RER
	Profilierung	Profil walzen, Stahl	2002	RER
	Schweißen	Schweissen, Lichtbogen, Stahl	2002	RER
Stahlwechsel	Stahlherstellung (63 %)	Blasstahl, niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Stahlherstellung (37 %)	Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Kaltziehen	Sheet walzen, Stahl (=Kalt walzen)	2002	RER
	Feuerverzinkung	Stückverzinkung	2002	RER

Tabelle 8-21 Datensätze zu den Vorketten der Vorprodukte sowie Hilfs- und Betriebsstoffe bei Echo im Werk Houthalen (Belgien) (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Name	Prozesse	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Bahnöl: VSE T75	Herstellung (20 %)	Naphtha, ab Raffinerie	2000	RER
Curing Compound EH01	Herstellung	Acrylsäure, ab Werk	2000	RER
Betoclean	Herstellung (25 %)	Naphtha, ab Raffinerie	2000	RER
Abdeckkappen	Herstellung	Polypropylen-Granulat, ab Werk	2001	RER
	Formbildung	Tiefziehen, mit Kalandrieren	1997	RER

Tabelle 8-22 Datensätze zu den Antransportprozessen der Vorprodukte bzw. Betriebsstoffe zu DW Systembau in das Werk BRESPA Schneverdingen (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Transportgut	Entfernung (einfach) [km]	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Bahnöl/Schalöl: Addiment Trennmittel TR1	614 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Deckenauflegerstreifen	310 ^{b)}	Transport, Lkw >16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Abdeckkappe	400	Transport, Lkw >16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Ringanker	100 ^{c)}	Transport, Lkw 3.5-16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Stahlwechsel	100 ^{c)}	Transport, Lkw 3.5-7.5 t, EURO3	2005	RER

a) Die Entfernung bezieht sich auf den Lieferanten „Sika Deutschland“ und wurde mit GoogleEarth ermittelt (Stuttgart – Schneverdingen).

b) Die Entfernung bezieht sich auf den Lieferanten „Ehlers und Pfeiffer GmbH“ und wurde mit GoogleEarth ermittelt (Niemberg – Schneverdingen).

c) Eigene Abschätzung

Für alle Transporte wird angenommen, dass der Auslastungsgrad 50 % beträgt, d.h. Hinfahrt: 100 % und Rückfahrt: 0 %

Tabelle 8-23 Datensätze zu den Antransportprozessen der Vorprodukte bzw. Betriebsstoffe zu Echo in das Werk Houthalen (Belgien) (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Transportgut	Entfernung (einfach) [km]	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Bahnöl: VSE T75	17,3 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Curing Compound EH01	17,3 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Betoclean	17,3 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Abdeckkappe	400 ^{b)}	Transport, Lkw >16 t, Flottendurchschnitt	2005	RER

a) Die Entfernung bezieht sich auf den Lieferanten „Schepens N.V.“ und wurde mit GoogleEarth ermittelt (Lummen und Houthalen).

b) Eigene Abschätzung, wie für das Werk BRESPA

8.4.1.4 Modellierung des Energieverbrauchs

Tabelle 8-24 Datensätze zur Energiebereitstellung bei DW Systembau, Werk BRESPA Schneverdingen (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Energie-Bereitstellung		Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Strom	Mittelspannung	Strom, Mittelspannung, ab Netz	2004	DE
	Transformation auf Niederspannung	Direkte Emissionen von der Übertragung (Frischknecht und Emmenegger 2003)	2003	generisch
Diesel		Diesel, ab Regionallager	2000	RER
Flüssiggas Propan		Propan/ Butan, ab Raffinerie	2000	RER
Heizöl		Heizöl EL, ab Regionallager	2000	RER

Tabelle 8-25 Datensätze zur Energiebereitstellung Echo im Werk Houthalen (Belgien) (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Energie-Bereitstellung	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Strom	Strom, Niederspannung, ab Netz	2004	BE
Erdgas	Erdgas, in Heizkessel mod. >100kW	2000	RER
Heizöl	Heizöl EL, ab Regionallager	2000	RER

8.4.1.5 Modellierung der Entsorgung

Tabelle 8-26 Datensätze zur Modellierung der Entsorgung bei DW Systembau und Echo in den Werken BRESPA Schneverdingen resp. Houthalen (Belgien) (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Abfälle	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Stapelhölzer	Schnittholz, Nadelholz, sägerau, luftgetrocknet, u=20 %, ab Werk	2002	RER
Strom aus Holzverbrennung	Strom, Niederspannung, ab Netz	2004	DE
Abfall Beton + Ausschuss Decken	Kies gebrochen, ab Abbau	2001	CH
Spannstahl (Schrott)	Eisenschrott, ab Werk	2002	RER

8.4.2 Modellierung der Prozesse auf der Baustelle

Tabelle 8-27 Datensätze zu den Vorprodukten auf der Baustelle (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Input	Datensatz	Zeitbezug	geographischer Bezug
Randbohlen	Schnittholz, Nadelholz, sägerau, luftgetrocknet, u=20 %, ab Werk	2002	RER
Transportbeton (C12/15)	Magerbeton, ab Werk	2001	CH
Strom	Strom, Niederspannung, ab Netz	2004	DE
Dieserverbrauch des Fahrmischers	Diesel, schwefelarm, ab Regionallager	2005	RER

Tabelle 8-28 Datensätze zum Antransport der Vorprodukte auf die Baustelle (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Transportgüter	Entfernung (Einfach) [km]	Name der Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Randbohlen	20 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-7.5 t, EURO3	2005	RER
Direkte Emissionen während der Transport vom Transportbeton im Fahrmischer (C12/15)	20 ^{a)}	Betrieb, Lkw 20-28 t, Flottendurchschnitt	2005	RER

a) Entsprechend den Angaben des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) in seinem Jahresbericht 2006 wird angenommen, dass die Transportentfernung zwischen Transportbetonwerk und Baustelle durchschnittlich 20 km beträgt der Auslastungsgrad: 50 %

8.5 Modellierung der Halbfertigteildecke

8.5.1 Modellierung der Herstellung der Halbfertigteile im Werk

8.5.1.1 Modellierung der Betonherstellung

Tabelle 8-29 Datensätze zur Herstellung von Beton C25/30

Prozesse	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Beton C25/30	Die der Veröffentlichung „Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton“ des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. zugrundeliegenden Sachbilanzdaten	2007	DE

Zur Modellierung der Halbfertigteilherstellung siehe Kapitel 3.1.2.1.

8.5.1.2 Modellierung der Betonstahl-Herstellung

Tabelle 8-30 Datensätze der Betonstahl-Herstellung (Quelle: Ecolnvent 2.0)

Prozesse	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Primärstahl-Herstellung	Blasstahl, niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
Sekundärstahl-Herstellung	Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
Kaltziehen	Sheet walzen, Stahl (=Kaltwalzen)	2002	RER
Profilierung	Profil walzen, Stahl	2002	RER
Schweißen	Schweißen, Lichtbogen, Stahl	2002	RER

Es erfolgte eine Abschätzung des Schweiß-Aufwandes über die Schweißmeter.

8.5.1.3 Modellierung des Energieverbrauchs

Da keine spezifischen Daten verfügbar waren, wurde für die Herstellung der Halbfertigteile der gleiche Energieverbrauch sowie Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen wie bei der Spannbeton-Fertigdecken-Herstellung angenommen wird (Zuordnung nach Kubikmeter Deckenvolumen). Selbstverständlich unter Berücksichtigung der im Halbfertigteil verwendeten Beton- und Stahlmengen und -Qualitäten. Dieses Vorgehen ist bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend zu berücksichtigen.

8.5.2 Modellierung der Prozesse auf der Baustelle

Tabelle 8-31 Datensätze zur Herstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe (Quelle: Ecolnvent 2.0, ausgenommen Beton C25/30)

	Name	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Betonstabstahl 500S bzw. Betonstahlmatten 500M	Primärstahl-Herstellung	Blasstahl, niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Sekundärstahl-Herstellung	Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Kaltziehen	Sheet walzen, Stahl (=Kaltwalzen)	2002	RER
	Profilierung	Profil walzen, Stahl	2002	RER
	Schweißen	Schweissen, Lichtbogen, Stahl	2002	RER
Beton C25/30	Herstellung	Die der Veröffentlichung „Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton“ des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. zugrunde liegenden Sachbilanzdaten	2007	DE
Holz	Herstellung	Schnittholz, Nadelholz, sägerau, luftgetrocknet, u=20 %, ab Werk	2002	RER
Schalöl: Relax B2	Herstellung	Heizöl EL, ab Regionallager	2000	RER
Fugenmörtel: ARDUMUR 828	Herstellung	Acrylatspachtelmasse, ab Werk	2003	RER

Tabelle 8-32 Datensätze zum Antransport der Vorprodukte auf die Baustelle

Transportgüte	Entfernung (einfach) [km]	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Schalöl: Relax B2	100 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-7.5 t, EURO3	2005	RER
Fugenmörtel: ARDUMUR 828	100 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-7.5 t, EURO3	2005	RER
Holz	100 ^{a)}	Transport, Lkw 7.5-16 t, EURO3	2005	RER
Betonstahl	100 ^{a)}	Transport, Lkw >32 t, EURO3	2005	RER

a) eigene Abschätzung

	Name	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Betontransport mit Fahrmischer	Direkte Emissionen	Betrieb, Lkw 20-28 t, Flottendurchschnitt	2001	RER
Diesel	Herstellung	Diesel, ab Regionallager	2000	RER

8.6 Modellierung der Ortbetondecke

8.6.1 Modellierung der Prozesse bei der Herstellung und auf der Baustelle

Tabelle 8-33 Datensätze zur Herstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe (Quelle: EcoInvent 2.0, ausgenommen Beton C25/30)

	Name	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Betonstabstahl 500S und Betonstahlmatten 500M	Primärstahl-Herstellung	Blasstahl, niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Sekundärstahl-Herstellung	Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	2001	RER
	Kaltziehen	Sheet walzen, Stahl (=Kaltwalzen)	2002	RER
	Profilierung	Profil walzen, Stahl	2002	RER
	Schweißen	Schweißen, Lichtbogen, Stahl	2002	RER
Beton C25/30	Herstellung	Die der Veröffentlichung „Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton“ des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. zugrunde liegenden Sachbilanzdaten	2007	DE
Holz	Herstellung	Schnittholz, Nadelholz, sägerau, luftgetrocknet, u=20 %, ab Werk	2002	RER
Schälöl	Herstellung	Heizöl EL, ab Regionallager	2000	RER

Tabelle 8-34 Datensätze zur Bereitstellung von Strom (Quelle: EcoInvent 2.0)

Energie-Bereitstellung	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Strom	Strom, Niederspannung, ab Netz	2004	DE

8.6.2 Modellierung der Transportprozesse

Tabelle 8-35 Datensätze zum Antransport des Transportbetons auf die Baustelle

	Name	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Betontransport mit Fahrmischer	Direkte Emissionen	LKW, Gesamtgewicht 32 t	2001	RER
Diesel	Herstellung	Diesel, ab Regionallager	2000	RER

Tabelle 8-36 Datensätze und Annahmen zur Transportentfernung beim Antransport der Vorprodukte auf die Baustelle

Transportgüte	Entfernung (einfach) [km]	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug
Betonstahl	100 ^{a)}	Transport, Lkw >32 t, EURO3	2005	RER
Beton C25/30	20 ^{b)}	Betrieb, Lkw 20-28 t, Flottendurchschnitt	2005	RER
Holz	100 ^{a)}	Transport, Lkw 7.5-16 t, EURO3	2005	RER
Schalöl	100 ^{a)}	Transport, Lkw 3.5-7.5 t, EURO3	2005	RER

a) Eigene Abschätzung

b) Jahresbericht des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie für Fahrmischer, Bezugsjahr 2006: 20 km zur Baustelle

8.7 Modellierung des End of life

Tabelle 8-37 Überblick über die für die Modellierung des End-of-Life verwendeten Datenmodule

Abfälle	In %	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug	Quelle
Beton	53 %	Entsorgung Gebäude, unbewehrter Beton, in Beseitigung	2002	CH	EcolInvent 2.0
	47 %	Kies gebrochen, ab Abbau	2001	CH	EcolInvent 2.0
Holz	100 %	MVA mittlerer Standard	1999	DE	Umberto 4.5

Tabelle 8-38 Datensätze zu Entsorgungsprozessen

Abfälle	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug	Quelle
Beton	Entsorgung, Gebäude, unbewehrter Beton, in Beseitigung	2002	CH	EcolInvent 2.0
Stahl	Entsorgung, Gebäude, Armierungseisen, ins Recycling	2002	CH	EcolInvent 2.0
Holz	MVA mittlerer Standard	1999	DE	Umberto 5.5

Tabelle 8-39 Datensätze zur Energiebereitstellung

Energie	Datensätze	Zeitbezug	geographischer Bezug	Quelle
Diesel	Diesel, in Baumaschine	2001	Global	EcolInvent 2.0
Strom	Strom, Niederspannung, ab Netz	2001	DE	EcolInvent 2.0

8.8 Grundlagen für die Normierung

Tabelle 8-40 Überblick über die für die Normierung auf per-Capita-Basis verwendete Grundlage. Geografischer Bezug: Deutschland

Wirkungskategorie	Verbrauch / Auswirkung absolut				Bevölkerung im Bezugs-jahr ²	Verbrauch / Auswirkung per Capita (=Normierungswert)	
	Menge	Einheit	Zeitbezug	Quelle	Anzahl Personen	Menge	Einheit
Primärenergieverbrauch	13.993.000.000	GJ	2007	UBA ¹	82.217.800	170,19	GJ/Person*a
Treibhauspotential	1.015.000.000	Tonnen CO2e	2004	dito	82.501.000	12,30	Tonnen CO2e/Person*a
Versauerung	2.238.176.363	kg SO2e	2007	dito	82.217.800	27,22	kg SO2e/Person*a
Überdüngung ³							
POCP	1.315.981.220	kg C2H4e	2007	dito	82.217.800	16,01	kg C2H4e/Person*a
Quecksilber	4.000.000	g	2007	dito	82.217.800	0,05	Gramm/Person*a

- 1 „Daten zur Umwelt“, Umweltbundesamt über www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de, abgerufen im Mai 2009
- 2 Statistisches Bundesamt über www.destatis.de, abgerufen im Mai 2009
- 3 wird ggf. noch ergänzt

Tabelle 8-41 Überblick über die für die Normierung auf Haushalt-Basis verwendete Grundlage (Quelle: Quack und Rüdener 2007). Die Daten beziehen sowohl die Herstellung, Nutzung als auch die Entsorgung durch den jährlichen Konsum eines statistischen Durchschnittshaushalts in 10 Produktfeldern ein.

	KEA	GWP	AP	EP	POCP
Einheit	GJ/HH*a	kg CO2/HH*a	kg SO2/HH*a	kg PO4/HH*a	kg Ethen/HH*a
Wohnen	93,43	6.669	17,99	0,89	2,78
Mobilität	57,54	4.230	14,70	1,36	8,68
Lebensmittel	38,82	3.188	10,88	0,76	0,73
Kühlen, Kochen, Spülen	14,60	946	2,72	0,21	0,19
Textilien	1,03	50	0,76	0,02	0,11
Wäsche waschen und trocknen	6,10	365	1,47	0,14	0,18
Informieren & Kommunizieren	12,23	521	2,29	0,26	0,13
Fernsehen & Co.	6,50	409	1,36	0,41	0,06
Summe	230,26	16.378	52,17	4,05	12,87

8.9 Ergebnisse

8.9.1 Gesamtergebnisse, nach Teilprozessen

Tabelle 8-42 Beitragsanalyse Spannbeton-Fertigdecke für alle betrachteten Wirkungskategorien

Gesamt (in Werk)		KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Beton-Herstellung	Zement	522.281,64	105.770,37	170,29	28,11	17,73
	Kies	255.851,48	17.127,28	84,20	18,50	2,17
	Sand	55.769,13	3.614,59	44,31	6,48	1,12
	Kalkstein	22.579,57	1.557,72	9,02	2,01	0,21
	Betonverflüssiger	523,88	36,70	0,20	0,03	0,01
Stahl-Herstellung + -Transport	Primärstahl	128.057,92	8.831,10	37,22	3,46	5,01
	Sekundärstahl	105.645,35	5.029,14	22,80	2,02	1,80
	Kaltziehen	106.208,24	5.965,66	22,22	1,63	2,18
	Profilierung	33.099,40	2.758,33	7,98	0,57	0,71
	Wärmebehandlung	51.873,41	2.958,60	2,09	0,22	0,27
	Transport des Stahls	41.564,88	2.873,97	16,29	3,69	0,48
Sonstige Materialien		16.955,87	66.126,20	177,20	20,35	9,51
Energieverbrauch		139.062,26	4.053,51	12,82	1,16	0,72
Gutschrift		-23.080,53	-832,83	-3,46	-0,40	-0,39
Summe		1.456.392,50	225.870,36	603,20	87,84	41,49
Transport		249.990,39	17.398,89	85,06	18,83	2,25
Gesamt (auf Baustelle)		KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Beton-Herstellung	Zement	27.363,13	6.017,14	8,17	1,22	0,30
	sonstiges	19.957,77	1.067,72	6,46	1,35	0,18
Stahl-Herstellung + -Transport	Primärstahl	32.435,90	2.241,78	9,34	0,86	1,28
	Sekundärstahl	27.398,86	1.305,01	5,93	0,53	0,47
	Prozesse	37.458,77	2.325,82	8,60	0,62	0,78
	Transport des Stahls	3.692,01	258,47	1,41	0,32	0,04
Sonstige Materialien		1.307,97	7,90	0,05	0,01	0,00
Energieverbrauch		41.814,96	2.393,83	3,19	0,28	0,16
Summe		191.429,36	15.617,67	43,13	5,19	3,21
End of life		238.291,49	15.331,48	94,89	19,77	2,41
Gutschrift		-246.158,76	-11.633,27	-50,82	-6,02	-5,40

Spannbetondecke	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Zement	549.644,76	111.787,51	178,46	29,33	18,03
Beton (ohne Zement)	354.681,82	23.404,02	144,19	28,37	3,68
Primärstahl	160.493,82	11.072,88	46,56	4,32	6,29
Sekundärstahl	133.044,21	6.334,16	28,72	2,55	2,26
Stahlverarbeitung	228.639,81	14.008,41	40,88	3,05	3,92
Energieverbrauch	180.877,22	6.447,34	16,01	1,44	0,87
Sonstiges	551.802,62	101.996,91	374,89	62,96	14,69
Gutschrift	-269.239,29	-12.466,10	-54,28	-6,43	-5,79
Summe	1.889.944,98	262.585,13	775,45	125,60	43,96

Spannbetondecke	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Zement	29,08 %	42,57 %	23,01 %	23,35 %	41,01 %
Beton (ohne Zement)	18,77 %	8,91 %	18,59 %	22,58 %	8,37 %
Primärstahl	8,49 %	4,22 %	6,00 %	3,44 %	14,30 %
Sekundärstahl	7,04 %	2,41 %	3,70 %	2,03 %	5,15 %
Stahlverarbeitung	12,10 %	5,33 %	5,27 %	2,43 %	8,93 %
Energieverbrauch	9,57 %	2,46 %	2,06 %	1,15 %	1,99 %
Sonstiges	29,20 %	38,84 %	48,35 %	50,13 %	33,42 %
Gutschrift	-14,25 %	-4,75 %	-7,00 %	-5,12 %	-13,16 %
Summe	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

Tabelle 8-43 Beitragsanalyse Halbfertigteildecke für alle betrachteten Wirkungskategorien

Gesamt (in Werk)		KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Beton-Herstellung	Zement	128.389,61	31.160,36	37,07	5,64	2,79
	Sonstiges	72.854,50	7.585,01	20,68	3,97	0,79
Stahl-Herstellung + -Transport	Primärstahl	107.805,34	7.434,45	31,34	2,91	4,21
	Sekundärstahl	88.937,36	4.233,78	19,19	1,70	1,51
	Prozesse	119.932,52	7.503,21	26,08	1,91	2,50
	Transport des Stahls	51.968,05	3.593,29	20,37	4,61	0,60
Sonstige Materialien		3.023,68	38.003,08	101,72	11,70	5,45
Energieverbrauch		67.725,47	1.955,21	6,24	0,56	0,35
Gutschrift		-11.305,30	-403,38	-1,68	-0,20	-0,19
Summe		629.331,25	101.065,00	261,01	32,82	18,02
Transport		54.685,40	3.806,01	18,61	4,12	0,49
Gesamt (auf Baustelle)		KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Beton-Herstellung	Zement	513.558,45	124.641,42	148,29	22,57	11,17
	sonstiges	368.971,33	35.618,64	113,98	22,57	4,08
Stahl-Herstellung + -Transport	Primärstahl	503.146,26	34.697,87	146,26	13,60	19,67
	Sekundärstahl	415.086,10	19.759,77	89,58	7,95	7,06
	sonstiges	559.745,89	35.018,79	121,71	8,90	11,65
	Transport des Stahls	17.684,20	1.230,81	6,02	1,33	0,16
Sonstige Materialien		102.928,01	3.907,17	18,03	2,04	1,44
Energieverbrauch		50.770,00	2.906,49	3,87	0,34	0,19
Summe		2.531.890,24	257.780,96	647,74	79,31	55,41
End of life		256.376,09	16.589,03	96,44	19,92	2,48
Gutschrift		-807.457,54	-46.200,43	-197,43	-20,81	-24,15

Halbfertigteildecke	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Zement	641.948,07	155.801,78	185,36	28,21	13,96
Beton (ohne Zement)	441.825,83	43.203,65	134,66	26,55	4,87
Primärstahl	610.951,60	42.132,32	177,59	16,51	23,88
Sekundärstahl	504.023,46	23.993,54	108,77	9,65	8,57
Stahlverarbeitung	679.678,41	42.522,01	147,79	10,81	14,15
Energieverbrauch	118.495,47	4.861,69	10,12	0,91	0,54
Sonstiges	486.665,44	67.129,39	261,18	43,73	10,63
Gutschrift	-818.762,84	-46.603,81	-199,11	-21,01	-24,34
Summe	2.664.825,43	333.040,56	826,36	115,36	52,26

Halbfertigteildecke	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Zement	24,09 %	46,78 %	22,43 %	24,46 %	26,71 %
Beton (ohne Zement)	16,58 %	12,97 %	16,30 %	23,01 %	9,32 %
Primärstahl	22,93 %	12,65 %	21,49 %	14,31 %	45,70 %
Sekundärstahl	18,91 %	7,20 %	13,16 %	8,37 %	16,40 %
Stahlverarbeitung	25,51 %	12,77 %	17,88 %	9,37 %	27,07 %
Energieverbrauch	4,45 %	1,46 %	1,22 %	0,79 %	1,03 %
Sonstiges	18,26 %	20,16 %	31,61 %	37,90 %	20,34 %
Gutschrift	-30,72 %	-13,99 %	-24,10 %	-18,21 %	-46,57 %
Summe	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

Tabelle 8-44 Beitragsanalyse Ortbetondecke für alle betrachteten Wirkungskategorien

Gesamt (auf Baustelle)		KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Beton-Herstellung	Zement	641.947,76	155.801,70	185,36	28,21	13,96
	sonstiges	461.213,94	44.523,28	142,48	28,22	5,10
Stahl-Herstellung + -Transport	Primärstahl	487.186,39	33.597,25	141,62	13,17	19,05
	Sekundärstahl	401.919,51	19.132,99	86,74	7,70	6,84
	Prozesse	541.990,67	33.907,99	117,85	8,62	11,28
	Transport des Stahls	17.123,26	1.191,77	5,83	1,29	0,15
Sonstige Materialien		7.591,62	102,46	0,94	0,12	0,05
Energieverbrauch		26.196,28	1.499,69	2,00	0,18	0,10
Summe		2.585.169,42	289.757,12	682,81	87,50	56,52
End of life		256.376,09	16.815,69	96,61	19,96	2,48
Gutschrift		-694.159,37	-38.185,59	-163,43	-17,64	-19,47

Ortbetondecke	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Zement	641.947,76	155.801,70	185,36	28,21	13,96
Beton (ohne Zement)	461.213,94	44.523,28	142,48	28,22	5,10
Primärstahl	487.186,39	33.597,25	141,62	13,17	19,05
Sekundärstahl	401.919,51	19.132,99	86,74	7,70	6,84
Stahlverarbeitung	541.990,67	33.907,99	117,85	8,62	11,28
Energieverbrauch	26.196,28	1.499,69	2,00	0,18	0,10
Sonstiges	281.090,96	18.109,92	103,38	21,36	2,69
Gutschrift	-694.159,37	-38.185,59	-163,43	-17,64	-19,47
Summe	2.147.386,14	268.387,22	615,98	89,81	39,54

Ortbetondecke	KEA (MJ)	GWP (kg CO2 eq.)	AP-EU (kg SO2 eq.)	EP (kg PO4 eq.)	POCP (kg Eth eq.)
Zement	29,89 %	58,05 %	30,09 %	31,41 %	35,31 %
Beton (ohne Zement)	21,48 %	16,59 %	23,13 %	31,42 %	12,90 %
Primärstahl	22,69 %	12,52 %	22,99 %	14,66 %	48,17 %
Sekundärstahl	18,72 %	7,13 %	14,08 %	8,57 %	17,29 %
Stahlverarbeitung	25,24 %	12,63 %	19,13 %	9,60 %	28,53 %
Energieverbrauch	1,22 %	0,56 %	0,32 %	0,20 %	0,25 %
Sonstiges	13,09 %	6,75 %	16,78 %	23,79 %	6,79 %
Gutschrift	-32,33 %	-14,23 %	-26,53 %	-19,65 %	-49,23 %
Summe	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

8.9.2 Gesamtergebnisse, absolut

Tabelle 8-45 Gesamtergebnisse absolut für alle drei betrachteten Alternativen und alle Wirkungskategorien

KEA (MJ)	Spannbeton-Fertigdecke	Halbfertigteildecke	Ortbetondecke
Zement	549.644,76	641.948,07	641.947,76
Beton (ohne Zement)	354.681,82	441.825,83	461.213,94
Primärstahl	160.493,82	610.951,60	487.186,39
Sekundärstahl	133.044,21	504.023,46	401.919,51
Stahlverarbeitung	228.639,81	679.678,41	541.990,67
Energieverbrauch	180.877,22	118.495,47	26.196,28
Sonstiges	551.802,62	486.665,44	281.090,96
Summe ohne Gutschrift	2.159.184,27	3.483.588,27	2.841.545,51
Relation, ohne Gutschrift	100,0 %	161,3 %	131,6 %
Gutschrift	-269.239,29	-818.762,84	-694.159,37
Summe, inkl. Gutschrift	1.889.944,98	2.664.825,43	2.147.386,14
Relation, inkl. Gutschrift	100,0 %	141,0 %	113,6 %

GWP (kg CO2 eq.)	Spannbeton-Fertigdecke	Halbfertigteildecke	Ortbetondecke
Zement	111.787,51	155.801,78	155.801,70
Beton (ohne Zement)	23.404,02	43.203,65	44.523,28
Primärstahl	11.072,88	42.132,32	33.597,25
Sekundärstahl	6.334,16	23.993,54	19.132,99
Stahlverarbeitung	14.008,41	42.522,01	33.907,99
Energieverbrauch	6.447,34	4.861,69	1.499,69
Sonstiges	101.996,91	67.129,39	18.109,92
Summe ohne Gutschrift	275.051,23	379.644,38	306.572,81
Relation, ohne Gutschrift	100,0 %	138,0 %	111,5 %
Gutschrift	-12.466,10	-46.603,81	-38.185,59
Summe	262.585,13	333.040,56	268.387,22
Relation, inkl. Gutschrift	100,0 %	126,8 %	102,2 %

AP-EU (kg SO ₂ eq.)	Spannbeton-Fertigdecke	Halbfertigteildecke	Ortbetondecke
Zement	178,46	185,36	185,36
Beton (ohne Zement)	144,19	134,66	142,48
Primärstahl	46,56	177,59	141,62
Sekundärstahl	28,72	108,77	86,74
Stahlverarbeitung	40,88	147,79	117,85
Energieverbrauch	16,01	10,12	2,00
Sonstiges	374,89	261,18	103,38
Summe ohne Gutschrift	829,73	1.025,47	779,42
Relation, ohne Gutschrift	100,0 %	123,6 %	93,9 %
Gutschrift	-54,28	-199,11	-163,43
Summe	775,45	826,36	615,98
Relation, inkl. Gutschrift	100,0 %	106,6 %	79,4 %

EP (kg PO ₄ eq.)	Spannbeton-Fertigdecke	Halbfertigteildecke	Ortbetondecke
Zement	29,33	28,21	28,21
Beton (ohne Zement)	28,37	26,55	28,22
Primärstahl	4,32	16,51	13,17
Sekundärstahl	2,55	9,65	7,70
Stahlverarbeitung	3,05	10,81	8,62
Energieverbrauch	1,44	0,91	0,18
Sonstiges	62,96	43,73	21,36
Summe ohne Gutschrift	132,02	136,37	107,45
Relation, ohne Gutschrift	100,0 %	103,3 %	81,4 %
Gutschrift	-6,43	-21,01	-17,64
Summe	125,60	115,36	89,81
Relation, inkl. Gutschrift	100,0 %	91,8 %	71,5 %

POCP (kg Eth eq.)	Spannbeton-Fertigdecke	Halbfertigteildecke	Ortbetondecke
Zement	18,03	13,96	13,96
Beton (ohne Zement)	3,68	4,87	5,10
Primärstahl	6,29	23,88	19,05
Sekundärstahl	2,26	8,57	6,84
Stahlverarbeitung	3,92	14,15	11,28
Energieverbrauch	0,87	0,54	0,10
Sonstiges	14,69	10,63	2,69
Summe ohne Gutschrift	49,75	76,60	59,00
Relation, ohne Gutschrift	100,0 %	154,0 %	118,6 %
Gutschrift	-5,79	-24,34	-19,47
Summe	43,96	52,26	39,54
Relation, inkl. Gutschrift	100,0 %	118,9 %	89,9 %

8.9.3 Gesamtergebnisse, normiert

Tabelle 8-46 Überblick über die für die Gesamtergebnisse, ihre Relation zur Alternative Spannbeton-Fertigdecke sowie die entsprechende Anzahl an Äquivalenz-Personen (Normierung per Capita) bzw. Äquivalenz-Haushalte Normierung per Haushalt

Primärenergieverbrauch	Gesamtergebnis	Relation	Normierung per Capita	Normierung per Haushalt
Einheit	GJ	Prozent	Äq.-Personen	Äq.-Haushalte
Spannbeton-Fertigdecke	1.890	100,0 %	11	8
Halbfertigteildecke	2.665	141,0 %	16	12
Ortbetondecke	2.147	113,6 %	13	9
Treibhauspotential	Gesamtergebnis	Relation	Normierung per Capita	Normierung per Haushalt
Einheit	kg CO ₂ e	Prozent	Äq.-Personen	Äq.-Haushalte
Spannbeton-Fertigdecke	262.585	100,0 %	21	16
Halbfertigteildecke	333.041	126,8 %	27	20
Ortbetondecke	268.387	102,2 %	22	16
Versauerungspotential	Gesamtergebnis	Relation	Normierung per Capita	Normierung per Haushalt
Einheit	kg SO ₂ e	Prozent	Äq.-Personen	Äq.-Haushalte
Spannbeton-Fertigdecke	775,45	100,0 %	28	15
Halbfertigteildecke	826,36	106,6 %	30	16
Ortbetondecke	615,98	79,4 %	23	12
Eutrophierungspotential	Gesamtergebnis	Relation	Normierung per Capita	Normierung per Haushalt
Einheit	kg PO ₄ e	Prozent	Äq.-Personen	Äq.-Haushalte
Spannbeton-Fertigdecke	125,60	100,0 %	27	31
Halbfertigteildecke	115,36	91,8 %	25	28
Ortbetondecke	89,81	71,5 %	19	22
POCP	Gesamtergebnis	Relation	Normierung per Capita	Normierung per Haushalt
Einheit	kg C ₂ H ₄ e	Prozent	Äq.-Personen	Äq.-Haushalte
Spannbeton-Fertigdecke	43,96	100,0 %	3	3
Halbfertigteildecke	52,26	118,9 %	3	4
Ortbetondecke	39,54	89,9 %	2	3

8.9.4 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Anteil Primär- und Sekundärproduktion Stahl

Tabelle 8-47 Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse Anteil Primär- und Sekundärproduktion Stahl. Variiert wurde nur die Stahlproduktion: Spannbeton-Fertigdecke: 100 % Primärstahl; Halbfertigteildecke und Ortbetondecke: 100 % Sekundärstahl.

Kumulierter Energieaufwand (KEA) (MJ)	Primärstahl	Sekundärstahl	Gutschrift	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case	160.493,82	133.044,21	-269.239,29	1.865.646,23	1.889.944,98
HF-D: Base Case	610.951,60	504.023,46	-818.762,84	2.368.613,21	2.664.825,43
OB-D: Base Case	487.186,39	401.919,51	-694.159,37	1.952.439,61	2.147.386,14
SB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Primärstahl)	641.975,29	0,00	-539.784,34	1.865.646,23	1.967.837,18
HF-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	672.031,28	-245.921,63	2.368.613,21	2.794.722,86
OB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	535.892,68	-240.466,27	1.952.439,61	2.247.866,02
GWP (kg CO2 eq.)	Primärstahl	Sekundärstahl	Gutschrift	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case	11.072,88	6.334,16	-12.466,10	257.644,19	262.585,13
HF-D: Base Case	42.132,32	23.993,54	-46.603,81	313.518,52	333.040,56
OB-D: Base Case	33.597,25	19.132,99	-38.185,59	253.842,58	268.387,22
SB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Primärstahl)	44.291,54	0,00	-34.149,92	257.644,19	267.785,81
HF-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	31.991,39	-6.196,45	313.518,52	339.313,45
OB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	25.510,65	-6.182,76	253.842,58	273.170,47
AP-EU (kg SO2 eq.)	Primärstahl	Sekundärstahl	Gutschrift	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case	46,56	28,72	-54,28	754,45	775,45
HF-D: Base Case	177,59	108,77	-199,11	739,10	826,36
OB-D: Base Case	141,62	86,74	-163,43	551,06	615,98
SB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Primärstahl)	186,24	0,00	-143,53	754,45	797,15
HF-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	145,03	-29,43	739,10	854,70
OB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	115,65	-29,05	551,06	637,67
EP (kg PO4 eq.)	Primärstahl	Sekundärstahl	Gutschrift	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case	4,32	2,55	-6,43	125,15	125,60
HF-D: Base Case	16,51	9,65	-21,01	110,20	115,36
OB-D: Base Case	13,17	7,70	-17,64	86,59	89,81
SB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Primärstahl)	17,30	0,00	-14,85	125,15	127,59
HF-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	12,87	-5,20	110,20	117,88
OB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	10,26	-5,12	86,59	91,73

POCP (kg Eth eq.)	Primärstahl	Sekundärstahl	Gutschrift	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case	6,29	2,26	-5,79	41,20	43,96
HF-D: Base Case	23,88	8,57	-24,34	44,14	52,26
OB-D: Base Case	19,05	6,84	-19,47	33,12	39,54
SB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Primärstahl)	25,15	0,00	-19,49	41,20	46,86
HF-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	11,43	-1,01	44,14	54,56
OB-D: Sensitivitätsanalyse I (100 % Sekundärstahl)	0,00	9,11	-0,99	33,12	41,25

8.9.5 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Entfernung Spannbeton-Fertigdecken-Werk zu Baustelle

Tabelle 8-48 Überblick über die Ergebnisse der Spannbeton-Fertigdecke zur Sensitivitätsanalyse Transport zwischen Werk und Baustelle für alle betrachteten Wirkungskategorien. Variiert wurde nur die Entfernung für die Spannbeton-Fertigdecke. Die Ergebnisse der anderen Deckenalternativen wurden nicht variiert.

KEA (MJ)				
Entfernung in Relation zum Base Case [Prozent]	Entfernung Werk - Baustelle [km]	Transport der Decke (SB-D) [MJ]	Transport des Ortbetons (SB-D) [MJ]	Gesamtsumme [MJ]
-50 %	84	124.995	6.874	1.764.950
-25 %	125	187.493	6.874	1.827.447
Base Case	167	249.990	6.874	1.889.945
50 %	251	374.986	6.874	2.014.940
100 %	334	499.981	6.874	2.139.935
200 %	501	749.971	6.874	2.389.926
300 %	668	999.962	6.874	2.639.916
400 %	835	1.249.952	6.874	2.889.907
GWP (kg CO2 eq.)				
Entfernung in Relation zum Base Case [Prozent]	Entfernung Werk - Baustelle [km]	Transport der Decke (SB-D) [kg CO2 eq.]	Transport des Ortbetons (SB-D) [kg CO2 eq.]	Gesamtsumme [kg CO2 eq.]
-70 %	50	5.220	468	250.406
-35 %	109	11.309	468	256.496
Base Case: 0 %	167	17.399	468	262.585
50 %	251	26.098	468	271.285
100 %	334	34.798	468	279.984
200 %	501	52.197	468	297.383
300 %	668	69.596	468	314.782
400 %	835	86.994	468	332.181

AP-EU (kg SO2 eq.)				
Entfernung in Relation zum Base Case [Prozent]	Entfernung Werk - Baustelle [km]	Transport der Decke (SB-D) [kg SO2 eq.]	Transport des Ortbetons (SB-D) [kg SO2 eq.]	Gesamtsumme [kg SO2 eq.]
-70 %	50	25,52	2,77	715,91
-35 %	109	55,29	2,77	745,68
Base Case: 0 %	167	85,06	2,77	775,45
50 %	251	127,59	2,77	817,98
100 %	334	170,12	2,77	860,51
200 %	501	255,17	2,77	945,56
300 %	668	340,23	2,77	1.030,62
400 %	835	425,29	2,77	1.115,68
EP (kg PO4 eq.)				
Entfernung in Relation zum Base Case [Prozent]	Entfernung Werk - Baustelle [km]	Transport der Decke (SB-D) [kg PO4 eq.]	Transport des Ortbetons (SB-D) [kg PO4 eq.]	Gesamtsumme [kg PO4 eq.]
-70 %	50	5,65	0,59	112,42
-35 %	109	12,24	0,59	119,01
Base Case: 0 %	167	18,83	0,59	125,60
50 %	251	28,24	0,59	135,01
100 %	334	37,66	0,59	144,43
200 %	501	56,49	0,59	163,26
300 %	668	75,32	0,59	182,09
400 %	835	94,15	0,59	200,91
POCP (kg Eth eq.)				
Entfernung in Relation zum Base Case [Prozent]	Entfernung Werk - Baustelle [km]	Transport der Decke (SB-D) [kg Eth eq.]	Transport des Ortbetons (SB-D) [kg Eth eq.]	Gesamtsumme [kg Eth eq.]
-70 %	50	0,68	0,08	42,39
-35 %	109	1,46	0,08	43,17
Base Case: 0 %	167	2,25	0,08	43,96
50 %	251	3,38	0,08	45,09
100 %	334	4,50	0,08	46,21
200 %	501	6,75	0,08	48,46
300 %	668	9,00	0,08	50,71
400 %	835	11,25	0,08	52,96

8.9.6 Ergebnisse Sensitivitätsanalysen zum Zementeinsatz

Tabelle 8-49 Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse Reduktion der Zementmenge in der Alternative Spannbeton-Fertigdecke. Variiert wurde nur die Zementmenge für die Spannbeton-Fertigdecke.

Reduktionspotential relativ (in %)	Base Case					
Reduzierung der Zementmenge	0 %	-4 %	-8 %	-12 %	-16 %	-20 %
KEA (MJ)	0,0 %	-1,1 %	-2,2 %	-3,3 %	-4,4 %	-5,5 %
GWP (kg CO2 eq.)	0,0 %	-1,6 %	-3,2 %	-4,8 %	-6,4 %	-8,1 %
AP-EU (kg SO2 eq.)	0,0 %	-0,9 %	-1,8 %	-2,6 %	-3,5 %	-4,4 %
EP (kg PO4 eq.)	0,0 %	-0,9 %	-1,8 %	-2,7 %	-3,6 %	-4,5 %
POCP (kg Eth eq.)	0,0 %	-1,6 %	-3,2 %	-4,8 %	-6,5 %	-8,1 %
Reduktionspotential (absolut)	Base Case					
Reduzierung der Zementmenge	0 %	-4 %	-8 %	-12 %	-16 %	-20 %
KEA (MJ)	1.889.945	1.869.054	1.848.162	1.827.271	1.806.380	1.785.489
GWP (kg CO2 eq.)	262.585	258.354	254.123	249.893	245.662	241.431
AP-EU (kg SO2 eq.)	775	769	762	755	748	741
EP (kg PO4 eq.)	126	124	123	122	121	120
POCP (kg Eth eq.)	44,0	43,3	42,5	41,8	41,1	40,4

8.9.7 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Halbfertigteil

Tabelle 8-50 Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Halbfertigteil. Variiert wurde nur die Zementsorte im Halbfertigteil.

Kumulierter Energieaufwand (KEA) (MJ)	Zement im Fertig-/Halbfertigteil	Beton (ohne Zement)	Sonstiges	Summe
HF-D: Base Case (Zement im Halbfertigteil: durchschnittlicher Zement nach VDZ 2007)	128.390	72.855	2.463.581	2.664.825
HF-D: Sensitivitätsanalyse III (Zement im Halbfertigteil:CEM I)	149.263	72.855	2.463.581	2.685.699
HF-D: Relation Sensitivitätsanalyse III zu Base Case	116 %	100 %	100 %	101 %

GWP (kg CO2 eq.)	Zement im Fertig / Halbfertigteil	Beton (ohne Zement)	Sonstiges	Summe
HF-D: Base Case (Zement im Halbfertigteil: durchschnittlicher Zement nach VDZ 2007)	31.160	7.585	294.295	333.041
HF-D: Sensitivitätsanalyse III (Zement im Halbfertigteil:CEM I)	34.119	7.585	294.295	336.000
HF-D: Relation Sensitivitätsanalyse III zu Base Case	109 %	100 %	100 %	101 %
AP-EU (kg SO2 eq.)	Zement im Fertig-/Halbfertigteil	Beton (ohne Zement)	Sonstiges	Summe
HF-D: Base Case (Zement im Halbfertigteil: durchschnittlicher Zement nach VDZ 2007)	37,07	20,68	768,61	826,36
HF-D: Sensitivitätsanalyse III (Zement im Halbfertigteil:CEM I)	48,51	20,68	768,61	837,79
HF-D: Relation Sensitivitätsanalyse III zu Base Case	131 %	100 %	100 %	101 %
EP (kg PO4 eq.)	Zement im Fertig-/Halbfertigteil	Beton (ohne Zement)	Sonstiges	Summe
HF-D: Base Case (Zement im Halbfertigteil: durchschnittlicher Zement nach VDZ 2007)	5,64	3,97	105,74	115,36
HF-D: Sensitivitätsanalyse III (Zement im Halbfertigteil:CEM I)	7,48	3,97	105,74	117,20
HF-D: Relation Sensitivitätsanalyse III zu Base Case	133 %	100 %	100 %	102 %
POCP (kg Eth eq.)	Zement im Fertig-/Halbfertigteil	Beton (ohne Zement)	Sonstiges	Summe
HF-D: Base Case (Zement im Halbfertigteil: durchschnittlicher Zement nach VDZ 2007)	2,8	0,8	48,7	52,3
HF-D: Sensitivitätsanalyse III (Zement im Halbfertigteil:CEM I)	5,8	0,8	48,7	55,3
HF-D: Relation Sensitivitätsanalyse III zu Base Case	208 %	100 %	100 %	106 %

8.9.8 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Beton auf der Baustelle

Tabelle 8-51 Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Zementsorte im Beton auf der Baustelle.

Kumulierter Energieaufwand (KEA) (MJ)	Zement im Transportbeton	Transportbeton (ohne Zement)	Transport d. Transportbetons	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case (Transportbeton: Portlandkalksteinzement EcoInvent 2001)	27.363	13.084	6.874	1.842.624	1.889.945
HF-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	513.558	291.418	77.553	1.782.296	2.664.825
OB-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	641.948	364.273	96.941	1.044.224	2.147.386
SB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	25.815	21.519	5.727	1.842.624	1.895.685
HF-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	349.606	291.418	77.553	1.782.296	2.500.873
OB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	437.007	364.273	96.941	1.044.224	1.942.446
GWP (kg CO2 eq.)	Zement im Transportbeton	Transportbeton (ohne Zement)	Transport d. Transportbetons	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case (Transportbeton: Portlandkalksteinzement EcoInvent 2001)	6.017	600	468	255.500	262.585
HF-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	124.641	30.340	5.279	172.781	333.041
OB-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	155.802	37.925	6.598	68.062	268.387
SB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	5.337	2.240	390	255.500	263.467
HF-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	72.277	30.340	5.279	172.781	280.676
OB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	90.346	37.925	6.598	68.062	202.931

AP-EU (kg SO ₂ eq.)	Zement im Transportbeton	Transportbeton (ohne Zement)	Transport d. Transportbetons	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case (Transportbeton: Portlandkalksteinzement EcolInvent 2001)	8,17	3,69	2,77	760,82	775,45
HF-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	148,29	82,72	31,26	564,09	826,36
OB-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	185,36	103,40	39,08	288,15	615,98
SB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	7,80	6,11	2,31	760,82	777,04
HF-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	105,66	82,72	31,26	564,09	783,73
OB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	132,07	103,40	39,08	288,15	562,70
EP (kg PO ₄ eq.)	Zement im Transportbeton	Transportbeton (ohne Zement)	Transport d. Transportbetons	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case (Transportbeton: Portlandkalksteinzement EcolInvent 2001)	1,22	0,75	0,59	123,03	125,60
HF-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	22,57	15,90	6,68	70,21	115,36
OB-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	28,21	19,87	8,35	33,38	89,81
SB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	1,19	1,17	0,49	123,03	125,89
HF-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	16,12	15,90	6,68	70,21	108,91
OB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	20,15	19,87	8,35	33,38	81,75

POCP (kg Eth eq.)	Zement im Transportbeton	Transportbeton (ohne Zement)	Transport d. Transportbetons	Sonstiges	Summe
SB-D: Base Case (Transportbeton: Portlandkalksteinzement EcoInvent 2001)	0,30	0,10	0,08	43,48	43,96
HF-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	11,17	3,16	0,92	37,01	52,26
OB-D: Base Case (Transportbeton C25/30: durchschnittl. Zement VDZ 2007)	13,96	3,95	1,15	20,48	39,54
SB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	0,88	0,23	0,07	43,48	44,66
HF-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	11,90	3,16	0,92	37,01	53,00
OB-D: Sensitivitätsanalyse II (Transportbeton auf der Baustelle: CEM III Nemuth und Kreißig 2007)	14,88	3,95	1,15	20,48	40,46

8.9.9 Auszüge aus der Statikberechnung von KHP