



Ökobilanz - Transportbeton

Einflussparameter zur Modellierung und kritische Analyse
der LCA - Ergebnisse

Autor:
Richard Deutsch, BSc.

Betreuer:
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Alexander Passer, MSc.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGrazonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit wurde als Auftragsdiplomarbeit für den Güteverband Transportbeton Österreich (GVTB) im Rahmen der Erstellung einer Umweltproduktdeklaration (EPD) Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Kurzfassung

Derzeit werden jährlich etwa 33 Billionen Tonnen Beton weltweit produziert, der dafür verwendete Zement ist für fünf Prozent des anthropogenen CO_2 - Ausstoßes verantwortlich. Um die derzeitige Situation der Umweltwirkungen von Transportbeton zu ermitteln, wird eine systematische Literaturrecherche zur Ermittlung des Status Quo durchgeführt. Mit der Methode der Ökobilanz werden die Umweltwirkungen und Ressourcenverbräuche für Transportbeton in Österreich für das Jahr 2015 ermittelt. Dafür wurden 113 Rezepturen von sieben Transportbetonunternehmen, die in Summe rund 40% des in Österreich verwendeten Transportbeton produzieren, bilanziert. Die Ergebnisse werden sowohl für die abgefragten Expositionsklassen und Betonsortenkurzbezeichnungen, als auch zusammengefasst für typische Einsatzbereich angegeben. Als Ergebnis geht hervor, dass Betone für untergeordnete Bauteile ein GWP von $103 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ aufweisen und Beton mit höheren technischen und funktionalen Anforderungen, wie Betone für den Hochbau und Infrastrukturbau ein GWP von $191 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ bzw. $242 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ haben.

Um die LCA - Ergebnisse hinsichtlich ihrer Repräsentativität und Unsicherheiten zu beurteilen, wurden diese kritisch analysiert. Die wesentlichen Prozessbeiträge wurden dabei Mithilfe der Dominanzanalyse ermittelt und die Variation der relevanten Prozessen mittels Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Repräsentativität der Sachbilanzdaten wurde durch die Variation der Rezepte geprüft.

Zur Quantifizierung der Unsicherheiten wurde der Einfluss von unterschiedlichen LCIA - Methoden und Hintergrunddaten untersucht und eine Monte-Carlo Simulation durchgeführt. Die LCA - Ergebnisse wurden in die Literatur eingeordnet und es konnte eine ähnlich Größenordnung der Umweltwirkungen festgestellt werden, dabei wurde eine Relation zur funktionalen Äquivalenz (Druckfestigkeit) hergestellt.

Abstract

At present, about 33 billion tonnes of concrete are produced each year, and the cement used in concrete is responsible for five percent of total anthropogenic CO₂ emissions. In order to identify the scientific state of the art on concrete's environmental effects, the status quo is determined through a systematic literature review. The environmental impact assessments for ready-mixed concrete in Austria are calculated using Life Cycle Assessment. For this, 113 mixes from seven ready-mixed concrete companies, which produce around 40% of the ready-mixed concrete used in Austria, were reported. The results are presented for concretes with different both the exposure conditions, as well as for typical applications. As a result, concretes for subordinate components have a GWP of 103 kgCO₂/m³, and concrete with higher technical and functional requirements, such as concretes for building and infrastructure construction, have a GWP of 191 kgCO₂/m³ and 242 kgCO₂/m³ respectively.

In order to assess the LCA results in terms of their representativeness and uncertainties, the results were critically analyzed. A dominance analysis was used to determine the essential contributions and a sensitivity analysis to quantify the effects on the results by varying the type of cement, the transports and the energy mix processes.

By examining the representativeness due to the uncertainties in the background data, sufficient accuracy in the life cycle inventory was established. Furthermore, the compressive strength classes of the concretes were analyzed and the influence of the background data of different database versions on the results was shown by means of a correlation diagram. The results' deviations associated to the use of different LCIA methods were analyzed. In order to quantify the uncertainties in the background data, the Monte Carlo simulation method is used.

To classify the LCA results, they are compared with the environmental impacts published in different EPDs, papers and databases sources. Subsequently, a comparison of the environmental impact categories is made on the basis of the functional and technical performance.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	3
Vorwort und Danksagung	5
Kurzfassung	7
Abstract	9
1. Einleitung	15
1.1. Hintergrund der Arbeit	15
1.2. Umweltwirkungen von Beton	17
1.3. Ziele der Arbeit	18
1.4. Vorgangsweise	19
1.5. Aufbau dieser Arbeit	21
2. Methoden	23
2.1. Ökobilanz	23
2.1.1. Grundsätze der Ökobilanz	28
2.1.2. Prozess LCA	31
2.1.3. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens	32
2.1.4. Repräsentativität der Ökobilanz	33
2.1.5. Modellierung	34
2.1.6. Ergebnisdarstellung	38
2.2. Dominanzanalyse	39
2.3. Sensitivitätsanalyse	40
2.4. Korrelationsanalyse	41
2.5. Monte-Carlo-Analyse	42
2.6. Systematische Literaturrecherche	43

3. Anwendung der Ökobilanz für Transportbeton	45
3.1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens	45
3.1.1. Ziel der Ökobilanz	45
3.1.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens	45
3.2. Sachbilanz (LCI)	53
3.2.1. Datenerhebung	53
3.2.2. Abschneidekriterien zum Ausschluss von Inputs und Outputs	55
3.2.3. Auswahl der Vordergrund- & Hintergrunddaten	55
3.2.4. Allokationen	56
3.2.5. Ergebnisse der Sachbilanz	56
3.2.6. Interpretation der Sachbilanz	57
3.3. Wirkungsabschätzung (LCIA)	60
3.3.1. Auswahl der Wirkungskategorien	60
3.3.2. Auswahl der Charakterisierungsmodelle	60
3.3.3. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	61
3.3.4. Interpretation der Wirkungsabschätzung	63
4. Kritische Analyse der LCA - Ergebnisse	67
4.1. Dominanzanalyse	69
4.2. Sensitivitätsanalyse	72
4.3. Repräsentativität der Rezepte	75
4.4. Druckfestigkeitenvergleich	76
4.5. Korrelationsanalyse ecoinvent v.2.2 & v.3.3	79
4.6. Vergleich unterschiedlicher LCIA-Methoden	83
4.7. Monte-Carlo Analyse	85
4.8. Einordnung in die Literatur	87
4.9. Funktionaler Äquivalenzvergleich	90
5. Zusammenfassung und Ausblick	93
5.1. Zusammenfassung	93
5.2. Ausblick	96
Abbildungsverzeichnis	106
Tabellenverzeichnis	107
A. Anhang - Erhebungsbogen	109
B. Anhang - Hintergrunddaten zur Modellierung	115

C. Anhang - Weitere Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	119
D. Anhang - Weitere detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	123
E. Anhang - Weitere Ergebnisse der Dominanzanalyse	127
F. Anhang - Weitere Ergebnisse der Repräsentativität	133
G. Anhang - Weitere Ergebnisse der Korrelationsanalyse ecoinvent v.2.2 & v.3.3	139
H. Anhang - Weitere Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation	149
I. Anhang - Weitere Ergebnisse der Einordnung in die Literatur	155
J. Anhang - Weitere Ergebnisse des funktionalen Äquivalenzvergleichs	161

1. Einleitung

1.1. Hintergrund der Arbeit

Zur Errichtung von Bauwerken ist seit jeher eine enorme Menge an unterschiedlichen energetischen und stofflichen Ressourcen notwendig. Eine dieser stofflichen Ressourcen ist der für seine funktionale und technische Performance geschätzte Werkstoff Beton. Bereits vor 14.000 Jahren verwendeten Handwerker in der heutigen Türkei eine Mischung aus gebranntem Kalk, Ziegelmehl und Puzzolanerde, quasi ein Ur-Beton, als Mörtel für ihre Ziegelbauwerke. Im alten Rom wurden spätestens seit dem 2. Jahrhundert vor Christus, Fundamente und später ganze Gebäude aus einem Gemisch von Steinen, Sand, gebranntem Kalk, Puzzolanerde und Meerwasser, dem Opus Caementicium, errichtet. Erst 1844 brachte der Engländer Issac Charles Johnson eine Mischung aus Ton und Kalk zum schmelzen, auch als sintern bezeichnet, und erfand damit den bis dato verwendeten Portlandzement. Wenige Jahre später verstärkte der französische Gärtner Joseph Monier seine aus Beton gefertigten Blumenkübel mit einem Geflecht aus Stahl. Womit der Erfolgslauf des Stahlbetons beginnt und durch seine vielseitige Einsetzbarkeit bis heute bei nahezu keinem Bauwerk wegzudenken ist.

Durch die beinahe unendliche Möglichkeit der Formgebung und die in Kombination mit Bewehrungsstahl sehr guten statischen Eigenschaften, gilt Beton neben Holz, Stahl und Ziegel als eines der wichtigsten Baumaterialien. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Betontechnologie entstand auch die Möglichkeit des Transports über weitere Distanzen. Beton musste also nicht mehr insitu hergestellt werden, sondern konnte von, für die Betonherstellung spezialisierten Werken, auf die Baustelle befördert werden. Die Betontechnologie entwickelte Zusatzstoffe, Zusatzmittel und neue Herstellungsprozesse zur Optimierung der Qualität, der Eigenschaften und der Verarbeitbarkeit des Betons. Beton ist dadurch mehr als eine Schaufel Zement, drei Schaufeln Kies und ein Kübel Wasser, es ist ein technologisch komplexes Produkt in jeglicher Hinsicht.

In Österreich werden jährlich rund 10 Mio. Kubikmeter (m^3) Transportbeton produziert und eingebaut. [GVTB2016] In weit größeren Industrie- und Entwicklungsländern wie Amerika, Brasilien, Russland, Indien und China sind die produzierten Mengen deutlich höher. Im Durchschnitt werden etwa 4,7 Tonnen Beton jährlich pro Person weltweit produziert (ca. 33 Billionen Tonnen), das entspricht ca. 13,2 Mrd. m^3 Beton. Zudem wird prognostiziert, dass der weltweite Bedarf in den nächsten Jahren um bis zu 2,5% jährlich zunehmen wird. [ISO/TC071:2016] Aufgrund dieser großen Mengen gerät der Transportbeton auch in den Fokus hinsichtlich seiner Umweltwirkungen. Die Zementindustrie produziert jährlich rund 1,8 Billionen Tonnen CO_2 und ist damit für etwa fünf Prozent des anthropogenen CO_2 - Ausstoßes verantwortlich. [WBCSD2016] Damit hat der gesamte Bausektor einen großen Anteil an der weltweiten Klimaänderung.

Zur Eingrenzung des weltweiten Klimawandels hat die Versammlung der Vereinten Nationen (UN) 2015 bei der UN - Klimakonferenz in Paris ein verbindliches Abkommen beschlossen. Dieses Übereinkommen hat als Ziel die globale Erwärmung auf maximal $+2^\circ\text{C}$, im Vergleich zum Temperaturniveau der vorindustriellen Zeit, zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen müssen die Treibhausgasemissionen weltweit zwischen 2045 und 2060 auf Null reduziert werden. Die Europäische Union hat bereits im Jahr 2008 auf ein Richtlinien- und Zielpaket für Klimaschutz und Energie geeinigt. Es enthält Ziele die bis zum Jahr 2020 zu erreichen sind, die sogenannten 20 - 20 - 20 Ziele. Diese sind, die Reduktion von 20% der THG - Emissionen im Vergleich zu 1990, die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien um 20% und die Steigerung der Energieeffizienz um 20%.

Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, bedarf es einer konsequenten Klimaschutzpolitik. Die Reduktion der THG¹ - Emissionen gelingt nur durch den Einsatz energieeffizienterer Systeme und der Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien. Im Bausektor ist vor allem bei der energieintensiven Zementherstellung ein großes Einsparungspotenzial vorhanden, dass einen positiven Beitrag zur Erreichung der Ziele leisten könnte. Doch auch der Einsatz von alternativen Produkten zum klassischen Portlandzement, sowie technisch und funktionale Alternativen in der Herstellung sind eine Möglichkeit den Klimawandel positiv zu beeinflussen.

¹Treibhausgase (THG) sind Gase die zum Treibhauseffekt beitragen, sie können sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein.

1.2. Umweltwirkungen von Beton

Zur Beurteilung der Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen, gibt es unterschiedliche Methoden. Die in dieser Arbeit verwendete, ist die Methode der Ökobilanzierung (siehe Kapitel 2.1). Diese ermöglicht es die Umweltauswirkungen für unterschiedliche Wirkungskategorien zu ermitteln, die bekannteste ist die Kategorie der Globalen Erwärmung mit der Einheit kgCO_2 -Äquivalenz.

Durch die Wichtigkeit des Werkstoffes Beton und der beträchtlichen jährlich produzierten und verbauten Masse sind dessen Umweltwirkungen von großer Bedeutung. Um den Status Quo der Ökobilanzierung, deren Unsicherheiten und im speziellen die Umweltwirkungen für Beton und Transportbeton zu erheben, wurde eine Variante der systematischen Literaturrecherche auf unterschiedlichen Plattformen für wissenschaftliche Publikationen und veröffentlichten Umweltproduktdeklarationen durchgeführt.

Dabei sind Arbeiten zum Thema der unterschiedlichen LCA-Methoden von [Lasvaux2016], [Lewandowska2014a], [Passer2015b], [Combined2004], [Hoxha2013], [Zabalza-Bribian2009], [AbdRashid2015] und [Fouquet2015] zu nennen, im speziellen mit der Modellierung von Ökobilanzen beschäftigen sich [Frischknecht2010], [Hafliger2015] und [Hafliger2017]. Dem Thema Unsicherheiten in der Modellierung und in den Ergebnisse, sowie Sensitivitätsanalysen der Resultate widmen sich die wissenschaftlichen Publikationen von [Benini2015], [Ciroth2004], [Combined2004], [Hafliger2017] und [Basset-Mens2006]. Das Thema der Allokation von Stoffen und Stoffströmen behandeln [Chen2010], [Fischer2007] und [Woodworth1983].

In der Literatur findet sich jedoch im Vergleich zu den allgemeinen Themen eine geringe Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Thema der Umweltwirkungen von Beton und im speziellen Transportbeton. Erwähnenswert sind Arbeiten von [Park2012], [Hong2012], [Marinkovic2013], [Marinkovic2014a], [Tosic2015], [Dong2015c], [Turk2015a], [Smith2016], [Kim2016], [Kleijer2017] und [Gursel2017]. Im Zeitraum der letzten fünf Jahre wurde dieses Thema von mehreren Autoren aufgegriffen und publiziert wurde. Das Thema der Umweltwirkungen für Beton ist aufgrund der weltweiten Klimaschutzpolitik nicht regional beschränkt. Fünf der genannten Publikationen sind aus dem europäischen Raum, vier aus dem ostasiatischen Bereich und zwei von US-Amerikanischen Universitäten.

Etwa 40 unterschiedliche EPDs für Transportbeton und Beton, von verschiedensten Herstellern werden auf diversen Plattformen zur Verfügung gestellt. In Österreich werden von den Verbän-

den für Zement (VÖZ - Vereinigung der österreichischen Zementindustrie) und Beton (VÖB - Verband österreichischer Beton- und Fertigteilwerke) sowie auf der Datenbank für Baumaterialien (baubook) EPDs bzw. Daten zu Umweltwirkungen veröffentlicht. Die Ergebnisse der recherchierten EPDs weisen große Unterschiede auf. Dies hat vor allem mit der spezifischen Modellierung des Bilanzierers zu tun. Die große Anzahl an LCIA - Methoden, Hintergrunddaten, Datenunsicherheiten, intransparenten Aufzeichnungen und nationalen Produkt Kategorie Regeln (PCR) machen einen Vergleich der LCA - Ergebnisse nur schwer möglich. Die Recherche der Umweltproduktdeklarationen dient zur Darstellung des Status-Quo der Umweltwirkungen von Beton und zur Einordnung der in Kapitel 3 berechneten LCA - Ergebnisse dieser Arbeit.

In Europa gibt es seitens der Europäischen Kommission (EC) Initiativen für eine alternative Methode zur EPD, den sogenannten Product Environmental Footprint (PEF). Diese versucht die Circular Economy und soziale Anforderungen festzulegen. Mit Hilfe einer strikt formulierten Anleitung zur Erstellung der Ökobilanz, der Product Environmental Footprint Category Rule Guidance (PEFCR), ist eine einheitliche Anwendung festgelegt, dies schafft eine Basis zur Vergleichbarkeit von Produkten. Der Unterschied zwischen EPD und PEF ist in Kapitel 2 ausführlicher erläutert.

1.3. Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung der Einflussparameter und die kritische Analyse der LCA - Ergebnisse für Transportbeton in Österreich. Es gilt dabei zu untersuchen, welche Prozesse und Ressourcen haben den wesentlichsten Beitrag zu den Ergebnissen und wie beeinflussen diese die Modellierung. Anhand der zu erstellenden Ökobilanz sollen die Unsicherheiten aus Datenqualität, Produktionsmenge, Modellierung und Methoden, sowie die zeitlichen, technologischen und geografischen Unsicherheiten, bewertet werden um die Repräsentativität der Ergebnisse beurteilen zu können.

Bei der zu erstellenden EPD, welche die Basis für die spätere kritische Analyse bildet, handelt es sich um eine Branchen-EPD, d.h. die funktionale/deklarierte Einheit ist für eine Gruppe gleichartiger Produkte von unterschiedlichen Herstellern definiert. Seitens des Güteverbands für Transportbeton in Österreich (GVTB), welche als Auftraggeber der EPD fungieren, wurden die zu erreichenden Ziele klar festgelegt. Das primäre Projektziel, in dessen Rahmen ein Teil dieser Arbeit entstanden ist, ist die Veröffentlichung einer Branchen - EPD für drei Produkte, die sich durch die unterschiedlichen Anwendungsgebiete (Betone für untergeordnete Bauwerke - X0,

1.4. Vorgangsweise

Betone vorwiegend für den Hochbau - XC1 bis B2, Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau - B3 bis B7) definieren. Bei der im Rahmen der Diplomarbeit erstellten Ökobilanz handelt es sich um eine „Cradle-to-gate“ LCA. Der Fokus wird explizit auf die Quantifizierung der Module A1 - A3 (Rohstoffbereitstellung, Transport und Herstellung) gelegt.

Um eine vollständige Feststellung der Umweltwirkungen des Endproduktes zu erhalten, ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus A - C & D zu betrachten. Dies ist im Rahmen der zu veröffentlichen „business-to-business“ - EPD geplant.

1.4. Vorgangsweise

Die Vorgangsweise der Diplomarbeit und zur Erstellung der EPD ist in Abbildung 1.1 als Prozessmodell dargestellt. Teile dieser Diplomarbeit wurden im Rahmen des Projekts zur Erstellung der EPD für Beton erarbeitet, die im wesentlichen in Zusammenarbeit von drei Organisationen bearbeitet wurde. Als Auftraggeber der EPD fungiert der GVTB, als Bilanzierer der Ökobilanz die Arbeitsgruppe für Nachhaltiges Bauen (AG NHB) der Technischen Universität Graz und als Programm Operator der EPD die Bau EPD GmbH.

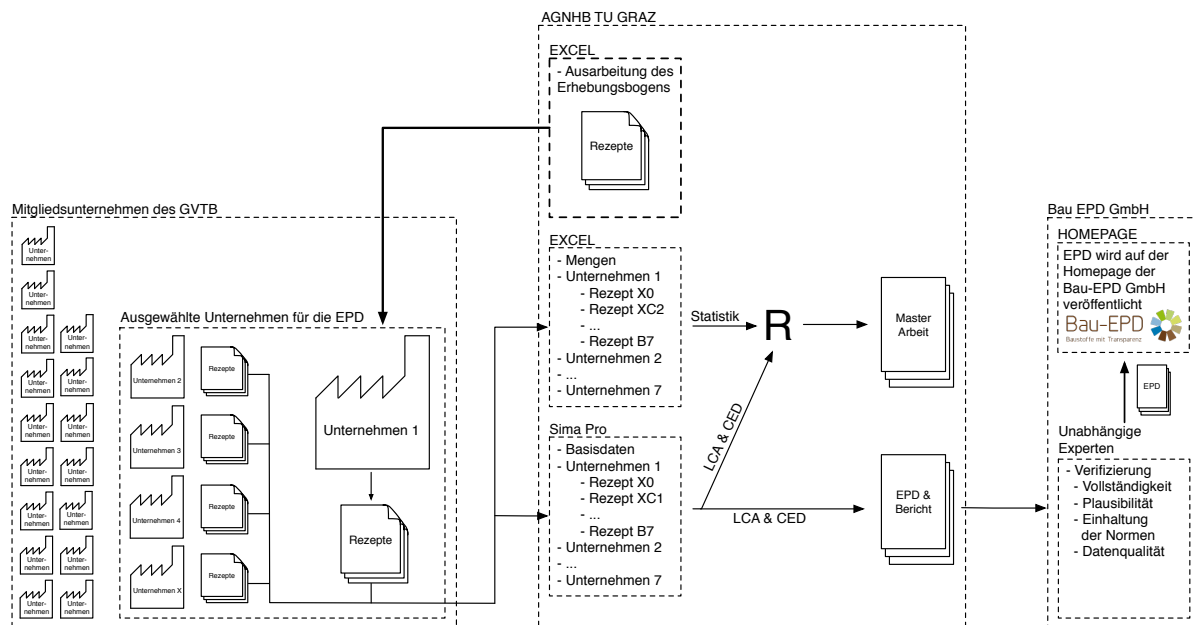


Abbildung 1.1.: Prozessmodell

Folgende Schritte wurden durchgeführt:

1. Datenerhebung & Grundlagen

Um eine umfassende Erhebung aller benötigten Daten durchführen zu können, wurde ein Fragenbogen (siehe Anhang A) ausgearbeitet. Mit Hilfe dessen werden die Daten zu Produktionsmengen, Energie- und Elektrizitätsbedarf, der Frischbetonherstellung, internen und externen Transporten, Ausgangsstoffen, Rohstoffverbräuchen im Produktionsprozess und Produktionsmengen je Kurzbezeichnung, sowie die Rezepturen für die Expositionsklassen bzw. Betonsortenkurzbezeichnungen von X0, XC1, XC2, B1, B2, B3, B4, B5, B6 und B7 abgefragt.

2. Auswahl der Werke

Die Auswahl von acht repräsentativen Transportbetonwerken, die an der Datenerhebung teilnehmen, wurde seitens des GVTB durchgeführt.

3. Versand

Nach Bekanntgabe der Firmen und der zuständigen Ansprechpersonen, wurden die Erhebungsbögen als Excel-File, sowie eine schriftliche Stellungnahme des GVTB und eine Anleitung zum Ausfüllen des Fragebogens von der TU Graz per E-Mail an alle teilnehmenden Unternehmen zugesendet.

4. Retournierung

Von sieben der acht teilnehmenden Unternehmen wurde der Erhebungsbogen per E-Mail an die TU Graz übermittelt. Nach dem Erhalt der Fragebögen, wurden diese auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft.

5. Auswertung LCI

Die gesamten Rezepte (insgesamt 113) wurden im Programm Microsoft Excel aufbereitet um das Life Cycle Inventory (LCI) mit der Statistiksoftware R auswerten und analysieren zu können.

6. Auswertung LCA

Zur Berechnung der Umweltwirkungen und des Ressourcenverbrauchs wurden die Rezepte inklusive aller Ressourcen- und Prozessstoffe im Programm SimaPro 8 modelliert.

7. Hintergrundbericht (nicht im Rahmen dieser Arbeit)

Nach dem Verfassen des Hintergrundberichts und der EPD wurden diese der Bau EPD GmbH übergeben.

8. Statistische Auswertung & kritische Analyse

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sowie die Ergebnisse der Ökobilanz sind in dieser Diplomarbeit dargestellt. Zusätzlich wurden die Einflussparameter der Modellierung sowie die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Unsicherheiten und Repräsentativität untersucht und beurteilt.

9. Verifizierung & Veröffentlichung (nicht Bestandteil dieser Arbeit)

Nach der Verifizierung durch unabhängige Dritte des EPD - Gremiums (externe Sachverständige) wurde die EPD auf der Homepage der Bau EPD GmbH veröffentlicht.

1.5. Aufbau dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist nach folgenden Punkten aufgebaut:

1. Im Kapitel 1 wird der Hintergrund dieser Arbeit beschrieben, sowie der Status Quo zu den Umweltwirkungen von Beton dargestellt. Weiters werden die im Rahmen dieser Arbeit zu erreichenden Ziele definiert und die Vorgangsweise erläutert.
2. Das Kapitel 2 beschreibt die in dieser Arbeit zur Anwendung kommenden Methoden.
3. Die Anwendung der Methode der Ökobilanz für Transportbeton wird in Kapitel 3 behandelt.
4. Im Rahmen einer kritischen Analyse der LCA - Ergebnisse (siehe Kapitel 4) werden die zuvor ermittelten Einflussparameter auf Unsicherheiten untersucht und bewertet, um die Repräsentativität der Ergebnisse beurteilen zu können.
5. Im Kapitel 5 findet sich eine Zusammenfassung der Arbeit, der Ausblick, sowie eine Beschreibung des weiteren Forschungsbedarfs.

Die Zitate aus der Fachliteratur werden bei sinngemäßer Wiedergabe durch Angabe des Autors und des Erscheinungsjahres in einer eckigen Klammer ersichtlich gemacht. Bei wörtlichen Zitaten werden diese zusätzlich in Kursivschrift dargestellt.

Anmerkung:

Einzelne Beiträge bzw. Absätze zur vorliegenden Arbeit, die vom Autor im Rahmen des genannten Projekts erarbeitet wurden, wurden im Wortlaut unverändert übernommen und sind entsprechend zitiert (siehe Literaturverzeichnis). Zur besseren Lesbarkeit dieser Arbeit wurden diese Textbausteine des Autors nicht durch Kursivschrift zusätzlich gekennzeichnet. [Deutsch2017]

2. Methoden

In folgendem Kapitel 2 werden die in dieser Arbeit angewandten Methoden zur Untersuchung der Einflussparameter der Modellierung und zur kritischen Analyse der LCA - Ergebnisse angeführt und erklärt.

2.1. Ökobilanz

„Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen ... Die Ökobilanz-Studie untersucht die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebenswegs eines Produktes (d.h. von der Wiege bis zur Bahre) von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung.“ [ISO14040:2006]

Die gesamtheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit von Gebäuden wird als Lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsanalyse (LCSA, engl.: Life Cycle Sustainability Assessment) bezeichnet. Die LCSA kann dabei als Summe von drei Dimensionen gesehen werden.

- Lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsanalyse (LCSA)
 - Ökobilanz (LCA)
 - Lebenszykluskosten (LCC)
 - Sozialer Lebenszyklusbewertung (SLCA)

Die Methode der Ökobilanzierung, wie sie in der vorliegenden Arbeit angewendet wird, kann daher als ein Bestandteil der gesamten Nachhaltigkeitsbewertung bezeichnet werden. Man versteht darunter eine systematische Analyse von potentiellen Umweltwirkungen des definierten Produktsystems über dessen gesamten Lebensweg. Die Methode der LCA gilt als eine der international renommiertesten, die mit definierten Indikatoren eine Quantifizierung der Nachhaltigkeit

ermöglicht. Die internationale Normenreihe der ISO14040 [ISO14040:2006] standardisiert die Methode der LCA, diese bildet gleichzeitig die Grundlage für die Umweltkennzeichnungen.

Es wird dabei zwischen drei Typen von Umweltkennzeichen unterschieden:

- Umweltzeichen (Typ I)
- Selbstdeklaration (Typ II)
- Umweltproduktdeklaration (Typ III)

Umweltkennzeichen Typ I (Umweltzeichen) sind durch die internationale Norm ISO14024 [ISO14024:2001] standardisiert und richten sich in erster Linie an private und gewerblich Endverbraucher.

Umweltkennzeichen Typ II (Selbstdeklaration) sind durch die internationale Norm ISO14021 [ISO14021:2012] standardisiert und wenden sich meist an Endverbraucher.

Umweltkennzeichen Typ III (Umweltproduktdeklaration) sind durch die internationale Norm ISO14025 [ISO14025:2010] und die europäische Norm EN 15804 [EN15804:2014] standardisiert und sind vorrangig für Planer, Handel und Endverbraucher. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte EPD für Transportbeton gilt als Umweltkennzeichen Typ III und basiert daher auf die angeführten international gültigen Normenreihen.

Die Umweltproduktdeklarationen (EPDs) bilden die Datengrundlage für eine ökologische Gebäudewertung nach EN 15978 [EN15978:2012] und werden von vielen Gebäudezertifizierungssystemen in Österreich (ÖGNI, ÖGNB-TQB, klima:aktiv) als auch internationalen Systemen (DGNB, LEED, BREAM, etc.) als Grundlage für die Bewertung herangezogen.² Die Erstellung bzw. Verwaltung der EPDs unterliegt verschiedenen nationalen Verbänden und Unternehmen. In Österreich ist die Bau EPD GmbH als Programm Operator für die EPDs zuständig. Die Bau EPD GmbH ihrerseits ist Mitglied der ECO Platform, einem internationalen gemeinnützigen Verein, dessen Ziel es ist die Harmonisierung und Vernetzung aller in Europa vorhandenen EPD Programme voranzutreiben. Eine Übersicht der in Europa und international tätigen Program Operators (PO) findet sich in Tabelle 2.1.

Eine weitere Möglichkeit zur Messung von Umweltleistungen von Produkten, ist die von der Europäischen Kommission (EC) veröffentlichte Methode des sogenannten Product Environmental Footprints (PEF). Im Vergleich der PEF - Methode mit der EN15804 - Methode erscheinen

²<http://www.bau-epd.at/de/epds/wozu-epds/>; Zugriff am: 03.08.2017

³Darstellung in Anlehnung an [Passer2015b]

2.1. Ökobilanz

Tabelle 2.1.: EPD Program Operators³

	Land	EPD Programm Operator (PO)	EPD PO Kürzel	Homepage
Europa	Deutschland	ift Rosenheim	Ift	www.ift-rosenheim.de
		Institut Bauen und Umwelt e.V. (Institute for Construction and Environment)	IBU	www.bau-umwelt.de
	Dänemark	Danks Standard (Danish Standard)	MVD	www.mvd.dk
	Europa	European Aluminium Association	EAA	www.alueurope.eu
		Confederation of European Paper Industries	CEPI	www.paperpfor.eu
	Europa, Belgien	PlasticsEurope	PE	www.plasticseurope.org
	Finnland	RT Environmental Declaration	RT	http://www.rts.fi/ymparistoseloste/index_RTED.htm
	Frankreich	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (French Environmental and Energy Agency) + AFNOR French Standard	ADEME	www.developpement-durable.gouv.fr/-Experimentation-de-l-affichage.4303-.html
		Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (Environmental and Health Declaration Sheets) + AFNOR French Standard	FDES	www.inies.fr
		PEP ecopassport	PEP	www.pep-ecopassport.org
		Association HQE tio	HQE	http://assohqe.org/hqe/
	Großbritannien	BRE Global	BRE	www.greenbooklive.com
	Italien	Certificazioni e controlli per le costruzioni	ICMQ S.p.a.	www.icmq.it
	Niederlande	Milieurelevante Productinformatie	MRPI	http://www.mrpi.nl/
	Norwegen	Næringslivets miljøstiftelse EPD Norge (Norwegian EPD Foundation)	NEF	www.epd-norge.no
	Österreich	Bau EPD GmbH	BAU-EPD	www.bau-epd.at
	Polen	Instytut Techniki Budowlanej	ITB	www.itb.pl/
	Portugal	DAPHabitat System	DAPHabitat	www.daphabitat.pt
	Schweden	International EPD System	IES	www.environdec.com
	Schweiz	Schweizerischer Überwachungsverband für Gesteinsbaustoffe	SÜGB	http://www.sugb.ch
	Spanien	Sistema Declaraciones Ambientales de Productos por la construcción (EPD System for the Construction sector)	DAPc	www.csostenible.net/index.php/es/sistema_dapc
		Spanish Association for Standardization and Certification	AENOR	http://www.en.aenor.es
International	Slowakei	ZAG EPD	ZAG	www.zag.si
	Australien	Ecospecifier	ecospec	www.GlobalGreenTag.com
	China	Chinese EPD Program		http://www.unep.org/SBCI/pdfs/Shanghai_documents/China_5_EPD&CF_building&materials_HW_JQ.pdf
	International	The Green Standard	TGS	www.thegreenstandard.org
		UL Environment	UL	www.ul.com
	Japan	Japanese Environmental Management Association of Industry	JEMAI	www.ecoleaf-jemai.jp
	Kanada	Canadian Standards Association	CSA Group	http://www.csaregistry.ca/epd
		FP Innovations	FP	www.forintek.ca
	Korea	Carbon Footprint Label	KEITI	www.edp.or.kr
	Taiwan	Environmental Development Foundation	EDF	www.edf.org.tw
	USA, Kanda	ASTM International	ASTM	www.astm.org/EPDs.htm
		Carbon Leadership Forum	CLF	www.carbonleadershipforum.org
		ICC Evaluation Services	ICC-ES	www.icc-es.org/ep
		National Ready Mixed Concrete Association	NRMCA	www.nrmca.org/sustainability/EPDProgram/
		NSF International	NSF	www.nsf.org
	USA	SCS Global Services	SCS	www.scs-certified.com

einige grundlegende Unterschiede die in [Passer2015b] angeführt sind. Die beiden Methoden unterscheiden sich bereits in den angestrebten Zielen. Wichtigstes übergeordnetes Ziel des PEF sind direkte konsistente und reproduzierbare Vergleiche von Produkten über deren Lebenszyklus auf Basis der PEF-Kategorieregeln (PEFCR), die mit den PCRs (PKR - Teil B) für EPDs verglichen werden können. Bei EPDs nach EN15804 ist das kein explizit angestrebtes Ziel, sie sollen als Umweltkennzeichen Typ III nur Informationen („business to business“) zur Verfügung stellen, damit auf Bauwerksebene bewertet werden kann. Die Methode der EPD zielt darauf ab, die Umweltauswirkungen eines Gebäudes und deren Produkte transparent für jedes einzelne Stadium des Lebenszyklus getrennt zu erfassen und zu bewerten. Durch die unterschiedliche Zielsetzung der beiden Methoden folgen verschiedene methodische Entscheidungen in der Anwendung. [Passer2015b] Die wichtigsten Unterschiede sind in Tabelle 2.2 angeführt.

Tabelle 2.2.: Vergleich EC PEF und EPD⁴

Kriterium	EC PEF	EN 15804:2012+A1:2013
Ressourcen-Nutzung und Emissionen / Sachbilanz		
Anforderungen an die Datenqualität	Strenge Anforderungen für PEF-Studien, die für die externe Kommunikation bestimmt sind.	Die Daten sollen so aktuell wie möglich sein (aktualisiert innerhalb von 10 Jahren für generische Daten und 5 Jahren für spezifische Daten); 1 Jahr gemittelte Daten sind i.A. zu verwenden; technologische Repräsentativität muss die physische Realität widerspiegeln.
Spezifische Daten	Obligatorisch für alle Vordergrundprozesse und für Hintergrundprozesse falls anwendbar	Erste Wahl: spezifische + durchschnittliche (generische) Daten; Allerdings wird auf den CEN TR 15941 verwiesen, nach dem auch generische Daten für herstellereigenspezifische Prozesse verwendet werden können.
Generische Daten	Nur für Hintergrundprozesse. Wenn verfügbar, branchenspezifische generische Daten anstelle von generischen Multi-Sektor-Daten; die Daten sollen die PEF-Qualitätsanforderungen erfüllen; Anleitung zur Auswahl von default- und generischen Daten in Methodendokument und den jeweils spezifischen PEFCRs. Empfohlene Quellen werden benannt.	Verwendung für Prozesse, die der Hersteller nicht beeinflussen kann; Dokumentationen der technischen, geographischen und zeitbezogenen Repräsentativität müssen zur Verfügung gestellt werden.
Abschneideregeln	i.A. nicht erlaubt	1 % des erneuerbaren / nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauchs; 1 % der gesamten Masse des Einheit-Prozesses; Insgesamt vernachlässigte Stoff- und Energieströme max. 5 %
Umgang mit Datenlücken	Alle Datenlücken müssen mit Hilfe von besten verfügbaren generischen oder extrapolierten Daten geschlossen werden. Insgesamt soll dies nicht mehr als 10 % des Gesamtbetrags für die jeweilige Wirkungskategorie sein.	Bei unzureichender Daten oder Datenlücken gemäß den Abschneideregeln erlaubt
End of life (EoL) Allokation	Muss eingeschlossen werden: Bis das Produkt zur Natur als Abfall zurückgeführt wird oder in einen anderen Produkt-Lebenszyklus eintritt. Derzeit vorgeschlagener EoL-Verteilungsschlüssel (Allokation) basiert auf dem 50:50 Ansatz. Weitere Verteilungsschlüssel und kombinierte Ansätze werden derzeit getestet, bei denen Teile der Prozess-/Lieferkette einer quantitativen Analyse unterworfen sind und andere qualitative Beschreibungen der potenziellen Umwelt-Hotspots erfolgen.	Die EoL Systemgrenze ist (gleich wie beim PEF) dort, wo das Ende des Abfall-Zustands erreicht ist: Das sind EoL-Prozesse des Abfall verursachenden Prozesses, weitere für die Verarbeitung erforderlichen, um Primärmaterial oder Brennstoffeinsatz eines anderen Produkt-Systems zu ersetzen. Solche Prozesse werden außerhalb der Systemgrenze betrachtet und sind daher dem optional informativen Modul D zugeordnet.
Wirkungsabschätzung		
Anzahl der Wirkungskategorien	7	
Indikatoren (und Modelle – falls erwähnt)	Indikator	Modell / Methode
Treibhauspotenzial – Global warming potential (GWP)	kg CO ₂ -Äqv.	IPCC / CML v 4.1 2012
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht – Ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-Äqv.	CML v 4.1 2012
Ökotoxizität – Ecotoxicity for aquatic fresh water	CTUe (Comparative Toxic Unit for ecosystems)	USEtox model
Humantoxizität – Human Toxicity – cancer effects	CTUh (Comparative Toxic Unit for humans)	USEtox model
Humantoxizität – Human Toxicity – non-cancer effects		
Feinstaub – Particulate Matter/Respiratory Inorganics	kg PM 2,5-Äqv.	RiskPoll model
Ionising Radiation – human health effects	kg U 235-Äqv. (to air)	Human Health effect model
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon – Photochemical ozone formation potential (POCP)	kg NMVOC-Äqv.	LOTOS-EUROS model
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser – Acidification potential (AP)	mol H ⁺ -Äqv.	Accumulated Exceedance model
Eutrophierungspotenzial – Eutrophication – terrestrial (EP)	mol N-Äqv.	
Eutrophierungspotenzial – Eutrophication – aquatic	fresh water: kg P-Äqv. marine: kg N-Äqv.	EUTREND model
Ressourcenverbrauch – Resource Depletion – water	m ³ water use related to local scarcity of water	Swiss Ecoscarcity model
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF) – Resource Depletion – mineral, fossil	kg antimony (Sb)-Äqv.	CML2002 model
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPRE) – Resource Depletion – non-fossil	equal to fossil	equal to fossil
Landverbrauch – Land Use	kg C deficit	Soil Organic Matter (SOM) model
Normalisierung – Normalisation	Wird derzeit im Rahmen der Pilotphase evaluiert (z.B. Einfluss auf Kommunikationsmöglichkeiten und Abhängigkeit von Annahmen).	
Gewichtung – Weighting	Wird derzeit im Rahmen der Pilotphase evaluiert (z.B. Einfluss auf Kommunikationsmöglichkeiten und Abhängigkeit von Annahmen).	
Ergebnisinterpretation		
	Identifizierung von Hotspots und Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen sind Pflichtbestandteil. Ebenso verpflichtend ist die Dokumentation, inwieweit die methodischen Entscheidungen wie Systemgrenzenwahl, Datenquellen und Allokationswahl die analytischen Ergebnisse beeinflussen.	Im Allgemeinen keine Identifikation von Hotspots oder Empfehlungen erforderlich.

2.1. Ökobilanz

Neben den oben angeführten Unterschieden existieren noch weitere im Detail, wie etwa die Anzahl der zu berechnenden Module des Lebenszyklus (PEF Module A - C, EPD Module A - D), jedoch ist der Stand der Entwicklungen noch nicht abgeschlossen. So werden potenzielle Gutschriften & Lasten bei EPDs im Modul D angegeben, die Methode PEF hingegen integriert diese in das Modul A und C.

Die Methode des PEF beruht auf den Ansatz der „Circular Economy“ . Darunter versteht man, dass Stoffe in der End of Life - Phase wieder der Herstellung von neuen Produkten zugeführt werden sollen und dies möglichst auf gleicher Ebene um „Downcycling“ zu vermeiden, siehe dazu [Frischknecht2010]. Die Berechnung des Product Environmental Footprints erfolgt mit der eigens entwickelten Circular Footprint Formula (CFF) siehe dazu [Allacker2014].

Um nicht zwei unterschiedlichen Methoden für die Berechnung der Umweltauswirkungen von Bauprodukten zu entwickeln, wird derzeit an einer Harmonisierung der PEF-Methode und der EN15804-Methode gearbeitet. [Passer2015b] Die Anwendbarkeit der PEF - Methode auf Gebäude wird derzeit in einem Forschungsprojekt (PEF4buildings⁵) der Europäischen Kommission untersucht.

⁴Darstellung in Anlehnung an [Passer2015b]

⁵<http://www.energyville.be/en/project/pef4buildings-application-product-environmental-footprint-pef-method-new>
Zugriff am: 25.08.2017

2.1.1. Grundsätze der Ökobilanz

Eine Ökobilanz besteht immer aus vier Phasen, deren Zusammenhang ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Als erster Schritt werden zu erreichendes Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert. Darin wird festgelegt wofür die Ökobilanz angewendet wird, die Gründe für die Durchführung der Studie und welche Zielgruppe angesprochen werden soll. Weiters ist zu definieren, worum es sich bei dem Produkt handelt, dessen Funktionen, funktionelle Einheit und die Systemgrenze der Studie. Die Wahl des Allokationsverfahrens und der Wirkungskategorien, sowie die Anforderungen an die Daten, Annahmen und Einschränkungen sind durch den Untersuchungsrahmen festzulegen. Der zweite Schritt einer Ökobilanz ist die Erstellung der Sachbilanz (Life Cycle Inventory - LCI). *Sie umfasst Datenerhebung und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems.* [ISO14040:2006] Dabei werden Daten innerhalb der Systemgrenzen zu Energie-, Rohstoff- und Betriebsstoffinputs, sowie Produkte, Koppelprodukte, Abfälle, aber auch Emissionen in Luft, Wasser und Boden erhoben. Im dritten Schritt, der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment LCIA), wird die Bedeutung der potentiellen Umweltauswirkungen, basierend auf den Ergebnissen der Sachbilanz beurteilt. Dies erfolgt durch die Verknüpfung der Sachbilanzdaten mit den spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren.

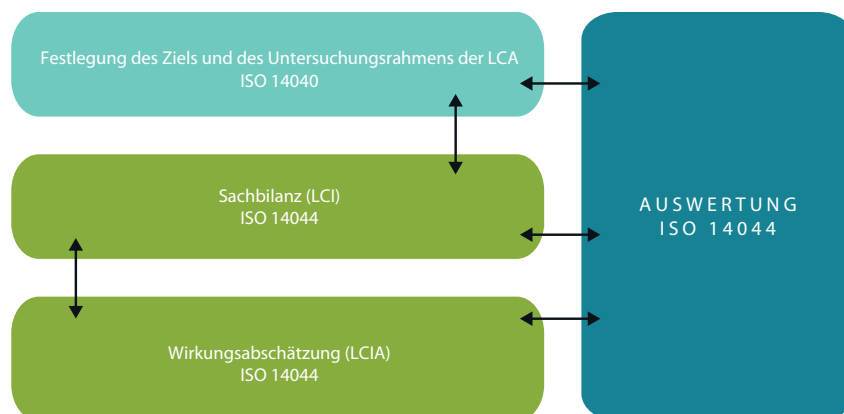


Abbildung 2.1.: Rahmen der Ökobilanz⁶

⁶Darstellung von AG NHB, TU Graz

Lebenswegbetrachtung

Die Ökobilanz betrachtet den gesamten Lebensweg eines Produktes, von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung. Durch einen systematischen Überblick und eine Vorausschau kann die Verlagerung einer möglichen Umweltbelastung zwischen den Abschnitten oder einzelnen Prozessen des Lebensweges identifiziert und möglicherweise vermieden werden. [ISO14040:2006]

Im Rahmen der Diplomarbeit für Transportbeton wurde eine Ökobilanz nur für die Herstellungsphase A1-A3 (siehe Abbildung 3.2) erstellt, eine Ausweitung der Berechnungen über den gesamten Lebensweg ist im Rahmen der EPD geplant.

Umweltbezogene Ausrichtung

Eine Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und -wirkungen eines Produktsystems. Üblicherweise liegen ökonomische und soziale Aspekte und Wirkungen außerhalb des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz. Für eine umfassendere Einschätzung können auch andere Instrumente mit der Ökobilanz kombiniert werden. [ISO14040:2006]

Relativer Ansatz und funktionelle Einheit

Die Ökobilanz ist ein relativer Ansatz, der um eine funktionelle Einheit aufgebaut ist. Diese funktionelle Einheit legt fest, was zu untersuchen ist. Sämtliche nachfolgenden Analysen sind dann auf diese funktionelle Einheit bezogen, da alle Inputs und Outputs in der Sachbilanz und demzufolge auch das Wirkungsabschätzungsprofil auf die funktionelle Einheit bezogen sind. [ISO14040:2006]

Für Beton und Betonerzeugnisse ist als funktionelle Einheit 1m^3 Frischbeton definiert (siehe Kapitel 3.1.2.2).

Iterativer Ansatz

Die Ökobilanz ist eine iterative Methode. In den einzelnen Phasen einer Ökobilanz werden die Ergebnisse der anderen Phasen verwendet. Der iterative Ansatz innerhalb der und zwischen den

Phasen trägt zur Ganzheitlichkeit und Konsistenz der Studie und der im Bericht angegebenen Ergebnisse bei. [ISO14040:2006]

Transparenz

Wegen der einer Ökobilanz eigenen Komplexität ist die Transparenz ein wichtiges Leitprinzip bei der Erstellung von Ökobilanzen, um eine angemessene Auswertung der Ergebnisse sicherzustellen. [ISO14040:2006]

Alle Grundlagen sowie Datensätze zur Modellierung der Ökobilanz sind in Anhang B transparent und nachvollziehbar dargestellt.

Ganzheitlichkeit

Eine Ökobilanz betrachtet alle Attribute und Aspekte von natürlicher Umwelt, menschlicher Gesundheit und Ressourcen. Durch die Berücksichtigung aller Attribute und Aspekte innerhalb einer Studie aus medienübergreifender Sicht können potentielle Wechselwirkungen identifiziert und abgeschätzt werden. [ISO14040:2006]

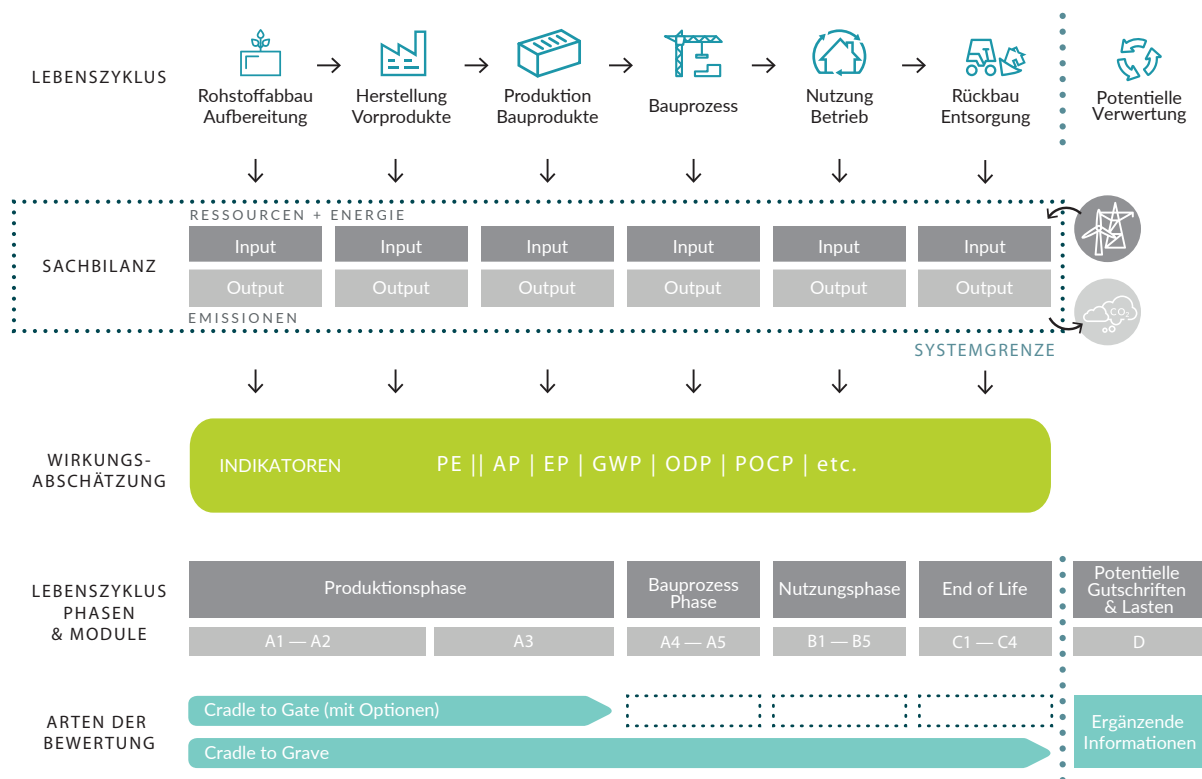
Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes

Entscheidungen innerhalb einer Ökobilanz basieren Vorzugsweise auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen. Wenn das nicht möglich ist, dürfen andere wissenschaftliche Ansätze (z. B. aus Sozial- und Wirtschaftswissenschaften) angewendet oder darf Bezug auf internationale Übereinkommen genommen werden. Wenn weder eine wissenschaftliche Grundlage vorhanden ist, noch eine Begründung auf der Grundlage anderer wissenschaftlicher Ansätze oder internationaler Übereinkommen möglich ist, dann dürfen Entscheidungen gegebenenfalls auf Werthaltungen basieren. [ISO14040:2006]

2.1. Ökobilanz

2.1.2. Prozess LCA

In der Abbildung 2.2 ist der modulare Aufbau einer LCA und der Prozess vereinfacht dargestellt. Als ersten Arbeitsschritt bei der Ökobilanzierung gilt es das Ziel und den Untersuchungsrahmen festzulegen. Bei der Erhebung der Sachbilanzdaten (LCI) werden die aus dem Lebenszyklus des Gebäudes bzw. Produkts entstehenden Emissionen, Ressourcenverbräuche und Energieaufwände erfasst. Anhand der Sachbilanzdaten können potentielle Umweltauswirkungen, durch Verknüpfung mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren, in der Wirkungsabschätzung beurteilt werden. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung können für unterschiedliche Lebenszyklusphase und Module angegeben werden. Bei Umweltproduktdeklarationen sind Bewertungen von Cradle to Gate A1-A3 (Wiege bis Werkstor) und Cradle to Grave A-C (Wiege bis Bahre) üblich. In der vorliegenden Arbeit wird eine Cradle to Gate Bilanzierung durchgeführt. (siehe Kapitel 3.1.2.3)

Abbildung 2.2.: Modularer Aufbau und Bestandteile einer LCA ⁷⁷Darstellung von AG NHB, TU Graz

2.1.3. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Die „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“ ist die Komponente, die in keiner Studie fehlen darf, die den Anspruch erhebt, eine normgerechte Ökobilanz zu sein....Ziel und Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz müssen eindeutig festgelegt und auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt sein. Aufgrund der iterativen Eigenschaft der Ökobilanz ist der Untersuchungsrahmen während der Studie möglicherweise zu konkretisieren. [ISO14040:2006]

Das Ziel und der Untersuchungsrahmen müssen bei Ökobilanzstudien eindeutig festgelegt werden. Bei der Festlegung des Ziels einer Ökobilanz geht es insbesondere um folgende Punkte: [ISO14044:2006]

- beabsichtigte Anwendung
- Gründe für die Durchführung der Studie
- die angesprochene Zielgruppe
- Veröffentlichung der Ergebnisse

Aufgrund der Datenintensivität der LCA - Methode [Steubing2016], sind die Ergebnisse stark von der Qualität der verwendeten Daten, sowie methodischen Annahmen die vom Bilanzierer getroffen werden, abhängig. Daher ist eine transparente und nachvollziehbare Formulierung des Untersuchungsrahmens und der Ziele von besonderer Wichtigkeit. Die internationale Norm ISO14044 [ISO14044:2006] schlägt vor folgende Punkte zu berücksichtigen und eindeutig zu beschreiben.

- das zu untersuchende Produktsystem
- die Funktion des Produktsystems
- die funktionelle Einheit
- die Systemgrenze
- die Allokationsverfahren
- die Methode für die Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien
- die Methoden zur Auswertung
- die Anforderungen an die Daten
- die Annahmen
- etc.

2.1.4. Repräsentativität der Ökobilanz

Um die Repräsentativität der Ökobilanz und damit der EPD für das Produkt zu gewährleisten ist es, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, erforderlich eine umfassende Datenerhebung mit hoher Datenqualität durchzuführen. Üblicherweise wird nur der Herstellungsprozess A3 konkret vom Bilanzierer abgefragt, es müssen für eine vollständige Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus aber alle vorgeschalteten Prozesse (Rohstoffe, Hilfsstoffe, Energie, etc.) und nachgelagerten Prozesse (Emissionen, Produkte, etc.) vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden.

Um konkret abzugrenzen in welchem Rahmen die EPD gültig ist, sind folgenden Punkte zu beachten:

- Geographische Repräsentativität
 - Handelt es sich bei dem bilanzierten Produkt um ein spezielles in einer bestimmten Fabrik hergestelltes Erzeugnis oder um eine Gruppe sehr ähnlicher (gleichartiger) Produkte, die in unterschiedlichen Werken erzeugt werden. [Kloepffer2007] Ist die EPD für das gesamte Bundesgebiet gültig, ist darzustellen, dass die erfassten Werke gleichmäßig innerhalb geographischen Systemgrenze verteilt sind.
- Technische Repräsentativität
 - Die technische Repräsentativität beurteilt die Fabriken und Werke in denen das Produkt erzeugt wird. Es gilt dabei zu bewerten ob der Herstellungsprozess dem „state of the art“ entspricht, das Inventar und die Fertigungsgeräte allgemein marktüblich sind und die Energieverbräuche und Energiequellen mit jenen der durchschnittlichen Hersteller des selben Produkts übereinstimmen.
- Zeitliche Repräsentativität
 - Bei der Erstellung einer EPD ist es erforderlich anzugeben für welches Bezugsjahr die erhobenen Daten und die damit berechneten Ergebnisse repräsentativ sind und für welchen Zeitraum dies gültig sind. Durch die Weiterentwicklung von Herstellungsprozessen, der Zusammensetzung des Strommixes und weiteren künftigen Veränderungen sind die LCA - Ergebnisse nur für eine begrenzte Zeitdauer repräsentativ.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse zusätzlich über die Produkteigenschaften gegliedert um eine konkretere Aussage für unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten zu treffen und eine besser Anwendbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Die Gliederung für die Ergebnisse in der EPD erfolgt über die Expositionsklasse und Betonsortenkurzbezeichnungen und sind wie folgt eingeteilt:

- Betone für untergeordnete Bauwerke
 - X0
- Betone vorwiegend für den Hochbau
 - XC1, XC2, B1, B2
- Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau
 - B3, B4, B5, B6, B7

Eine weitere Möglichkeit zur Gliederung der Betone, ist die Einteilung nach der Druckfestigkeitsklasse. Zur Einordnung der Ergebnisse in die Literatur, siehe Kapitel 4.8, sind die LCA - Ergebnisse den vom Hersteller angegebenen Druckfestigkeiten zugeordnet. Diese vom Werk angegebene Festigkeit beschreibt die Mindestdruckfestigkeit des spezifischen Rezepts, in vielen Fällen ist aufgrund von einkalkulierten Sicherheitszuschlägen eine höhere Festigkeit zu erwarten [ONB4710-1:2015]. Dieser Sicherheitszuschlag hat maßgebliche Auswirkungen auf die Ökobilanzergebnisse. In Kapitel 4.4 sind die vom Hersteller angegebenen Druckfestigkeiten mit den zu erwartenden und den in der ÖNorm B4710 - 1 [ONB4710-1:2015] angegebenen indikativen Festigkeiten verglichen und abgebildet. Eine genau Beschreibung dieser Festigkeiten findet sich in Kapitel 4.4.

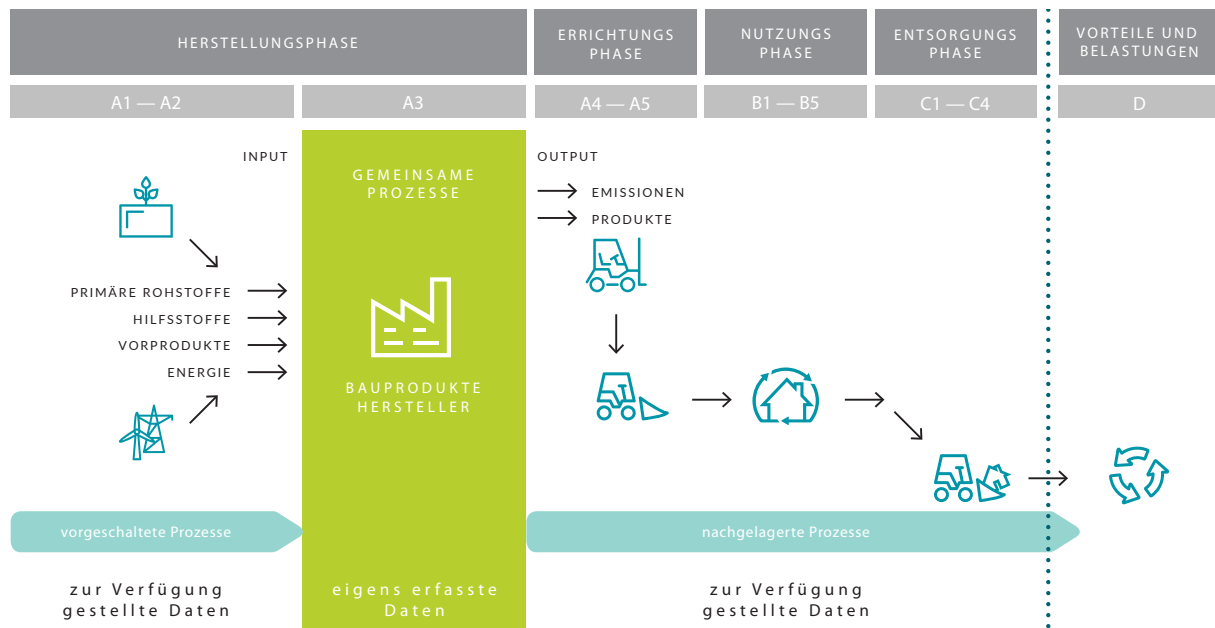
Ziel ist es in Zukunft den Beton nicht nach seiner Druckfestigkeitsklasse (mind. Bindemittelgehalt) zu klassifizieren, sondern ihn individuell anhand der funktionalen und technischen Anforderungen zu definieren, dem sogenannten „performance based design“ Beton.

2.1.5. Modellierung

Die Verknüpfung der erhobenen, spezifischen Vordergrunddaten mit den Hintergrunddaten aus einer Datenbank wird mittels dem Werkzeug der Ökobilanzierungssoftware durchgeführt und als Modellierung bezeichnet. Dabei werden die vom Hersteller erhobenen Produktdaten im Rahmen der Sachbilanz ausgewertet (auch als Vordergrunddaten bezeichnet) und mit Energie- und Stoffdatensätzen (auch als Hintergrunddaten bezeichnet) in einer Software verknüpft.

⁸Darstellung von AG NHB, TU Graz

2.1. Ökobilanz

Abbildung 2.3.: Datenerhebung und Datenqualität⁸

Wie in Abbildung 2.4 erkennbar ist, werden die benötigten Umweltinformationen zur Modellierung der Herstellungsphase (A1- A3) von unterschiedlichen Quellen abgefragt. Die Informationen kommen aus Datenbanken, von Energielieferanten und Herstellern von Vorprodukten und werden dem Bilanzierer übermittelt. Dabei ist es wichtig eine klare Abgrenzung zu treffen bis zu welchem Anteil Stoffe berücksichtigt werden. Üblicherweise werden alle Daten die einen Anteil größer einem Prozent des gesamten Stoff- und Energiestroms darstellen in der Sachbilanz und der Modellierung berücksichtigt, sodass die Summe der vernachlässigten Prozesse den Betrag von fünf Prozent der Charakterisierungsergebnisse nicht übersteigt. Sind für gewisse Stoff- und Energieströme keine spezifischen Daten vorhanden, ist es zulässig, repräsentative Daten aus der Literatur oder von gleichwertigen Werken zu übernehmen, dies muss jedoch dezidiert angeführt werden.

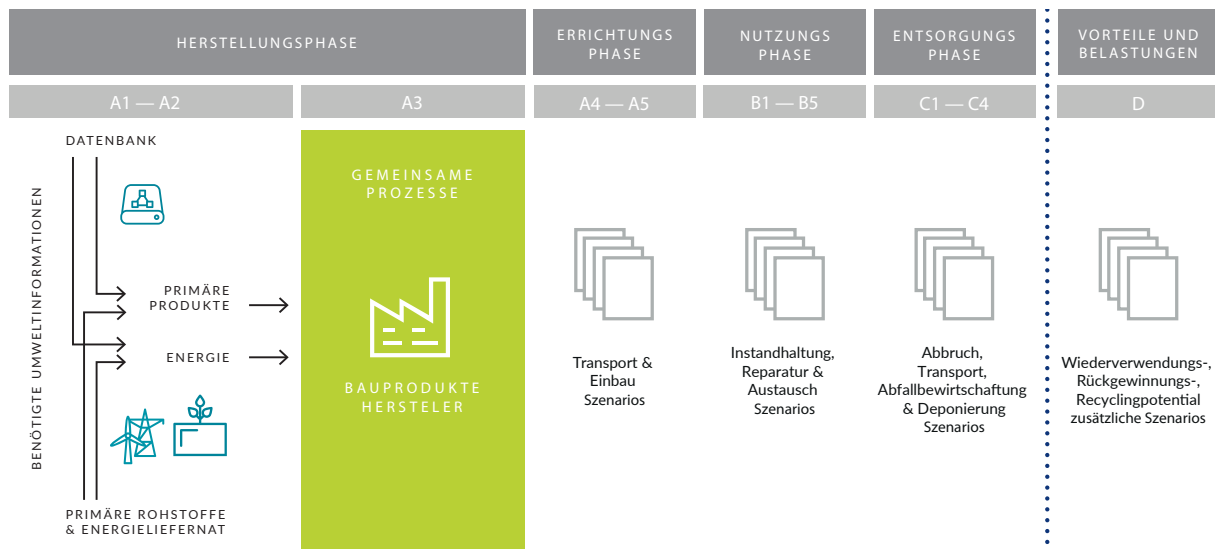
Für die Modellierung der Errichtungsphase (A4 - A5), Nutzungsphase (B1 - B5), Entsorgungsphase (C1 - C4) und der potenziellen Guteschriften & Lasten (D) müssen konkrete Szenarien angenommen oder reale Szenarien abgebildet und modelliert werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien wurde mittels einer Sensitivitätsanalyse abgebildet, siehe Kapitel 4.2.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die umfassende Datenerhebung mittels Fragebogen, siehe Anhang A und die Verknüpfung mit den Hintergrunddaten der Datenbank ecoinvent v.2.2 & ecoinvent v.3.3, siehe Anhang B, in der Ökobilanzierungssoftware SimaPro 8¹⁰.

Als Hintergrunddaten stehen Datenbanken von unterschiedlichen internationalen Anbietern zur

⁹Darstellung von AG NHB, TU Graz

¹⁰<https://network.simapro.com/esuservices/>; Zugriff am: 24.08.2017

Abbildung 2.4.: Repräsentativität der Daten ⁹

Verfügung. Dabei zählen ecoinvent, ProBas (Prozessorientierte Basisdaten), ELCD (European Reference Life Cycle Database) GaBi databases und U.S. LCI zu den renommiertesten Anbietern. Für die Erstellung der EPD für Transportbeton wurde die Datenbank des gleichnamigen schweizer Unternehmens ecoinvent¹¹ verwendet.

Durch die Weiterentwicklung von Materialien, energieeffizienteren Prozessen, der Änderung des Strom-Mixes (z.B. Steigerung des Anteils von erneuerbaren Energien) und der Aktualisierung der Charakterisierungsfaktoren ändern sich damit auch die Stoff- und Energieströme der Hintergrunddaten. Die Anbieter reagieren darauf mit kontinuierlichen Updates und Anpassungen ihrer Datenbanken. Der Datensatz ecoinvent v.2.2 beruht auf Berechnungen aus dem Jahr 2010, ecoinvent v.3.3, aus 2017, ist die im Moment aktuellste Version.

Eine weitere Entwicklung der Datenbank sind die seit der ecoinvent v.3.0 eingeführten unterschiedlichen Systemmodelle. Diese behandeln das Thema der Allokation und wie etwa Koppelprodukte¹² beurteilt werden.¹³

Die Ergebnisse der Berechnungen mit den unterschiedlichen Hintergrunddaten werden im Kapitel 4.5 mittels einer Korrelationsanalyse verglichen.

Nachfolgend werden die drei Systemmodelle kurz beschrieben, eine tiefergehende Betrachtung der Systemmodelle ist aufgrund ihrer Komplexität nicht Gegenstand dieser Arbeit und kann im eigens dafür publizierten Handbuch des Datenbankbetreibers ecoinvent [ecoinvent2010] nachgelesen werden.

¹¹<http://www.ecoinvent.org/home.html>; Zugriff am: 24.08.2017

¹²Unter Koppelproduktion versteht man die Bildung von mindestens zwei Produkten in einem Prozess. [Kloepffer2007]

¹³<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/system-models-in-ecoinvent-3.html>; Zugriff am: 08.08.2017

2.1. Ökobilanz

- Cut-Off Model
 - Der Hersteller / Erzeuger des Produkts ist voll für die anfallenden Abfälle verantwortlich. Für den Fall, dass die Abfälle rezyklierbar, also wiederverwendbar sind, werden dem Hersteller keine Gutschriften in Rechnung gestellt. ¹⁴
- APOS Model
 - APOS (Allocation at the point of substitution) ist ein Allokationsansatz, der die Erweiterung von Produktsystemen zur Vermeidung von Zuweisungen in Behandlungssystemen nutzt. Es wurde entwickelt, um Zuweisungen im Allgemeinen zu vermeiden, um stattdessen die wertvollen Nebenprodukte von Behandlungssystemen zusammen mit der Aktivität, die das Material für die Behandlung produziert, zuzuordnen. ¹⁵
- Consequential Model
 - Das konsequente Systemmodell verwendet unterschiedliche Grundannahmen, um die Konsequenzen einer Veränderung eines bestehenden Systems zu beurteilen. Es kann für perspektivische Studien und Vorhersage zukünftiger Veränderungen verwendet werden. Die Modellierungsannahmen unterscheiden sich in mehreren Schlüsselaspekten vom attributionalen Ansatz des Cut-off-Modells. ¹⁶

Für die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Ökobilanz wurde sowohl für die Daten aus ecoinvent v.2.2 und v.3.3 das konservative Cut-Off Systemmodell angewendet.

Zur Berechnung der Wirkungsabschätzung (LCIA) werden die Hintergrunddaten mit Charakterisierungsfaktoren aus LCIA - Methoden verknüpft. Ein Überblick über die unterschiedlichen LCIA - Methoden ist in Tabelle 2.3 dargestellt. Die LCA - Ergebnisse für die vorliegende Arbeit wurden mit den aktuellsten LCIA - Methoden berechnet, die eine Kombination der aktuellsten Methoden darstellt, siehe Spalte EPD2017. Für die Erstellung einer gültigen EPD ist die Verwendung der LCIA - Methode, laut der für die EPD gültigen PKR - Teil A und PKR - Teil B, verpflichtend. In Österreich verweist die PKR für EPDs dabei auf die EN 15804 [EN15804:2014]. Die Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Methoden wird in Kapitel 4.6 ausführlicher behandelt.

¹⁴<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>; Zugriff am: 08.08.2017

¹⁵<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/apos-system-model/allocation-at-the-point-of-substitution.html>; Zugriff am: 08.08.2017

¹⁶<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/consequential-system-model/substitution-consequential-long-term.html>; Zugriff am: 08.08.2017

Tabelle 2.3.: Vergleich der Charakterisierungsmethoden

Wirkungskategorie	Kürzel	Einheit	CML	EPD2013	EN15804:2012+A1:2013	ILCD	CED v.1.09	EPD2017
Abiotic depletion	ADPE	kg Sb eq	CML v4.2	CML v4.1	CMLv4.1			CML v4.2
Abiotic depletion (fossil fuels)	ADPF	MJ	CML v4.2	CML v4.1	CMLv4.1			CML v4.2
Global warming (GWP100a)	GWP	kg CO ₂ eq	IPCC2013	IPCC2013	IPCC2007	IPCC2007		IPCC2013
Ozone layer depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	CML v4.2	CML v4.1	CMLv4.1	WMO 1999		CML v4.2
Human toxicity		kg 1,4-DB eq	CML v4.2					CML v4.2
Fresh water aquatic ecotox.		kg 1,4-DB eq	CML v4.2					CML v4.2
Marine aquatic ecotoxicity		kg 1,4-DB eq	CML v4.2					CML v4.2
Terrestrial ecotoxicity		kg 1,4-DB eq	CML v4.2					CML v4.2
Photochemical oxidation	POCP	kg C ₂ H ₄ eq	CML v4.2	CML v4.1	CMLv4.1			CML v4.2
Acidification	AP	kg SO ₂ eq	CML v4.2	CML v4.1	CMLv4.1			CML v4.2
Eutrophication	EP	kg PO ₄ --- eq	CML v4.2	CML v4.1	CMLv4.1			CML v4.2
Primary energy non-renewable, excl. raw mat.	PENRE	MJ eq					Frischknecht et al. 2007	ecoinvent2000
Primary energy non-renewable, raw mat.	PENRM	MJ eq						
Primary energy renewable, excl. raw mat.	PERE	MJ eq					Frischknecht et al. 2007	ecoinvent2000
Primary energy renewable, raw mat.	PERM	MJ eq						
Use of net fresh water	FW	m ³						Pfister et al. 2009
Hazardous waste disposed	HWD	kg						Pfister et al. 2009
Non hazardous waste disposed	NHWD	kg						Pfister et al. 2009
Radioactive waste disposed	RWD	kg						Pfister et al. 2009
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh					Rosenbaum et al. 2008		
Human toxicity, cancer effects	CTUh					Rosenbaum et al. 2008		
Particulate matter		kg PM _{2.5} eq				Rabl und Spadaro 2004		
Ionizing radiation HH		kBq U235 eq				Frischknecht et al. 2000		
Ionizing radiation E (interim)	CTUe							
Photochemical ozone formation		kg NMVOC eq				Van Zelm et al. 2008		
Acidification		molc H ⁺ eq				Seppälä et al. 2008		
Terrestrial eutrophication		molc N eq				Struijs et al. 2009		
Freshwater eutrophication		kg P eq				Rosenbau et al. 2008		
Marine eutrophication		kg N eq						
Freshwater ecotoxicity	CTUe					Milá i Canals et al.2007		
Land use		kg C deficit				Frischknecht et al. 2008		
Water resource depletion		m ³ water eq				Guineé et al. 2002		
Mineral, fossil & ren resource depletion		kg Sb eq						

2.1.6. Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Ökobilanz werden in der vorliegenden Arbeit grafisch als Boxplot dargestellt.

Der Boxplot ist ein Diagramm, das zur grafischen Darstellung der Verteilung eines mindestens ordinalskalierten Merkmals verwendet wird. [Mosler2006] Er ist über verschiedene Kennwerte definiert.

Spannweite: Wertebereich des Datensatzes

Interquartilabstand (IQR): Ist der Wertebereich in dem sich 50% des Datensatzes befinden.

Oberer Ausreißer: Werte die größer als das obere Quartil + 1,5 x IQR sind

Oberes Quartil: 25% der Datenwerte sind größer oder gleich diesem Wert

Median: 50% der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Wert

Mittelwert: Das arithmetische Mittel aller Datenwerte

Unteres Quartil: 25% der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Wert

Unterer Ausreißer: Werte die kleiner als das untere Quartil - 1,5 x IQR sind

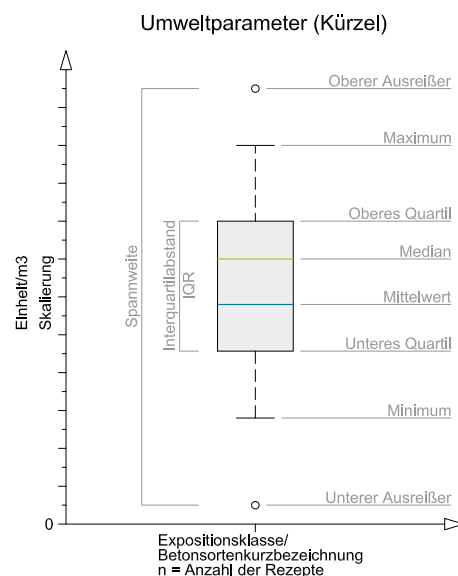


Abbildung 2.5.: Erklärung des Boxplots

2.2. Dominanzanalyse

Die Beitragsanalyse dient ganz allgemein zur Ermittlung der quantitativen Beiträge einzelner Elemente zu einem Gesamtergebnis. [Kloepffer2007] Die Dominanzanalyse kann als spezielle Art der Beitragsanalyse angesehen werden, indem sie, wie der Name sagt, die dominanten (beherrschenden) Beiträge zum Ergebnis ermittelt und damit für die Identifizierung der signifikanten Parameter geeignet ist. [Heijungs2001]

Zur Erstellung der Dominanzanalyse sind die berechnete Ergebnisse nach ihrer Herkunft aufgeschlüsselt. Alle Beiträge mit einem Anteil größer-gleich 1% sind dabei in einem Säulendiagramm abgebildet. Die Auswertung erfolgt für alle Wirkungskategorien. Anhand der Darstellung sind die dominanten Ressourcen und Prozesse auf die Ergebnisse leicht zu erkennen.

Mit den Erkenntnissen der Dominanzanalyse können wichtige Fragen geklärt werden, z.B. wo Optimierungen des Produktsystems am effektivsten durchgeführt werden können. Diese Fragestellungen sind besonders für nicht-vergleichende Ökobilanzen von Bedeutung, da meiste eine Optimierung das primäre Ziel ist. [Heijungs2001]

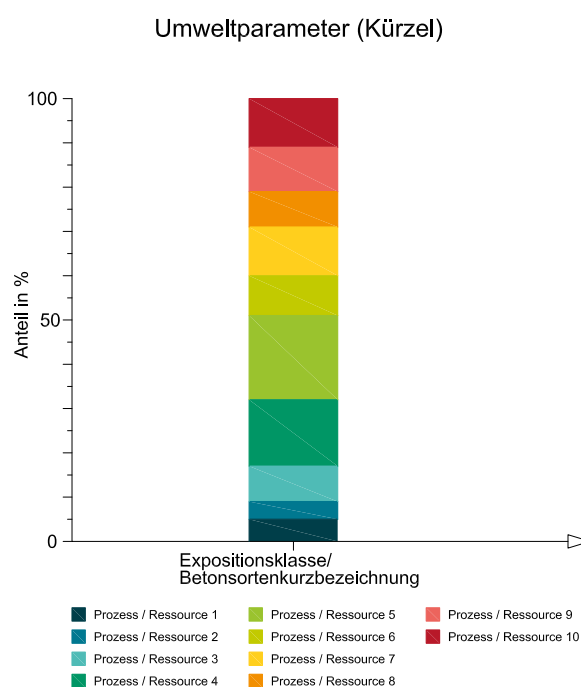


Abbildung 2.6.: Erklärung der Dominanzanalyse

2.3. Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist eine der am häufigsten angewandten quantitativen Methoden zur Beurteilung und ist nach ISO 14044 zwingend vorgeschrieben. Ziel der Sensitivitätsprüfung ist die Einschätzung der Unsicherheiten von Ergebnissen in der Ökobilanz, die sich aufgrund der Datenqualität, der Abschneidekriterien, der Wahl des Allokationsverfahrens oder der Auswahl der Wirkungskategorien ergeben können. Zur Erstellung werden einzelne Prozesse, welche die Repräsentativität der Ökobilanz betreffen, im Produktsystem ausgetauscht und die Ergebnisse mit jenen der ursprünglichen verglichen. So können auf anschauliche Art und Weise die Einflüsse des geänderten Prozesses oder der geänderten Ressource auf die Endergebnisse festgestellt werden. [Kloepffer2007]

2.4. Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse ist ein statisches Verfahren zur Ermittlung der Stärke des statistischen Zusammenhangs zwischen zwei oder mehreren Variablen. [Burkschat2012]

In der vorliegenden Arbeit wurde diese statistische Methode angewendet, um die Ergebnisse der Datenbanken ecoinvent v.2.2 und ecoinvent v3.3 zu vergleichen, siehe Kapitel 4.5. Ebenso ist der Unterschied zwischen Median, Mittelwert und allen berechneten Werten zu sehen. Liegt der Punkt (x-Wert ist Ergebnis von v.3.3 und y-Wert ist Ergebnis von v.2.2) im linken oberen Bereich ist das Ergebnis mit den Hintergrunddaten aus der Datenbank ecoinvent v.2.2 größer als jenes mit den Hintergrunddaten aus ecoinvent v.3.3. Liegt der Punkt im rechten unteren Bereich kann eine gegengleiche Aussage getroffen werden. Je näher sich die Werte (Punkte) an der Diagonale befinden, desto geringer sind die Unterschiede in den Ergebnissen aus den beiden Datensätzen.

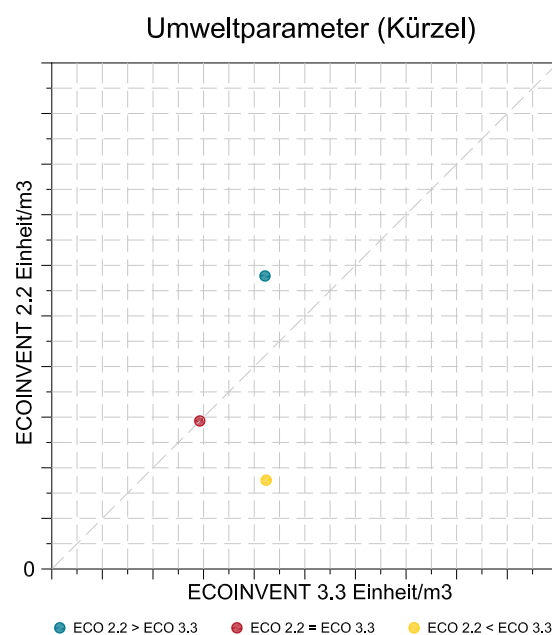


Abbildung 2.7.: Erklärung der Korrelationsanalyse

2.5. Monte-Carlo-Analyse

Eine Monte Carlo Simulation ist ein stochastisches Verfahren um Parameterunsicherheit der LCA [Huijbregts1998] aufzuzeigen. Die Simulation nutzt die Verteilung aller Parameter, um die Werte zu variieren, dadurch kommt es bei jedem Berechnungsdurchlauf zu unterschiedlichen Ergebnissen. Durch die hohe Anzahl an Wiederholungen zeigt die Monte Carlo Simulation (MCS) die Verteilung der Ergebnisse des untersuchten Produktsystems.

Die Verteilung der Parameter in SimaPro wird auf Basis von Pedigree-Matrizen berechnet. Die Pedigree-Matrix wurde 1996 von Weidema / Wesnaes eingeführt [Weidema1996]. Die Matrix ist ein Vektor, der aus fünf Zahlen besteht, wobei jeder von eins bis fünf reicht. Die fünf Werte stellen die Unsicherheit des Parameters in Bezug auf Datensicherheit, Vollständigkeit, zeitlicher, geographischer und technologischer Repräsentativität dar.

In SimaPro wird jeder Input und Output des Einheitsprozesses (unit process) mit einer Pedigree-Matrix bewertet, dabei wurde für alle in der Datenbank ecoinvent enthalten Einheitsprozesse bereits eine Bewertung durchgeführt. Die MCS für die vorliegenden Arbeit wird mit der Ökobilanzierungssoftware SimaPro durchgeführt, die Parameter werden auf der Grundlage der Pedigree-Matrizen variiert. Für die Berechnung der Unsicherheiten werden 10.000 Iterationen durchgeführt, diese Anzahl wird auch in anderen LCA-Studien verwendet, siehe dazu [Pang2015], [Blengini2010]. Auch Ciroth et al., die sich mit den Unsicherheiten in LCAs befassen, empfehlen die Verwendung von 10.000 Iterationsschritten für MCS [Ciroth2004].

Das Ergebnis der MCS wird als Balkendiagramm dargestellt. Die Balkenhöhe repräsentiert dabei den Mittelwert der Ergebnisse, die Fühler geben die prozentuelle Standardabweichung an und die Punkte stellen die 2,5% bzw. 97,5% Fraktile dar.

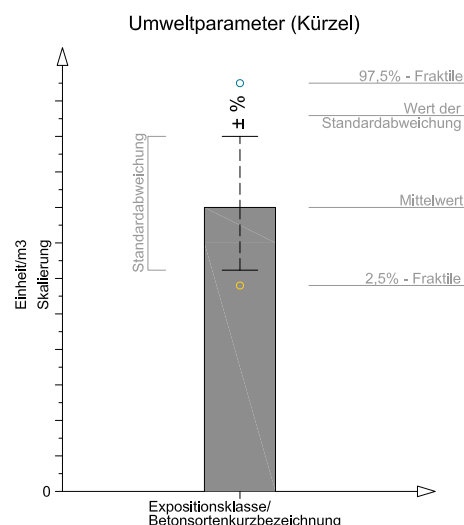


Abbildung 2.8.: Erklärung der Monte Carlo Simulation

2.6. Systematische Literaturrecherche

Zur Verifizierung der berechneten Ergebnisse wird ein Art der systematischen Literaturrecherche angewendet.

Die Systematische Literaturrecherche (SLR) ist ein auf dem Gebiet der medizinischen Wissenschaft entwickeltes Verfahren [Higgins2008], um einen Überblick über die relevante veröffentlichte Literatur für eine spezifische Forschungsfrage zu erhalten.

Spezifische Aspekte und identifizierte Forschungslücken dienen als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen. Zu Beginn der SLR gilt es, die Forschungsfrage zu formulieren. Basierend auf dieser werden Schlüsselwörter definiert (die in einem Iterationsprozess verfeinert werden können) mit denen man beginnt relevante Datenbanken zu durchsuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei auf den beiden Homepages zur Veröffentlichung von wissenschaftlichen Arbeiten (ScienceDirect und Springer) nach Publikationen, die sich mit der Modellierung, den Methoden und den Unsicherheiten der LCA beschäftigen, sowie nach wissenschaftlichen Arbeiten mit Umweltwirkungen von Beton und im speziellen Transportbeton gesucht.

Zudem gilt es auf internationalen Plattformen für die Verbreitung von EPDs, Umweltproduktdeklarationen für Transportbeton zu finden. Auch die beiden Baustoffdatenbanken (Ökobaudat und baubook) veröffentlichen Ökobilanzergebnisse für Betone, diese werden ebenso für den Vergleich herangezogen, wie die LCA - Ergebnisse des Seibersdorf Reports.

Die in den wissenschaftlichen Publikationen, EPDs und Datenbanken veröffentlichten LCA - Ergebnisse für Beton und Transportbeton sind in Kapitel 4.8 in einem Diagramm dargestellt. Die Werte sind als Punkte, je nach Druckfestigkeitsklasse abgebildet. Dadurch wird ein Vergleich mit den Ergebnissen, der im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten EPD für Transportbeton, ermöglicht.

3. Anwendung der Ökobilanz für Transportbeton

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt die Anwendung der Methode der Ökobilanz (siehe Kapitel 2.1) für Transportbeton. Es geht dabei um die Festlegung des Ziel und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanzdaten (LCI) und die Wirkungsabschätzung (LCIA).

3.1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Gemäß dem Kapitel 2.1.3 folgt die Festlegung des Ziels der Ökobilanz und des Untersuchungsrahmens.

3.1.1. Ziel der Ökobilanz

Die vorliegende Ökobilanz dient als Grundlage für die kritische Analyse der LCA - Ergebnisse. Sie wurde nach den Regeln der Bau EPD GmbH (PKR Teil A & B) [BauEPD2017a] [BauEPD2017b] und damit auch in Übereinstimmung mit der ÖN EN 15804:2012+A1:2013 erstellt. Die LCA - Ergebnisse wurden von einem unabhängigen Dritten vorab geprüft und sind in weiterer Folge zur Veröffentlichung in einer EPD zur „business-to-business“ Kommunikation vorgesehen.

3.1.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

Im Zuge der Festlegung des Untersuchungsrahmens gilt es das untersuchte Produktsystem, die funktionale / deklarierte Einheit, die Systemgrenzen, den Produktionsablauf und die Datenqualität

zu beurteilen und definieren.

3.1.2.1. Untersuchtes Produktsystem

Die im Rahmen der Diplomarbeit erstellte EPD bezieht sich auf den durchschnittlichen Frischbeton, der zur Herstellung von Betonerzeugnissen (in all ihren Variationen) in Österreich angewandt wird.

Die zur Produktion von Betonelementen notwendigen Schalelemente und der im Bauteil enthaltene Bewehrungsstahl wird nicht berücksichtigt, da sich die LCA rein auf den Werkstoff Beton bezieht. Ebenso wird der Transport vom Mischwerk zur Baustelle nicht deklariert, da es sich um eine „cradle-to-gate“ LCA handelt. Der durchschnittliche Frischbeton für Betonerzeugnisse in Österreich setzt sich aus unterschiedlichen Zementen, siehe Tabelle 3.2, (die Zementart ist abhängig von der jeweiligen Anwendung), einer Gesteinskörnung (die Kornverteilung variiert aufgrund der verschiedenen Anwendungen), Anmachwasser und unterschiedlichen Zusatzstoffen (z.B. Gesteinsmehl, AHWZ) und Zusatzmittel (Luftporenbildner, Fließmittel, etc.), welche die Eigenschaften des Betons für die geplante Anwendung des Betons optimieren sollen, zusammen. Die stoffliche Zusammensetzung der untersuchten Rezepte variiert aufgrund der unterschiedlichen Rezepturen stark, siehe Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1.: Stoffliche Zusammensetzung des untersuchten Produktsystems

Stoffliche Zusammensetzung		
Bindemittel / Zement	3,7% - 18,6%	88,00 - 429,00 kg/m ³
Zusatzstoffe	0,0% - 5,5%	0,00 - 130,00 kg/m ³
Zusatzmittel	0,0% - 0,2%	0,00 - 5,45 kg/m ³
Gesteinskörnungen	60,1% - 86,5%	1428,00 - 2057,00 kg/m ³
Anmachwasser	6,1% - 8,0%	145,00 - 190,00 kg/m ³

Die im Beton eingesetzte Zementart hängt von den geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften ab. Die Anteile der in den analysierten Werken eingesetzten Zementarten sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2.: Zementsorten

Summe Zement					
100%					
CEM I	CEM II				CEM III
9,65%	84,71%				CEM III A
	CEM II A			CEM II B	5,64%
	83,77%			0,94%	
	CEM II A-M	CEM II A-L	CEM II A-S	CEM II B-S	
	23,39%	30,65%	29,73%	0,94%	

3.1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Die Kornverteilung der eingesetzten Gesteinskörnung variiert aufgrund der verschiedenen Betonsorten. Bei der Kornform handelt es sich um Runkorn, Kantkorn, Recyclingkorn oder einer Mischung daraus.

Die Zusatzstoffe und Zusatzmittel variieren wie bei den Zementen aufgrund der geforderten Eigenschaften des Betons. Die in den analysierten Werken eingesetzten Zusatzstoffe und Zusatzmittel sind:

- Zusatzstoffe
 - Typ I - Gesteinsmehl
 - Typ II - AHWZ (Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe)
- Zusatzmittel
 - Luftporenbildner
 - Fließmittel
 - Betonverflüssiger

Grundsätzlich lässt sich Beton nach den Eigenschaften des Frischbetons und des Festbetons sowie der geplanten Einbauumgebung unterscheiden und in Klassen einteilen.

Die in Österreich relevanten Klassen für Frischbeton werden nach den Eigenschaften der Konsistenz, des Größtkorns, der Betonart, der Blutneigung, der Wärmeentwicklung, der Verarbeitungszeit, der Anfangserhärtung, der Festigkeitsentwicklung und dem Schwinden eingeteilt. Jeder dieser Klassen lässt sich durch die Art des Bindemittels, der Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln und der Änderung der Gesteinskörnung beeinflussen und individuell auf den geplanten Einsatzbereich anpassen.

Die Klassen für die Eigenschaften des Festbetons werden bestimmt durch die Druckfestigkeit, die Rohdichte, der Abreißfestigkeit, dem Feuerwiderstand, der Undurchlässigkeit und Beständigkeit und der Trinkwassertauglichkeit. Die Festbetoneigenschaften können wie die Frischbetoneigenschaften durch Veränderung der Rezeptur beeinflusst werden. Zur Erreichung der geforderten Eigenschaften, ist eine entsprechende Nachbehandlung (Beheizen, Kühlen, Schutz vor Austrocknung) bei besonderen Witterungsverhältnissen unerlässlich.

Die Einteilung des Betons, bezogen auf seine Umgebungsbedingungen erfolgt mit den sogenannten Expositionsklassen, diese beschreiben die Einwirkungen auf den Beton aus der Umgebung. Die relevanten Expositionsklassen sind X0 (kein Korrosions- und Angriffsrisiko), XC1 - XC4 (Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung), XW1 - XW2 (Wasserundurchlässigkeit bei drückendem Wasser), XD1 - XD3 (Bewehrungskorrosion durch Chloride), XF1 - XF4 (Frostangriff mit oder ohne Taumittel), XA1- XA3 (Chemischer Angriff) und XM1 - XM3 (Verschleißbeanspruchung). Für häufig benötigte Anforderungen sind in der ÖNorm B 4710 -1

[ONB4710-1:2015] „empfohlene Betonsorten“ festgelegt und mit Kurzbezeichnungen B1 - B12 versehen worden. Sie sind über einen max. Wasser- / Bindemittelwert, einen Mindestluftgehalt sowie Anforderungen an die Gesteinskörnung und das Bindemittel definiert. Die sieben Betonsortenkurzbezeichnungen B1 - B7 decken die üblichen Umweltbelastungen, eine Kombination aus mehreren Expositionsklassen, ab. Aufgrund dieser Betonzusammensetzung wird eine gewisse Druckfestigkeitsklasse mit Sicherheit erreicht, die sogenannte indikative Festigkeit. Betone mit der Betonsortenkurzbezeichnungen B8 - B12 sind für den Einsatz bei Tiefengründungen.

Zur zusammenfassenden Darstellung der LCA - Ergebnisse werden Expositionsklassen und Betonsortenkurzbezeichnungen, aufgrund ihres vorwiegenden Einsatzbereichs, zusammengefasst. In Österreich werden Betone für folgende Einsatzbereiche unterschieden, ihnen sind zuvor erläuterten Kurzbezeichnungen zugeordnet:

Tabelle 3.3.: *Gliederung der Einsatzbereiche*

Einsatzbereiche	Expositionsklassen / Betonsortenkurzbezeichnungen
Betone für untergeordnete Bauteile	X0
Betone vorwiegend für den Hochbau	XC1, XC2, B1, B2
Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau	B3, B4, B5, B6, B7

In der Fachliteratur sowie den internationalen EPDs zu Transportbeton erfolgt meist eine Einteilung des Betons anhand dessen Druckfestigkeitsklasse. Im Rahmen dieser Arbeit werden die LCA - Ergebnisse sowohl für die Expositionsklassen X0, XC1, XC2 und die Betonsortenkurzbezeichnungen B1 - B7 getrennt angegeben als auch die Ergebnisse der Einsatzbereiche. In der zu erstellenden EPD für Transportbeton ist die Angabe der Ökobilanzresultate nur für die jeweiligen Einsatzbereiche geplant. Um einen Vergleich der Umweltwirkungen der in dieser Diplomarbeit erstellen Ökobilanz mit den Resultaten der Fachliteratur und den EPDs zu ermöglichen, werden die Rezepturen anhand ihrer angegebenen Druckfestigkeit gegliedert und die Ergebnisse den Druckfestigkeitsklassen zugeordnet, siehe Kapitel 4.4.

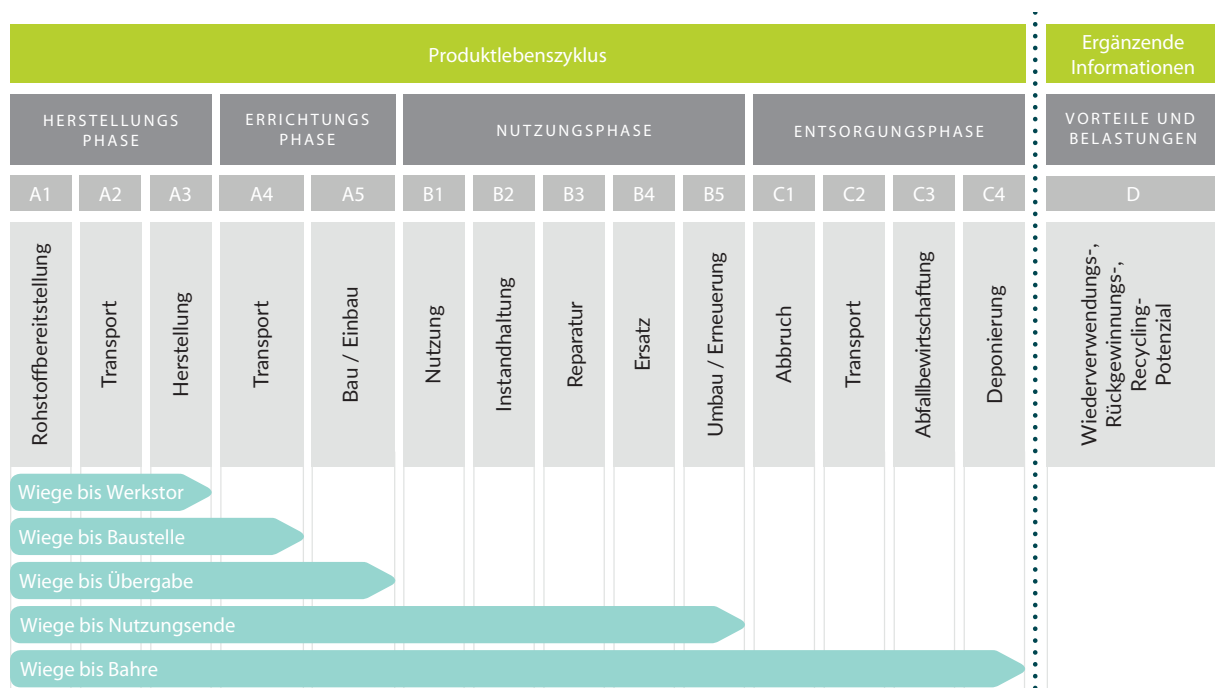
3.1.2.2. Funktionale / deklarierte Einheit

Die funktionale Einheit ist ein Kubikmeter (1m^3) Transportbeton, unter Einbeziehung der jeweiligen Expositionsklasse nach ÖNORM B4710-1 [ONB4710-1:2015]. Die untersuchten Frischbetonrezepturen weisen dabei eine Frischbetonrohddichte zwischen 2308 kg/m^3 und 2412 kg/m^3 , siehe Kapitel 3.2.5 Abbildung 3.4 auf.

3.1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

3.1.2.3. Systemgrenzen

Bei dieser LCA handelt es sich um eine „Cradle-to-gate“ (Wiege bis Werkstor) Betrachtung. Dies bedeutet, dass lediglich die Module A1-A3 (Rohstoffbereitstellung, Transport und Herstellung), siehe Abbildung 3.1 betrachtet werden. Um eine vollständige Feststellung der Umweltwirkungen des Endproduktes zu erhalten, ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus zu betrachten.

Abbildung 3.1.: Phasen des Produktlebenszyklus¹⁷

A1-A3, Produktstadium, Informationsmodule

Das Produktstadium beginnt mit der Berücksichtigung der Produktion aller notwendigen Rohstoffe inklusive aller Vorketten. Die weiteren modellierten Prozesse stellen die Produktion des betrachteten Produktes inklusive der Energiebereitstellung unter Berücksichtigung der dazugehörigen Vorketten dar. Alle notwendigen dazugehörigen Transporte der Roh- und Hilfsstoffe sind in der Bilanzierung berücksichtigt. Auf Grund der Produkteigenschaften ist eine separate Verpackung nicht möglich.

Folgende Stadien gemäß ÖN EN 15804:2012+A1:2013 sind berücksichtigt:

- A1: Rohstoffbereitstellung und -verarbeitung sowie Verarbeitungsprozesse von als Input dienenden Sekundärstoffen

¹⁷Darstellung von AG NHB, TU Graz

- A2: Transport zum Werk
- A3: Herstellung (inkl. Energiebereitstellung, Wasserbereitstellung, Bereitstellung von Hilfsstoffen, Entsorgung von Abfällen)

3.1.2.4. Produktionsablaufes

Der Produktionsablauf zur Erzeugung von Frischbeton ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Zunächst müssen die primären und sekundären Rohstoffe (Bindemittel / Zement, Zusatzstoffe, Zusatzmittel, Gesteinskörnung) erzeugt / abgebaut und den Transportbetonwerken zugeliefert werden. Die Gesteinskörnung wird von manchen Unternehmen direkt vor Ort abgebaut / geschürft und zur Verwendung aufbereitet. Der Transport der Rohstoffe und Sekundärstoffe zu den Transportbetonwerken erfolgt primär mittels LKW und nur zu einem geringen Anteil mit der Bahn, siehe dazu Tabelle 3.5.

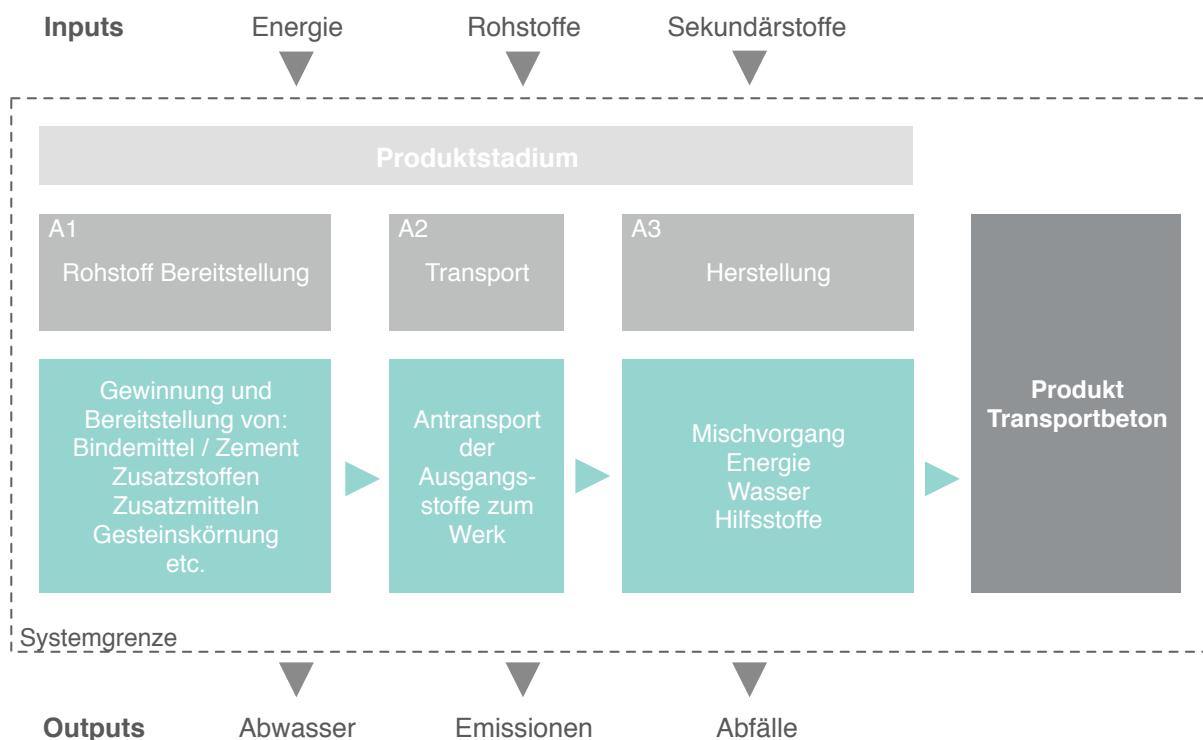


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung des Produktionsablaufes sowie der Systemgrenze¹⁸

Die Herstellung des Betons erfolgt in Betonmischern. Es kommen dabei unterschiedliche Arten von Mixern zum Einsatz. Der Tellermischer und der Zwangsmischer sind die beiden am häufigsten verwendeten Mische zur Herstellung von Transportbeton. Zur Dosierung des Bindemittels

¹⁸Darstellung von AG NHB, TU Graz

3.1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

wird die Gesteinskörnung gewogen, sowie deren Feuchtegehalt bestimmt. Zunächst wird die Gesteinskörnung und der Zement als Bindemittel mit weiteren Zusatzstoffen trocken vorgemischt. Nach der Beigabe von Wasser und Zusatzmitteln wird die Mischung zu einem plastisch verformbaren Frischbeton vermengt. Das Produkt Frischbeton ist bereit für den Transport zur Baustelle und verlässt mit der Ausgabe aus dem Mischer, die für diese Ökobilanz definierte Systemgrenze.

Handelt es sich bei dem erzeugten Transportbeton um einen „neuen“ Beton, ist vor der Verwendung eine Erstprüfung nach ÖNorm B 4710 - 1 Anhang A durchzuführen. Mittels dieser wird für eine Betonzusammensetzung nachgewiesen, dass alle festgelegten Anforderungen an den Frischbeton und Festbeton erfüllt sind. [ONB4710-1:2015]

Zur Überprüfung, ob der gelieferte Beton dem angeforderten Beton entspricht, kann der Auftraggeber eine Identitätsprüfung nach ÖNorm B 4710 - 1 Anhang B veranlassen.

Die Identitätsprüfung gibt an, ob ein definiertes Betonvolumen einer definierten Menge einer Betonsorte zu derselben Grundgesamtheit gehört, für die die Konformität mit der charakteristischen Festigkeit und den sonstigen Anforderungen mittels Konformitätsnachweis durch den Hersteller nachgewiesen wurde. [ONB4710-1:2015]

Die Systemgrenzen zur Natur sind so gelegt, dass die in das System Material- und Energieinputs liefernden Prozesse, die darauffolgenden Herstellungs- und Transportprozesse bis zum Werkstor, sowie die Behandlung aller Abfälle, welche durch die vorher genannten Prozesse entstehen, Teil des Systems sind.

Die zur Entnahme der Rohstoffe (z.B. Bergbau für mineralische Rohstoffe, Erdölförderung für petrochemisch basierte Rohstoffe oder Forstwirtschaft/Landwirtschaft für nachwachsende Rohstoffe) nötigen technischen Maßnahmen gehören zum untersuchten System. Informationen zu den verwendeten Datensätzen der einzelnen Rohstoffe können der Dokumentation der Datenbank „ecoinvent v.3.3“, siehe Anhang B, entnommen werden. Die einzelnen Informationsmodule für die Produktstadien (A1- A3) sowie der Produktionsablauf sind in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt.

3.1.2.5. Datenqualität

Der Güteverband Transportbeton (GVTB) zählt rund 130 Mitgliedsunternehmen, die in 227 Transportbetonwerken etwa 90% der österreichischen Transportbetonmenge erzeugen.¹⁹ Die Auswahl der repräsentativen Werke erfolgt durch den GVTB.

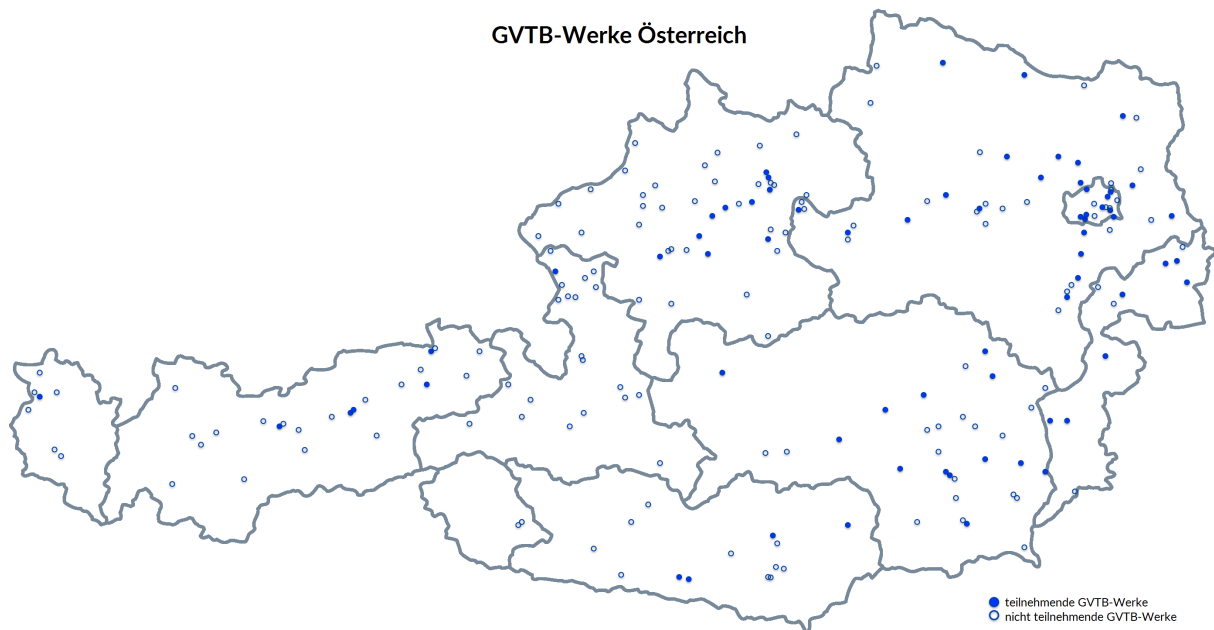


Abbildung 3.3.: GVTB-Werke

Die eigene Datenerhebung umfasst 80 Transportbetonwerke (siehe Abbildung 3.3). Diese Werke produzierten im Jahr 2015 rund 3.828.000 m³ der abgeschätzten rund 10.669.000 (2015) in Österreich produzierten Kubikmeter an Frischbeton für Betonerzeugnisse. Das Gesamtvolumen der so erfassten Produktion entspricht somit etwa 36% des in Österreich hergestellten Transportbetons für Betonerzeugnisse. Die geographische Lage der abgefragten Werke, siehe Abbildung 3.3, deckt das gesamte Bundesgebiet ab. Die Untersuchung, ob die Daten technisch, geografisch und zeitlich Repräsentativität sind, wird in Kapitel 4 bearbeitet.

¹⁹http://www.gvtb.at/gvtb/ueber_uns.php; Zugriff am: 14.05.2017

3.2. Sachbilanz (LCI)

Sachbilanzen umfassen Datenerhebungen und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems. [ISO14040:2006]

3.2.1. Datenerhebung

Die Datensammlung erfolgt gemäß der Anleitung aus ÖN EN ISO 14044 [ISO14044:2006]. Das Berechnungsverfahren wird konsistent über die ganze Studie angewendet. Entsprechend der Zieldefinition wurden in der Sachbilanz alle maßgeblichen Input- und Outputströme, die im Zusammenhang mit dem betrachteten Produkt auftreten, identifiziert und quantifiziert. Die Datenerhebung entspricht den Ökobilanz Regeln – PKR Teil A [BauEPD2017a]. Auf Basis der produktspezifischen Festlegungen, dem PKR Teil B [BauEPD2017b], wurden alle Primärdaten, aus der Datenerhebung mittels Erhebungsbogen (siehe Anhang A), für das Jahr 2015 berücksichtigt, d.h. alle für die Rezeptur eingesetzten Ausgangsstoffe, der Energiebedarf und alle direkten Produktionsabfälle wurden, die Abschneidekriterien berücksichtigend, in der Bilanzierung berücksichtigt.

Der Fragebogen zur Datenerhebung besteht aus zwei Teilen (Formular Teil A & Formular Teil B). In Teil A werden allgemeine Angaben zur Jahresproduktionsmenge des Unternehmens sowie der einzelnen Werke abgefragt. Der Energie- bzw. Elektrizitätsbedarf für Produktion und Heizung, die Arten und Größen der Mischanlagen zur Frischbetonherstellung sowie die Art und Betriebsstoffverbräuche der internen Transportmittel wird in Teil A erfasst. Weiters sind alle Ausgangsstoffe zur Frischbetonherstellung (Zement, Zusatzstoffe, Zusatzmittel, Gesteinskörnung, Anmachwasser und rezyklierte Produkte), deren Mengen pro Jahr, mittlerer Transportweg bis Werk und Transportart (LKW, Bahn) sowie zugehörige Sicherheitsdatenblätter und Produktdatenblätter zu nennen. Zusätzlich ist in Formular Teil A anzugeben welche Rohstoffverbräuche, wie Abfallprodukte und Prozessstoffe (Prozesswasser, Schmierstoffe, Verschleißteile, etc.), im Produktionsprozess anfallen.

Der Formular Teil B erfasst mindestens eine Betonrezeptur für die Expositionsklasse bzw. Betonsortenkurzbezeichnungen X0, XC1, XC2, B1, B2, B3, B4, B5, B6 und B7. Für jedes Rezept sind dabei eine genau Bezeichnung, die Expositionsklassen, die Druckfestigkeitsklasse nach ÖNorm B 4710 - 1 [ONB4710-1:2015] (C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37,

C35/45, C40/50, etc.) und die produzierte Menge der spezifischen Rezeptur in Masse und Volumen pro Jahr anzugeben. Weiters ist eine exakte Mengenangabe in kg/m^3 für folgende Materialien zu nennen.

Materialien für Frischbetonherstellung [kg/m^3]:

- verwendete Zemente/Bindemittel (inkl. Sortenbezeichnung)
 - CEM I
 - CEM II
 - CEM III
- Zusatzstoff Typ I
 - Gesteinsmehl
- Zusatzstoff Typ II
 - AHWZ (aufbereitet hydraulisch wirksame Zusatzstoffe)
 - Flugasche
 - Hüttensand
- Zusatzmittel
 - Luftporenbildner
 - Betonverflüssiger
 - Fließmittel
 - etc.
- Gesteinskörnung
 - Korngruppe 0/4
 - Korngruppe 4/8
 - Korngruppe 8/16
 - Korngruppe 16/32
 - Korngruppe >32
- Anmachwasser
 - Frischwasser
 - rezykliertes Wasser

3.2.2. Abschneidekriterien zum Ausschluss von Inputs und Outputs

Es wurden alle Daten aus der Datenerhebung berücksichtigt, welche Energie- und Stoffströme mit einem Anteil von größer ein Prozent am Gesamtsystem darstellen.

Die Summe der vernachlässigten Prozesse übersteigt nicht den Betrag von fünf Prozent der Charakterisierungsergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien, das heißt die Abschneidekriterien gemäß PKR - Teil B, ISO 14044 und EN 15804:2012+A1:2013 werden eingehalten.

Für die Berechnung wurden alle Inputs wie Rohstoffe, Prozesswasser, Hilfsstoffe, und Energien (Strom), die für die Produktion notwendig sind, betrachtet. Die Daten für die Produktion stammen aus in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Datenerhebung. Auch die Transportdistanzen der verwendeten Ausgangsstoffe wurden mit Hilfe des Erhebungsbogens ermittelt und in der Ökobilanz berücksichtigt.

Sind Datenlücken in der Datenerhebung einzelner Firmen vorhanden, werden dies auf Nachfrage ergänzt oder durch brachenübliche Durchschnittswerte ersetzt. So werden, etwa bei keiner Angabe über den Verbrauch von Prozessstoffen (Verschleißteile, Schmieröle, etc.), die Werte einer bereits bestehende Ökobilanz [Seibersdorf1997] angesetzt.

3.2.3. Auswahl der Vordergrund- & Hintergrunddaten

Die Primärdaten / Vordergrunddaten [Finnveden2009] sind die von den Firmen erhobenen spezifischen Daten. Diese werden in der Sachbilanz analysiert und bilden die Grundlage zur Modellierung der Ökobilanz. Die in dieser Arbeit verwendeten Vordergrunddaten stammen aus der Auswertung der Erhebungsbögen, die in den Ergebnissen der Sachbilanz dargestellt sind, siehe dazu Kapitel 3.2.5, Abbildung 3.4 und Tabelle 3.4.

Bei generischen Daten / Hintergrunddaten [Tillman2000] handelt es sich um Mittelwerte oder repräsentative Einzelwerte die nicht spezifisch von Firmen abgefragt werden. [Kloepffer2007] Im Rahmen dieser Arbeit werden die Hintergrunddaten von Datensätze aus der Datenbank ecoinvent v.3.3 verwendet. Ein Beispiel dafür ist der österreichische Strom-Mix. Die Zusammensetzung des elektrischen Stroms, der für die Herstellung des Betons in den Werken benötigt wird, wird nicht durch den Erhebungsbogen abgefragt. Es wird zur Berechnung der Ökobilanz, der von den Erstellern der ecoinvent Datenbank berechnete Strom-Mix für Österreich verwendet. Zur Berechnung repräsentativer LCA - Ergebnisse ist es wichtig, die Hintergrunddaten der jeweiligen geographischen Region und möglichst aktuelle Datensätze zu verwenden. Um eine

Nachvollziehbarkeit der Berechnungen zu gewährleisten müssen die Hintergrunddaten aufgezeichnet und transparent dargestellt werden. Alle im Rahmen dieser Ökobilanz verwendeten Hintergrunddaten sind im Anhang B in den Tabellen B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9, B.10, B.11, B.12 und B.13 angeführt.

3.2.4. Allokationen

Als Allokation wird laut ÖN EN ISO 14040 die Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Ökobilanzmoduls auf das untersuchte Produktsystem verstanden [ISO14040:2006]. Wenn dies nicht vermeidbar ist, sollten Allokationen sorgfältig bedacht und gerechtfertigt werden [EN15804:2014], zum Beispiel bei multifunktionellen Prozessen.

In einem Betonwerk entstehen bei der Herstellung von Frischbetons keine Co-Produkte²⁰. Die anfallenden Abfälle wie Kunststoffmaterialien oder hausmüllähnlicher Abfall, die mit den Vorketten angeliefert werden, sind keine Koppelprodukte und werden einer realistischen Verwertungsrouten zugeführt und der Produktion zugerechnet. Dabei wurde auf bereits vorhandene Datensätze zurückgegriffen. Reste wie Kunststoffmaterialien oder Restmüll, die nicht bei den Produktionsprozessen zugeordnet werden, wurden vom System ausgeschlossen.

3.2.5. Ergebnisse der Sachbilanz

In Tabelle 3.4 ist die durchschnittliche Betonzusammensetzung jeder Expositionsklasse und Betonsortenkurzbezeichnung angeführt. Das Ergebnis der Auswertung der erhobenen Daten ist in Abbildung 3.4 grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender technischer und funktionaler Performance des Betons der Bindemittel- (Zement-)gehalt steigt.

Tabelle 3.4.: Sachbilanz der erhobenen Daten

	Durchschnittliche Betonzusammensetzung									
	X0	XC1	XC2	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Anmachwasser kg/m ³	159,54	176,75	174,79	170,46	170,68	171,43	173,87	166,64	163,54	169,43
Sand kg/m ³	944,18	865,19	869,93	875,14	850,07	820,36	816,39	796,04	776,82	738,86
Kies kg/m ³	1107,00	1065,12	1056,14	1056,14	1053,86	1009,86	1039,95	1039,79	1026,11	992,25
Zusatzmittel kg/m ³	0,46	1,43	1,53	1,57	1,91	2,31	2,33	2,51	2,74	3,40
Zusatzstoffe kg/m ³	26,11	49,50	50,36	45,71	53,64	42,14	55,55	35,86	84,29	24,43
Bindemittel / Zement kg/m ³	114,66	235,76	245,64	259,57	280,93	303,79	324,24	319,00	313,50	379,71

Die Zusammenfassung zur durchschnittlichen Transportentfernung der Vorprodukte zum Werk,

²⁰Co-Produkte sind Produkte die durch die Erzeugung des primären Produkts durch einen Koppelprozess entstehen.

3.2. Sachbilanz (LCI)

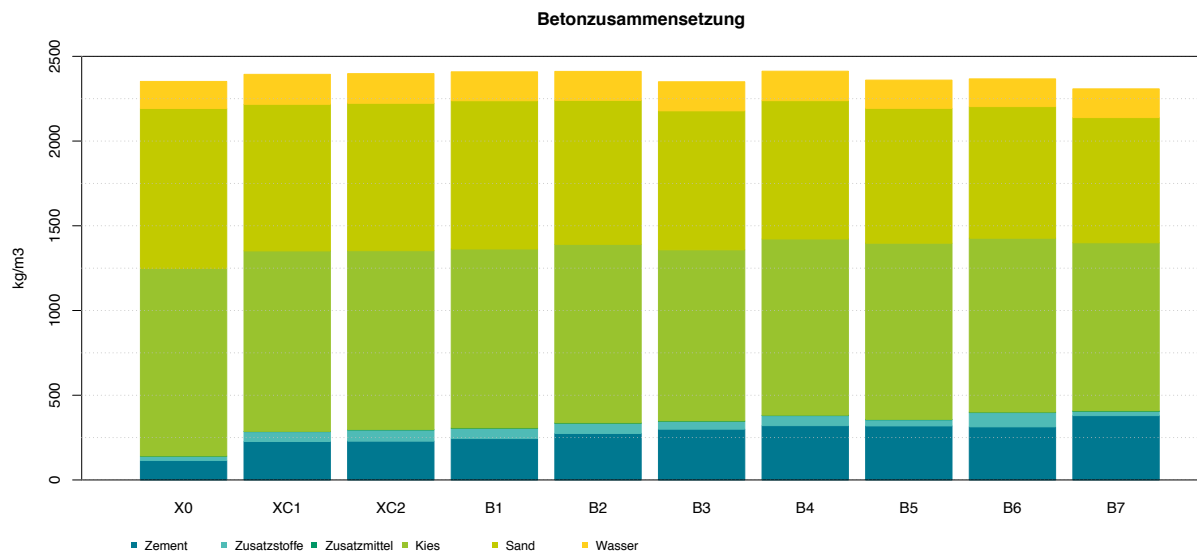


Abbildung 3.4.: Sachbilanz der erhobenen Daten

sowie die verwendeten Transportmittel sind in Tabelle 3.5 dargestellt. Zur Bilanzierung wird der mittlere Transportweg bis Werk herangezogen, da die weitere Transportroute der Zubringer nicht nachvollziehbar ist. Über die Auslastung (Vollbeladung / Teilbeladung) kann keine Aussage getroffen werden, da dies nicht durch die Datenerhebung erfasst wurde. Das primäre Transportmedium zur Anlieferung der Rohstoffe und Sekundärstoffe ist der LKW, Transporte mit der Bahn spielen eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 3.5.: Durchschnittliche Transportentfernungen der Vorprodukte zum Werk

	Transport							
	Materialien							
	Zement			Zusatzstoffe	Zusatzmittel		Gesteinskörnung	
	CEM I	CEM II	CEM III	AHWZ	Luftporenmittel	Fließmittel	Kies	Sand
durchsch.Transportdistanz bis Werk [km]	100,4	49,6	43,5	54,0	180,8	180,8	22,1	19,9
Transportmedium	LKW	LKW	LKW	LKW	LKW	LKW	LKW/Bahn	LKW/Bahn

3.2.6. Interpretation der Sachbilanz

In Abbildung 3.5 sind die Sachbilanzergebnisse dargestellt. Auf der Abszisse sind die Hauptbestandteile des Beton aufgeschlüsselt und diese weiter in die Expositionsklasse bzw. Betonsortenkurzbezeichnung unterteilt. Auf der Ordinate sind die Massenanteile der Hauptbestandteile in kg/m^3 aufgetragen. Die Balkenhöhe stellt den Mittelwert und der Fühler den minimalen bzw. maximalen Anteil der Rezepte dar. Die Punkte in den Balken des Zementanteils stellen den Mindestzementgehalt²¹ laut ÖNorm B 4710 - 1 dar, dieser darf nicht unterschritten werden. Wie

²¹ Der Mindestzementgehalt ist der Massenanteil an Zement der laut ÖNorm B 4710 -1 Tabelle NAD 7b & Tabelle NAD 10, mindestens in einem Kubikmeter Beton enthalten sein muss. Darf nicht mit dem Mindestbindemittelgehalt

bereits zuvor erwähnt steigt der Bindemittel- / Zementgehalt mit zunehmender funktionaler und technischer Anforderung an den Beton an. Beim Einsatz von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln kann kein klarer Trend abgeleitet werden, sie werden je nach Rezeptur spezifisch angepasst. Der Anteil der Gesteinskörnung, sowohl Kies als auch Sand, nimmt mit steigender funktionaler und technischer Anforderung ab, wobei die Bandbreiten der unterschiedlichen Rezepturen sehr groß sind. So schwankt der Kiesgehalt bei X0 - Beton zwischen 753 - 1273 kg/m³ und bei B7 - Beton zwischen 945 - 1074 kg/m³. Der Anmachwassergehalt ist für alle Rezepturen annähernd ident. Das bedeutet, dass der Wasser-Bindemittelwert (W/B - Wert²²) durch eine höhere Zugabe an Bindemitteln, d.h. mehr kg/m³, gesenkt wird.

verwechselt werden.

²²Der W/B - Wert ist der Quotient aus der Masse des Anmachwassers und der Masse des anrechenbaren Bindemittels. Er ist ein wichtiger Kennwert zur Bestimmung der Eigenschaften des Betons.

3.2. Sachbilanz (LCI)

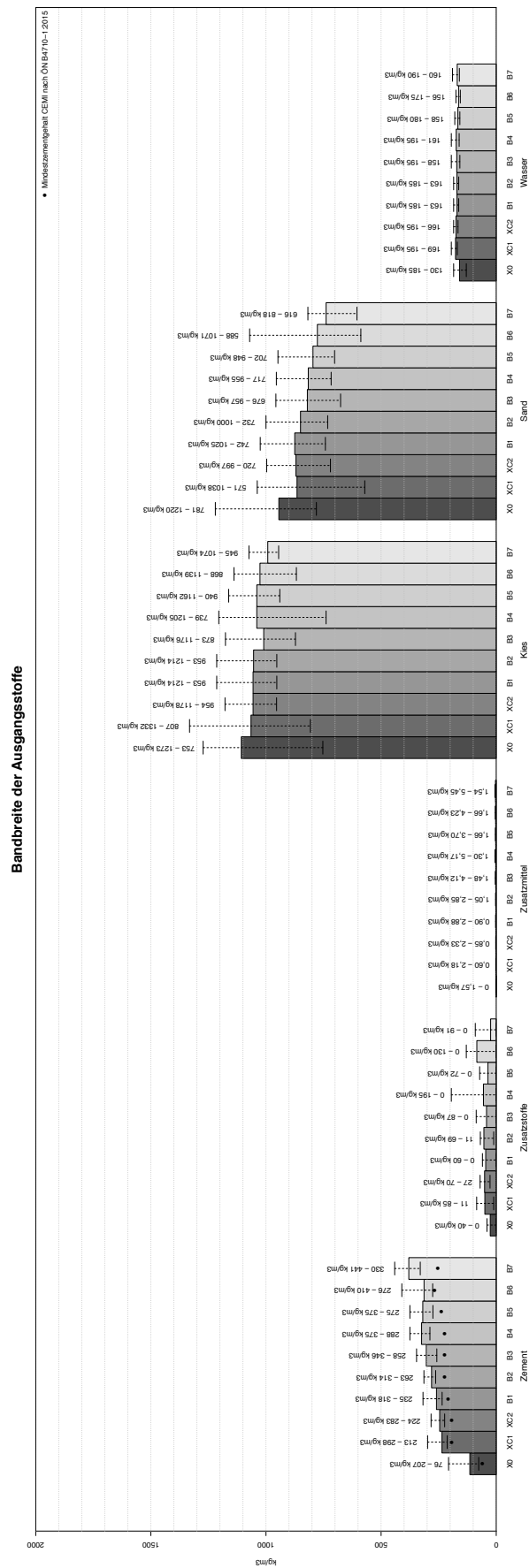


Abbildung 3.5.: Bandbreite der Ausgangsstoffe

3.3. Wirkungsabschätzung (LCIA)

Die Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment -LCIA) ist die zweite vorwiegend naturwissenschaftliche Komponente der Ökobilanz, die gemeinsam mit der Sachbilanz eingebettet ist in die beiden, wissenschaftstheoretisch betrachtet, „weiche“ Komponenten „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“ (vor der Sachbilanz) und „Auswertung“ (nach der Wirkungsabschätzung). [Kloepffer2007]

3.3.1. Auswahl der Wirkungskategorien

Zur Beschreibung der Umweltauswirkungen der LCA, werden im Rahmen dieser Arbeit die Umweltparameter der Umweltwirkungen und Umweltaspekte berechnet, siehe Tabelle 3.6. Die Berechnung zusätzlicher Wirkungskategorien, laut PKR - Teil B sind für die Erstellung der EPD geplant. Weitere Wirkungskategorien sind im Kapitel 2.1.5 in der Tabelle 2.3 dargestellt.

3.3.2. Auswahl der Charakterisierungsmodelle

Für die Berechnung der ausgewählten Umweltwirkungen dieser Arbeit (siehe Tabelle 3.6) sind die aktuellsten Charakterisierungsmodelle (CML v.4.2. [CML], IPCC 2013 [IPCC]) zur Anwendung gekommen. Die Umweltaspekte des Ressourcenverbrauchs werden mit der Methode ecoinvent2000 [ecoinvent]) berechnet. Weiter Charakterisierungsmodelle sind im Kapitel 2.1.5 in der Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 3.6.: Wirkungskategorien und Charakterisierungsmodelle

Umweltparameter					
Umweltwirkung	Wirkungskategorie	Parameter	Kürzel	Einheit	Charakterisierungsmodell
	Versauerung von Boden und Wasser	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	AP	kg SO ₂ eq.	CML v.4.2.
	Eutrophierung	Eutrophierungspotenzial	EP	kg PO ₄ eq.	CML v.4.2.
	Globale Erwärmung	Treibhauspotenzial	GWP	kg CO ₂ eq.	IPCC 2013
	Ozonabbau	Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg CFC-11 eq.	CML v.4.2.
	Photochemische Ozonbildung	Troposphärisches Ozonbildungspotenzial	POCP	kg Ethen eq.	CML v.4.2.
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - Stoffe	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - nicht fossile Ressourcen	ADPE	kg Sb eq.	CML v.4.2.
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	ADPF	MJ - unterer Heizwert	CML v.4.2.
Umweltaspekte	Parameter		Kürzel	Einheit	Charakterisierungsmodell
	Ressourcenverbrauch	Total erneuerbarer Primärenergie	PERT	MJ - unterer Heizwert	ecoinvent2000
		Total nicht erneuerbarer Primärenergie	PENRT	MJ - unterer Heizwert	ecoinvent2000
		Total Primärenergie	PET	MJ - unterer Heizwert	ecoinvent2000

3.3. Wirkungsabschätzung (LCIA)

3.3.3. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Ökobilanz werden in den folgenden Tabellen 3.7, 3.8 & 3.9 für alle betrachteten Module (A1-A3) dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der Rezepte in drei Gruppen, welche die typischen Einsatzbereiche für Beton in Österreich repräsentieren, zusammengefasst. Der angegebene Zahlenwert ist das arithmetische Mittel der Ergebnisse. So werden z.B. alle LCA - Resultate der modellierten X0 - Rezepturen ungewichtet gemittelt, selbiges wird bei den weiteren Ergebnissen angewendet.

Die Berechnungen wurden anhand der zuvor beschriebenen Methoden durchgeführt, die angegebenen Ergebnisse stellen Relativaussagen dar, d.h. sie können aufgrund unterschiedlicher Unsicherheiten, die in Kapitel 4 näher untersucht werden, abweichen.

Tabelle 3.7.: LCA - Ergebnisse - Betone für untergeordnete Bauwerke

Betone für untergeordnete Bauwerke (X0)					
Umweltwirkung			Kürzel	Einheit	A1 - A3
	Versauerung von Boden und Wasser	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	AP	kg SO2 eq.	2,17E-01
	Eutrophierung	Eutrophierungspotenzial	EP	kg PO4 ep.	7,31E-02
	Globale Erwärmung	Treibhauspotenzial	GWP	kg CO2 eq.	1,03E+02
	Ozonabbau	Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg CFC-11 eq.	5,20E-06
	Photochemische Ozonbildung	Troposphärisches Ozonbildungspotenzial	POCP	kg Ethen eq.	1,23E-02
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - Stoffe	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - nicht fossile Ressourcen	ADPE	kg Sb eq.	1,71E-04
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	ADPF	MJ - unterer Heizwert	5,05E+02
Umweltaspekte		Parameter	Kürzel	Einheit	
	Ressourcenverbrauch	Total erneuerbarer Primärenergie	PERT	MJ - unterer Heizwert	6,66E+01
		Total nicht erneuerbarer Primärenergie	PENRT	MJ - unterer Heizwert	6,40E+02
		Total Primärenergie	PET	MJ - unterer Heizwert	7,06E+02

Tabelle 3.8.: LCA - Ergebnisse - Betone vorwiegend für den Hochbau

Betone vorwiegend für den Hochbau (XC1 - B2)					
Umweltwirkung			Kürzel	Einheit	A1 - A3
	Versauerung von Boden und Wasser	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	AP	kg SO2 eq.	3,48E-01
	Eutrophierung	Eutrophierungspotenzial	EP	kg PO4 ep.	1,16E-01
	Globale Erwärmung	Treibhauspotenzial	GWP	kg CO2 eq.	1,91E+02
	Ozonabbau	Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg CFC-11 eq.	7,28E-06
	Photochemische Ozonbildung	Troposphärisches Ozonbildungspotenzial	POCP	kg Ethen eq.	2,07E-02
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - Stoffe	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - nicht fossile Ressourcen	ADPE	kg Sb eq.	1,96E-04
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	ADPF	MJ - unterer Heizwert	7,46E+02
Umweltaspekte		Parameter	Kürzel	Einheit	
	Ressourcenverbrauch	Total erneuerbarer Primärenergie	PERT	MJ - unterer Heizwert	1,05E+02
		Total nicht erneuerbarer Primärenergie	PENRT	MJ - unterer Heizwert	9,97E+02
		Total Primärenergie	PET	MJ - unterer Heizwert	1,10E+03

Tabelle 3.9.: LCA - Ergebnisse - Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau

Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau (B3 - B7)					
Umweltwirkung			Kürzel	Einheit	A1 - A3
	Versauerung von Boden und Wasser	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	AP	kg SO2 eq.	4,21E-01
	Eutrophierung	Eutrophierungspotenzial	EP	kg PO4 ep.	1,39E-01
	Globale Erwärmung	Treibhauspotenzial	GWP	kg CO2 eq.	2,42E+02
	Ozonabbau	Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg CFC-11 eq.	8,14E-06
	Photochemische Ozonbildung	Troposphärisches Ozonbildungspotenzial	POCP	kg Ethen eq.	2,54E-02
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - Stoffe	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - nicht fossile Ressourcen	ADPE	kg Sb eq.	2,03E-04
	Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	ADPF	MJ - unterer Heizwert	8,68E+02
Umweltaspekte	Parameter		Kürzel	Einheit	
	Ressourcenverbrauch	Total erneuerbarer Primärenergie	PERT	MJ - unterer Heizwert	1,22E+02
		Total nicht erneuerbarer Primärenergie	PENRT	MJ - unterer Heizwert	1,17E+03
		Total Primärenergie	PET	MJ - unterer Heizwert	1,29E+03

3.3.4. Interpretation der Wirkungsabschätzung

Zur Interpretation der Ergebnisse sind die LCIA - Ergebnisse zum GWP aller Expositionsklassen und Betonsortenkurzbezeichnungen in Abbildung 3.6 als Boxplot dargestellt. Die weiteren LCIA - Ergebnisse sind im Anhang C & D zu finden. Es ist zu erkennen, dass mit steigender funktionaler und technischer Anforderung an den Beton auch die Umweltwirkung zunimmt. Die „grünen“ Linien in den Boxen repräsentieren den jeweiligen Median der untersuchten Rezepte. Die „blauen“ Linien stellen den jeweiligen Mittelwert der betrachteten Einsatzbereiche dar. Es ist erkennbar, dass die Umweltwirkungen für die Rezepte der Expositionsklasse X0 (blauer Bereich), deutlich unter jenen der anderen Expositionsklassen und Betonsortenkurzbezeichnungen liegen. Weiters ist ersichtlich, dass die Umweltwirkungen für Rezepte von XC1, XC2, B1 und B2 Betone (grüner Bereich) annähernd gleich sind, bzw ähnliche Schwankungsbreiten aufweisen. Ebenso verhalten sich die Rezepturen der Betone B3, B4, B5, B6 und B7 (gelber Bereich). Daher wurden die Ergebnisse, zur besseren Anwendbarkeit in der Praxis, in Gruppen zusammengefasst. Die Gruppen repräsentieren typische Einsatzbereiche der Betonrezepturen.

Wird die signifikante Steigung der Werte mit der Steigung des Bindemittelgehalts (siehe Abbildung 3.5) verglichen ist eine deutlich Übereinstimmung der Steigungen erkennbar, diese Abhängigkeit des Bindemittelgehalts auf die Umweltwirkungen wird in weiterer Folge durch die Dominanzanalyse (siehe Kapitel 4.1) bestätigt.

Der Wert „n“ in der Abszisse ist die Anzahl der modellierten Rezepte je Expositionsklasse und Betonsortenkurzbezeichnung, deren Repräsentativität in Kapitel 4.3 genauer betrachtet wird. Die Ergebnisse zu den weiteren Umweltparametern finden sich im Anhang C und zeigen ein ähnliches Resultat. Einzig die Schwankungsbreiten der Ergebnisse unterscheiden sich.

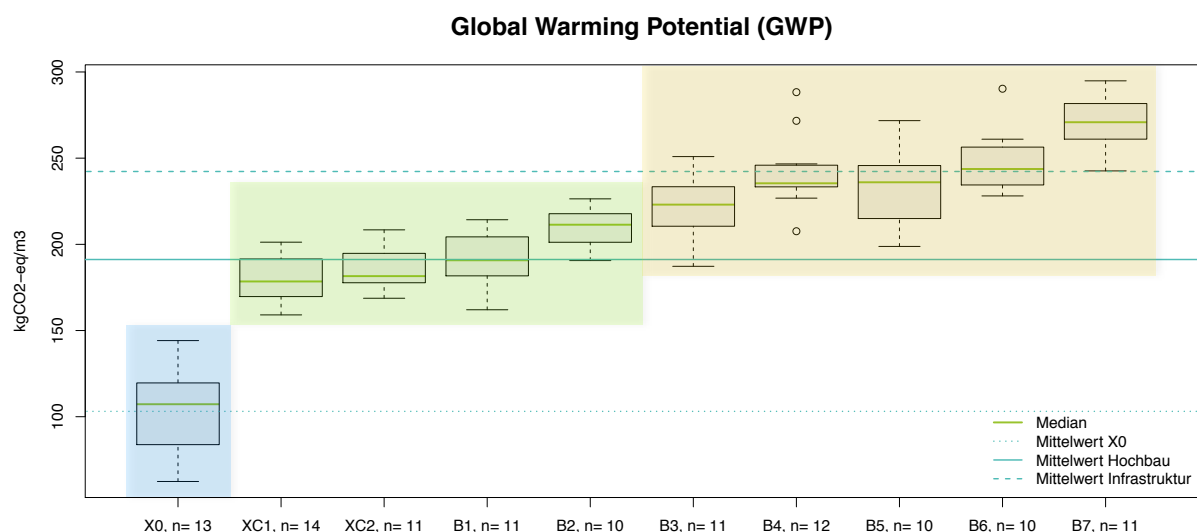


Abbildung 3.6.: Ergebnis der Wirkungsabschätzung (GWP)

In den Abbildungen 3.7, 3.8 & 3.9 sind die Ergebnisse, der in Tabelle 3.3 definierten Einsatzbereiche dargestellt. Auch hier ist erkennbar, dass mit steigender Anforderung an den Beton die Umweltwirkung zunimmt. Zudem kann Bandbreite der Ergebnisse abgelesen werden.

Zur Beurteilung des GWP wird der $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ - Austoß pro m^3 berechnet, dieser liegt bei X0 Betonen (Abbildung 3.7) im Bereich von 62 - 145 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ ($\pm 40\%$), 50% der betrachteten 13 Rezepte liegen zwischen 84 - 120 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ ($\pm 18\%$), was im Mittel 103 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ Austoß pro m^3 X0 - Beton bedeutet.

Werden alle Ergebnisse (Zahlenwerte) numerisch sortiert, so ist der mittlere Eintrag der Medianwert. Liegen der Medianwert und der Mittelwert nahe beieinander (5 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ Unterschied), sind keine Ausreißer in den Ergebnissen vorhanden.

Die Unterschiede in den Bandbreiten der Ordinate beruhen darauf, dass die Statistiksoftware R, die in dieser Arbeit zur Anwendung gekommen ist, versucht alle Ergebnisse eines Umweltparameters darzustellen.

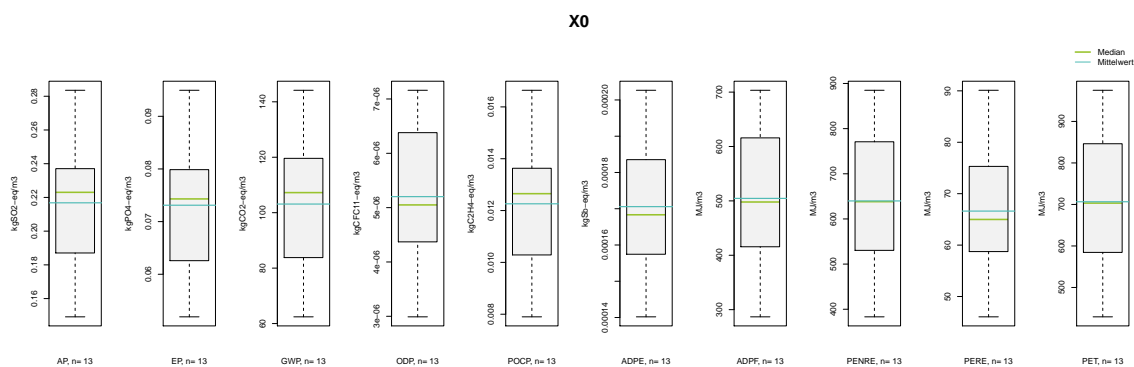


Abbildung 3.7.: Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (X0)

Für die 46 ausgewerteten Rezepturen, für Betone vorwiegend für den Hochbau (Abbildung 3.8), ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Rezepte und dem damit verbundenen LCI, eine Bandbreite der Ergebnisse für GWP zwischen 159 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ und 228 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ ($\pm 18\%$), wobei 50% der betrachteten Rezepturen im Bereich von 177 - 204 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ ($\pm 7\%$) liegen, dies hat einen mittleren $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ - Austoß von 191 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ zur Folge. Der Median und der Mittelwert sind beinahe gleich, (>1 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ Unterschied), wodurch von einer guten Normalverteilung der Ergebnisse ausgegangen werden kann.

Ähnlich verhält sich der gesamte Primärenergiebedarf (PET). Dieser schwankt zwischen 883 - 1308 MJ/m^3 ($\pm 20\%$), wobei 50% der betrachteten Rezepturen im Bereich von 1015 - 1189 MJ/m^3 ($\pm 8\%$) liegen, dies hat einen mittleren PET von etwa 1100 MJ/m^3 zur Folge. Die weiteren Umweltparameter verhalten sich annähernd identisch.

Die Ergebnisse der Rezepturen für Beton vorwiegend für den Infrastrukturbau (Abbildung 3.9) haben eine Bandbreite von 192 bis 289 $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q.}$ ($\pm 19\%$) pro m^3 . Von den 54 ausgewerteten

3.3. Wirkungsabschätzung (LCIA)

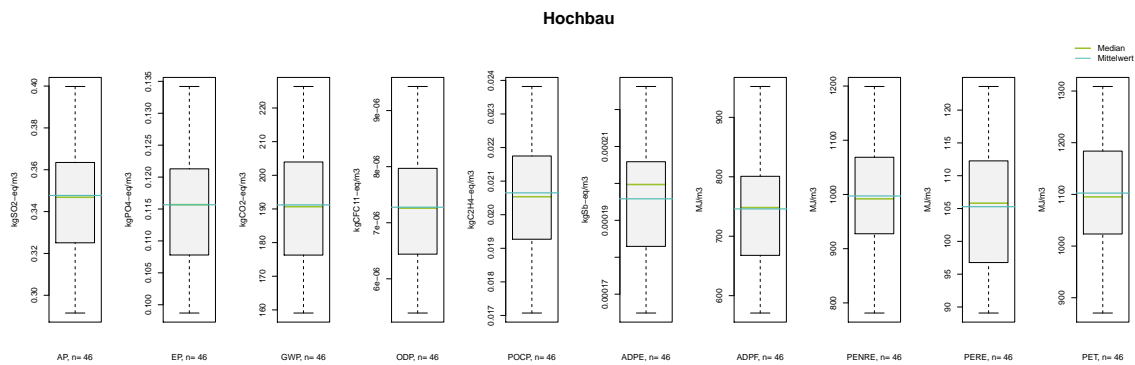


Abbildung 3.8.: Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Hochbau)

Rezepturen liegen 50% der Ergebnisse in einem Bereich von 226 bis 259 kgCO₂-äq. ($\pm 19\%$). Im Mittel ergibt sich für Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau ein kgCO₂-äq. - Ausstoß von 242 kgCO₂-äq. . Die Normalverteilung der Ergebnisse, kann wie bei den Betonen vorwiegend für den Hochbau, durch annähernd gleiche Werte für Median und Mittelwert erkannt werden. Das gleiche Resultat zeichnet sich für die weiteren Umweltparameter ab.

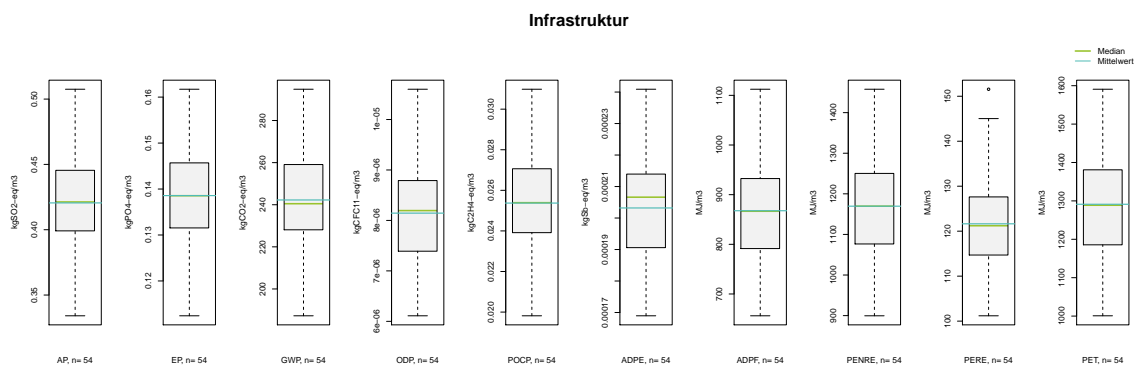


Abbildung 3.9.: Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Infrastrukturbau)

Zu allen Ergebnissen kann gesagt werden, dass vor allem die Rezepturen mit der Zementsorte CEM I, aufgrund des hohen Portlandzementklinkeranteils in im oberen Bereich der Ergebnisse liegen. Die Rezepte mit den geringsten Umweltwirkungen sind Beton mit der Zementsorte CEM II/A und einem hohen Anteil an hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen (AHWZ). Eine betontechnologische Optimierung der Rezepturen hinsichtlich der Bestandteile kann zu einer Verringerung der Umweltwirkungen führen. Vor allem durch die Substitution des Zements durch alternative Stoffe, wie fein gemahlene Gesteinsmehle und Hüttensande, ist ein vielversprechender Ansatz, wie aus den Ergebnissen von Forschungsprojekten ERESKO und Öko² - Beton hervorgeht, siehe dazu [Juhart2015]. Denn nicht nur die Zementart sondern auch der Massenanteil des Zements ist von großer Bedeutung. So haben Rezepturen mit hohem Zementgehalt eine größere Umweltwirkung als Betone mit geringem Zementgehalt. Die Rezepturen mit den vergleichsweise

größten Massenanteile haben auch die größten Umweltwirkungen. Einerseits muss aufgrund der ÖNorm B 4710 - 1 ein gewisser Bindemittelanteil und damit verbunden ein gewisser Zementanteil in den Betonen enthalten sein. Andererseits ist zur Erfüllung der technischen und funktionalen Anforderungen, wie Druckfestigkeitsklasse und Expositionsklasse, ein Mindestanteil an Zement erforderlich. Wobei die Angabe des Mindestbindemittelgehalts zur Erfüllung bestimmter Expositionsklassen in der ÖNorm B 4710 - 1, kritisch zu hinterfragen ist, denn die geforderten technischen und funktionalen Eigenschaften könnten durch individuelles Anpassen der Rezepturen möglicherweise auch mit geringeren Bindemittelanteilen erfüllt werden.

Aber auch die Größe und Form der Gesteinskörnung beeinflussen den Zementgehalt wesentlich. So sind Rezepturen mit kleinem Größtkorn durch den höheren Zementleimbedarf und dadurch höheren Zementgehalt im oberen Bereich der Ergebnisse zu finden. Die Form der Gesteinskörnung (rund, kantig) und die Beschaffenheit (Saugfähigkeit) unterscheiden sich aufgrund der regionalen Vorkommen voneinander und haben Einfluss auf den Zementleimbedarf. So unterscheiden sich die Zementanteile in den Rezepturen durch die regional vorhandenen Gesteinskörnungen, diese können aufgrund der überregionalen Tätigkeiten der untersuchten Unternehmen nicht dargestellt werden.

Zur Untersuchung der Einflüsse, der Zementarten und weiterer Parameter zur Modellierung, auf die Ergebnisse der Ökobilanz, werden in nachfolgendem Kapitel 4 die LCA - Ergebnisse kritisch hinterfragt.

Alle Ergebnisse der drei Gruppen, sowie die Ergebnisse aller Expositionsklassen und Betonsortenkurzbezeichnungen können den Tabellen 3.7, 3.8 & 3.9, sowie den Abbildungen im Anhang C & D entnommen werden.

4. Kritische Analyse der LCA - Ergebnisse

Zur Berechnung einer Ökobilanz müssen zahlreiche Annahmen getroffen werden. Deshalb widmet sich dieses Kapitel der Absicherung der Ergebnisse mittels einer kritischen Analyse. Dazu werden unterschiedliche Methoden zur

1. statistischen Auswertung,
2. Absicherung der Annahmen,
3. Absicherung der Daten,
4. methodischen Auswertung,
5. Absicherung und Einordnung der Ergebnisse,

angewendet.

In der Regel werden zu Beginn mittels einer Dominanzanalyse, siehe Kapitel 4.1, die Beiträge zu den LCA - Ergebnisse ermittelt.

Weiters wird eine Sensitivitätsanalyse zur Quantifizierung der Auswirkungen, bei Variation der Annahmen durchgeführt. In Kapitel 4.2 werden drei Prozesse und Ressourcen untersucht und deren Einfluss auf die Ergebnisse dargestellt.

Zur Ermittlung der technischen Repräsentativität, d.h. zu untersuchen ob die Anzahl der erhobenen Rezepte ausreicht um ein repräsentatives Ergebnis zu liefern, werden in Kapitel 4.3 die Ergebnisse von Rezepturen unterschiedlicher Unternehmen verglichen.

Im Kapitel 4.4 werden die Betone analysiert, den Druckfestigkeitsklassen zugeordnet und verglichen.

Um die Unterschiede in den Ergebnisse aufgrund der verwendeten Hintergrunddaten darzustellen wird in Kapitel 4.5 die Methode der Korrelationsanalyse angewendet.

Mit dem Einfluss der LCIA - Methoden und Modelle auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung beschäftigt sich das Kapitel 4.6.

Im Kapitel 4.7 wird die Methode der Monte - Carlo - Analyse zur Berechnung der Standardabweichungen und der 2,5% bzw. 97,5% - Fraktile aller Expositionsklassen und Betonsortenkurzbezeichnungen angewendet.

Zur Einordnung der LCA - Ergebnisse in die Literatur werden im Kapitel 4.8 die Literaturdaten mit den, in dieser Arbeit berechneten Ökobilanzresultaten, verglichen.

4.1. Dominanzanalyse

In Abbildung 4.1 ist das Ergebnis der Dominanzanalyse für das Globale Erwärmungspotenzial (GWP) dargestellt, die Ergebnisse der weiteren Wirkungskategorien und Ressourcenverbräuche sind in Anhang E zu finden.

Die Balkenhöhe jeder Farbe gibt den prozentuellen Anteil des Prozesses / der Ressource zum Gesamtergebnis des Umweltparameters je Expositionsklasse und Betonsortenkurzbezeichnung an.

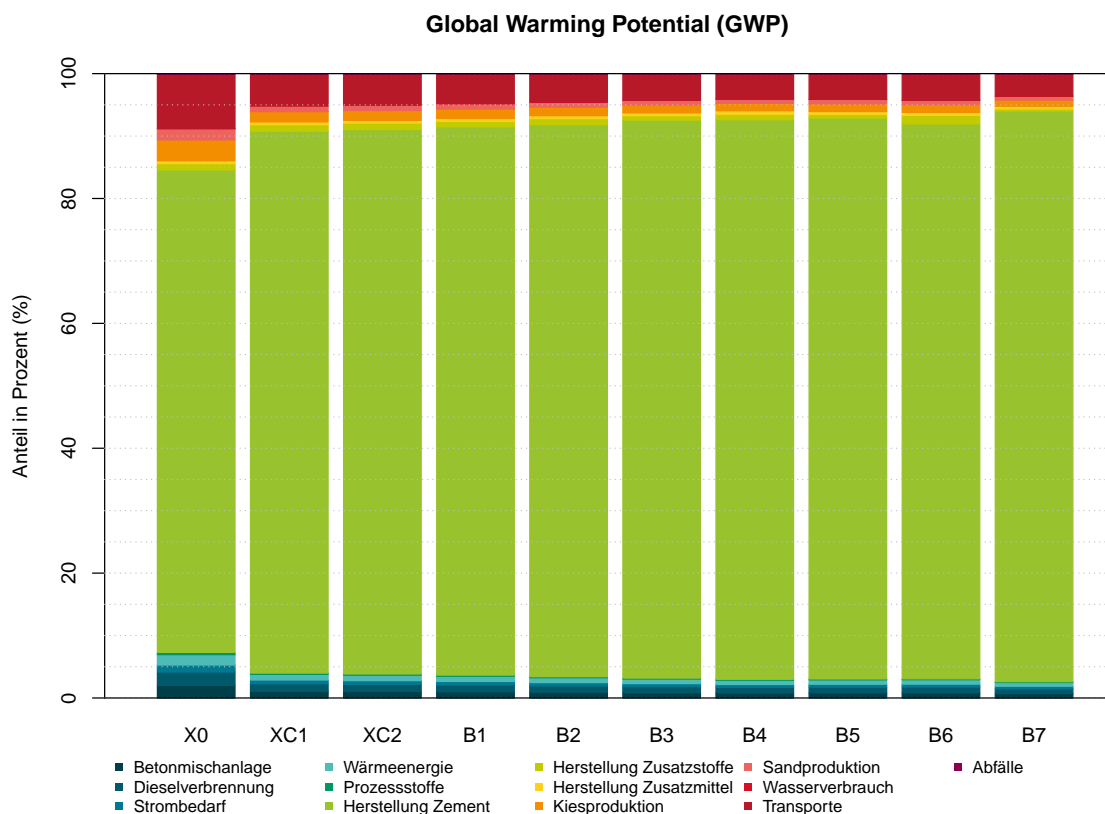


Abbildung 4.1.: Dominanzanalyse Produktsystem (GWP)

Es ist deutlich erkennbar, dass der Prozess der Zementherstellung („grüner Balken“) mit einem Anteil von etwa 85 - 90% den wesentlichsten Beitrag liefert. Mit steigendem Bindemittelgehalt, steigt auch der Beitrag zu den Ergebnissen, so hat die Zementherstellung beim Beton B7 einen größeren Anteil als beim Beton X0. Deshalb wurde eine weitere Dominanzanalyse, siehe Abbildung 4.2, speziell zur Beurteilung der Prozesse und Ressourcen der Zementherstellung erstellt.

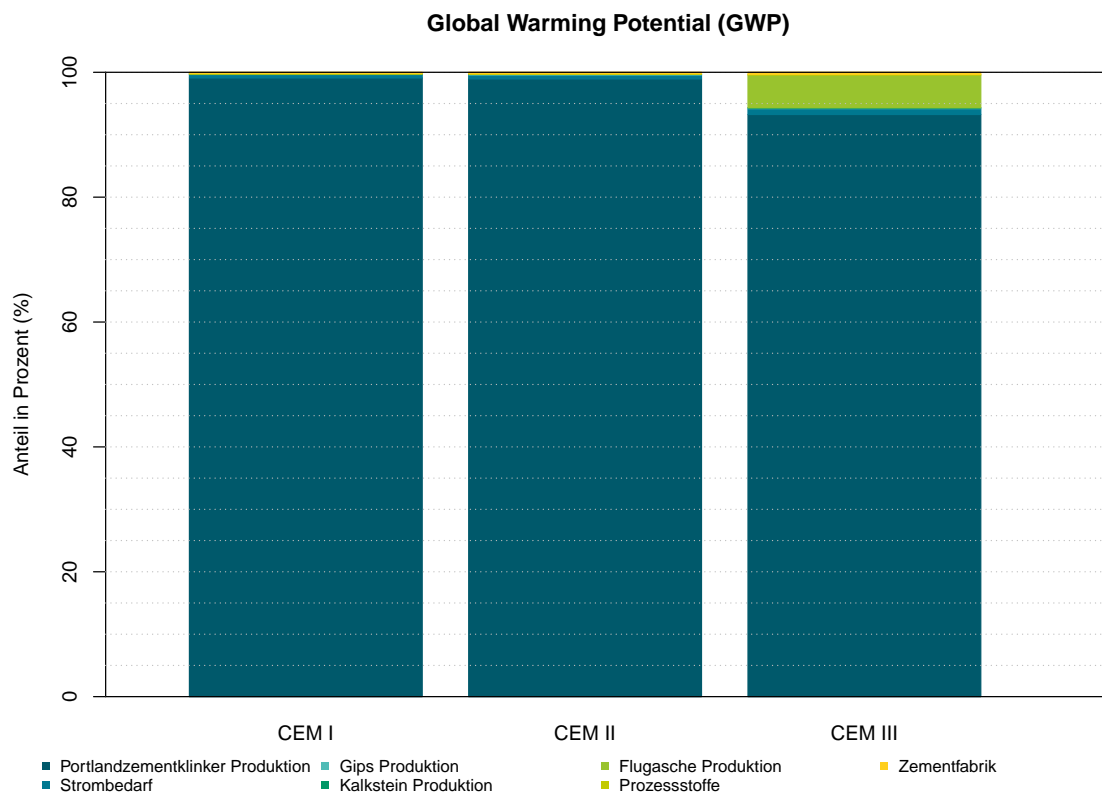


Abbildung 4.2.: Dominanzanalyse Zement (GWP)

Diese Abbildung zeigt, dass für die Herstellung von CEM I, die Produktion des Portlandzementklinkers einen Anteil von 99% am GWP hat. Beim Zement CEM II und CEM III sind es aufgrund des geringeren Klinkeranteils, siehe Tabelle 4.1 und **Tabelle im Anhang** 97% bzw. 93%. Grund dafür ist die CO_2 - Freisetzung bei der Entsäuerung²³ mit einem Anteil von etwa 65% und der energieintensive Sintervorgang²⁴, bei Temperaturen von etwa 1450°C , mit einem Anteil von etwa 35% am gesamten CO_2 - Ausstoß in der Klinkerproduktion.[VOZ2017] Dabei werden für den Brennvorgang zum größten Teil nicht erneuerbare Primärenergien, aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und von Abfällen, aufgewendet. Der Einsatz erneuerbarer Energien oder alternativer Brennstoffe wie, Biogas hätte das Potenzial die Umweltwirkungen der Zementherstellung zu reduzieren.

Einen weiteren wichtigen Beitrag liefert mit etwa 5 - 10% der Transport der primären und sekundären Rohstoffe zu den Transportbetonwerken. Dieser Anteil kann vor allem auf den Einsatz von Lastkraftwagen zurückgeführt werden, da die Umweltwirkungen eines LKWs pro transportierter Tonne und Kilometer (tkm) über jenen von Bahn und Schiff liegen. Der Transport mittels Güterzügen

²³ Als Entsäuerung wird der Vorgang bezeichnet, bei dem der Kalkstein sich in Kohlendioxid und Calciumoxid zerlegt, dies beginnt ab ca. 550°C während des vorwärmens auf etwa 900°C .

²⁴ Der Sintervorgang ist der Brennvorgang in einem Drehrohrofen. Das Erhitzen und anschließende rasche Abkühlen ist notwendig um die hydraulischen Eigenschaften des Klinkers zu erhalten.

4.1. Dominanzanalyse

gen und Schiffen könnte somit den Anteil der transportbedingten Umweltwirkungen reduzieren, ist aber aufgrund der geringen Flexibilität (Hafen oder Bahnhaltestelle notwendig) nicht generell anwendbar. Daher ist es wichtig möglichst kurze Transportdistanzen zu forcieren und regionale Rohstoffe zu verwenden.

Der Abbau und die Aufbereitung von Kies und Sand hat, trotz des hohen Massenanteils in einem Kubikmeter Beton, einen relativ geringen Beitrag von etwa 3 - 5%. Dies hat damit zu tun, dass Kies nicht zwingend aufbereitet werden muss, z.B. bei Schürfungen aus einer Kiesgrube, selbiges gilt für Sande. Sollte eine Aufbereitung erforderlich sein, wird das Gestein abgebaut, gebrochen, gesiebt und sortiert. Diese mechanischen Vorgänge haben im Verhältnis zur Masse des Materials nur geringe Umweltauswirkungen. Zu bedenken ist allerdings der große Verbrauch an Bodenressourcen, daher ist die Entwicklung und der Einsatz von rezyklierbaren Gesteinskörnungen eine gute und umweltschonende Alternative.

Die Energieverbräuche (Strombedarf, Wärmebedarf, Dieselpverbrennung für interne Transporte) haben in Summe etwa einen Anteil von 2 - 5% am GWP. Diese Energien werden für den Mischvorgang, die Beheizung und den Betrieb der Anlage und des Werks sowie allfällige interne Transporte aufgewendet. Der Einsatz von Photovoltaikanlagen zur Stromerzeugung, die wärmetechnische Sanierung der Gebäude oder das Umrüsten auf strombetriebene Fahrzeuge, sind Möglichkeiten den Energieverbrauch zu reduzieren bzw. dessen Umweltwirkungen zu verringern.

Der Beitrag zum GWP von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln kann wegen des geringen Volumensanteils (teilweise kleiner einem Prozent am Gesamtsystem) aufgrund der Abschneidekriterien vernachlässigt werden. Diese Aussage kann nicht generell getroffen werden, sondern ist von den technischen und funktionalen Eigenschaften des Betons abhängig, so sind zum Beispiel die Anteile von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln bei Spritzbeton oder selbstverdichtendem Beton durchaus relevant.

Einen untergeordneten Anteil haben die Betonmischanlage, der Wasserverbrauch, Prozessstoffe und Abfälle. Das Mischwerk und die Gebäude haben, auf die in der Nutzungsdauer produzierte Betonmenge, einen geringen Anteil an den Umweltwirkungen. Gleiches gilt für Prozessstoffe (Schmiermittel, Verschleißteile, Prozesswasser, etc.) und Abfälle, sie haben umgelegt auf die produzierte Betonmenge einen verschwindend kleinen Anteil.

4.2. Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse der vorliegenden Arbeit werden die Änderungen der Ergebnisse durch Variation einzelner Prozesse und Ressourcen untersucht. Es werden in drei Schritten die Auswirkungen durch die Änderung:

1. der Zementart,
2. der Transport EURO - Klasse,
3. des Strom-Mixes,

analysiert und beurteilt. Die Tabelle 4.2 zeigt die Auswertung dieser Sensitivitätsanalyse für ein durchschnittliches Rezept eines XC1 Betons.

Im ersten Schritt wird der Einfluss des Zementklinkers (OPC) untersucht. Im Rezept des XC1-Betons wird der Portlandkompositzement (CEM II/A-M) durch Portlandzement (CEM I) und Hochofenzement (CEM III/A) ersetzt. Die Modellierung der Zementsorten in der Ökobilanzierungssoftware kann in Anhang B in den Tabellen B.6, B.7 & B.8 nachvollzogen werden, die genaue Zusammensetzung aller Normalzementarten nach EN 197 - 1 [EN197-1:2011] findet sich im **Anhang**:. Der Bindemittelgehalt bleibt dabei unverändert, dadurch ist der unmittelbare Einfluss der Art und Menge der Zementstoffe auf die Ergebnisse zu erkennen. Es muss dabei angemerkt werden, dass die Rezepturen mit CEM I und CEM III den Mindestbindemittelgehalt laut ÖNorm B4710 -1 möglicherweise nicht einhalten.

Das Ergebnis zeigt, dass die Umweltauswirkung von CEM I um bis zu 11% größer und jene von CEM III und um bis zu 30% geringer als die Umweltauswirkung von CEM II ist. Diese Unterschiede ergeben sich durch die Anteile und Arten der Zementstoffe.

Tabelle 4.1.: Zusammensetzung und Bezeichnung der verwendeten Zementsorten

Hauptarten	Bezeichnung der Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung (Massenanteil in %)									
			Portlandzementklinker	Hüttensand	Silicastaub	Puzzolan		Flugasche		gebrannter Schiefer	Kalkstein	Nebenbestandteile
						natürlich	natürlich getempert	kleinkörnig	feinkörnig			
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandkompositzement	CEM II/A-M	80-88	-	-	-	-	12-20	-	-	-	0-5
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5

Wie in Tabelle 4.1 ersichtlich, besteht Portlandzement (CEM I) laut EN 197 -1 [EN197-1:2011] zu mindestens 95% aus Portlandzementklinker und zu maximal 5% aus Nebenbestandteilen. Die Hauptbestandteile des CEM II sind neben Portlandzementklinker (80-88%) auch Hüttensand, Silicastaub, Puzzolane, Flugasche, gebrannter Schiefer, Kalkstein und weitere Nebenbestandteilen. Die Bezeichnung entsteht je nach Menge und Art der Bestandteile, wobei die Bezeichnungen A, B & C von den prozentuellen Anteilen abhängt und die Buchstaben S, D, P, Q, V, W, T, L, LL und

4.2. Sensitivitätsanalyse

M den jeweiligen Zumahlstoff definieren. Der Hochofenzement (CEM III/A) ist eine Mischung aus Portlandzementklinker (35-64%), Hüttensand und Nebenbestandteilen.

Manche dieser Stoffe sind Abfälle aus anderen Prozessen oder natürliche Ressourcen und haben somit eine geringe Umweltauswirkung. Der Hüttensand zum Beispiel ist ein Koppelprodukt der Stahlerzeugung, dessen Umweltauswirkungen werden mittels Allokation angerechnet.

Die Substitution des Klinkeranteils durch ökobilanziell bessere Zumahlstoffe ist eine Möglichkeit die Umweltwirkungen zu verringern. Diesem Thema widmet sich auch das Forschungsprojekt ERESCON [Juhart2015], in dem unter anderem der Portlandzementklinker durch Zumahlstoffe und Zusatzstoffe mit geringerem Primärenergiebedarf und GWP substituiert wurde. Weiters untersucht [Ammenberg2015] die Verbesserung der CO₂ - Performance von Zement.

Tabelle 4.2.: Sensitivitätsanalyse für einen Beton XC1

	Zement			Transporte				Strom		
	CEM I	CEM II	CEM III	EURO 6	EURO 5	EURO 4	EURO 3	Österreich	Deutschland	Schweiz
AP	108,14%	100%	78,97%	100%	102,48%	104,33%	107,79%	100%	100,14%	99,46%
EP	107,79%	100%	84,63%	100%	101,93%	103,33%	106,02%	100%	104,05%	97,98%
GWP	111,13%	100%	70,78%	100%	100,10%	100,06%	100,10%	100%	100,44%	99,54%
ODP	103,86%	100%	98,52%	100%	100,46%	100,45%	100,67%	100%	100,01%	101,03%
POCP	109,10%	100%	77,58%	100%	100,69%	100,68%	101,71%	100%	100,17%	99,49%
ADPE	100,92%	100%	98,55%	100%	100,01%	100,01%	100,02%	100%	100,05%	100,00%
ADPF	106,02%	100%	92,85%	100%	100,37%	100,36%	100,54%	100%	101,23%	98,85%
PENRE	106,31%	100%	90,17%	100%	100,27%	100,26%	100,39%	100%	101,21%	100,95%
PERE	105,72%	100%	105,71%	100%	100,01%	100,01%	100,02%	100%	94,37%	96,23%

Legende: >+10,0% +5% bis +10% +5% bis -5% -5% bis -10% >-10%

Sensitivitätsanalyse für 1m3 Beton (XC1)

Im zweiten Schritt werden die Transporte der primären Rohstoffe, Hilfsstoffe und Vorprodukte zum Transportbetonwerk betrachtet. In der Erhebung wurden spezifische Vordergrunddaten jedes Unternehmens für die Entfernung und die Art des Transportmittels angegeben. Keine Angabe wurde zu den EURO - Klassen der eingesetzten Fahrzeuge gemacht. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit die Annahme getroffen, dass der Transport - LKW der EURO 6 - Klasse entspricht. Die Modellierung erfolgt mit dem ecoinvent - Datensatz *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) |transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | Alloc Rec, U*. Zur Beurteilung welche Auswirkungen diese Annahme auf die Ergebnisse haben kann, wurden die EURO 6 - LKWs in der Sensitivitätsanalyse durch EURO 5, EURO 4 und EURO 3 Transporter ersetzt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass sich die LCA - Resultate von EURO 6, 5, 4 und 3 LKWs zwischen 0 - 7% unterscheiden. Für das GWP sind es nur 0,1%, daher ist die Wahl EURO - Klasse im Bezug des GWP nicht relevant. Die geringen Unterschiede entstehen durch die technischen Eigenschaften der LKWs der jeweiligen EURO - Klasse. Nicht untersucht wurde, aufgrund des zu geringen Anteils, die Auswirkungen auf die Ergebnisse durch den Transport per Bahn und Schiff. Der Einsatz von Güterzügen und Schiffen für den Antransport der Rohstoffe kann, wie in Kapitel 4.1 erwähnt, die transportbedingten Umweltwirkungen reduzieren, nötigen geographischen und technischen Bedingungen vorausgesetzt.

Als dritter Teil der Sensitivitätsanalyse wird der Strom-Mix betrachtet. Die für die Ökobilanz betrachteten Transportbetonwerke sind allesamt in Österreich situiert, daher wird in der Bilanzierung davon ausgegangen, dass der österreichische Strom-Mix verwendet wird. Um die in Kapitel 3.3.3 angegebenen LCA - Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Deutschland und der Schweiz, bei gleichen Sachbilanzdaten, vergleichen zu können, wird der Einfluss des Strom-Mixes auf die Ergebnisse analysiert. Zur Berechnung der Unterschiede wird der österreichische Strom-Mix *electricity, medium voltage (AT) | electricity voltage transformation from high to medium voltage | Alloc Rec, U* durch die national spezifischen Energien *electricity, medium voltage (DE) | electricity voltage transformation from high to medium voltage | Alloc Rec, U* für Deutschland und *electricity, medium voltage (CH) | electricity voltage transformation from high to medium voltage | Alloc Rec, U* und die Schweiz ersetzt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass sich die Umweltauswirkungen aufgrund der Zusammensetzung des Strom-Mixes (Deutschland höherer Anteil an Kohle, nuklearer und erneuerbarer Energie, Schweiz höherer Anteil an nuklearer und erneuerbarer Energie) nur geringfügig unterscheiden. Eine genaue Zusammensetzung des Strom-Mixes findet sich in **Anhang**:. Durch die geringen Unterschiede ist ein Vergleich der Umweltwirkungen, bei gleichen Sachbilanzdaten, für Österreich, Deutschland und die Schweiz durchaus zulässig.

4.3. Repräsentativität der Rezepte

Diese Untersuchung dient zur Beurteilung, ob die durch die Datenerhebung abgefragten Rezepte der Expositionsclassen und Betonsortenkurzbezeichnungen zu repräsentativen Ergebnissen führen. Dazu sind die LCA - Ergebnisse aller relevanten XC1 - Betonrezepturen (18 Rezepte) eines Unternehmens, diese entsprechen in Summe 80% der Jahresproduktionsmenge an XC1-Beton des Unternehmens, mit den Ergebnissen der XC1 - Rezepturen (13 Rezepte) der anderen sechs Unternehmen in Abbildung 4.3 verglichen. Zur Beurteilung der Repräsentativität wird das GWP herangezogen, alle weiteren Ergebnisse finden sich im Anhang F. Der linke Boxplot zeigt als Ergebnis, den Median, Mittelwert und die Spannweite der 18 XC1 - Betonrezepturen eines Unternehmens. Im mittleren Boxplot sind die Werte der 13 XC1 - Betonrezepturen von den übrigen teilnehmenden Unternehmen abgebildet. Der rechte Boxplot wird durch die Ergebnisse aller XC1 - Rezepte gebildet.

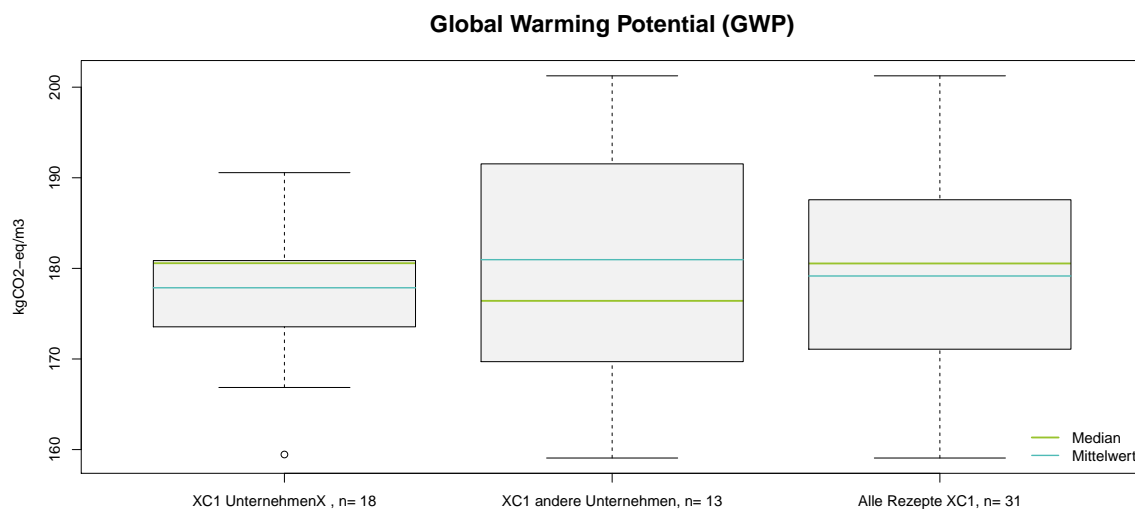


Abbildung 4.3.: Analyse von XC1 Rezepten (GWP)

Als Ergebnis dieser Untersuchung geht hervor, dass die Spannweite der Ergebnisse zwar im ersten Boxplot größer ist als jene im zweiten, der Mittelwert und der Median aber beide im Bereich von 180 kgCO₂-äq. ± 3 kgCO₂-äq. liegen. Die Spannweite der Ergebnisse des genauer untersuchten Unternehmens liegt bei $\pm 6\%$ und jene der anderen Unternehmen bei $\pm 11\%$. Im Hinblick auf die Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse (siehe Kapitel 4.7) bei der eine Standardabweichung von $\pm 17\%$, aufgrund der Datenunsicherheit der Hintergrunddaten, berechnet wurde, wird eine detailliertere Erhebung der Sachbilanzdaten als nicht sinnvoll erachtet. Der hohe Aufwand einer genaueren Erhebung der Sachbilanzdaten ist aufgrund der Unsicherheiten der Hintergrunddaten nicht gerechtfertigt. Durch diese Ergebnisse kann von einer ausreichenden Genauigkeit der Sachbilanzdaten ausgegangen werden.

4.4. Druckfestigkeitenvergleich

Anmerkung: In folgendem Kapitel ist mit dem Begriff der „Festigkeit“ immer die Betondruckfestigkeit laut ÖN B4710 - 1 zu verstehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Einordnung der Ergebnisse in die Literatur (siehe Kapitel 4.8) die Druckfestigkeiten der Betonrezepturen genauer betrachtet. Es wird dabei zwischen drei Festigkeiten unterschieden:

- **indikative Druckfestigkeit**
 - Bei Einhaltung des laut ÖN B4710 - 1 [ONB4710-1:2015] geforderten Mindestbindemittelgehalts, des maximalen Wasser- / Bindemittelwerts (W/B - Wert), des Mindestluftgehalts sowie Anforderungen an die Gesteinskörnung und die Bindemittelauswahl, ergibt sich je nach Expositionsklasse (außer X0) und Betonsortenkurzbezeichnung eine mit Sicherheit erreichte Druckfestigkeitsklasse, die als indikative Druckfestigkeit bezeichnet wird.
- **angegebene Druckfestigkeit**
 - Als angegebene Druckfestigkeit wird in dieser Arbeit jene Festigkeit bezeichnet, die von den Transportbetonwerken auf jedem Rezept angegeben und zugesichert wird.
- **erwartete Druckfestigkeit**
 - Unter der zu erwartenden Druckfestigkeit wird jene Festigkeit bezeichnet, die aufgrund des W/B - Werts, der Zementfestigkeitsklasse (CEM 32,5 | CEM 42,5 | CEM 52,5) und der genormten Lagerbedingungen laut ÖN B4710 - 1 mittels Walz-Kurve berechnet und in Wirklichkeit erreicht wird.

In Abbildung 4.4 sind die Druckfestigkeiten als Korrelationsdiagramm dargestellt. Auf der Abszisse sind die von den Herstellern angegebenen und auf der Ordinate die zu erwartenden Druckfestigkeiten aufgetragen. Liegt der Punkt exakt auf der Diagonale, stimmen die beiden Festigkeiten überein. Ist der Punkt über der Diagonale, ist eine höhere Druckfestigkeit des Betons zu erwarten, als vom Herstellern angegeben. Auf der Diagonale verteilt liegen die laut Norm definierten indikativen Festigkeiten jeder Betonsorte. Die Anordnung der Werte (Punkte) als Parallele dient ausschließlich der Darstellung, jeder Punkt innerhalb eines Rasterquadrats hat dieselbe angegebene und zu erwartende Druckfestigkeit.

4.4. Druckfestigkeitenvergleich

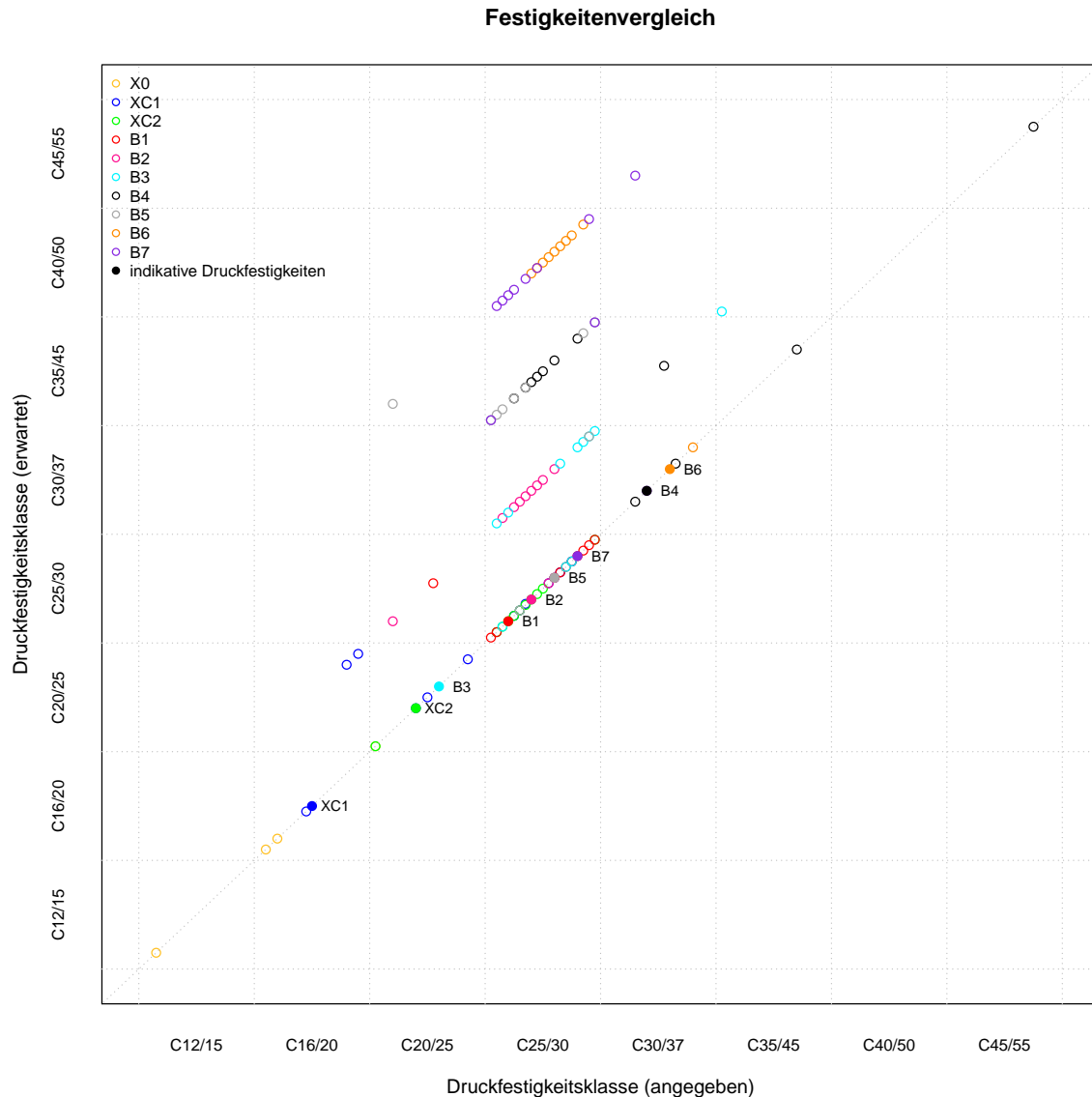


Abbildung 4.4.: Vergleich der Druckfestigkeiten

Es ist zu erkennen, dass von mehreren Rezepturen eine höhere Druckfestigkeit erwartet wird, als angegeben. Speziell die Angabe der Druckfestigkeitsklasse C 25/30 wird häufig überschritten. Dies hat vor allem damit zu tun, dass die Transportbetonwerke mehr Bindemittel in den Rezepturen verwenden, als laut ÖNorm B 4710 - 1 vorgeschrieben ist. Dies dient einerseits zur Absicherung der Unternehmen, dass die angegebene Druckfestigkeitsklasse mit Sicherheit erreicht wird. So wird aufgrund von Ungenauigkeiten in der Wiegevorrichtung, der Feuchtegehaltsmessung und anderen, zur Gewährleistung des maximalen W/B - Werts mehr Bindemittel beigegeben. Andererseits ist der Bindemittelgehalt von der Verwendung des Größtkorns (GK) der Gesteinskörnung abhängig. Wird aufgrund der Einbaubedingungen des Betons die Verwendung eines kleineren GK vorgeschrieben (GK16 statt GK32), so entsteht eine größere Oberfläche, die vom Zementleim umschlossen werden muss. Zur Bildung des benötigten Zementleims ist ein

höherer Bindemittelgehalt erforderlich. Die meisten in der Abbildung 4.4 dargestellten Rezepte, bei denen eine höhere Druckfestigkeit erwartet wird, ist das GK kleiner als bei den anderen Rezepten.

Diese Abweichung der zu erwartenden Druckfestigkeit von der angegebenen Druckfestigkeit hat zur Folge, dass die in Kapitel 4.8 verglichenen Umweltwirkungen von Beton nicht eindeutig zugeordnet werden können. Da in den bestehenden EPDs keine genauen Angaben bezüglich der Art der Druckfestigkeit (erwartete, angegebene oder indikative) gemacht werden. Ebenso zeigt dieses Ergebnis, dass die Definition der deklarierten Einheit über die Druckfestigkeitsklasse nicht ideal ist. Die Berechnung der Ergebnisse aufgrund der geforderten Expositionsklassen, durch die genaue Beschreibung des Beton bezüglich seiner funktionalen und technischen Eigenschaften, hingegen realistischere Ergebnisse liefert. Um dennoch einen Vergleich der in dieser Arbeit berechneten Ergebnisse zu ermöglichen, werden die LCA - Resultate den von den Unternehmen angegebenen Druckfestigkeitsklassen zugeordnet, da das Produkt Beton mit der Angabe dieser Druckfestigkeitsklasse dem Kunden verkauft wird.

4.5. Korrelationsanalyse ecoinvent v.2.2 & v.3.3

Mit der Methode der Korrelationsanalyse werden die Ergebnisse der ecoinvent Datenbank von Version v.2.2 & v.3.3 miteinander verglichen. Diese Analyse dient zur Beurteilung der Auswirkungen von unterschiedlichen Hintergrunddaten auf die Ergebnisse. Die Unterschiede dieser beiden Versionen liegen sowohl in der Aktualisierung der Hintergrunddaten, sowie neuen Datensätzen und der Verknüpfung von globalen Lieferketten. Genauere Angaben zu Unterschieden finden sich in den Publikationen von [Wernet2016], [Steubing2016] & [Hellweg2016] sowie auf der Homepage²⁵ des Datenbankbetreibers ecoinvent.

Zur Analyse der Auswirkungen auf die Ergebnisse, aufgrund der Unterschiede in den Datenbanken wurden alle Rezepte mit Hintergrunddaten aus ecoinvent v.2.2 & v.3.3 berechnet. Die Sachbilanzdaten blieben dabei unverändert, ebenso wurde die selbe LCIA - Methode zur Berechnung verwendet. Die LCA - Ergebnisse beider Datenbanken wurden mit Hilfe einer Software (R) zur statistische Auswertung hinsichtlich ihrer Korrelation untersucht. Es werden dabei die direkten Unterschiede der Ergebnisse, sowie die Unterschiede von Median, Mittelwert und allen Werten dargestellt.

Die Interpretation der Korrelationsanalyse erfolgt über die Ergebnisse für das GWP, siehe Abbildung 4.5, und den Ressourcenverbrauch an erneuerbarer Primärenergie (PERE), siehe Abbildung 4.6. Alle weiteren Ergebnisse finden sich im Anhang G.

Wie in Abbildung 4.5a) zu erkennen ist, weisen die Ergebnisse mit den Hintergrunddaten der Datenbank aus ecoinvent v.2.2 einen größeren CO₂-Äq. - Ausstoß auf als jene der v.3.3. In den Abbildungen 4.5b), c) und d) ist die Korrelation der Ergebnisse dargestellt. Die Steigung der Abweichungen nimmt mit der Erhöhung der technischen und funktionalen Anforderung an den Beton und somit durch einen höheren Bindemittelgehalt zu. Erkennbar ist dies dadurch, dass die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen v.2.2 und v.3.3 für X0 - Betone (gelbe Punkte) geringer sind als für B7 - Betone (violette Punkte). Ein Grund für diese Abweichungen zwischen den Ergebnisse von v.2.2 und v.3.3 könnte die Änderung des Strom-Mixs und anderer Prozesse in den beiden Datenbanken sein. Die Abweichungen der Mediane (Abbildung 4.5b)) und der Mittelwerte (Abbildung 4.5c)) sind in der selben Größenordnung, was auf eine gute Repräsentativität der beiden statistischen Kennzahlen schließen lässt.

²⁵<http://www.ecoinvent.org/database/database.html>; Zugriff am: 14.08.2017

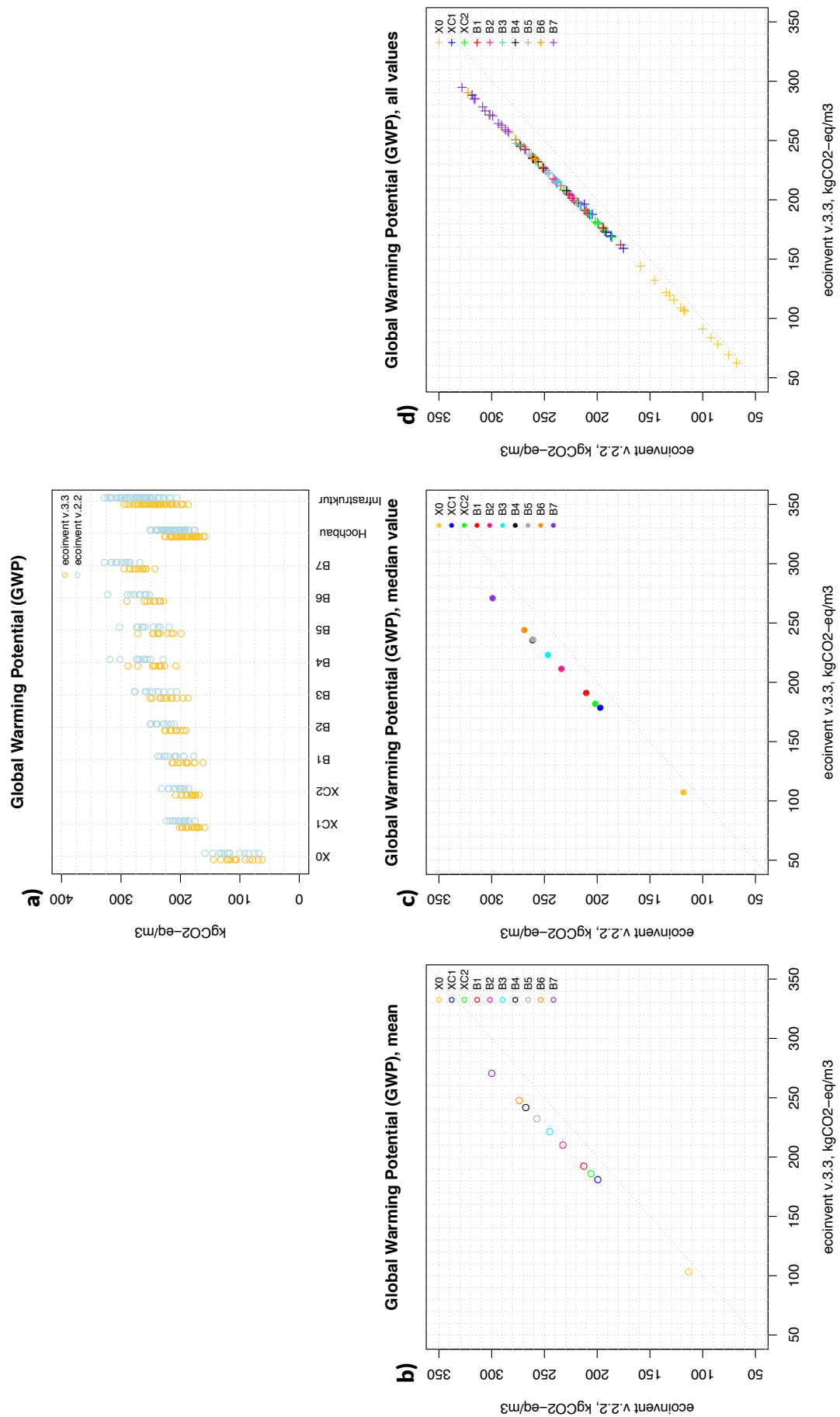


Abbildung 4.5.: Ergebnis der Korrelationsanalyse (GWP)

4.5. Korrelationsanalyse ecoinvent v.2.2 & v.3.3

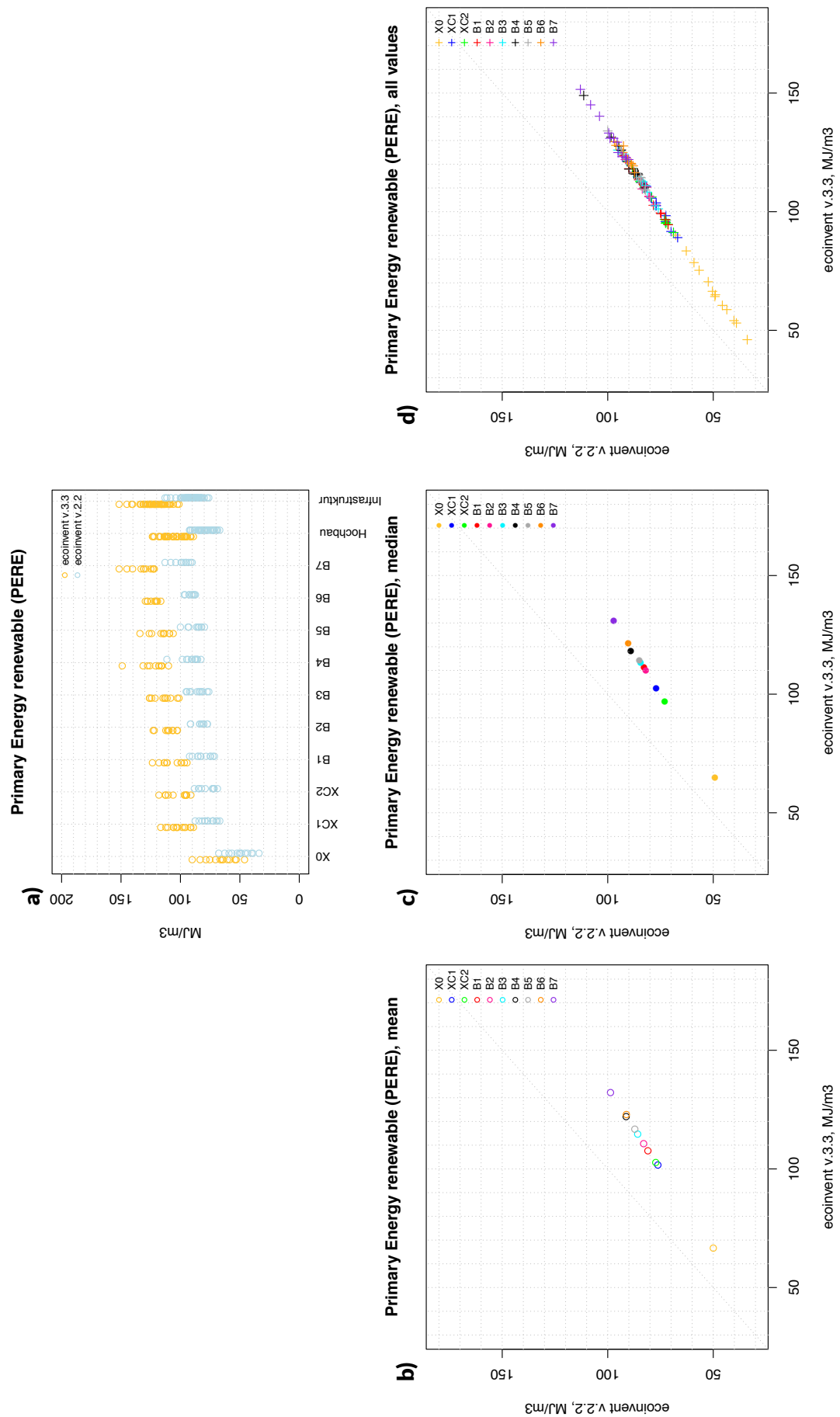


Abbildung 4.6.: Ergebnis der Korrelationsanalyse (PERE)

Die Abbildung 4.6a) zeigt, dass die Ergebnisse mit den Hintergrunddaten der Datenbank aus ecoinvent v.3.3 einen größeren PERE aufweisen als die Ergebnisse mit v.2.2. In den Abbildungen 4.6b), c) und d) sind die Korrelationsdiagramme abgebildet. Darin ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der beiden Hintergrunddaten für den PERE mit steigendem Bindemittelgehalt weiter von einander abweichen. Der höhere Anteil an PERE hat vor allem mit der Veränderung des Strom-Mixes zu tun. In den letzten Jahren hat sich durch die Forcierung der erneuerbaren Energie der Strom-Mix stark verändert und so ist der Anteil der erneuerbaren Energien gewachsen. Dies wurde auch in der Aktualisierung der Datenbank in der v.3.3 angepasst.

Die Änderung der Ergebnisse durch die unterschiedlichen Hintergrunddaten ist nicht für jeden Umweltparameter gleich und in vielen Fällen schwer nachzuvollziehen. Im Anhang G sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse der weiteren Umweltparameter dargestellt, diese zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Eine tiefergehende Betrachtung der Unterschiede ist daher durchaus sinnvoll, wird im Rahmen dieser Arbeit aber nicht durchgeführt. Zu einem anderen Ergebnis kommt Steubing et al. [Steubing2016], der die Auswirkungen auf die Ergebnisse von Hintergrunddaten der v.2.2 und v.3.1 untersucht hat. Laut seinen Berechnungen entsteht durch die Daten der v.3.1 ein um etwa 8% höheres GWP.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass ein nicht unerheblicher Einfluss auf die Ergebnisse durch die Wahl des Datensatzes vorliegt. Um die Nachvollziehbarkeit einer Ökobilanz zu gewährleisten ist eine transparente Darlegung aller verwendeten Hintergrunddaten und die dazugehörige Datenbank unerlässlich. Für die Einordnung der Ergebnisse in die Literatur gilt daher, dass aufgrund unterschiedlicher Datenbanken und Versionen, Unterschiede in den Umweltwirkungen entstehen können.

4.6. Vergleich unterschiedlicher LCIA-Methoden

4.6. Vergleich unterschiedlicher LCIA-Methoden

In folgendem Kapitel sollen zur Einordnung der Ergebnisse in die Literatur und zur Abschätzung der unterschiedlichen LCIA - Methoden die in den EPDs verwendet werden, die Unterschiede quantifiziert werden.

Für die vorliegende Arbeit fasst eine eigenen LCIA - Methode (EPD2017) die aktuellsten Charakterisierungsmodelle zusammen. Um einen Vergleich herzustellen, wurden die Umweltwirkungen von einem Kubikmeter XC1 - Beton mit den verschiedenen LCIA - Methoden berechnet und die prozentuellen Unterschiede dargestellt.

Die Tabelle 4.3 zeigt die Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen LCIA - Methoden. Die hier verglichenen Methoden beinhalten unterschiedliche Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung der Wirkungskategorien. Die Charakterisierungsmodelle sind in Kapitel 2.1.5 in Tabelle 2.3 angegeben.

Tabelle 4.3.: Vergleich der Ergebnisse²⁶ unterschiedlicher Charakterisierungsmethoden

Wirkungskategorie	Kürzel	Einheit	CML	EPD2013	EN15804:2012+A1:2013	ILCD	CED v.1.09	EPD2017
Abiotic depletion	ADPE	kg Sb eq	0,0%	0,0%	0,0%	-	-	0,0%
Abiotic depletion (fossil fuels)	ADPF	MJ	0,0%	0,0%	0,0%	-	-	0,0%
Global warming (GWP100a)	GWP	kg CO ₂ eq	0,0%	0,0%	-0,4%	4,7%	-	0,0%
Ozone layer depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	0,0%	0,0%	0,0%	-0,006%	-	0,0%
Human toxicity		kg 1,4-DB eq	0,0%	-	-	-	-	0,0%
Fresh water aquatic ecotox.		kg 1,4-DB eq	0,0%	-	-	-	-	0,0%
Marine aquatic ecotoxicity		kg 1,4-DB eq	0,0%	-	-	-	-	0,0%
Terrestrial ecotoxicity		kg 1,4-DB eq	0,0%	-	-	-	-	0,0%
Photochemical oxidation	POCP	kg C ₂ H ₄ eq	0,0%	0,0%	0,0%	-	-	0,0%
Acidification	AP	kg SO ₂ eq	0,0%	13,3%	13,3%	-	-	0,0%
Eutrophication	EP	kg PO ₄ --- eq	0,0%	0,0%	0,0%	-	-	0,0%
Primary energy non-renewable, excl. raw mat.	PENRE	MJ eq	-	-	-	-	8,2%	0,0%
Primary energy non-renewable, raw mat.	PENRM	MJ eq	-	-	-	-	-	-
Primary energy renewable, excl. raw mat.	PERE	MJ eq	-	-	-	-	0,0%	0,0%
Primary energy renewable, raw mat.	PERM	MJ eq	-	-	-	-	-	-
Use of net fresh water	FW	m ³	-	-	-	-	-	0,0%
Hazardous waste disposed	HWD	kg	-	-	-	-	-	0,0%
Non hazardous waste disposed	NHWD	kg	-	-	-	-	-	0,0%
Radioactive waste disposed	RWD	kg	-	-	-	-	-	0,0%
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh		-	-	-	Nicht vergleichbar, da in EPD2017 nicht berechnet	-	-
Human toxicity, cancer effects	CTUh		-	-	-		-	-
Particulate matter	kg PM _{2.5} eq		-	-	-		-	-
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq		-	-	-		-	-
Ionizing radiation E (interim)	CTUe		-	-	-		-	-
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq		-	-	-		-	-
Acidification	molc H ⁺ eq		-	-	-		-	-
Terrestrial eutrophication	molc N eq		-	-	-		-	-
Freshwater eutrophication	kg P eq		-	-	-		-	-
Marine eutrophication	kg N eq		-	-	-		-	-
Freshwater ecotoxicity	CTUe		-	-	-		-	-
Land use	kg C deficit		-	-	-		-	-
Water resource depletion	m ³ water eq		-	-	-		-	-
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq		-	-	-		-	-

Legende: höhere Umweltwirkung geringere Umweltwirkung

Es ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse je nach Umweltparameter unterscheiden. Für das GWP sind die kgCO₂äq. - Ausstöße bei der Methode des ILCD um etwa 4,7% Prozent größer als jene der Methode EPD2017. Unterschiede zeigen sich auch in den Ergebnissen des Versauerungspotenzials (AP) und dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PENRE). Ein besonders zu erwähnendes Ergebnis sind die Unterschiede der Methoden auf Basis der EN

²⁶Die absoluten Werte können aufgrund der Vertraulichkeit der Daten nicht angegeben werden.

15804 und der ILCD, denn beide verwenden zur Berechnung des GWP das Charakterisierungsmodell des IPCC - Reports 2007, trotzdem unterscheiden sich die Ergebnisse. Eine genauere Untersuchung ergab, dass in der publizierten Norm EN 15804 einige Rundungsfehler bei den Charakterisierungsfaktoren enthalten sind.

Für die Einordnung der Ergebnisse in die Literatur kann gesagt werden, dass die LCIA - Methoden die Ergebnisse der Ökobilanz beeinflussen und daher Unterschiede entstehen können.

4.7. Monte-Carlo Analyse

Die in diesem Kapitel angewendete Monte-Carlo Simulation ist eine numerische Methode zur Quantifizierung der Unsicherheiten in den Hintergrunddaten. Innerhalb des LCI werden die Inputs und Outputs durch einzelne Werte beschrieben. Diese quantitative Beschreibung der Einheitsprozesse beinhalten aufgrund der Verwendung von Mittelwerten gewisse Unsicherheiten. [Frischknecht2007] Oft kann die Unsicherheit des Mittelwerts nicht aus den vorhandenen Information abgeleitet werden, da es nur eine Informationsquelle gibt. Um diese Werte dennoch zu quantifizieren wird mit Hilfe der Pedigree - Matrix die Datenqualität von Experten qualitativ bewertet. [Weidema1996] Die Datenquellen werden bezüglich sechs Eigenschaften bewertet, diese sind Datensicherheit, Vollständigkeit der Daten, zeitliche, geografische und technische Repräsentativität und die Anzahl der Stichproben. Jede der Eigenschaften wird hinsichtlich des Qualitätsniveaus mit eine Wert von 1 bis 5 beurteilt, dadurch entsteht ein Vektor der zur Monte-Carlo Simulation verwendet wird. [Frischknecht2007]

Die Monte-Carlo Simulation wird in der Ökobilanzierungssoftware SimaPro 8 durchgeführt. Diese bietet vier verschiedene Unsicherheitsverteilungen zur Auswahl, die rechteckige Verteilung, die dreieckig Verteilung, die Normalverteilung und die logarithmische Normalverteilung. Für die in dieser Arbeit durchgeführte Monte-Carlo Simulation wird die von SimaPro für Einheitsprozesse empfohlene Log-Normalverteilung angewendet. Zur Berechnung der Unsicherheiten werden die aus der Pedigree - Matrix stammenden Parameter per Zufall variiert, diese Iteration wird in 10.000 Schritten wiederholt um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen.

Die Abbildung 4.7 zeigt das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation aller Expositionsclassen und Betonsortenkurzbezeichnungen für das GWP. Die Höhe des Balken repräsentiert den Mittelwert aller berechneten Ergebnisse. Die Fühler geben die prozentuelle Standardabweichung vom Mittelwert an. Der gelbe Punkt zeigt die 2,5% - Fraktile, d.h. 97,5% der Ergebnisse liegen **über** diesem Wert, und der blaue Punkt zeigt die 97,5% - Fraktile, d.h. 97,5% der Ergebnisse liegen **unter** diesem Wert.

In der Darstellung ist zu erkennen, dass die Standardabweichung im Bereich von $\pm 13\%$ bis $\pm 18\%$ liegt. Diese Unterschiede entstehen durch die Parameter der Datenqualität in der Pedigree - Matrix. So werden für den Beton B6 die Zementsorten CEM I, CEM II/A-M und CEM III/A verwendet, aufgrund deren unterschiedlicher Zusammensetzung und damit unterschiedlicher Datenqualität entsteht eine größere Unsicherheit in den Ergebnisse. Für den Beton B5 und B7 wird beinahe in allen Rezepturen die Zementsorte CEM II/A-M verwendet, daher die geringere Standardabweichung. Die weiteren Ressourcen- und Energieströme haben aufgrund der Dominanz des Zements in den Umweltwirkungen nur geringe Auswirkungen auf die Standardab-

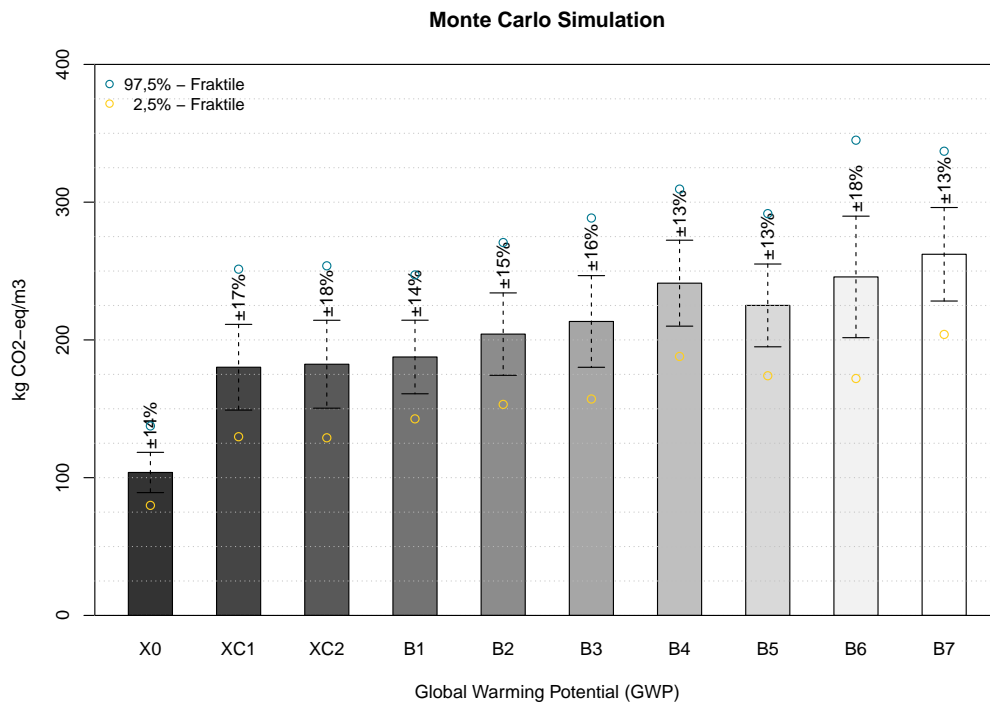


Abbildung 4.7.: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation (GWP)

weichung. Um die Standardabweichung zu verkleinern und dadurch eine größere Sicherheit in den Ergebnisse zu erlangen, muss die Datenqualität der Hintergrunddaten verbessert werden. Im Hinblick auf das Kapitel 2.4 kann gesagt werden, dass die Sachbilanzdaten mit einer Spannweite von $\pm 11\%$ bei XC1 - Betonen, aufgrund der Standardabweichung von $\pm 17\%$, mit ausreichender Genauigkeit erhoben wurden. Eine genauere Erfassung der unternehmensspezifischen Daten ist nicht zielführend, da die Unsicherheiten in den Hintergrunddaten damit nicht verbessert werden und somit die Standardabweichung unbeeinflusst bleibt. Verringert kann die Standardabweichung nur mit der Verbesserung der Datenqualität der Hintergrunddaten, also einer Änderung der qualitativen Bewertung der Datenqualität in der Pedigree - Matrix. Ökobilanzen werden aufgrund der großen Anzahl an Prozessen, die unmöglich für alle Bilanzen erhoben werden können, immer Unsicherheiten aufweisen. Daher sind auch die Ergebnisse der EPDs, abhängig von der verwendeten Datenbank, mit Standardabweichungen behaftet. Diese werden jedoch nicht in den Umweltproduktdeklarationen angeführt.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation für die weiteren Umweltparameter sind in Anhang H dargestellt. Diese zeigen, abhängig vom Umweltparameter, Standardabweichungen von bis zu $\pm 38\%$, was auf hohe Unsicherheiten in den Hintergrunddaten schließen lässt.

4.8. Einordnung in die Literatur

Das Ergebnis der Auswertung der Recherche nach LCA - Ergebnissen für Transportbeton ist für das GWP in Abbildung 4.8 dargestellt. Die einzelnen Punkte repräsentieren die Umweltwirkungen pro m³ Transportbeton, der jeweiligen Druckfestigkeitsklasse. Jedes Symbol stellt dabei eine andere Datenquelle dar, siehe Legende.

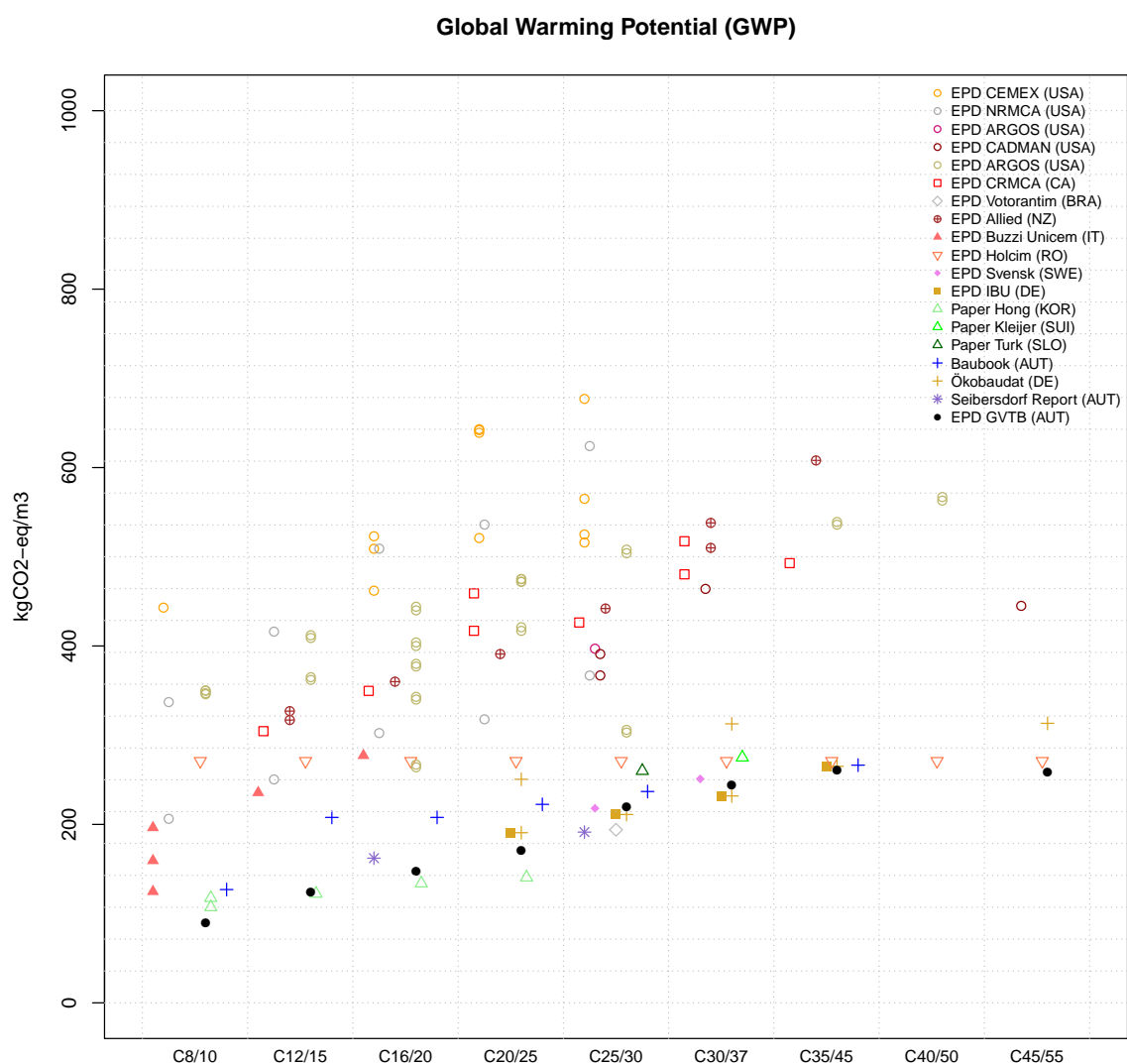


Abbildung 4.8.: Einordnung der Ergebnisse in die Literatur (GWP)

Ziel dieser Auswertung, der in der Literatur veröffentlichten Ökobilanzergebnisse, ist es, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten LCA - Ergebnisse einordnen zu können. Dazu wurden die Ergebnisse jeder Rezeptur in die vom Unternehmen angegebenen Druckfestigkeitsklasse einge-

ordnete und das arithmetische Mittel aller Ergebnisse gebildet. Dieser Mittelwert repräsentiert die Umweltwirkung der jeweiligen Druckfestigkeitsklasse.

In der Darstellung kann erkannt werden, dass die Umweltwirkung mit der Zunahme der Druckfestigkeitsklasse steigt. Grund dafür ist der steigende Bindemittelgehalt für höhere Druckfestigkeitsklassen. Weiters ist ersichtlich, dass die Werte innerhalb einer Druckfestigkeitsklasse eine Streuung aufweisen. Für diese Unterschiede gibt es mehrere Ursachen, die sein können:

- Definition der funktionalen / deklarierten Einheit
 - Auf Basis welcher funktionale / deklarierten Einheit wird das Produkt ökobilanziert?
- Wahl der Systemgrenze
 - Wie wird die Systemgrenze definiert? Welche Prozess- und Energieströme werden bilanziert?
- Erhebung der Sachbilanzdaten
 - Wie sieht die Sachbilanz für das deklarierte Produkt aus? Ist eine Repräsentativität des LCI gegeben?
- Wahl der Abschneidekriterien
 - Welche Abschneidekriterien werden festgelegt? Wie wird mit Datenlücken umgegangen?
- Wahl der Vordergrunddaten
 - Werden dafür die Ergebnisse der Sachbilanz herangezogen oder Daten aus Datenbanken verwendet?
- Wahl der Hintergrunddaten
 - Welche Datenbank wird verwendet? Sind die Daten für das Produkt repräsentativ? Welcher Strom-Mix wird verwendet. Wie aktuell sind die Hintergrunddaten?
- Wahl der Allokationsmethode
 - Welche Allokationsmethode wird angewendet? Wie werden Koppelprodukte und recyclingfähige Materialien berücksichtigt?
- Wahl der Charakterisierungsmethode
 - Welche Wirkungskategorien sollen bilanziert werden? Welche Einheit zur Angabe der Ergebnisse wird verwendet? Wie aktuell sind die Charakterisierungsfaktoren der LCIA - Methode?

Wie ersichtlich, sind zum Vergleich der EPDs viele Annahmen, die vom Bilanzierer getroffen werden bzw. von den nationalen PCRs vorgeschrieben sind, berücksichtigt werden. Nicht alle dieser Annahmen sind in den veröffentlichten EPDs dargestellt, daher ist die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse schwierig. Trotz der großen Unterschiede in den Annahmen werden die Ergebnisse in der Abbildung 4.8 miteinander verglichen.

4.8. Einordnung in die Literatur

Es ist zu erkennen, dass die eigenen Ergebnisse (schwarze Punkte), vor allem mit den Ergebnissen übereinstimmen, die auf Basis der gleichen Normen bilanziert wurden. Bedenkt man die Standardabweichung der Ergebnisse, aufgrund der Unsicherheiten in den Hintergrunddaten, von bis zu $\pm 18\%$ kann von einer guten Übereinstimmung der Ergebnisse ausgegangen werden. Die Einordnung der Ergebnisse der weiteren Umweltparameter (siehe Anhang I), zeigen zum Teile große Unterschiede in den Ergebnissen. Zurückzuführen sind diese vor allem auf die Verwendung der Datenbank und die LCIA - Methode. Die Datenbank ecoinvent v.3.3 wurde in keiner der ausgewerteten EPDs verwendet, daher sind die Unterschiede in den Ergebnisse auf diese Tatsache zurückzuführen. Ebenso die eigens erstellte LCIA - Methode mit den aktuellsten Charakterisierungsmodellen trägt zu den Unterschieden bei.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit der Zunahme der Druckfestigkeit der CO_2 - Ausstoß steigt. Grund dafür ist der steigende Bindemittelgehalt für höhere Druckfestigkeitsklassen. Bestätigt wird dieses Ergebnis von [Habert2009] und [Damineli2010]. Um einen fairen Vergleich zu ermöglichen muss die Funktion bzw. der Anwendungsbereich des Betons berücksichtigt werden. Daher wird in Kapitel 4.9 die Umweltwirkung unter Berücksichtigung der Druckfestigkeit verglichen. Diese zeigt, dass in vielen Fällen der Nutzen der Festigkeitszunahme die Zunahme der THG - Emissionen übertrifft und ein kohärentes Umweltprofil der untersuchten Rezepturen besteht.

4.9. Funktionaler Äquivalenzvergleich

Die in diesem Kapitel angewandte Methode zum Vergleich der Ergebnisse beruht auf der funktionalen Anforderung an den Beton. Dazu wurden die Umweltwirkungen für die deklarierte Einheit von einem Kubikmeter Transportbeton jeder Rezeptur durch die von den Unternehmen angegebene Würfeldruckfestigkeit²⁷, laut ÖNorm B 4710 - 1 dividiert.

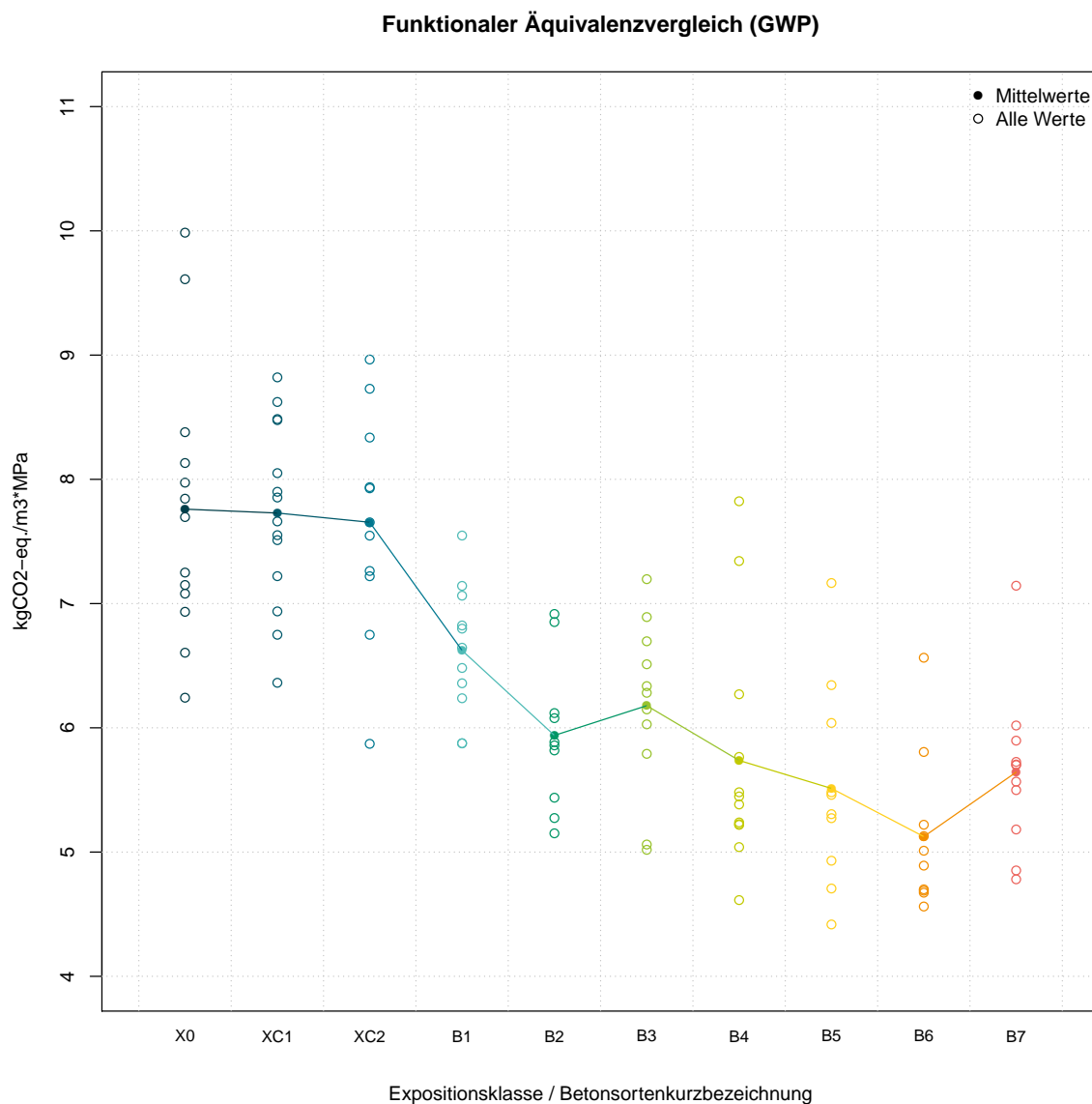


Abbildung 4.9.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (GWP)

²⁷Die Würfeldruckfestigkeit, ist die charakteristische Mindestdruckfestigkeit eines Betonwürfels mit einer Kantenlänge von 150mm und einer Lagerung von 28 Tagen laut ON 23303. Bei der Angabe der Druckfestigkeitsklasse von z.B. C8/10, entspricht der Wert 10 der char. Mindestdruckfestigkeit von Würfeln mit 10 N/mm², wobei 1 N/mm² einem Megapascal (1 MPa) entspricht.

4.9. Funktionaler Äquivalenzvergleich

Daraus ergibt sich je nach Umweltparameter der Charakterisierungsfaktor pro m^3 und MPa. Dieser Indikator wird auch von [Damineli2010] zur Darstellung der Ergebnisse verwendet. Zur Interpretation der Ergebnisse wird das GWP herangezogen, die Ergebnisse der weiteren Umweltparameter finden sich im Anhang J.

Wie in Abbildung 4.9 zu erkennen ist, sind auf der Abszisse die Expositionsclassen bzw. Beton-sortenkurzbezeichnungen aufgetragen und auf der Ordinate die dazugehörigen Ergebnisse in $\text{kgCO}_2\text{äq./m}^3\text{MPa}$ als Kreise dargestellt. Die Punkte repräsentieren den Mittelwert der jeweiligen Werte, diese sind miteinander verbunden um einen Trend ablesen zu können.

Wie dargestellt sinken das GWP mit Zunahme der technischen und funktionalen Anforderungen an den Beton. Dies hat mehrere Gründe, die vor allem mit der Beeinflussung der Druckfestigkeit zu tun haben. Die Druckfestigkeit ist im wesentlichen von fünf Faktoren abhängig, die sind:

1. W/B - Wert

- Der W/B - Wert ist der Hauptfaktor zur Beeinflussung der Druckfestigkeit des Betons. Zur vollständigen Hydratation von 1 kg Bindemittel sind in etwa 0,4 kg Wasser erforderlich, somit ergibt sich einen W/B - Wert von 0,4. Das bedeutet, dass sich keine mit Wasser gefüllten Poren im Zementstein bilden. Durch höhere W/B - Werte steigt die Anzahl der Poren, diese senken die Druckfestigkeit des Betons.

2. Zementfestigkeitsklasse

- Die Zementfestigkeitsklasse (CEM 32,5 | CEM 42,5 | CEM 52,5) ist abhängig von der Mahlfineinheit des Zements. So erreicht ein feinerer Zement (CEM 52,5) aufgrund der größeren Oberfläche eine höhere Festigkeit als ein gröberer Zement (CEM 32,5).

3. Luftporengehalt

- Ein höherer Luftporengehalt des Betons, bedeutet eine größere Porosität des Zementsteins, dadurch wird die Druckfestigkeit gesenkt.

4. Gesteinskörnung

- Die Festigkeit der Gesteinskörnung ist erst im Einsatz bei hochfesten Betonen (HPC) und ultrahochfesten Betonen (UHPC) von Bedeutung. Durch die Wasserinanspruchnahme der Gesteinskörnung, die je nach Art des unterschiedlich ausfällt, kann der W/B - Wert beeinflusst werden und damit indirekt die Druckfestigkeit des Betons.

5. Zusatzmittel

- Durch die Zugabe von größeren Mengen an Fließmittel kann der Anfang der Erhärtungsphase beeinflusst werden, diese haben jedoch keinen Einfluss auf die endgültige Druckfestigkeit des Betons.

Weiters kann die Druckfestigkeit durch Microfüller, wie fein aufgemahlene Gesteinsmehle und

Hüttensande, verbessert werden. Diese kommen in den untersuchten Rezepten allerdings nicht zur Anwendung.

So kann zu Abbildung 4.9 gesagt werden, dass bei X0, XC1 und XC2 - Betonen vor allem durch den hohen W/B - Wert (X0 bis ca.1,5, XC1 & XC2 zwischen 0,59 - 0,68) eine niedrigere Druckfestigkeit erreicht wird, die aufgrund des Bindemittelgehalts jedoch wesentlich höher sein könnte. Dadurch sind die Umweltwirkungen pro $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}$ deutlich größer als bei Betonen mit niedrigerem W/B - Werten. Dies zeigt auch die Darstellung, denn mit der Verringerung des W/B - Werts (B1 ca. 0,58, B2 & B3 ca. 0,53, B4 & B5 zwischen 0,43 - 0,48, und B6 & B7 ca.0,43) sinkt auch die Umweltwirkung je $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}$. Der absolut niedrigste Wert ist mit $4,4 \text{ kgCO}_2\text{äq./m}^3 \cdot \text{MPa}$ ein Beton B5, der durch einen geringen Zementanteil und einen niedrigen W/B - Wert eine hohe Festigkeit erreicht.

Der Einfluss der Zementfestigkeitsklasse kann nur begrenzt dargestellt werden, da in beinahe allen Rezepturen CEM 42,5 und CEM 52,5 in keinem verwendet wird. Der CEM 32,5 wird nur in wenigen Rezepten verwendet, die Ergebnisse liegen im oberen Bereich, dies lässt darauf schließen, dass die Produktion feiner Zemente bis zu einem gewissen Grad der Feinheit nur geringe zusätzlich Umweltwirkungen erzeugt, die Druckfestigkeit dadurch jedoch deutlich erhöht werden kann.

Über den Anteil des Luftporengehalts, der Gesteinskörnung und die Zusatzmittel kann in dieser Darstellung keine Aussage getroffen werden.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt [Damineli2010], der angibt, dass bei zunehmender Druckfestigkeit der $\text{kgCO}_2\text{äq./m}^3 \cdot \text{MPa}$ abnimmt und, dass auch ohne Substitution des Klinkers ein Wert von $4,3 \text{ kgCO}_2\text{äq./m}^3 \cdot \text{MPa}$ erreicht werden kann. Dieses Ergebnis bestätigt den Wert von $4,4 \text{ kgCO}_2\text{äq./m}^3 \cdot \text{MPa}$ des berechneten B5 - Betons. Um eine geringere CO_2 - Intensität zu erreichen ist allerdings ein Austausch des Klinker durch einen ökobilanziell besseren Stoff erforderlich.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung

Derzeit werden jährlich etwa 4,7 Tonnen Beton pro Person weltweit produziert und die Prognosen zeigen, dass der Bedarf in den nächsten Jahren um bis zu 2,5% jährlich steigen wird. Der dafür benötigte Zement ist für etwa fünf Prozent des anthropogenen CO₂ - Ausstoßes verantwortlich. Zur Erreichung der 20 - 20 - 20 Ziele und des UN - Klimaabkommens zur Begrenzung der maximalen Klimaerwärmung von +2°C muss auch der Bausektor das THG - Einsparungspotenzial ermitteln und die zur Einsparung notwendigen Konsequenzen ziehen.

Um die derzeitige Situation zum Thema der Umweltwirkungen von Transportbeton zu kennen, wird mit Hilfe der systematischen Literaturrecherche der Status Quo ermittelt. Zur Erreichung der definierten Ziele, der Modellierung der Einflussparameter und der kritischen Analyse der LCA - Ergebnisse, werden die angewendeten Methoden beschrieben.

Mithilfe der Methode der Ökobilanz werden nach umfassender Datenerhebung und Modellierung der Einflussparameter die Umweltwirkungen für Transportbeton in Österreich berechnet. Dabei wurden ~40% der jährlich in Österreich produzierten zehn Millionen Kubikmeter erfasst und bilanziert. Für die Bilanzierung wurden von sieben repräsentativen Unternehmen 113 Betonrezepturen für die Expositionsclassen X0, XC1 und XC2 sowie für die Betonsortenkurzbezeichnungen B1, B2, B3, B4, B5, B6 und B7 und die unternehmensspezifischen Daten zu Ressourcen- und Energieverbräuchen zur Verfügung gestellt. Diese wurden auf der Sachbilanzebene ausgewertet und bilden die Basis für die Ökobilanz. Die Umweltwirkungen und Ressourcenverbräuche, als Ergebnisse der Ökobilanz, werden für die jeweilige Expositionsclassen und Betonsortenkurzbezeichnung angegeben, aber auch zusammengefasst für die in Österreich typischen Einsatzbereiche. So zeigen die Ergebnisse ein GWP für Betone für untergeordnete Bauteile von 103 kgCO₂/m³, für Betone vorwiegend für den Hochbau von 191 kgCO₂/m³ und für Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau von 242 kgCO₂/m³. Die Ergebnisse weisen allerdings mehr oder minder große Bandbreiten auf, die auf unterschiedliche Unsicherheiten zurückzuführen sind. Daher wurden die LCA - Ergebnisse zur Beurteilung be-

züglich ihrer Repräsentativität und Unsicherheit kritisch analysiert.

Mithilfe der Dominanzanalyse wurden die maßgeblichen Beiträge von Prozessen und Ressourcen zu den Ergebnissen ermittelt. Als Ergebnis dieser geht hervor, dass den größten Anteil am GWP die Herstellung des Zements und dabei wiederum die Produktion des Zementklinkers hat. Durch die Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkung auf die Ergebnisse unterschiedlicher Zementsorten untersucht und quantifiziert. Es geht dabei vor allem um die Zusammensetzung der Zementsorten CEM I, CEM II/A-M und CEM III/A und deren Einfluss auf die Ergebnisse. Weiters wurden die Annahmen zu den Transport EURO - Klassen untersucht und welche Auswirkungen diese auf die unterschiedlichen Umweltparameter haben. Um die LCA - Ergebnisse in Relation mit den Ergebnissen anderer Länder stellen zu können, wurde der Einfluss des länderspezifischen Strom - Mixs auf die Ergebnisse untersucht. Dabei geht hervor, dass die Unterschiede vor allem für das GWP unter 1% liegen und die LCA - Ergebnisse bei gleichen Sachbilanzdaten durchaus vergleichbar sind.

Zur Untersuchung hinsichtlich der Repräsentativität der erhobenen Rezepturen wurden die Ergebnisse von 18 Rezepten von XC1 - Betonen eines Unternehmens mit den Ergebnissen von 13 Rezepten der sechs weiteren Unternehmen verglichen. Als Ergebnis geht hervor, dass die Unterschiede für das GWP der 18 Rezepte im Bereich von $\pm 6\%$ liegen und die Ergebnisse der 13 Rezepte sich im Bereich von $\pm 11\%$ unterscheiden. Durch die in weiterer Folge durchgeführte Monte-Carlo Simulation, wurde eine Standardabweichung von $\pm 17\%$ durch Unsicherheiten in den Hintergrunddaten ermittelt, daher kann von einer ausreichenden Genauigkeit der Sachbilanzdaten ausgegangen werden.

Zur Einordnung der LCA - Ergebnisse in die Literatur mittels der Druckfestigkeitsklasse, wurden alle Rezepturen hinsichtlich der Druckfestigkeiten untersucht. Die Auswertung ergibt, dass von viele Rezepturen eine höhere Druckfestigkeit zu erwarten ist als von den Unternehmen angegeben wird. Grund dafür sind Sicherheitszuschläge der Unternehmen sowie die Wahl des Größtkorns in der Gesteinskörnung.

Mit der Methode der Korrelationsanalyse wird der Einfluss, der zur Modellierung der Hintergrunddaten gewählten Datenbank, auf die Ergebnisse beurteilt. Es wurden dabei alle Rezepturen sowohl mit den Hintergrunddaten der Datenbank ecoinvent v.2.2 als auch ecoinvent v.3.3 modelliert und berechnet. Die Ergebnisse sind in einem Korrelationsdiagramm dargestellt und zeigen die Unterschiede auf. Je nach Umweltparameter sind die Ergebnisse für v.2.2 bzw. v.3.3 größer oder kleiner. Grund dafür ist z.B. die Aktualisierung der Hintergrunddaten wie dem länderspezifischen Strom-Mix. Weiters wurden die Auswirkungen auf die Ergebnisse durch deren Berechnung mit unterschiedlichen LCIA - Methoden untersucht. Dafür wurden die aktuellsten Charakterisierungsmodelle zu einer eigenen LCIA - Methode (EPD2017) zusammengefügt und die Ergebnisse mit weiteren in der Ökobilanzierungssoftware SimaPro 8 implementierten LCIA - Methoden verglichen. Unterschiede ergaben sich vor allem in den Ergebnissen des GWP, des

5.1. Zusammenfassung

AP und der PENRE.

Zur Quantifizierung der Unsicherheiten in den Hintergrunddaten wird die Methode der Monte-Carlo Simulation angewendet. Diese wird in SimaPro 8 durchgeführt und beruht auf die in einer Pedigree - Matrix bewerteten Datenqualität der Hintergrunddaten. Als Ergebnis der Monte-Carlo Simulation wird die Standardabweichung vom Mittelwert sowie die 2,5% und 97,5% - Fraktile angegeben. Die Standardabweichung auf Grund der Hintergrunddaten beträgt für GWP je nach Expositionsklasse und Betonsortenkurzbezeichnung zwischen $\pm 13\%$ und $\pm 18\%$. Die Verringerung dieser Abweichung ist nur durch die Verbesserung der Datenqualität der Hintergrunddaten möglich und nicht durch eine genauere Erhebung der Vordergrunddaten.

Zur Einordnung der berechneten Ökobilanzergebnisse werden diese mit den in Papers, EPDs und Datenbanken publizierten Umweltwirkungen verglichen. Trotz der Unterschiede in den Sachbilanzdaten und der methodischen Annahmen, ist in der Auswertung ersichtlich, dass die LCA - Ergebnisse auf Basis gleicher Normen zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Weiters ist ersichtlich, dass mit der Zunahme der Druckfestigkeit der CO_2 - Ausstoß steigt. Um einen fairen Vergleich zu ermöglichen sind in weiterer Folge die Umweltwirkungen und Ressourcenverbräuche durch die Würfeldruckfestigkeit dividiert um einen Vergleich auf Basis der Funktionalität zu ermöglichen. Dabei ist ersichtlich, dass mit steigender funktionaler und technischer Anforderung an den Beton, die Umweltwirkung pro $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}$ sinkt. Grund dafür ist vor allem die bessere Ausnutzung des Zementklinkers bei niedrigem W/B - Wert, wodurch höhere Druckfestigkeiten erreicht werden. Es ist klar zu erkennen, dass mit sinkendem W/B - Wert die CO_2 - Intensität abnimmt.

5.2. Ausblick

Die Umweltwirkungen und Ressourcenverbräuche zur Herstellung von einem Kubikmeter Transportbeton in Österreich wurde nun je nach Einsatzbereich ermittelt. In weiterer Folge sollte das Hauptziel die Entwicklung nachhaltiger Betone, also die Senkung der Umweltwirkungen bei gleichzeitiger hoher Leistungsfähigkeit, sein, so [Schepper2014]. Dies kann durch betontechnologische Entwicklungen wie [Juhart2015] zeigt durchaus gelingen. Eine Möglichkeiten dafür ist die Substitution des Zements durch ökobilanziell bessere Stoffe. Eine Änderung der Definition des Betons über den Mindestbindemittelgehalt, hin zur Definition bei der ein Beton individuell nach funktionaler und technischer Anforderung produziert wird, könnte die Umweltwirkungen senken. Dazu sollte die Funktionalität des Produkts künftig an Wichtigkeit gewinnen, denn durch den Einsatz von höher festen Betonen sinkt nicht nur die CO_2 - Intensität, sondern kann aufgrund der höheren Druckfestigkeit Bauteil schlanker gestaltet und dadurch die Betonmenge reduziert werden

Zur Beurteilung dieser Entwicklungen, ist die Ökobilanzierung eine bewährte Methode, die laufend weiterentwickelt wird. Vor allem die Verbesserung der Datenqualität der Hintergrunddaten führt zu aussagekräftigeren Ergebnissen. Um eine konsistente Bewertungsmöglichkeit zu bieten ist es erforderlich eine Harmonisierung der PEF - Methode und der EN 15804 - Methode (EPD) zu erarbeiten. Welche dieser beiden Methoden in Zukunft vermehrt Anwendung finden wird, oder ob beide parallel verwendet werden wird sich zeigen.

Ein wichtiger Aspekt zur Bewertung der Umweltwirkungen von Beton ist die Berechnung der potenziellen Gutschriften und Lasten (Modul D bei EPDs, in Modul A-C integriert bei PEF). Da CO_2 aus der Atmosphäre in den Beton diffundiert, erfolgt eine Carbonatisierung des Betons bei der das CO_2 eingelagert wird. Vor allem in der End of Life - Phase nach Abbruch und Zerkleinerung nimmt dieser Prozess drastisch zu. So können zwischen 20% - 40% des in der Klinkerproduktion ausgestoßenen CO_2 wieder eingelagert werden. Dies bildet ein großes Potenzial für eine bessere Ökobilanz des Transportbeton. Daher ist eine Berechnung aller Module (A - D EPD bzw. A - C PEF) des Lebenszyklus erstrebenswert.

Bibliography

- [ecoinvent] *The ecoinvent Database*. ecoinvent Organisation, 2000.
- [ISO14024:2001] *ÖNORM EN ISO 14024: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltkennzeichnung Typ I*. Österreichisches Normungsinstitut, 2001.
- [ISO14040:2006] *ÖNORM EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz*. Österreichisches Normungsinstitut, 2006.
- [ISO14044:2006] *ÖNORM EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz*. Österreichisches Normungsinstitut, 2006.
- [ISO14025:2010] *ÖNORM EN ISO 14025: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltkennzeichnung Typ III*. Österreichisches Normungsinstitut, 2010.
- [EN197-1:2011] *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätsnachweise von Normalzement*. Österreichisches Normungsinstitut, 2011.
- [EN15978:2012] *ÖNORM EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden*. Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [ISO14021:2012] *ÖNORM EN ISO 14021: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltkennzeichnung Typ II*. Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [IPCC] *IPCC Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [EN15804:2014] *ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie*. Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [ONB4710-1:2015] *ÖNORM B 4710 - 1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität*. Österreichisches Normungsinstitut, 2015.
- [WBCSD2016] *Cement Industry Energy and CO2 Performance - Getting the Numbers Right*. World Business Council For Sustainable Development - The Cement Sustainability Initiative, 2016.
- [CML] *CML-IA Characterisation Factors*. University Leiden - Department of Industrial Ecology, 2016.
- [GVTB2016] *Jahresbericht des Güteverbands für Transportbeton*. Güteverband Transportbeton, 2016.
- [ISO/TC071:2016] *Strategic Business Plan*. International Organization for Standardization, 2016.
- [BauEPD2017a] *PKR - Teil A: Allgemeine Regeln für Ökobilanzen und Anforderungen an den Hintergrundbericht*. Bau EPD GmbH, 2017.
- [BauEPD2017b] *PKR - Teil B: Anforderungen an eine EPD für Beton und Betonelemente*. Bau EPD GmbH, 2017.

- [Allacker2014] K. Allacker, F. Mathieux, N. Manfredi, F. De Camillis, and R. Pant. "Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives". In: *Resources, Conservation and Recycling* (2014).
- [Ammenberg2015] J. Ammenberg et al. "Improving the CO2 performance of cement, part III: the relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact". In: *Journal of Cleaner Production* 98.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.086 (2015), pp. 145–155.
- [AbdRashid2015] A. F. Abd Rashid and S. Yusoff. "A review of life cycle assessment method for building industry". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015), pp. 244–248.
- [Basset-Mens2006] C. Basset-Mens, H. M. van der Werf, P. Durand, and P. Leterme. "Implications of Uncertainty and Variability in the Life Cycle Assessment of Pig Production Systems". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11.5 (2006), pp. 298–304.
- [Burkschat2012] M. Burkschat, E. Cramer, and U. Kamps. *Beschreibende Statistik: Grundlegende Methoden der Datenanalyse*. Vol. 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [Blengini2010] G. A. Blengini and T. Di Carlo. "Energy-saving policies and low-energy residential buildings: an LCA case study to support decision makers in Piedmont (Italy)". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15.7 (2010), pp. 652–665.
- [Benini2015] L. Benini and S. Sala. "Uncertainty and sensitivity analysis of normalization factors to methodological assumptions". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* (Dec. 2015).
- [Ciroth2004] A. Ciroth, G. Fleischer, and J. Steinbach. "Uncertainties in LCA Uncertainty Calculation in Life Cycle Assessments - A Combined Model of Simulation and Approximation". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (2004), pp. 216–226.
- [Chen2010] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien, and A. Ventura. "LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete". In: *Resources, Conservation and Recycling* 54.12 (Oct. 2010), pp. 1231–1240.
- [Combined2004] A. Combined. "LCA Methodology : Uncertainties in LCA Uncertainty Calculation in Life Cycle Assessments Uncertainties in LCA". In: 9.4 (2004), pp. 216–226.
- [Damineli2010] B. L. Damineli, F. L. Kemeid, P. S. Aguiar, and M. John. "Measuring the eco-efficiency of cement use". In: *Cement & Concrete Composites* 32.https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009 (2010), pp. 555–562.
- [Schepper2014] M. DeSchepper, P. VandenHeede, I. VanDriessche, and N. DeBelie. "Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete". In: *Materials* 31.https://doi:10.339/ma7086010 (2014), pp. 6010–6027.
- [Dong2015c] Y. H. Dong, S. T. Ng, A. H. Kwan, and S. K. Wu. "Substituting local data for overseas life cycle inventories e a case study of concrete products in Hong Kong". In: *Journal of Cleaner Production* (2015), pp. 414–422.
- [Deutsch2017] R. Deutsch and A. Passer. "Hintergrundbericht zur Umweltproduktdeklaration (EPD) für Beton und Betonelemente". In: Technische Universität Graz (2017).
- [Fischer2007] C. Fischer and A. K. Fox. "Output-based allocation of emissions permits for mitigating tax and trade interactions". In: *Land Economics* 83.4 (2007), pp. 575–599.

Bibliography

- [Finnveden2009] G. Finnveden et al. "Recent developments in Life Cycle Assessment". In: *Journal of Environmental Management* 91(1).<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018> (2009), pp. 1–21.
- [Frischknecht2007] R. Frischknecht and N. Jungbluth. *Overview and Methodology: ecoinvent report No.1*. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dec. 2007.
- [Fouquet2015] M. Fouquet et al. "Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment". In: *Building and Environment* 90 (Aug. 2015), pp. 51–59.
- [Frischknecht2010] R. Frischknecht. "LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15.7 (June 2010), pp. 666–671.
- [Gursel2017] A. P. Gursel and C. Ostertag. "Comparative life-cycle impact assessment of concrete manufacturing in Singapore". In: *International Journal of Life Cycle Assessment* (2017), pp. 237–255.
- [Hafliger2015] I.-F. Häfliger, V. John, A. Passer, S. Lasvaux, and G. Habert. "Building's sensitivity to construction materials due to modelling choices in LCA". In: *N.N.* (2015).
- [Hafliger2017] I.-F. Häfliger et al. "Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials". In: *Journal of Cleaner Production* 156 (July 2017), pp. 805–816.
- [Higgins2008] J. P. Higgins and S. Green. "Cochrane Handbook for Systematic Reviews". In: *The Cochrane Collaboration Vol.5* (2008).
- [Hong2012] T. Hong, C. Ji, and H. Park. "Integrated model for assessing the cost and CO2 emission (IMACC) for sustainable structural design in ready-mix concrete". In: *Journal of Environmental Management* (2012), pp. 1–8.
- [Heijungs2001] Heijungs and Klein. "Numerical approaches towards life cycle interpretation. Five examples". In: *International Journal of Life Cycle Assessment* (2001).
- [Hoxha2013] E. Hoxha, G. Habert, J. Chevalier, M. Bazzana, and R. Le Roy. "Method to analyse the contribution of material's sensitivity in buildings' environmental impact". In: *Journal of Cleaner Production* 66 (2013), pp. 54–64.
- [Habert2009] G. Habert and N. Roussel. "Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives". In: *Cement & Concrete Composites* 31.<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001> (2009), pp. 397–402.
- [Huijbregts1998] M. Huijbregts. "Application of uncertainty and variability in LCA". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3.5 (1998), pp. 273–280.
- [Hellweg2016] S. Hellweg and R. Zah. "What is new at the data front?" In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (Sept. 2016), pp. 1215–1217.
- [Juhart2015] J. Juhart, C. Baldermann, A. David, G. Fischer, and A. Passer. *ERESCON - Neue Betone für den Infrastrukturbereich, Energie- und Ressourcenoptimiert*. Tech. rep. Technische Universität Graz, 2015.
- [Kim2016] T. H. Kim, C.-U. Chae, and H. J. Jang. "Analysis of CO2 Emission Characteristics of Concrete Used at Construction Sites". In: *Sustainability* (2016), p. 14.

- [Kloepffer2007] W. Klöpffer and B. Grahl. *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley-VCH, 2007.
- [Kleijer2017] A. Kleijer, S. Lasvaux, S. Citherlet, and M. Viviani. "Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete". In: *Resources, Conservation and Recycling* (2017), pp. 210–218.
- [Lasvaux2016] S. Lasvaux et al. "Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters?" In: *Ecological Indicators* 67 (Aug. 2016), pp. 174–182.
- [Lewandowska2014a] A. Lewandowska, A. Noskowiak, G. Pajchrowski, and J. Zarebska. "Between full LCA and energy certification methodology—a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20.1 (Jan. 2015), pp. 9–22.
- [Marinkovic2013] S. Marinković. "Life cycle assessment (LCA) aspects of concrete". In: *Woodhead Publishing Limited* (2013), pp. 45–80.
- [Marinkovic2014a] S. Marinković, M. Malešev, and I. Ignjatović. "Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates". In: *Woodhead Publishing Limited* (2014), pp. 239–266.
- [Mosler2006] K. Mosler and F. Schmid. *Beschreibende Statistik und Wirtschaftsstatistik*. Vol. 3. Auflage. ISBN 978-3-540-37459-6. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [VOZ2017] V. der Österreichischen Zementindustrie. *Nachhaltigkeitsbericht der österreichischen Zementindustrie 2016*. Tech. rep. 2017.
- [Pang2015] B. Pang et al. "Life cycle environmental impact assessment of a bridge with different strengthening schemes". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20.9 (2015), pp. 1300–1311.
- [Passer2015b] A. Passer et al. "Environmental product declarations entering the building sector: critical reflections based on 5 to 10 years experience in different European countries". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20.9 (Sept. 2015), pp. 1199–1212.
- [Park2012] J. Park, S. Tae, and T. Kim. "Life cycle CO₂ assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2012), pp. 2940–2946.
- [Smith2016] S. H. Smith and S. A. Durham. "A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design". In: *International Journal of Sustainable Built Environment* (2016), pp. 23–33.
- [Steubing2016] B. Steubing, G. Wernet, J. Reinhard, C. Bauer, and E. Moreno-Ruiz. "The ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (Sept. 2016), pp. 1269–1281.
- [Seibersdorf1997] P. Tuschl and K. Hye. *Ökobilanz Transportbeton*. Tech. rep. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, 1998.
- [Tillman2000] A.-M. Tillman. "Significance of decision-making for LCA methodology". In: *Environmental Impact Assessment Review* 20(1).[https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00035-9](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00035-9) (2000), pp. 113–123.

Bibliography

- [Tosic2015] N. Tosic, M. Snezana, T. Dasic, and M. Stanic. "Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use". In: *Journal of Cleaner Production* (2015), pp. 766–776.
- [Turk2015a] J. Turk, Z. Cotič, A. Mladenovič, and A. Šajna. "Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA". In: *Waste Management* (2015), pp. 194–205.
- [Wernet2016] G. Wernet et al. "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology". In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (Sept. 2016), pp. 1218–1230.
- [Woodworth1983] G. Woodworth. "Design and analysis of simulated choice or allocation experiments: An approach based on aggregate data". In: *Journal of Marketing Research* 20 (1983), p. 350.
- [Weidema1996] B. P. Weidema and M. S. Wesnaes. "Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators". In: *Journal of Cleaner Production* 4.3-4 (1996), pp. 167–174.
- [Zabalza-Bribian2009] I. Zabalza Bribián, A. Aranda Usón, and S. Scarpellini. "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification". In: *Building and Environment* 44.12 (Dec. 2009), pp. 2510–2520.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Prozessmodell	19
2.5. Erklärung des Boxplots	38
2.6. Erklärung der Dominanzanalyse	39
2.7. Erklärung der Korrelationsanalyse	41
2.8. Erklärung der Monte Carlo Simulation	42
3.3. GVTB-Werke	52
3.4. Sachbilanz der erhobenen Daten	57
3.5. Bandbreite der Ausgangsstoffe	59
3.6. Ergebnis der Wirkungsabschätzung (GWP)	63
3.7. Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (X0)	64
3.8. Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Hochbau)	65
3.9. Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Infrastrukturbau)	65
4.1. Dominanzanalyse Produktsystem (GWP)	69
4.2. Dominanzanalyse Zement (GWP)	70
4.3. Analyse von XC1 Rezepten (GWP)	75
4.4. Vergleich der Druckfestigkeiten	77
4.5. Ergebnis der Korrelationsanalyse (GWP)	80
4.6. Ergebnis der Korrelationsanalyse (PERE)	81
4.7. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation (GWP)	86
4.8. Einordnung der Ergebnisse in die Literatur (GWP)	87
4.9. Funktionaler Äquivalenzvergleich (GWP)	90
A.1. Erhebungsbogen zur Datenakquisition	110
A.2. Erhebungsbogen zur Datenakquisition	111
A.3. Erhebungsbogen zur Datenakquisition	112
A.4. Erhebungsbogen zur Datenakquisition	113
A.5. Erhebungsbogen zur Datenakquisition	114

C.1. Versauerung von Boden und Wasser	119
C.2. Eutrophierung	119
C.3. Ozonabbau	120
C.4. Photochemische Ozonbildung	120
C.5. Verknappung von abiotischen Ressourcen - Stoffe	120
C.6. Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	121
C.7. Total erneuerbare Primärenergie	121
C.8. Total nicht erneuerbare Primärenergie	121
D.1. Ergebnisse XC1	123
D.2. Ergebnisse XC2	123
D.3. Ergebnisse B1	123
D.4. Ergebnisse B2	124
D.5. Ergebnisse B3	124
D.6. Ergebnisse B4	124
D.7. Ergebnisse B5	125
D.8. Ergebnisse B6	125
D.9. Ergebnisse B7	125
E.1. Dominanzanalyse Versauerung von Boden und Wasser	127
E.2. Dominanzanalyse Eutrophierung	128
E.3. Dominanzanalyse Ozonabbau	128
E.4. Dominanzanalyse Photochemische Ozonbildung	129
E.5. Dominanzanalyse Verbrauch von abiotischen Ressourcen - Stoffe	129
E.6. Dominanzanalyse Verbrauch von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger	130
E.7. Dominanzanalyse Total nicht erneuerbare Primärenergie	130
E.8. Dominanzanalyse Total erneuerbare Primärenergie	131
F.1. Analyse von XC1 Rezepten - AP	133
F.2. Analyse von XC1 Rezepten - EP	133
F.3. Analyse von XC1 Rezepten - ODP	134
F.4. Analyse von XC1 Rezepten - POCP	134
F.5. Analyse von XC1 Rezepten - ADPE	135
F.6. Analyse von XC1 Rezepten - ADPF	135
F.7. Analyse von XC1 Rezepten - PENRE	136
F.8. Analyse von XC1 Rezepten - PERE	136
F.9. Analyse von XC1 Rezepten - PET	137
G.1. Ergebnisse Datenbankvergleich AP	140

G.2. Ergebnisse Datenbankvergleich EP	141
G.3. Ergebnisse Datenbankvergleich ODP	142
G.4. Ergebnisse Datenbankvergleich POCP	143
G.5. Ergebnisse Datenbankvergleich ADPE	144
G.6. Ergebnisse Datenbankvergleich ADPF	145
G.7. Ergebnisse Datenbankvergleich PENRE	146
G.8. Ergebnisse Datenbankvergleich PET	147
H.1. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation AP	149
H.2. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation EP	150
H.3. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation ODP	150
H.4. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation POCP	151
H.5. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation ADPE	151
H.6. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation ADPF	152
H.7. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation PENRE	152
H.8. Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation PERE	153
I.1. Einordnung der Ergebnisse von AP in die Literatur	155
I.2. Einordnung der Ergebnisse von EP in die Literatur	156
I.3. Einordnung der Ergebnisse von ODP in die Literatur	156
I.4. Einordnung der Ergebnisse von POCP in die Literatur	157
I.5. Einordnung der Ergebnisse von ADPE in die Literatur	157
I.6. Einordnung der Ergebnisse von ADPF in die Literatur	158
I.7. Einordnung der Ergebnisse von PENRE in die Literatur	158
I.8. Einordnung der Ergebnisse von PERE in die Literatur	159
J.1. Funktionaler Äquivalenzvergleich (AP)	161
J.2. Funktionaler Äquivalenzvergleich (EP)	162
J.3. Funktionaler Äquivalenzvergleich (ODP)	162
J.4. Funktionaler Äquivalenzvergleich (POCP)	163
J.5. Funktionaler Äquivalenzvergleich (ADPE)	163
J.6. Funktionaler Äquivalenzvergleich (ADPF)	164
J.7. Funktionaler Äquivalenzvergleich (PENRE)	164
J.8. Funktionaler Äquivalenzvergleich (PERE)	165
J.9. Funktionaler Äquivalenzvergleich (PET)	165
J.10. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (AP)	166
J.11. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (EP)	166
J.12. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (ODP)	167

J.13. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (POCP)	167
J.14. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (ADPE)	168
J.15. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (ADPF)	168
J.16. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (PENRE)	169
J.17. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (PERE)	169
J.18. Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (PET)	170

Tabellenverzeichnis

2.3. Vergleich der Charakterisierungsmethoden	38
3.1. Stoffliche Zusammensetzung des untersuchten Produktsystems	46
3.2. Zementsorten	46
3.3. Gliederung der Einsatzbereiche	48
3.4. Sachbilanz der erhobenen Daten	56
3.5. Durchschnittliche Transportentfernungen der Vorprodukte zum Werk	57
3.6. Wirkungskategorien und Charakterisierungsmodelle	60
3.7. LCA - Ergebnisse - Betone für untergeordnete Bauwerke	61
3.8. LCA - Ergebnisse - Betone vorwiegend für den Hochbau	61
3.9. LCA - Ergebnisse - Betone vorwiegend für den Infrastrukturbau	62
4.1. Zusammensetzung und Bezeichnung der verwendeten Zementsorten	72
4.2. Sensitivitätsanalyse für einen Beton XC1	73
B.1. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Allgemeine Prozesse und Ressourcen . . .	115
B.2. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Unternehmensspezifische Daten	115
B.3. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Luftporenbildner	116
B.4. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Fließmittel	116
B.5. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Betonverflüssiger	116
B.6. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - CEM I	116
B.7. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - CEM II	117
B.8. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - CEM III	117
B.9. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - AHWZ	117
B.10. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - BFS	117
B.11. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - BFSG	118
B.12. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Fly ash	118
B.13. Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Lime	118

A. Anhang - Erhebungsbogen



Erhebungsbogen für Transportbetone - Jahressummenblatt (Formular Teil A)			
Firma / Werk			
Anzahl Werke je Firma		Datum	
Kontaktperson		Position	
Telefon		E-Mail	
Produktionsmengen 2015			
Jahresproduktionsmenge der Firma - Volumen		[m ³]	
Jahresproduktionsmenge der Firma - Masse		[t]	
Jahresproduktionsmenge des Werkes - Volumen		[m ³]	
Jahresproduktionsmenge des Werkes - Masse		[t]	
Durchschnittsrohichte Transportbeton		[t/m ³]	
Energie- und Elektrizitätsbedarf 2015			
Wurde auf Firmenebene bereits der Elektrizitätsbedarf pro m ³ Frischbeton ermittelt?			
Elektrizitätsbedarf pro m ³ Frischbeton		[kWh/a]	
Sollte diese Information <u>nicht</u> vorliegen, bitten wir um Angabe folgender Informationen zur entsprechenden Ermittlung:			
Elektrizitätsbedarf Verwaltungsgebäude (Regional- bzw. Zentralverwaltung)		[kWh/a]	
(Anm.: Es erfolgt eine aliquote Aufteilung der übergeordneten Verwaltungsgebäude auf das Werk)			
Gesamtverbrauch des Werkes (incl. Infrastruktur, Verwaltung, Produktion...)		[kWh/a]	
Elektrizitätsbedarf Verwaltungsgebäude des Werkes		[kWh/a]	
Elektrizitätsbedarf Mischanlage des Werkes		[kWh/a]	
wenn nicht verfügbar: Abschätzung des Elektrizitätsbedarf		[kWh/a]	
Angaben zum Heizenergieverbrauch			
Wie hoch ist der Heizenergieverbrauch (Gas, Heizöl) der Firma		[/a]	
Wie hoch ist der Heizenergieverbrauch (Gas, Heizöl) des Werkes		[/a]	
Welcher Energieträger wird dafür verwendet (Gas, Heizöl, ...)			
Frischbetonherstellung (Formular Teil A.1.1)			
Mischanlage 1			
Mischerart (bspw. Zwangsmischer o.ä.)			
Größe des Mixers		[m ³]	
Mischanlage 2			
Mischerart (bspw. Zwangsmischer o.ä.)			
Größe des Mixers		[m ³]	
Mischanlage 3			
Mischerart (bspw. Zwangsmischer o.ä.)			
Größe des Mixers		[m ³]	

Abbildung A.1.: Erhebungsbogen zur Datenakquisition

Interne Transporte für Frischbetonherstellung (Formular Teil A.1.2)							
Wie erfolgt der interne Transport der Gesteinskörnungen?							
	Radlader	Betriebsstunden (für alle Werke)					[h]
		Dieselverbrauch / Jahr					[l/a]
Förderband (Erfassung des Elektrizitätsbedarfs im Zuge Punkt "Gesamtverbrauch des Werkes")							
	Andere						[/a]
Ausgangsstoffe für die Frischbetonherstellung (Formular Teil A.1.3)							
Mengen 2015					Antransport der Stoffe		
Falls für die Herstellung des Frischbetons mehr als 1 Lieferant für die Deckung der benötigten Rohstoffe herangezogen wird, so sind die damit verbundenen notwendigen Transportwege für die jeweils betroffenen Materialien zu mitteln.					mittlerer Transportweg bis Werk [m ³]	Transportmedium	
						LKW [%]	Bahn [%]
Typ: SDB PDB Menge/a:							
Zement 1 ²					[t/a]		
Zement 2 ²					[t/a]		
Zement 3 ²					[t/a]		
Zement 4 ²					[t/a]		
Zusatzstoff Typ II - AHWZ (ÖN 3309) ¹					[t/a]		
Zusatzstoff Typ II - Flugasche (EN 450) ¹					[t/a]		
Zusatzstoff Typ II - Hüttensand (EN 15167) ¹					[t/a]		
Zusatzstoff Typ I - Gesteinsmehl ¹					[t/a]		
Zusatzstoff 5 ¹					[t/a]		
Zusatzmittel 1 ¹					[t/a]		
Zusatzmittel 2 ¹					[t/a]		
Zusatzmittel 3 ¹					[t/a]		
Zusatzmittel 4 ¹					[/a]		
Gesteinskörnung gesamt					[t/a]		
Gesteinskörnung 0/4					[t/a]		
Gesteinskörnung 4/8					[t/a]		
Gesteinskörnung 8/16					[t/a]		
Gesteinskörnung 16/32					[t/a]		
Gesteinskörnung >32					[t/a]		
rezyklierte Gesteinskörnung					[t/a]		
Anmachwasser - Trinkwasser					[l/a]		
Anmachwasser - Restwasser					[l/a]		
Andere ²					[/a]		
Andere ²					[/a]		
Andere ²					[/a]		
Andere ²					[/a]		
Legende:					¹ Bei Verwendung von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln ist unbedingt ein SDB und/oder PDB der Rücksendung beizulegen und in obiger Tabelle mit einem X zu vermerken.		
X	SDB... Sicherheitsdatenblatt				² Bei Verwendung von Standardprodukten kann ein SDB/PDB beigelegt werden, bei unternehmensspezifischen Produkten ist unbedingt ein SDB/PDB beizulegen.		
X	PDB... Produktdatenblatt						

Abbildung A.2.: Erhebungsbogen zur Datenakquisition



Rohstoffverbrauch im Produktionsprozess		(Formular Teil A.2.1)	
Welche Abfall- bzw. Nebenprodukte fallen an?			
Retourbeton pro m ³ produz. Beton			[%/m ³]
Restmüll			[t/a]
Andere (Metall, Gummi, Elektro, Papier, ...)			[t/a]
Andere			[/a]
Welche Menge an Prozessstoffen (Leitungswasser, Schmierfette, Öle, etc.) werden jährlich verbraucht?			
Prozesswasser (z.B. Reinigung, Befeuchtung, Kühlung, o.ä.)			[m ³ /a]
Schmieröl (inkl. Motoröl+Hydrauliköl)			[kg/a]
Verschleißteile Stahl			[kg/a]
Verschleißteile- Gummi			[kg/a]
Andere (Büro, EDV, Reinigung, Leuchten, ...)			[kg/a]
Andere			[/a]
Andere			[/a]
Jahresgesamtmenge je Kurzbezeichnung		(Formular Teil A.2.2)	
Rezeptur-Blatt	Kurzbezeichnung	Jahresgesamtmenge	Einheit
Rezeptur-Blatt 1	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 2	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 3	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 4	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 5	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 6	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 7	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 8	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 9	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 10	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 11	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 12	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 13	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 14	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 15	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 16	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 17	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 18	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 19	-		[m ³]
Rezeptur-Blatt 20	-		[m ³]

Abbildung A.3.: Erhebungsbogen zur Datenakquisition



Betonrezeptur 01 - BEISPIEL				(Formular Teil B)	
Firma / Werk					
Bezeichnung		C30-37 B2 SB(A) GK22 F52 42,5R			
Expositionsklasse		XC3, XD2, XF1, XA1L		Kurzbezeichnung	B2
Festigkeitsklasse		C30/37			
Jahresproduktionsmenge dieser Rezeptur - Masse		6327	[t]		
Jahresproduktionsmenge dieser Rezeptur - Volumen		2643	[m ³]		
Stoffe für Betonrezeptur - Frischbeton					
Material		genaue Sortenbezeichnung		Menge / m ³	
Zement [kg]		CEM I 42,5R		352,5	
Zement [kg]				/	
Zusatzstoff Typ II - AHWZ (ÖN 3309) [kg]				/	
Zusatzstoff Typ II - Flugasche (EN 450) [kg]		Steamant		62,2	
Zusatzstoff Typ II - Hüttensand (EN 15167) [kg]				/	
Zusatzstoff Typ I - Gesteinsmehl [kg]				/	
Zusatzstoff [kg]				/	
Zusatzmittel 1 [kg]		Glenium ACE 420		1,5	
Zusatzmittel 2 [kg]				/	
Zusatzmittel 3 [kg]				/	
Gesteinskörnung gesamt [kg] *	RG	RK	KK	1778	
Gesteinskörnung 0/4 [kg]			x	1060,4	
Gesteinskörnung 4/8 [kg]		x	x	338,3	
Gesteinskörnung 8/16 [kg]		x	x	379,3	
Gesteinskörnung 16/32 [kg]				/	
Gesteinskörnung >32 [kg]				/	
Anmachwasser - Trinkwasser [l]				120	
Anmachwasser - Restwasser [l]				80	
Andere				/	
Andere				/	
W/B-Wert				0,51	
Frischbetonrohddichte [kg/m ³]				2394,2	
Ergänzende Hinweise					

* Anmerkung: Die Erfassung der Art der Gesteinskörnung erfolgt in obiger Liste mittels Angabe folgender Kürzel
 RG ... Recycling-Gesteinskörnung, RK ... Rundkorn, KK ... Kantkorn (Bei Mischkorn bitte RK und KK ankreuzen!)

Abbildung A.4.: Erhebungsbogen zur Datenakquisition



Betonrezeptur 01					(Formular Teil B)	
Firma / Werk						
Bezeichnung						
Expositionsclassen					Kurzbezeichnung	-
Festigkeitsklasse						
Jahresproduktionsmenge dieser Rezeptur - Masse				[t]	% der Rezeptur von der Gesamtmenge der Kurzbezeichnung	#DIV/0!
Jahresproduktionsmenge dieser Rezeptur - Volumen				[m ³]		
Stoffe für Betonrezeptur - Frischbeton						
Material		genaue Sortenbezeichnung			Menge / m ³	
Zement [kg]						
Zement [kg]						
Zusatzstoff Typ II - AHWZ (ÖN 3309) [kg]						
Zusatzstoff Typ II - Flugasche (EN 450) [kg]						
Zusatzstoff Typ II - Hüttensand (EN 15167) [kg]						
Zusatzstoff Typ I - Gesteinsmehl [kg]						
Zusatzstoff [kg]						
Zusatzmittel 1 [kg]						
Zusatzmittel 2 [kg]						
Zusatzmittel 3 [kg]						
Gesteinskörnung gesamt [kg] *	RG	RK	KK			
Gesteinskörnung 0/4 [kg]						
Gesteinskörnung 4/8 [kg]						
Gesteinskörnung 8/16 [kg]						
Gesteinskörnung 16/32 [kg]						
Gesteinskörnung >32 [kg]						
Anmachwasser - Trinkwasser [l]						
Anmachwasser - Restwasser [l]						
Andere						
Andere						
W/B-Wert						
Frischbetonrohddichte [kg/m ³]						
Ergänzende Hinweise						

* Anmerkung: Die Erfassung der Art der Gesteinskörnung erfolgt in obiger Liste mittels Angabe folgender Kürzel
 RG ... Recycling-Gesteinskörnung, RK ... Rundkorn, KK ... Kantkorn (Bei Mischkorn bitte RK und KK ankreuzen!)

Abbildung A.5.: Erhebungsbogen zur Datenakquisition

B. Anhang - Hintergrunddaten zur Modellierung

Tabelle B.1.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Allgemeine Prozesse und Ressourcen*

Bezeichnung	Region:	Einheit:
construction materials/others		
concrete mixing factory (CH) Alloc Rec, U	CH	p
construction processes/machinery		
diesel, burned in building machine (GLO) processing Alloc Rec, U	GLO	MJ
Diesel (CH) market for Alloc Rec, U	CH	MJ
electricity/supply mix		
electricity, medium voltage (AT) electricity voltage transformation from high to medium voltage Alloc Rec, U	AT	kWh
oil/heating systems		
Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW Alloc Rec, U	CH	MJ
Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW Alloc Rec, U	CH	MJ
natural gas/heating systems		
Heat, district or industrial, natural gas (EU without CH) heat production, natural gas, at industrial furnace low-NO _x >100kW Alloc Rec, U	EU without CH	MJ
metals/extraction		
Steel, low-alloyed, hot rolled (RER) production Alloc Rec, U	RER	kg
plastics/polymers		
Synthetic rubber (RER) production Alloc Rec, U	RER	kg
chemicals/organics		
Lubricating oil (RER) production Alloc Rec, U	RER	kg

Tabelle B.2.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Unternehmensspezifische Daten*

Bezeichnung	Region:	Einheit:
construction materials/cement		
*Cement, Portland (CH) production Alloc Rec, U CEM I	CH	kg
*Cement, Portland (CH) production Alloc Rec, U CEM II	CH	kg
*Cement, Portland (CH) production Alloc Rec, U CEM III	CH	kg
construction materials/aggregates		
Gravel, round (CH) gravel and sand quarry operation Alloc Rec, U	CH	kg
Sand (CH) gravel and quarry operation Alloc Rec, U	CH	kg
construction materials/additives		
*AHWZ	AT	kg
*Gesteinsmehl	AT	kg
construction materials/admixtures		
*Fließmittel	AT	kg
*Luftporenbildner	AT	kg
*Betonverflüssiger	AT	kg
water supply/production		
Tap water (CH) tap water production, conventional treatment Alloc Rec, U	CH	kg
transport systems/train		
Transport, freight, train (AT) processing Alloc Rec, U	AT	tkm
transport systems/road		
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Alloc Rec, U	CH	tkm
Outputs		
waste management/inert material landfill		
Inert waste, for final disposal (CH) treatment of inert waste, inert material landfill Alloc Rec, U	CH	kg
waste management/municipal incineration		
Municipal solid waste (AT) treatment of, incineration Alloc Rec, U	AT	kg
waste management/wastewater treatment		
Wastewater from concrete production (CH) treatment of, capacity 5E9l/year Alloc Rec, U	CH	m3
waste management/heat		
Heat, waste		MJ

Tabelle B.3.: Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Luftporenbildner

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Luftporenbildner			
air-entraining agent		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
chemicals/organics			
Chemical, organic (GLO) production Alloc Rec, U	GLO	0,025	kg
chemicals/inorganics			
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (GLO) market for Alloc Rec, U	RER	0,02	kg
water supply/production			
Water, completely softened, from decarbonised water, at user (RER) production Alloc Rec, U	RER	0,962	kg

Tabelle B.4.: Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Fließmittel

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Fließmittel			
plasticizer		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
natural gas/heating systems			
Heat, district or industrial, natural gas (EU without CH) heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW Alloc Rec, U	RER	0,054	MJ
chemicals/organics			
Formaldehyde (RER) oxidation of methanol Alloc Rec, U	RER	0,038	kg
Chemical, organic (GLO) production Alloc Rec, U	GLO	0,163	kg
chemicals/inorganics			
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (GLO) market for Alloc Rec, U	RER	0,133	kg
Sulfuric acid (RER) production Alloc Rec, U	RER	0,162	kg
water supply/production			
Water, completely softened, from decarbonised water, at user (RER) production Alloc Rec, U	RER	0,665	kg

Tabelle B.5.: Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Betonverflüssiger

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Betonverflüssiger			
high performance plasticizer		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
natural gas/heating systems			
Heat, district or industrial, natural gas (EU without CH) heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW Alloc Rec, U	RER	0,054	MJ
chemicals/organics			
Formaldehyde (RER) oxidation of methanol Alloc Rec, U	RER	0,038	kg
Chemical, organic (GLO) production Alloc Rec, U	GLO	0,163	kg
chemicals/inorganics			
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (GLO) market for Alloc Rec, U	RER	0,133	kg
Sulfuric acid (RER) production Alloc Rec, U	RER	0,162	kg
water supply/production			
Water, completely softened, from decarbonised water, at user (RER) production Alloc Rec, U	RER	0,665	kg

Tabelle B.6.: Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - CEM I

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Cement, Portland (CH) production Alloc Rec, U CEM I			
cement		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
Steel, low-alloyed (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,0000525	kg
Limestone, crushed, for mill (CH) limestone for mill, crushed, for mill Alloc Rec, U	CH	0,0477	kg
Ethylene glycol (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,000228	kg
Cement factory (CH) construction Alloc Rec, U	CH	2,73E-11	p
Gypsum, mineral (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,0495	kg
Clinker (CH), production Alloc Rec, U	CH	0,904	kg
Electricity, medium voltage (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,0438	kWh

Tabelle B.7.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - CEM II*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Cement, Portland (CH) production Alloc Rec, U CEM II			
cement		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
Steel, low-alloyed (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,0000525	kg
Limestone, crushed, for mill (CH) limestone for mill, crushed, for mill Alloc Rec, U	CH	0,152	kg
Ethylene glycol (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,000228	kg
Cement factory (CH) construction Alloc Rec, U	CH	2,73E-11	p
Gypsum, mineral (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,0495	kg
Clinker (CH), production Alloc Rec, U	CH	0,8	kg
Electricity, medium voltage (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,0438	kWh

Tabelle B.8.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - CEM III*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Cement, Portland (CH) production Alloc Rec, U CEM III			
cement		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
Steel, low-alloyed (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,0000525	kg
Limestone, crushed, for mill (CH) limestone for mill, crushed, for mill Alloc Rec, U	CH	0,0477	kg
Ethylene glycol (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,000228	kg
Cement factory (CH) construction Alloc Rec, U	CH	2,73E-11	p
Gypsum, mineral (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,0495	kg
Clinker (CH), production Alloc Rec, U	CH	0,5	kg
*Blast furnace slag, ground		0,403	kg
Electricity, medium voltage (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,0438	kWh

Tabelle B.9.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - AHWZ*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*AHWZ			
additives		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
*Blast furnace slag, ground		0,45	kg
*Fly ash – drying and stock		0,45	kg
*Lime (CH) production, milled, loose Alloc Rec, U	CH	0,1	kg

Tabelle B.10.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - BFS*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Blast furnace slag, ground			
additives		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
*Blast furnace slag, granulated		1	kg
Electricity, medium voltage (AT) market for Alloc Rec, U	AT	0,07	kWh
Heat, district or industrial, natural gas (EU without CH) heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW Alloc Rec, U	EU without CH	0,316	MJ
Diesel (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,000948	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Alloc Rec, U	RER	0,0053	tkm
Outputs			
To Air			
Particulates		0,000124	kg
Sodium hydroxide		0,000000684	kg
Methane		0,0000012	kg
Nitrogen oxides		0,0000217	kg
Carbon monoxide		0,0000136	kg
To Water			
Soil loss by erosion into water		0,0015	kg

Tabelle B.11.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - BFSG*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Blast furnace slag, granulated additives		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
Tap water (CH) market for Alloc Rec, U	CH	10	kg
Transport, freight, train (AT) processing Alloc Rec, U	AT	0,003	tkm
Electricity, medium voltage (AT) market for Alloc Rec, U	AT	0,00215	kWh
Outputs			
To Air			
Particulates		0,00000832	kg
Sulfur oxide		0,000207	kg
Hydrogen sulfide		0,000243	kg
Carbon monoxide		0,0000354	kg
To Water			
Waste water /m3		0,003	m3

Tabelle B.12.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Fly ash*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Fly ash – drying and stock additives		1	kg
Inputs			
From Technosphere			
Diesel (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,000857	kg
Electricity, medium voltage (AT) market for Alloc Rec, U	AT	0,00682	kWh
Heat, district or industrial, natural gas (EU without CH) heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW Alloc Rec, U	EU without CH	0,29	MJ
Transport, freight, train (AT) processing Alloc Rec, U	AT	0,003	tkm

Tabelle B.13.: *Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.3 - Lime*

Bezeichnung	Region	Menge	Einheit
*Lime (CH) production, milled, loose Alloc Rec, U		1	kg
Inputs			
From Nature			
Water, unspecified natural origin, CH	CH	0,0028009	m3
From Technosphere			
Limestone, crushed, for mill (CH) market for limestone, crushed, for mill Alloc Rec, U	CH	1	kg
Industrial machine, heavy, unspecified (GLO) market for Alloc Rec, U	GLO	0,000225	kg
Electricity, medium voltage (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,016	kWh
Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) market for heat, district or industrial, other than natural gas Alloc Rec, U	CH	0,0898	MJ
Electricity, high voltage (CH) electricity production, hydro, run-of-river Alloc Rec, U	CH	0,016	kWh
Heat, central or small-scale, other than natural gas (CH) market for Alloc Rec, U	CH	0,00141	MJ
Outputs			
To Air			
Water /m3		0,000817589	m3
To Water			
Water, CH		0,001983311	m3

C. Anhang - Weitere Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

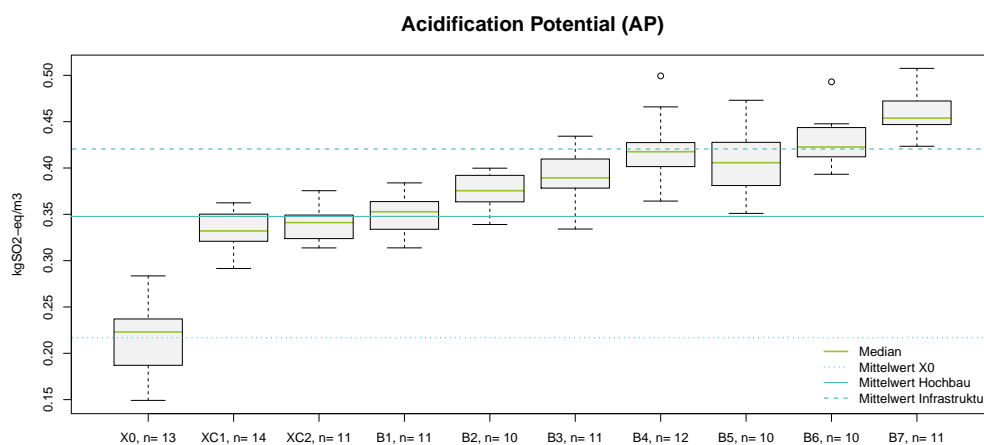


Abbildung C.1.: Versauerung von Boden und Wasser

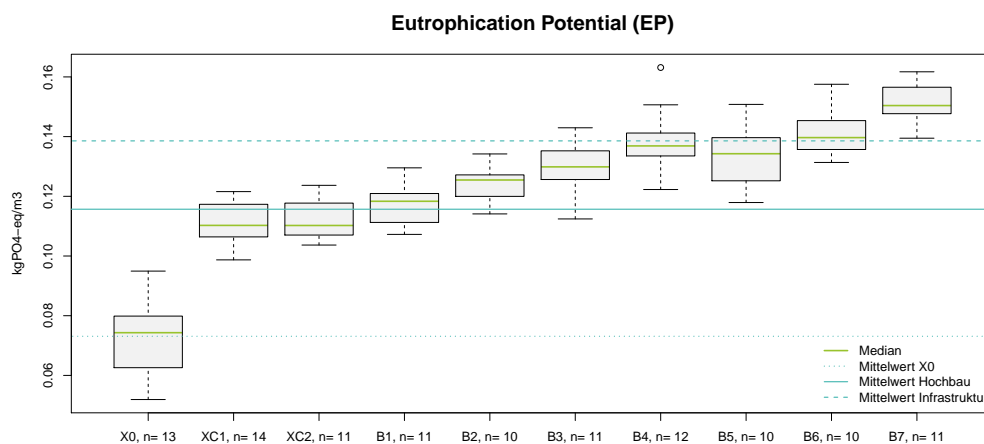


Abbildung C.2.: Eutrophierung

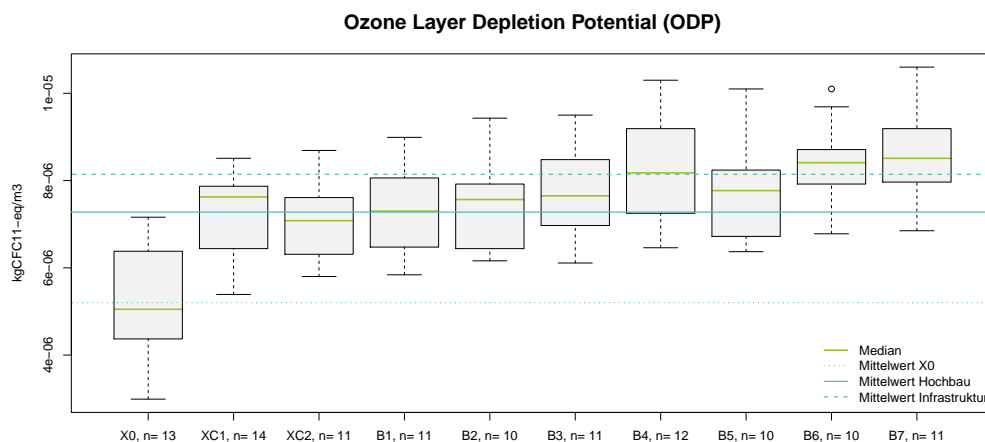


Abbildung C.3.: Ozonabbau

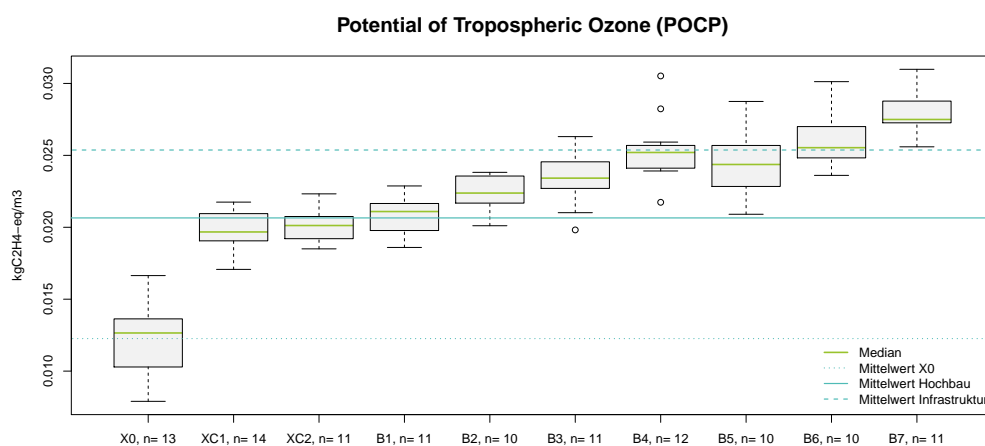


Abbildung C.4.: Photochemische Ozonbildung

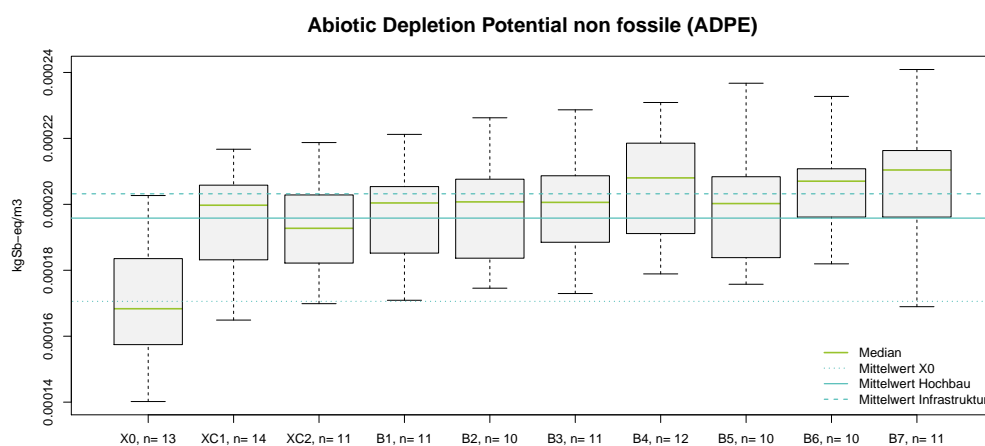


Abbildung C.5.: Verknappung von abiotischen Ressourcen - Stoffe

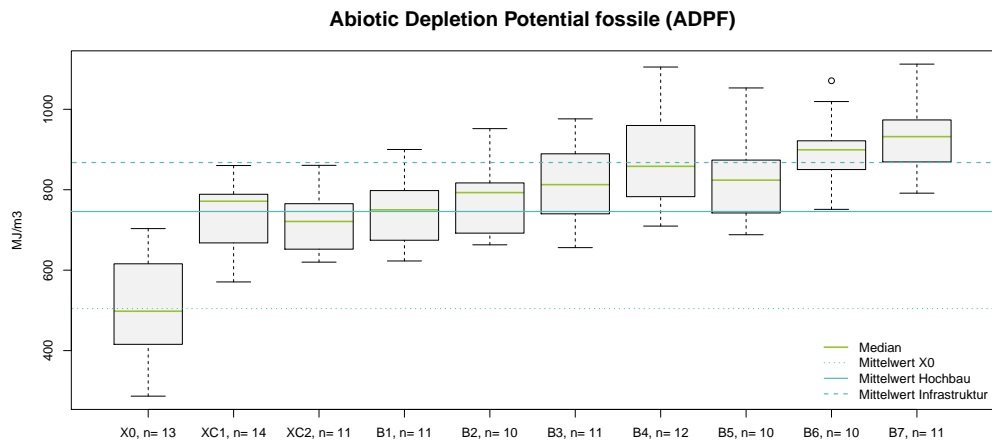


Abbildung C.6.: Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger

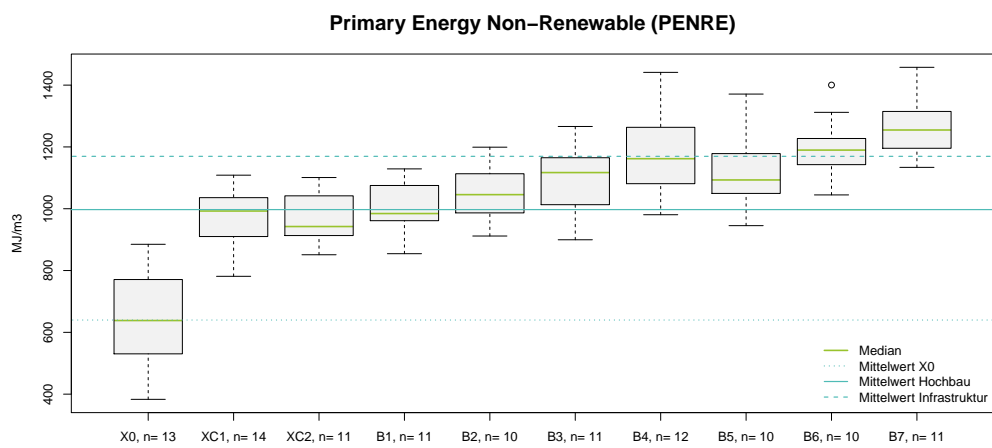


Abbildung C.7.: Total erneuerbare Primärenergie

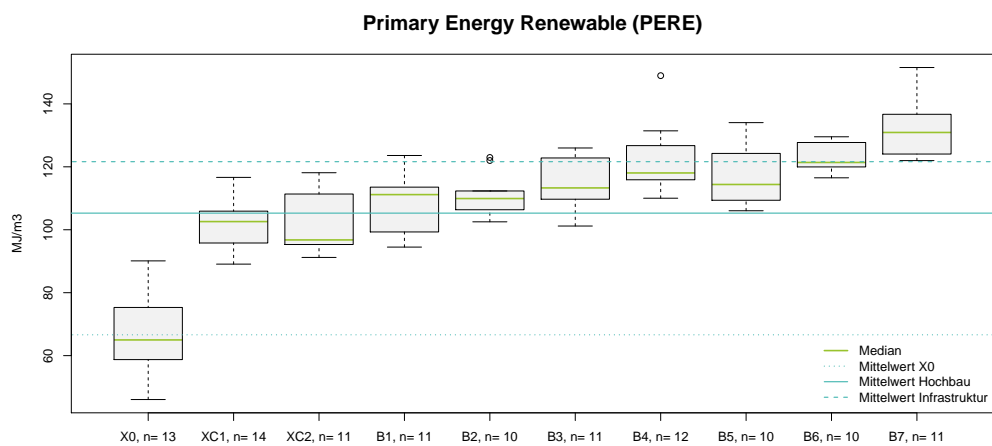


Abbildung C.8.: Total nicht erneuerbare Primärenergie

D. Anhang - Weitere detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

XC1

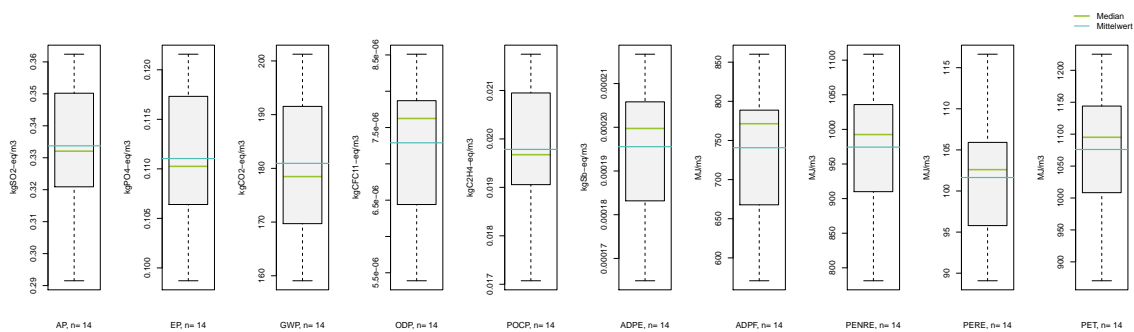


Abbildung D.1.: Ergebnisse XC1

XC2

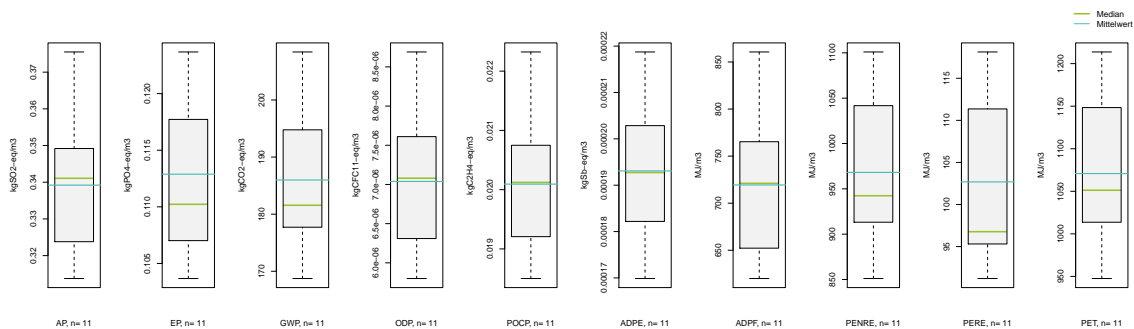


Abbildung D.2.: Ergebnisse XC2

B1

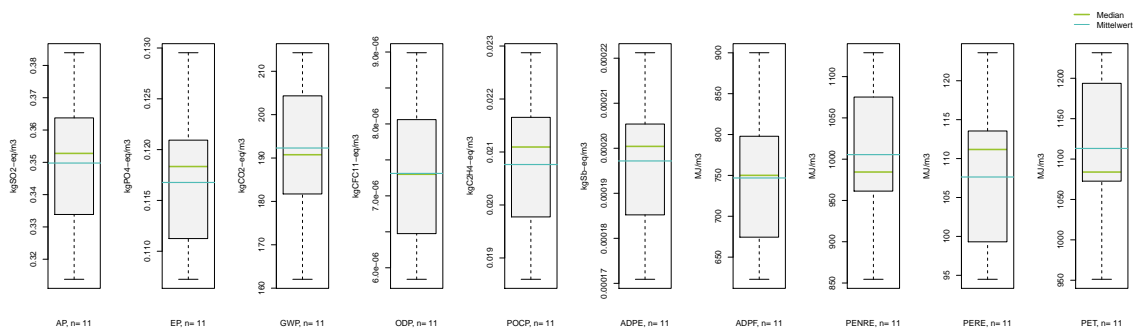


Abbildung D.3.: Ergebnisse B1

B2

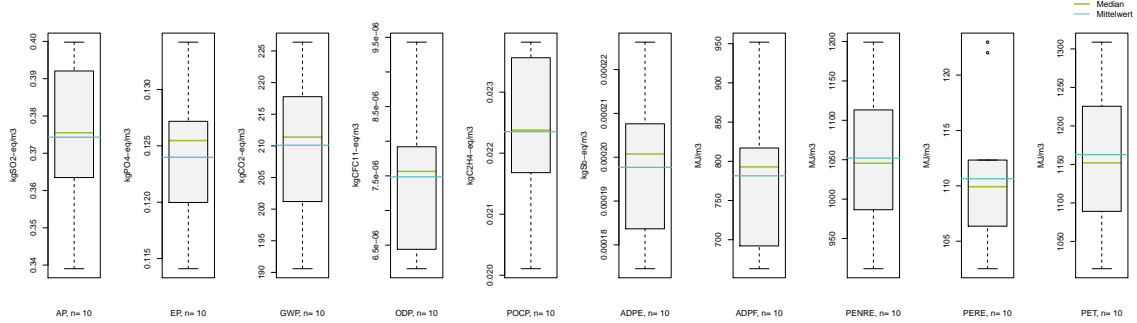


Abbildung D.4.: Ergebnisse B2

B3

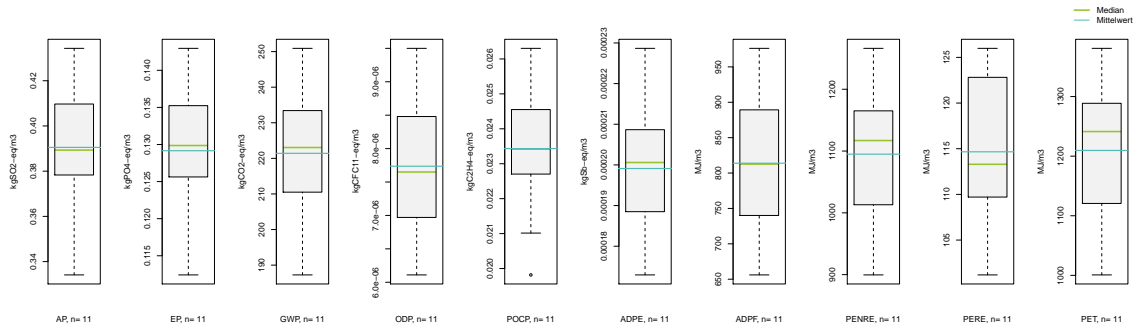


Abbildung D.5.: Ergebnisse B3

B4

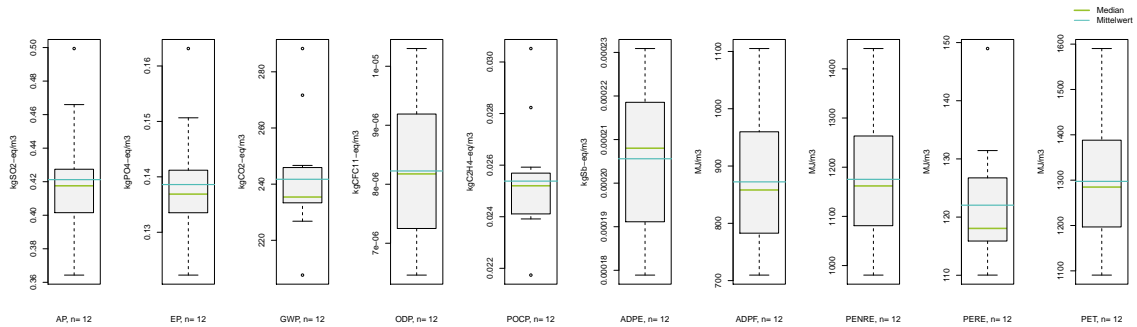


Abbildung D.6.: Ergebnisse B4

B5

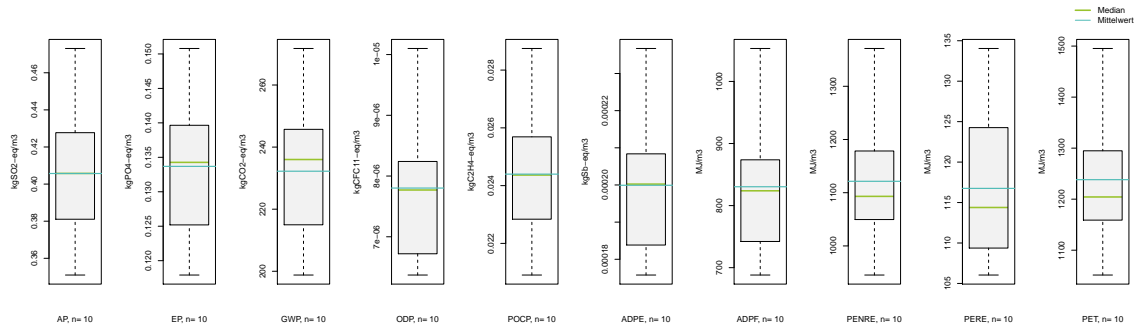


Abbildung D.7.: Ergebnisse B5

B6

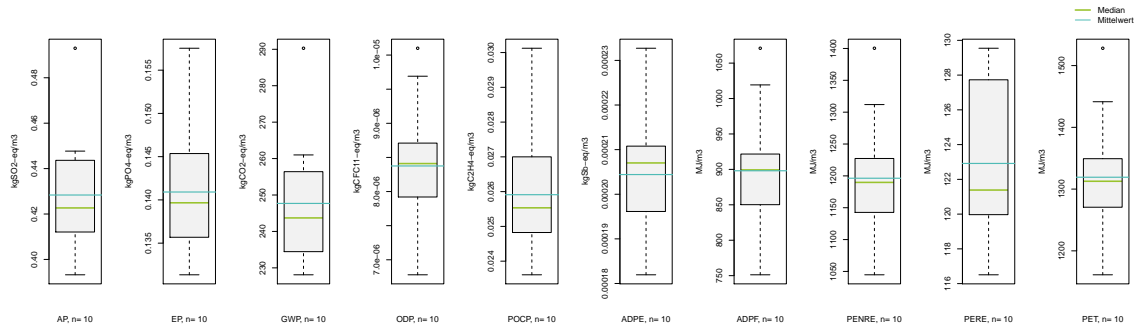


Abbildung D.8.: Ergebnisse B6

B7

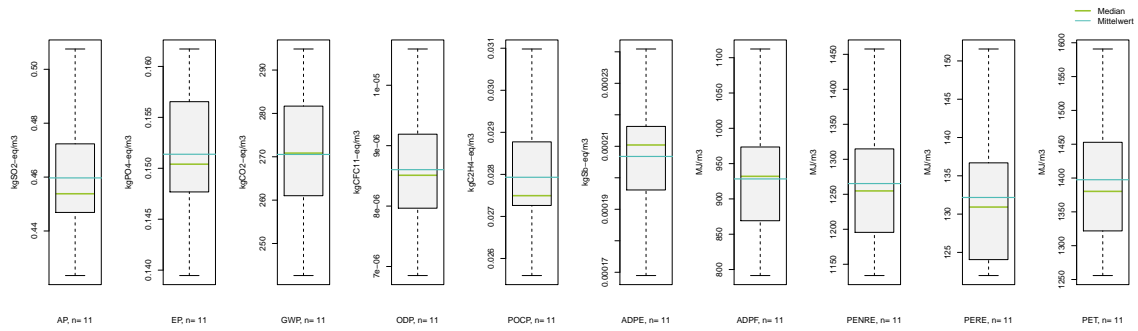


Abbildung D.9.: Ergebnisse B7

E. Anhang - Weitere Ergebnisse der Dominanzanalyse

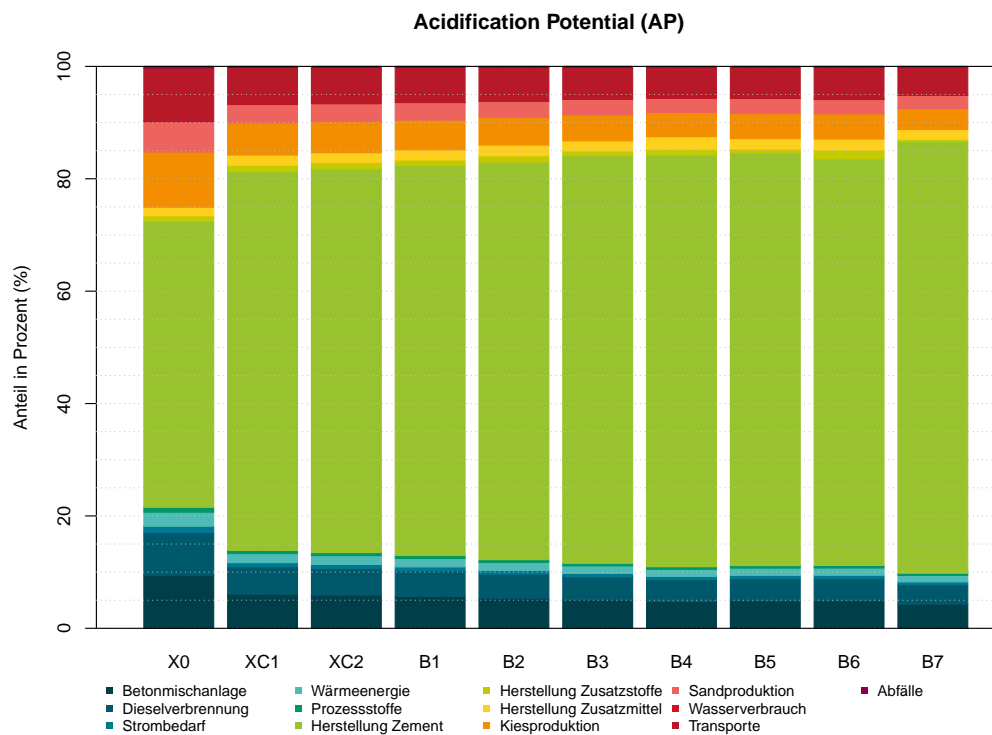


Abbildung E.1.: Dominanzanalyse Versauerung von Boden und Wasser

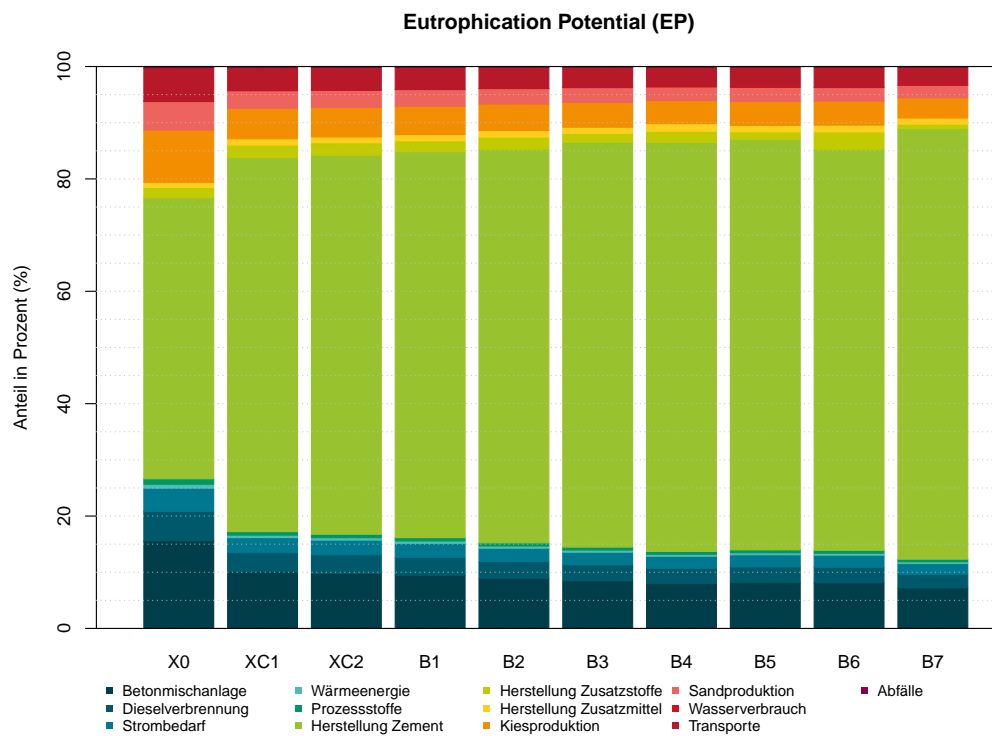


Abbildung E.2.: Dominanzanalyse Eutrophierung

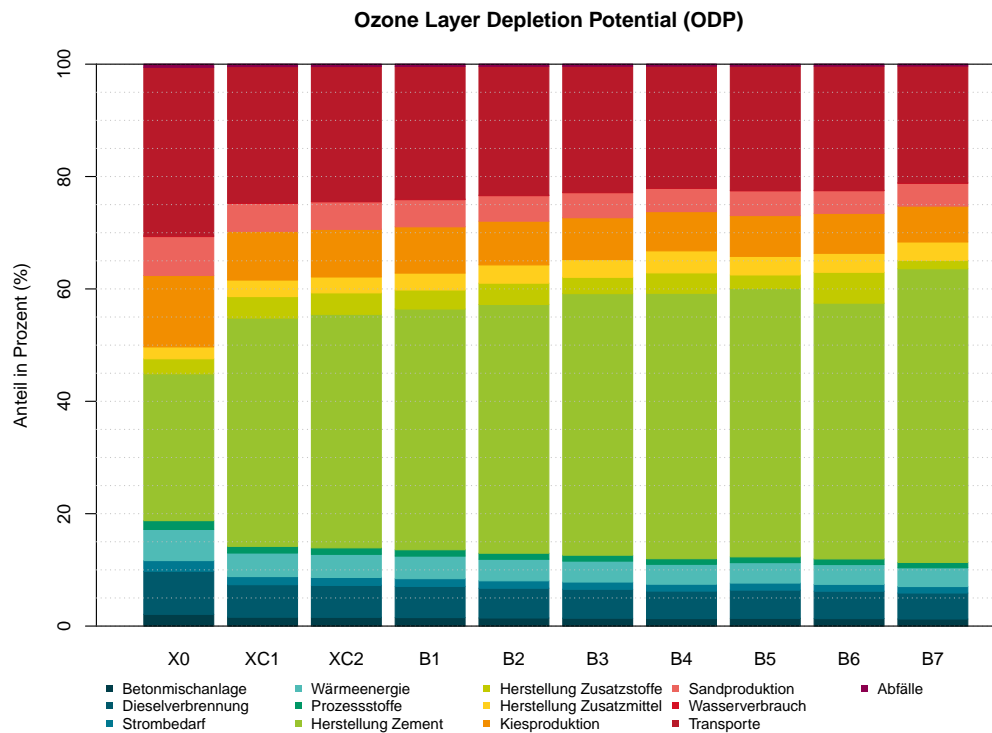


Abbildung E.3.: Dominanzanalyse Ozonabbau

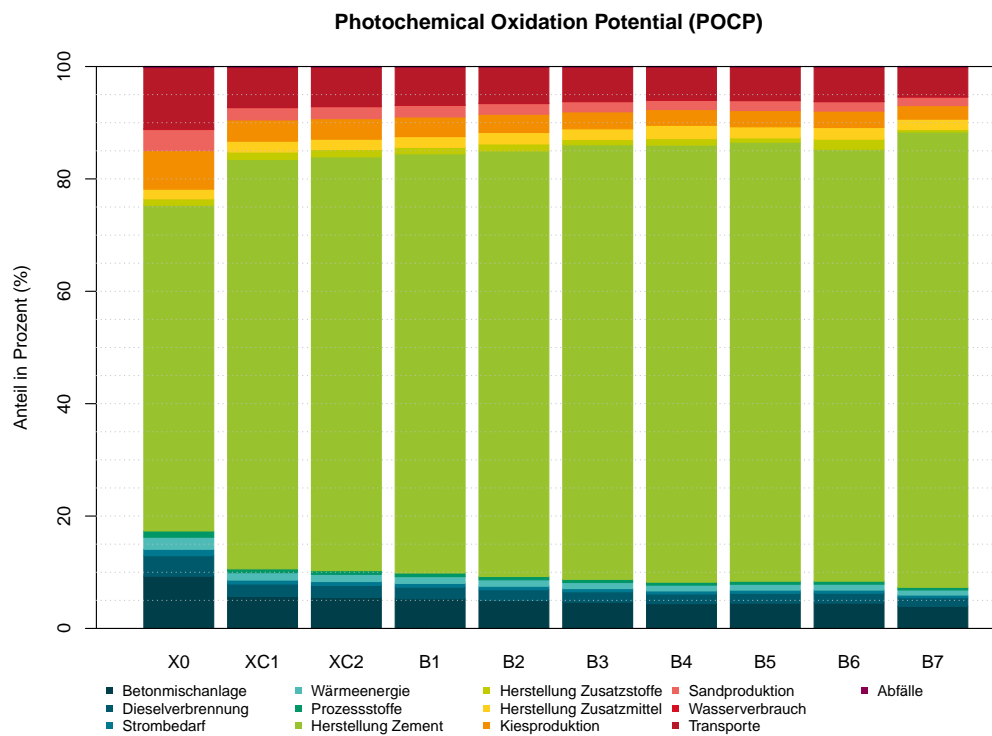


Abbildung E.4.: Dominanzanalyse Photochemische Ozonbildung

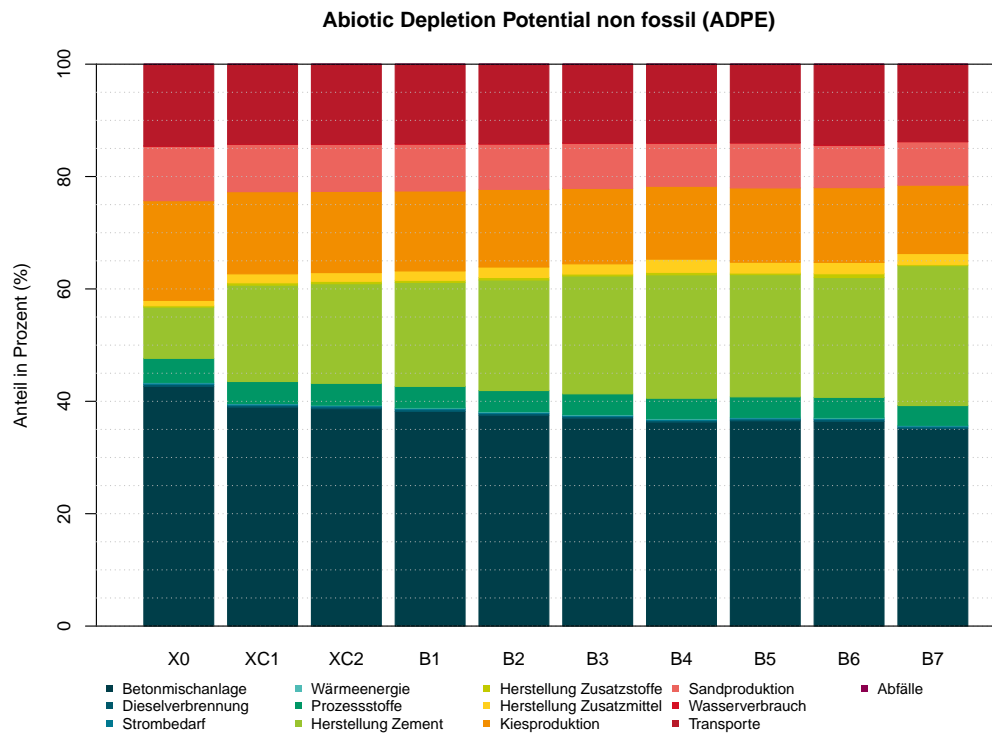


Abbildung E.5.: Dominanzanalyse Verbrauch von abiotischen Ressourcen - Stoffe

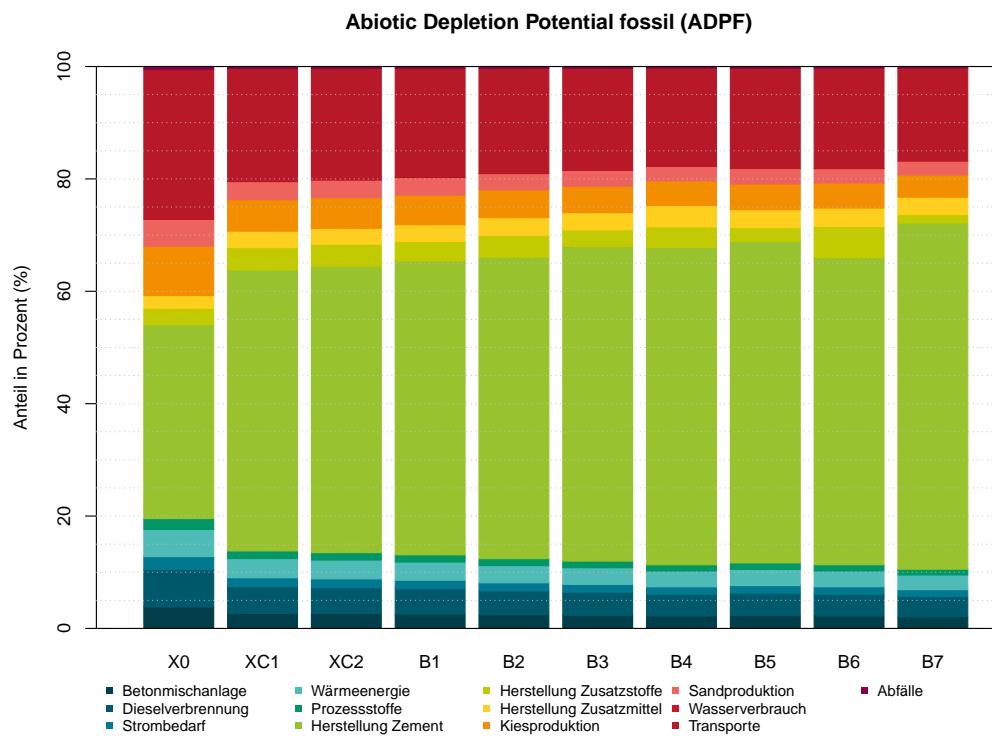


Abbildung E.6.: Dominanzanalyse Verbrauch von abiotischen Ressourcen - fossile Energieträger

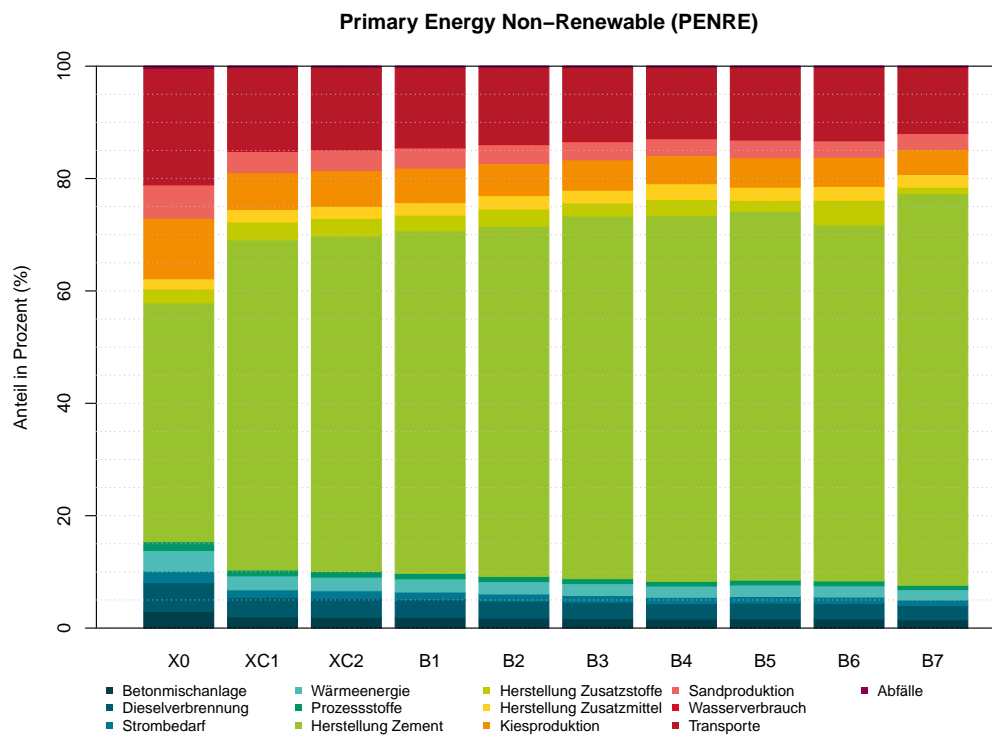


Abbildung E.7.: Dominanzanalyse Total nicht erneuerbare Primärenergie

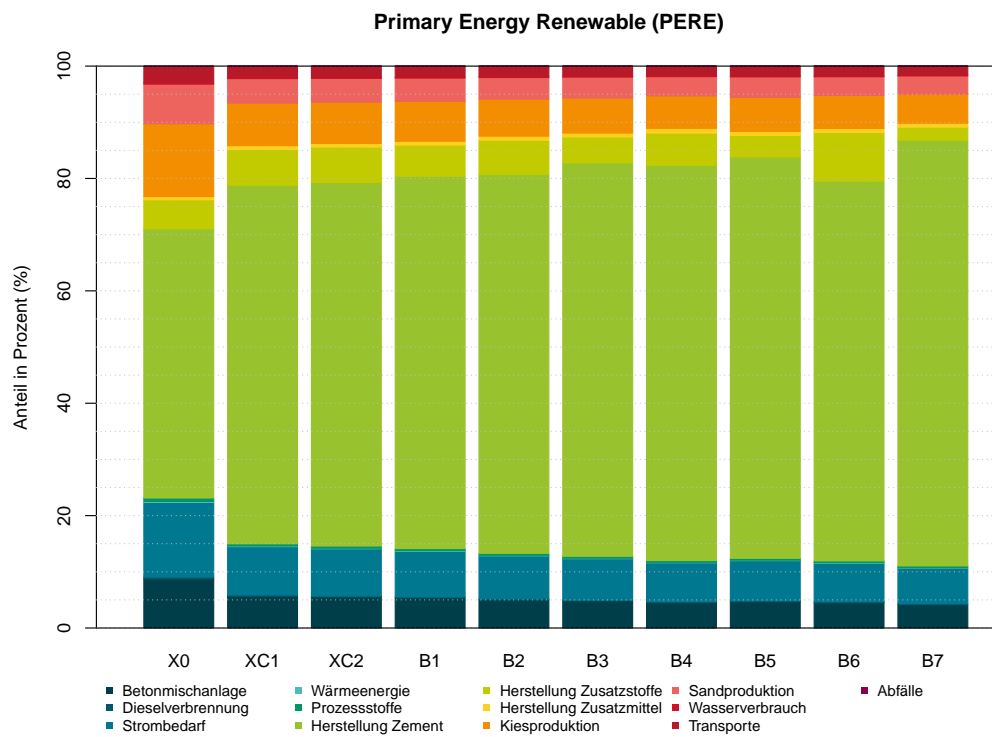


Abbildung E.8.: Dominanzanalyse Total erneuerbare Primärenergie

F. Anhang - Weitere Ergebnisse der Repräsentativität

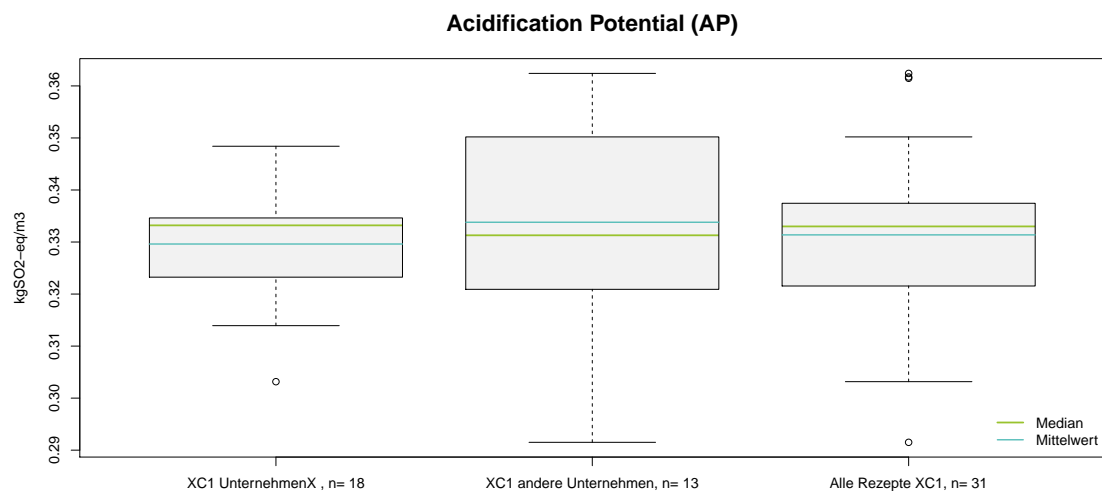


Abbildung F.1.: Analyse von XC1 Rezepten - AP

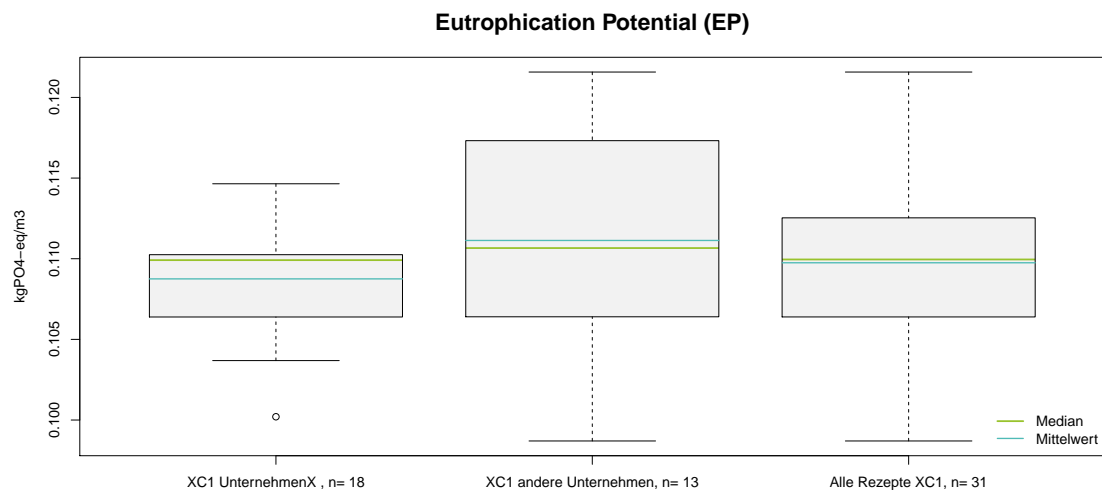


Abbildung F.2.: Analyse von XC1 Rezepten - EP

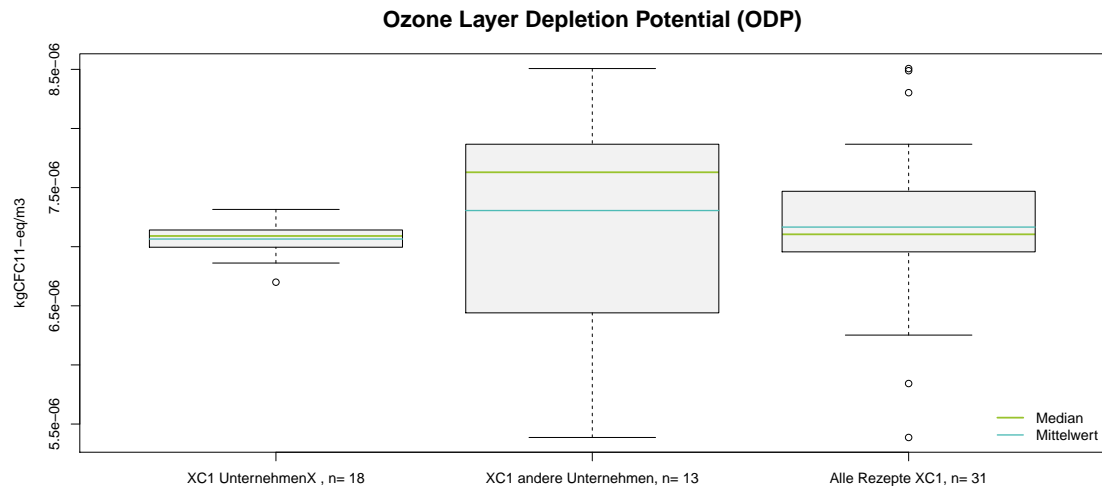


Abbildung F.3.: Analyse von XC1 Rezepten - ODP

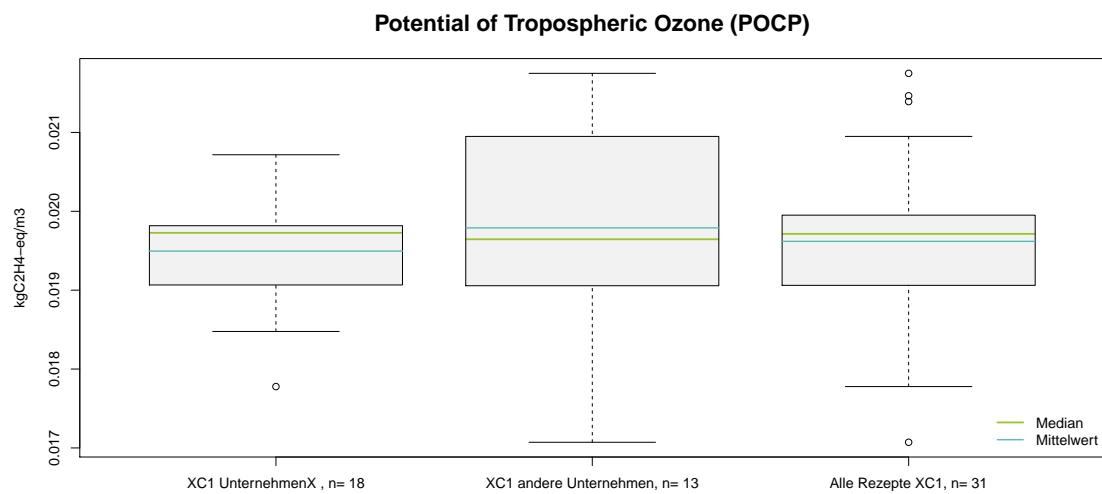


Abbildung F.4.: Analyse von XC1 Rezepten - POCP

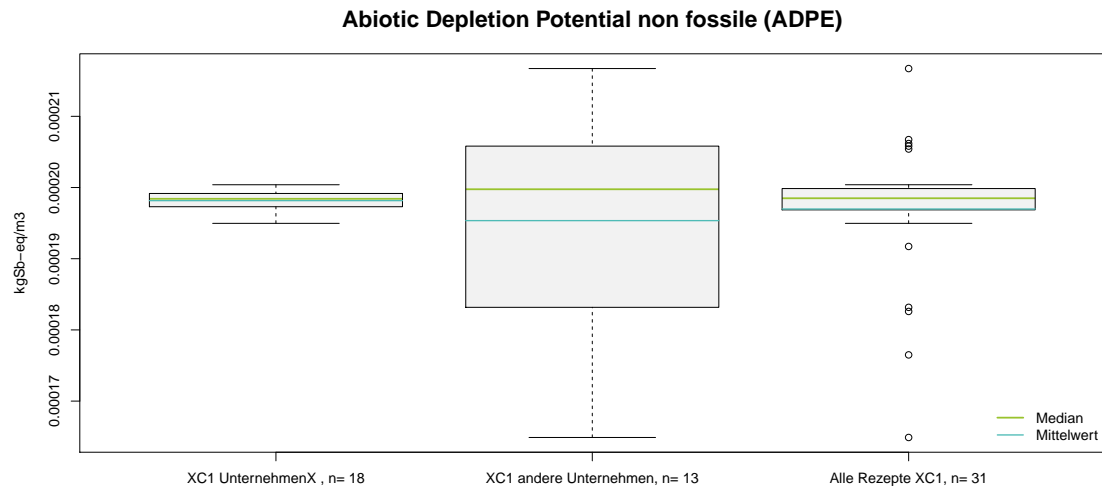


Abbildung F.5.: Analyse von XC1 Rezepten - ADPE

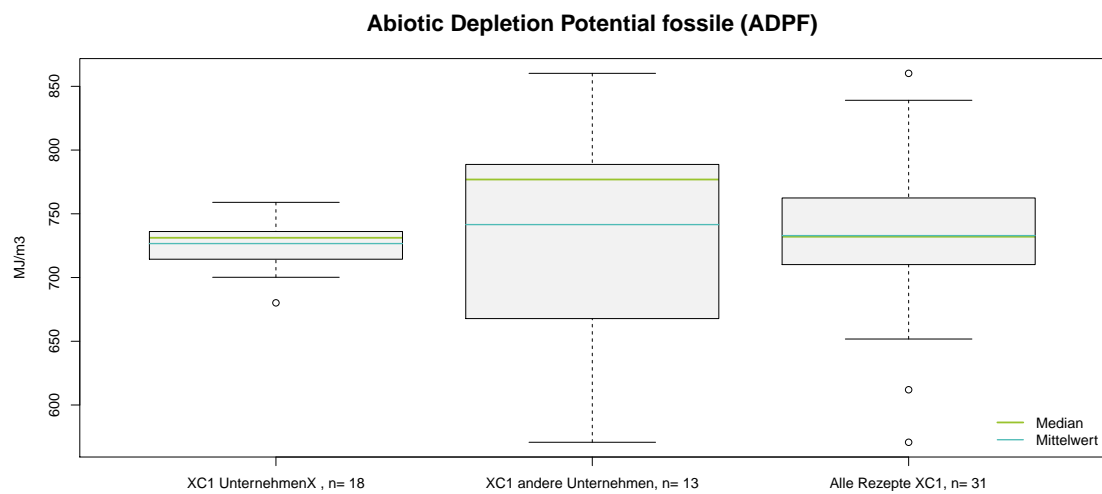


Abbildung F.6.: Analyse von XC1 Rezepten - ADPF

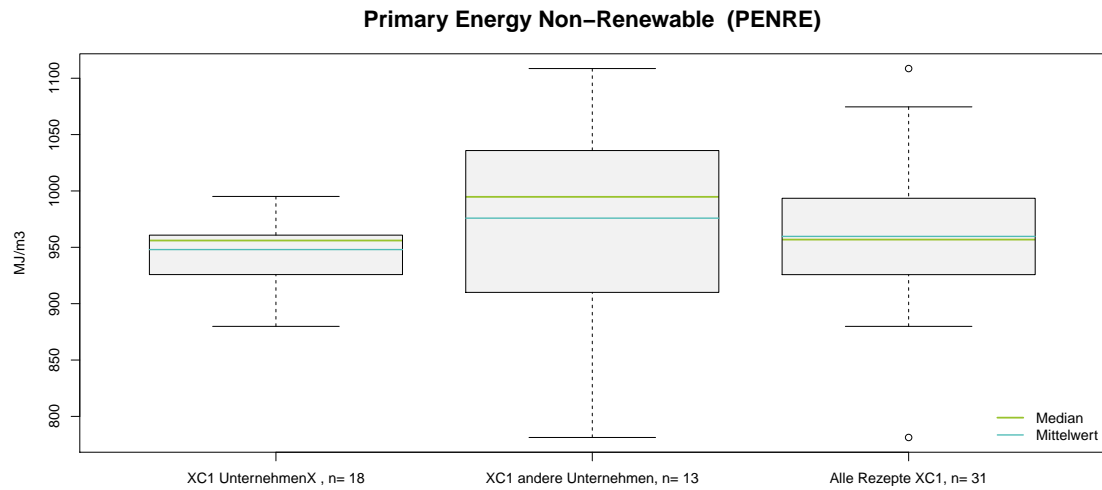


Abbildung F.7.: Analyse von XC1 Rezepten - PENRE

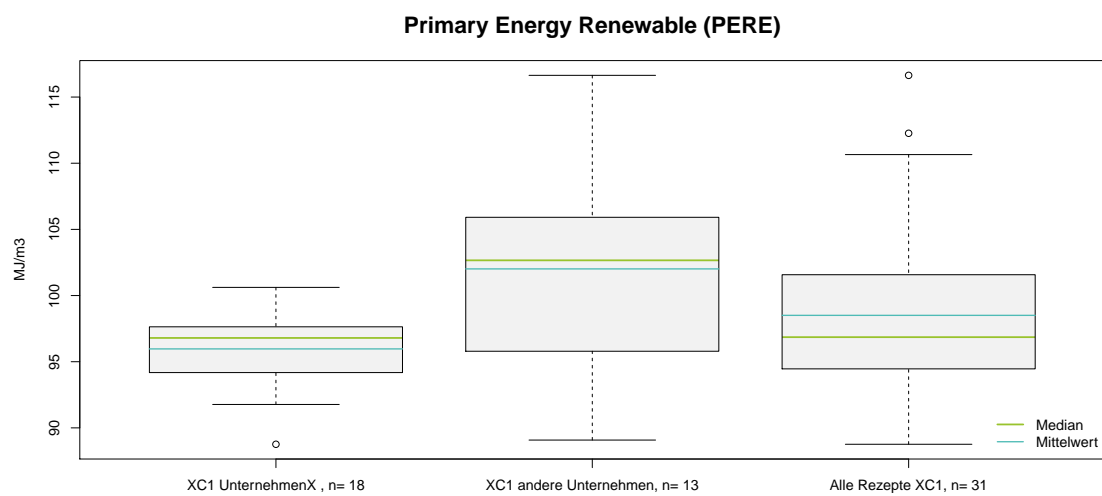


Abbildung F.8.: Analyse von XC1 Rezepten - PERE

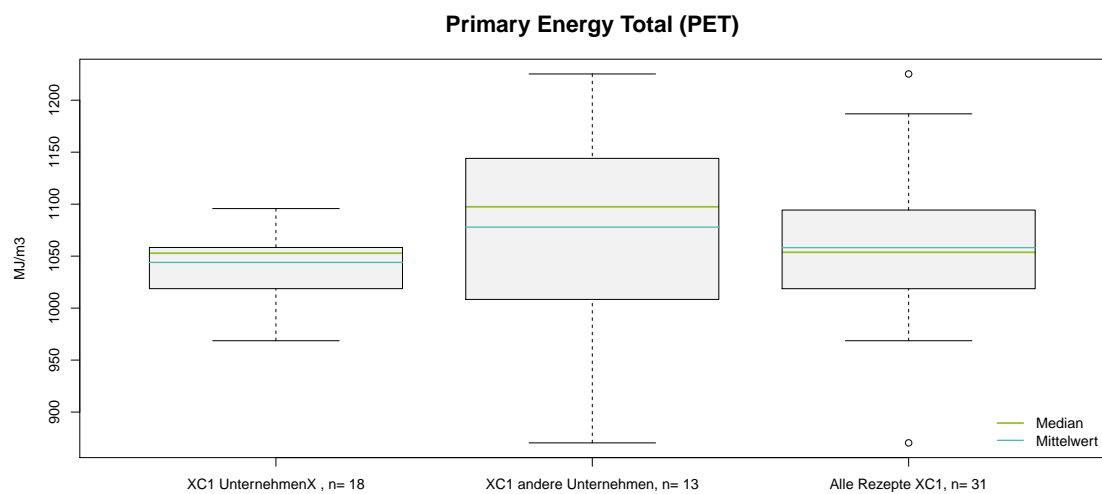


Abbildung F.9.: Analyse von XC1 Rezepten - PET

G. Anhang - Weitere Ergebnisse der Korrelationsanalyse ecoinvent v.2.2 & v.3.3

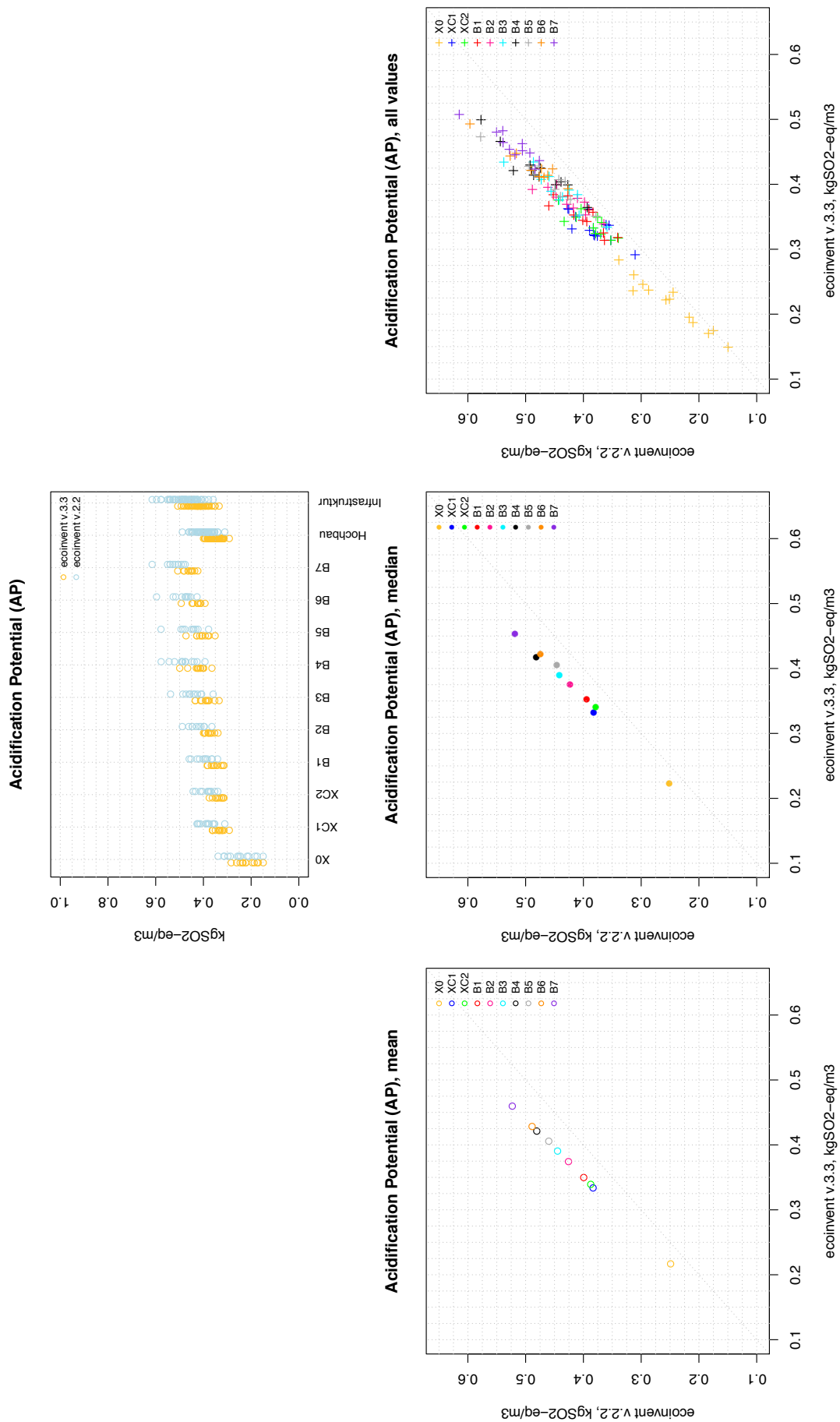


Abbildung G.1.: Ergebnisse Datenbankvergleich AP

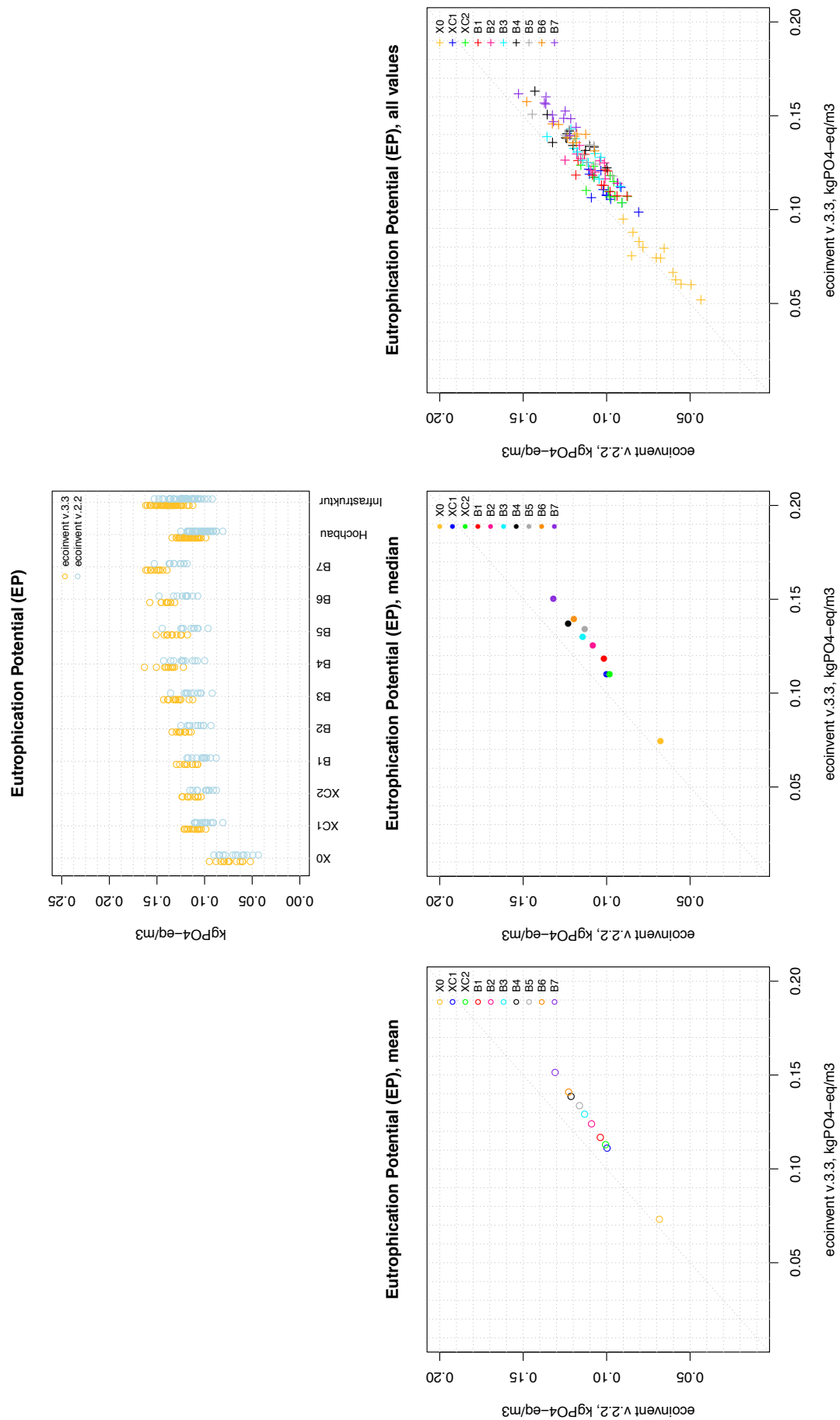


Abbildung G.2.: Ergebnisse Datenbankvergleich EP

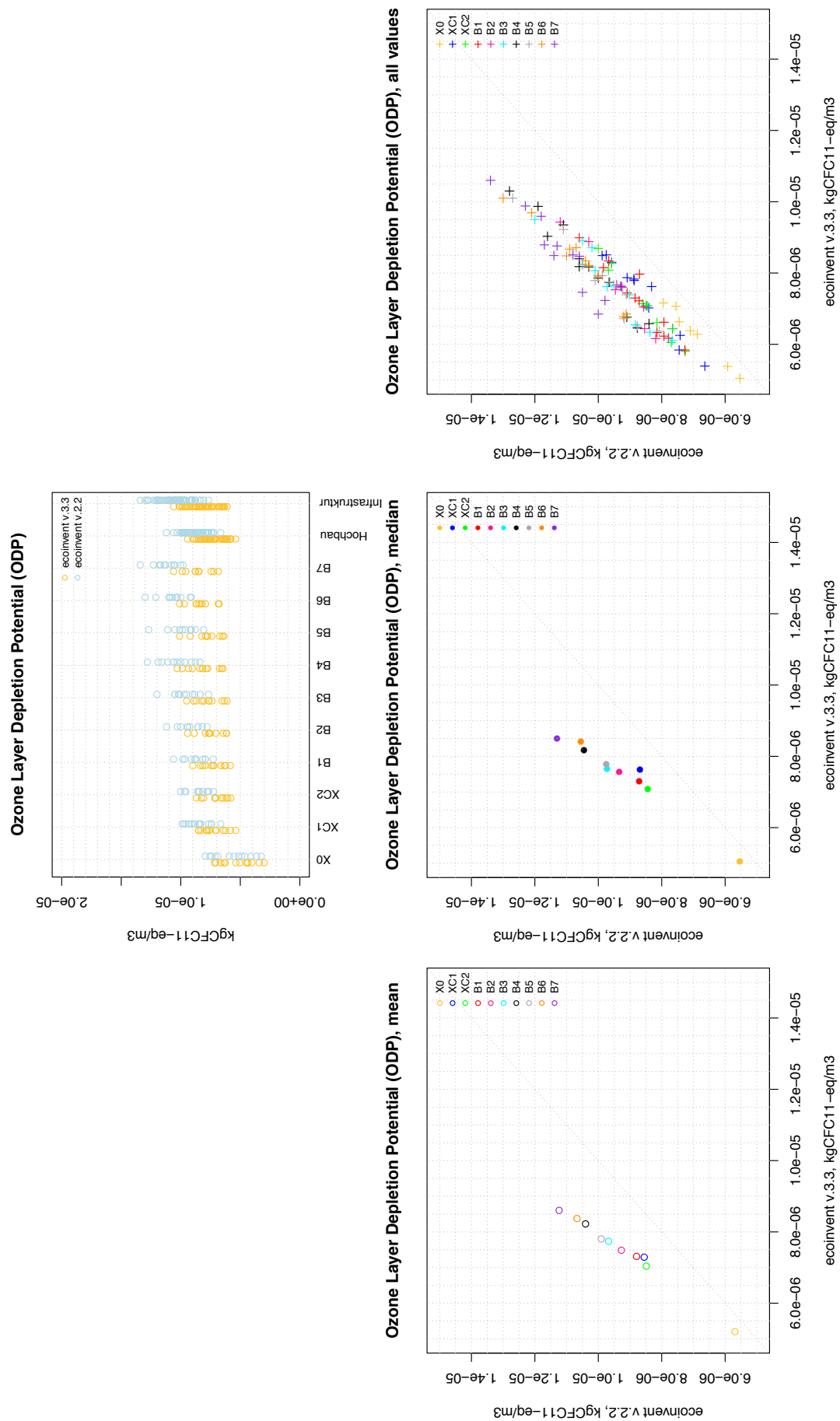
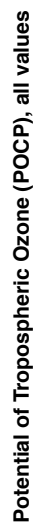


Abbildung G.3.: Ergebnisse Datenbankvergleich ODP



143

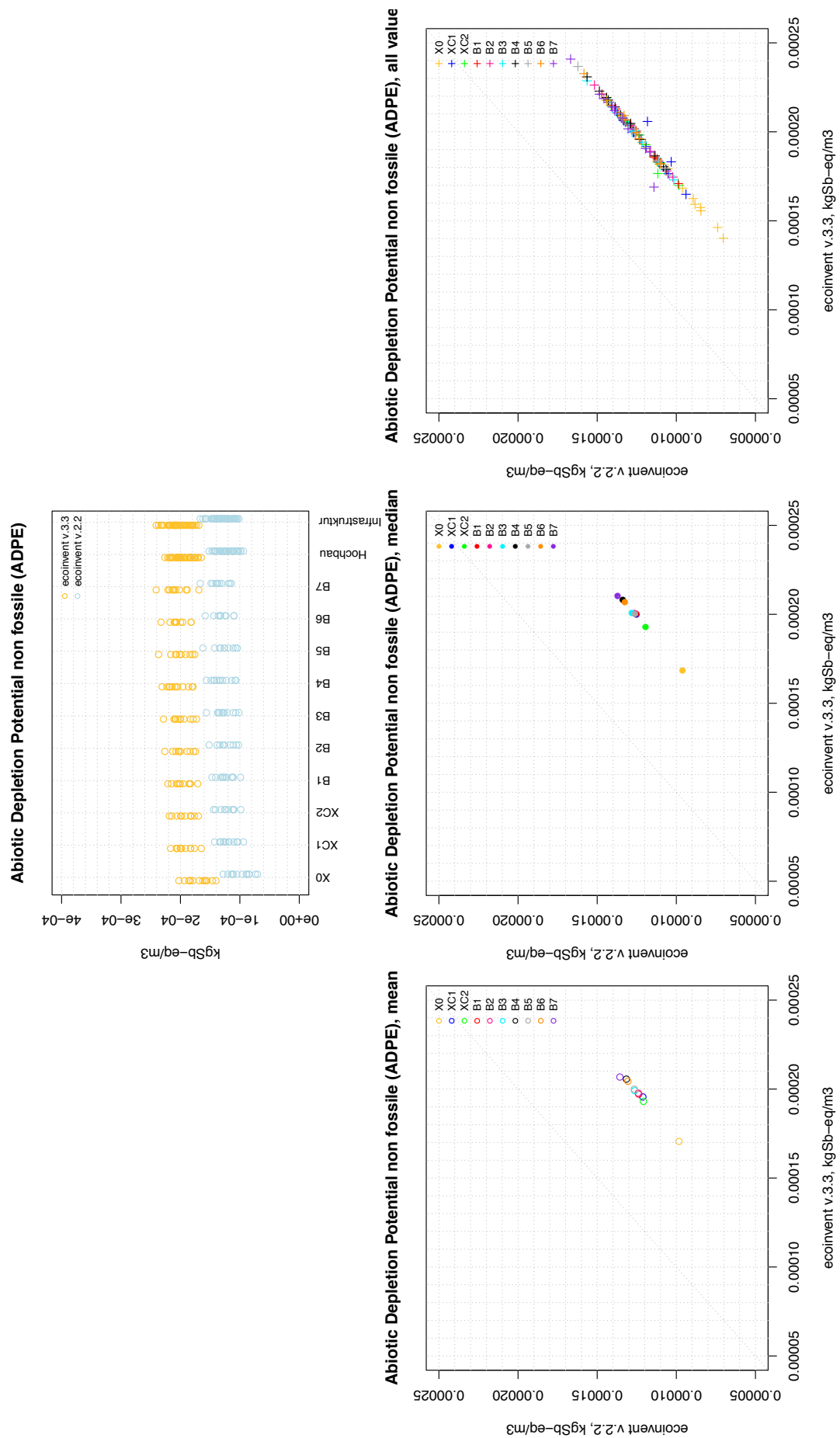


Abbildung G.5.: Ergebnisse Datenbankvergleich ADPE

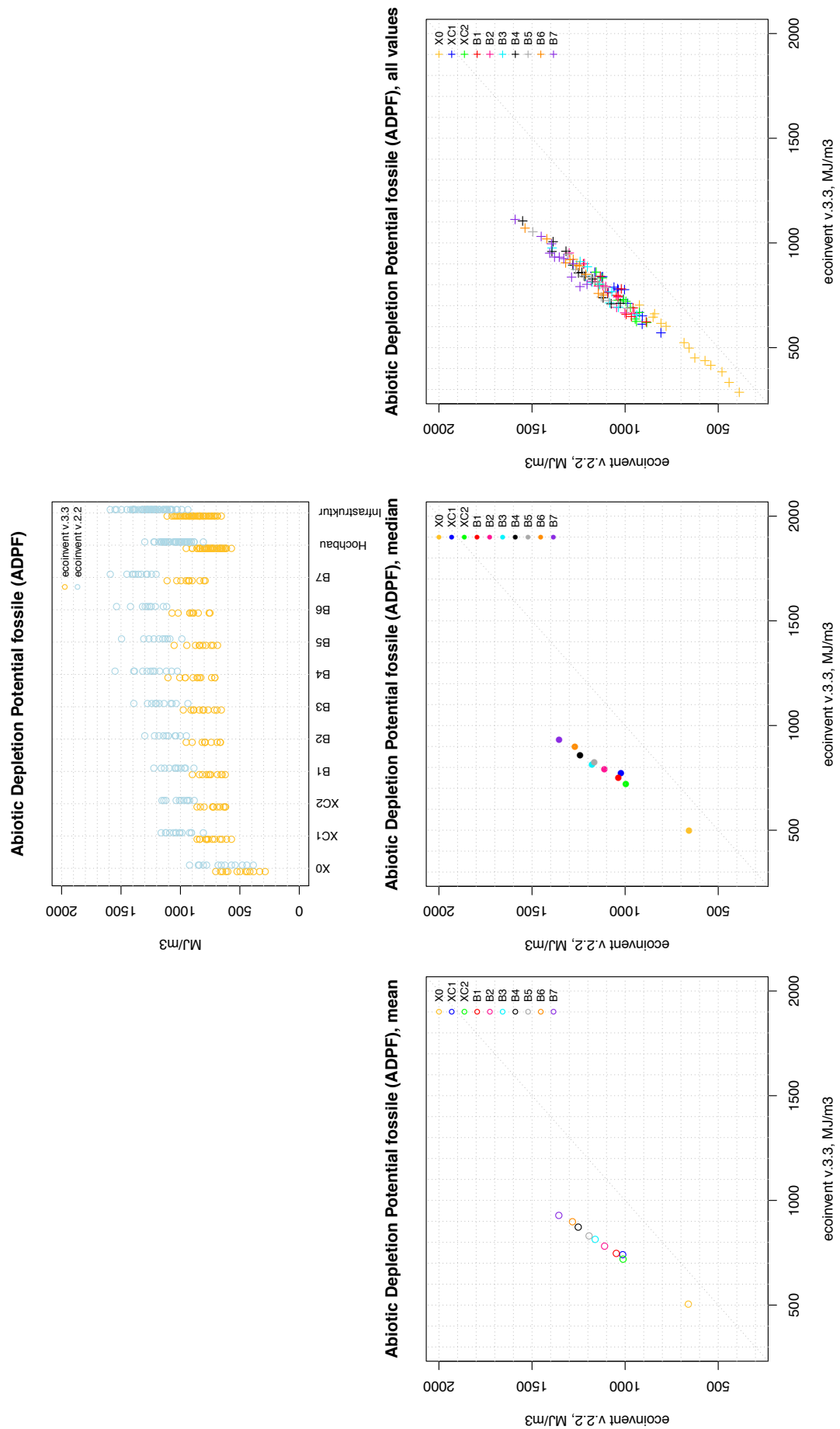


Abbildung G.6.: Ergebnisse Datenbankvergleich ADPF

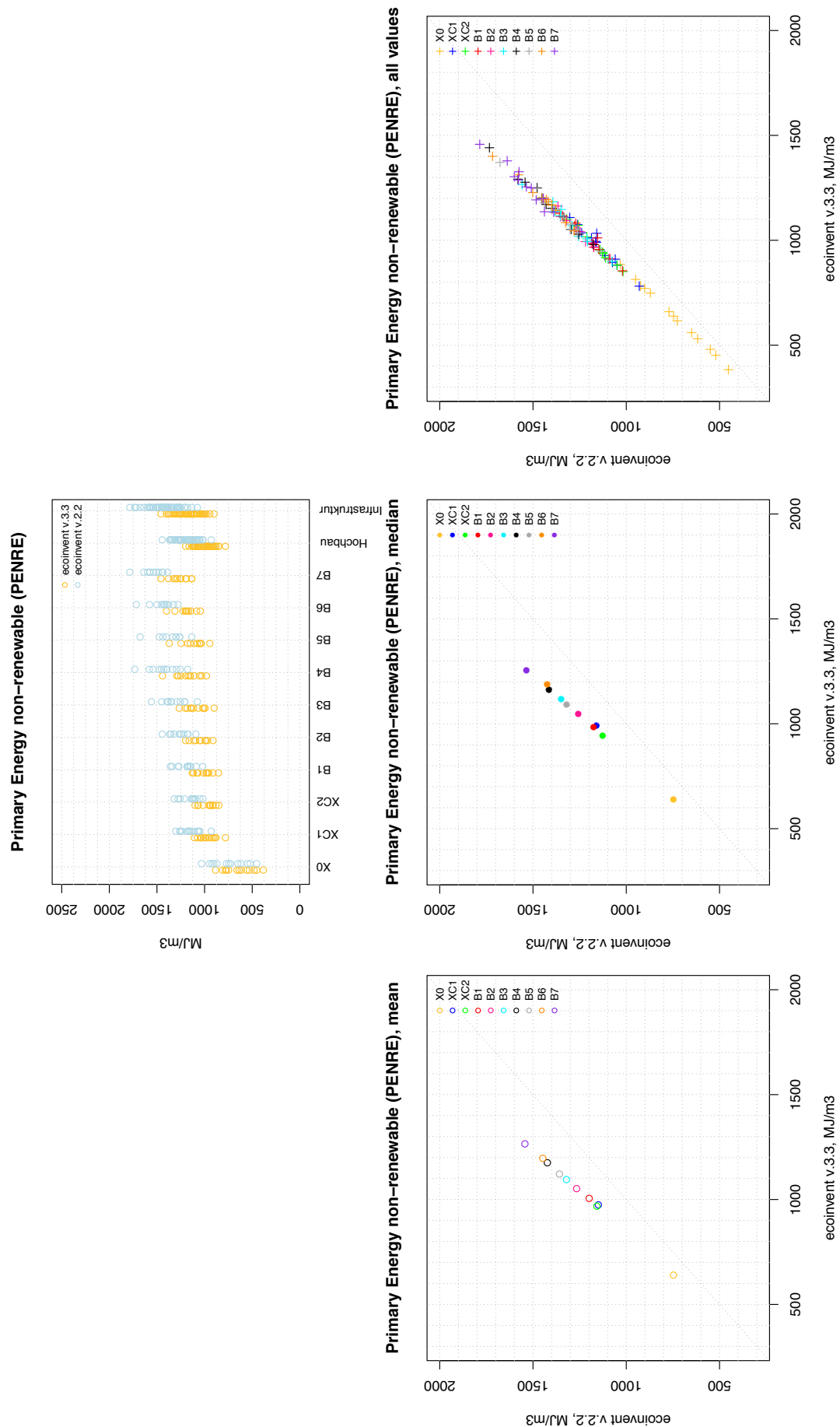


Abbildung G.7.: Ergebnisse Datenbankvergleich PENRE

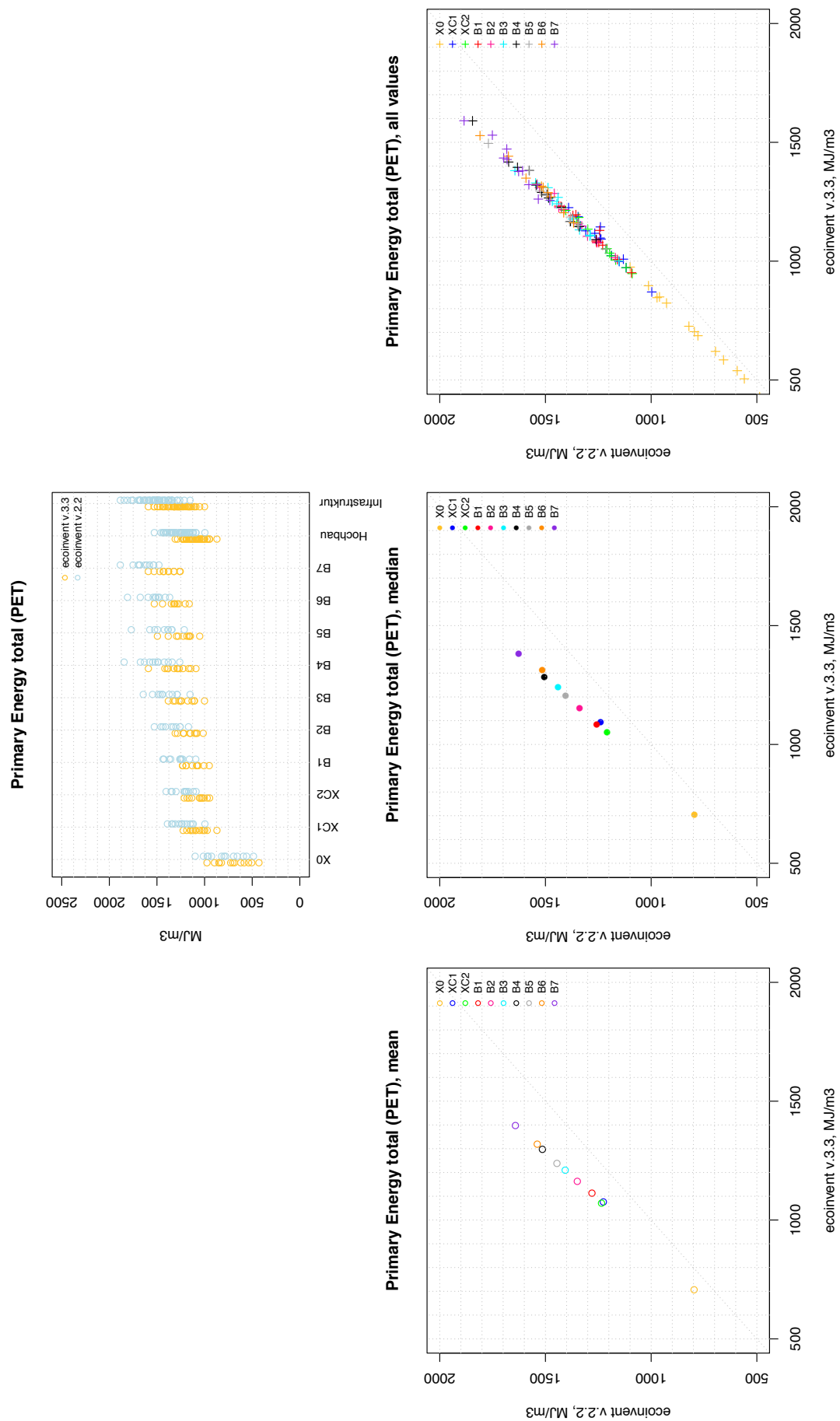


Abbildung G.8.: Ergebnisse Datenbankvergleich PET

H. Anhang - Weitere Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation

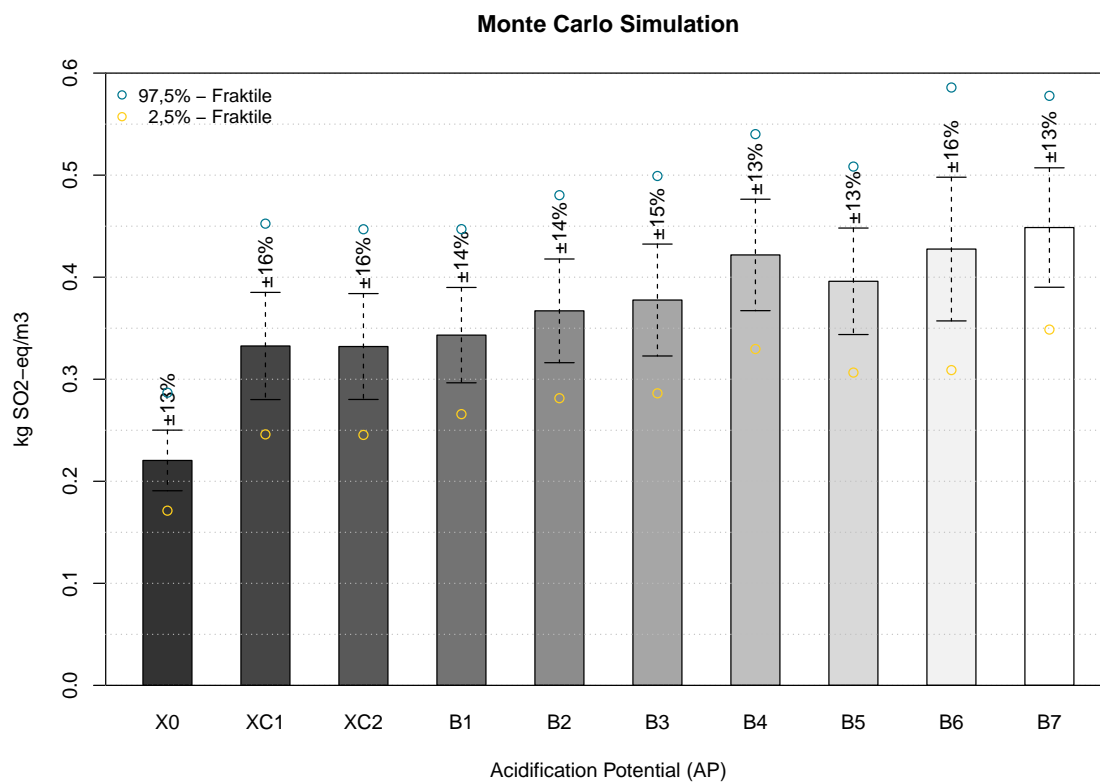


Abbildung H.1.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation AP

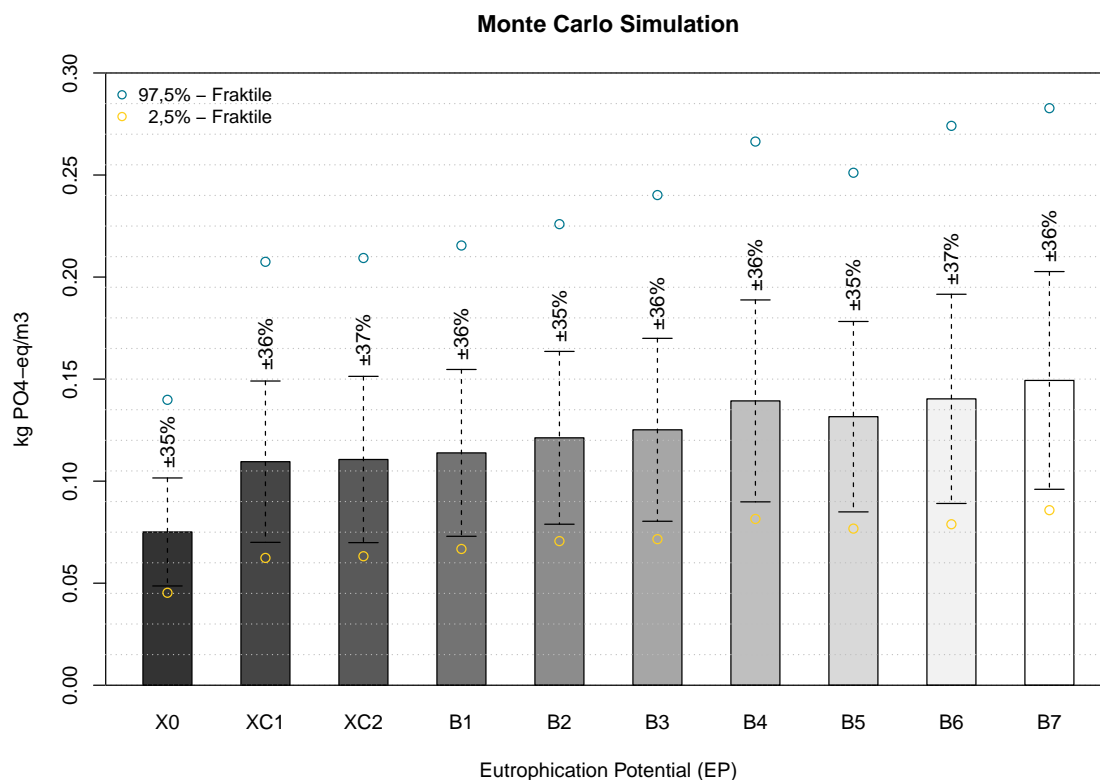


Abbildung H.2.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation EP

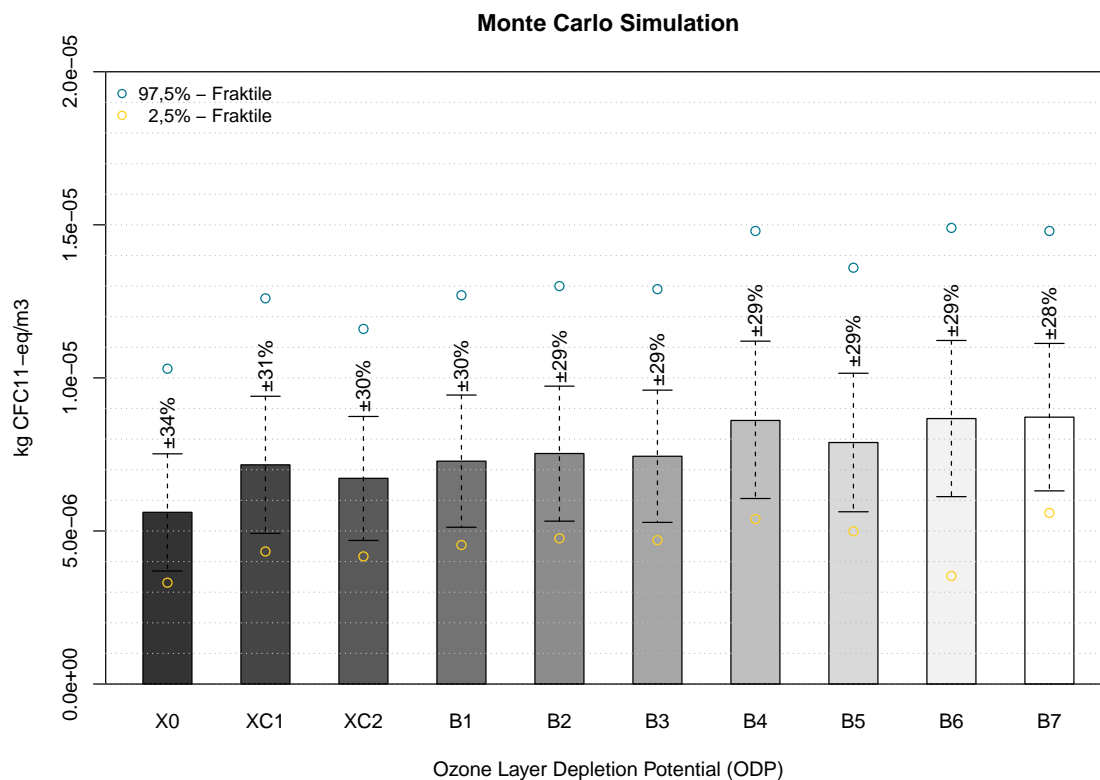


Abbildung H.3.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation ODP

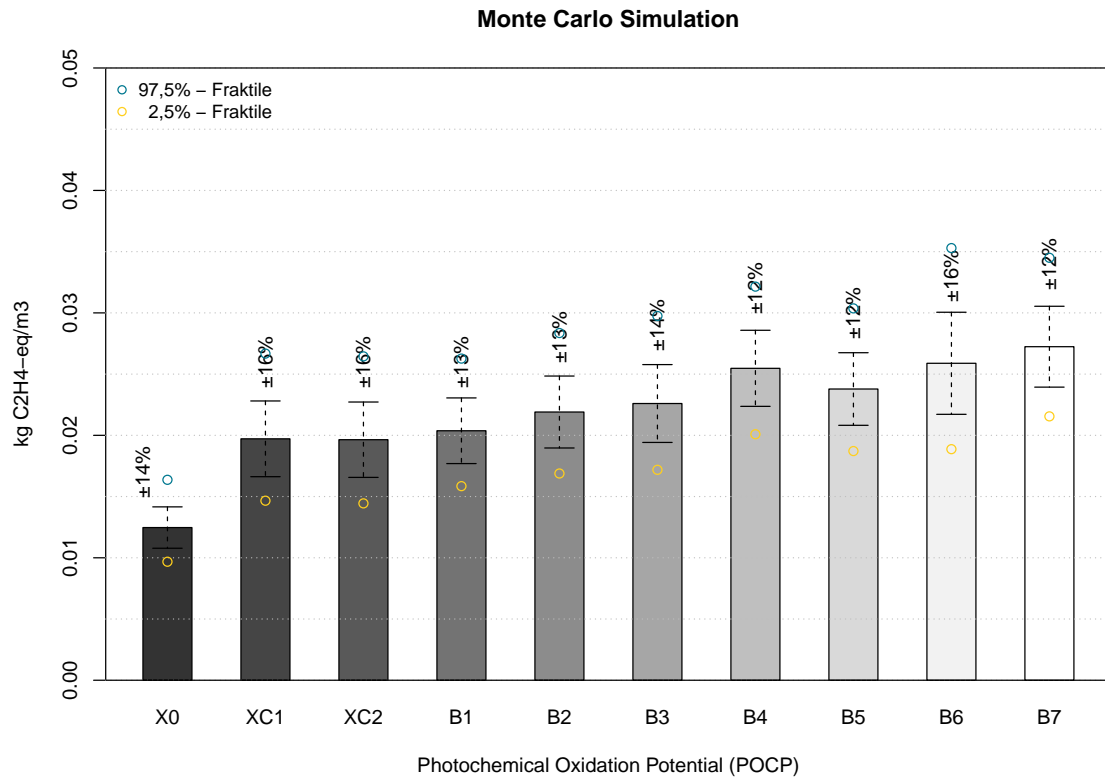


Abbildung H.4.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation POCP

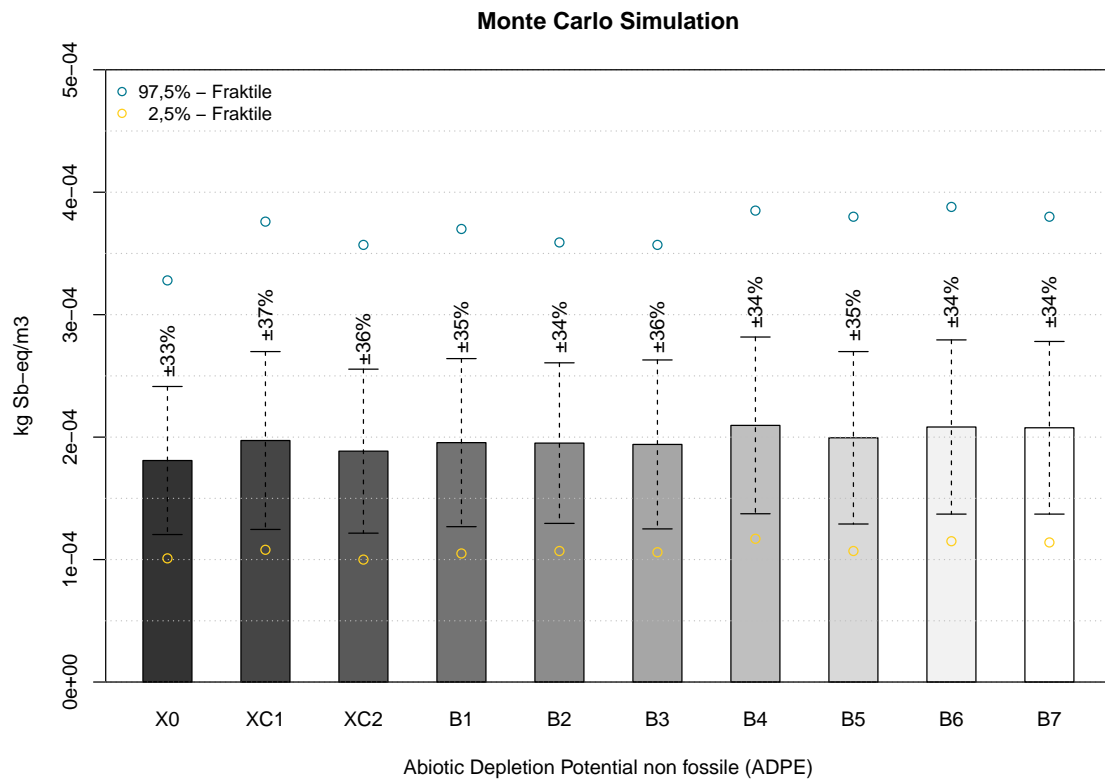


Abbildung H.5.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation ADPE

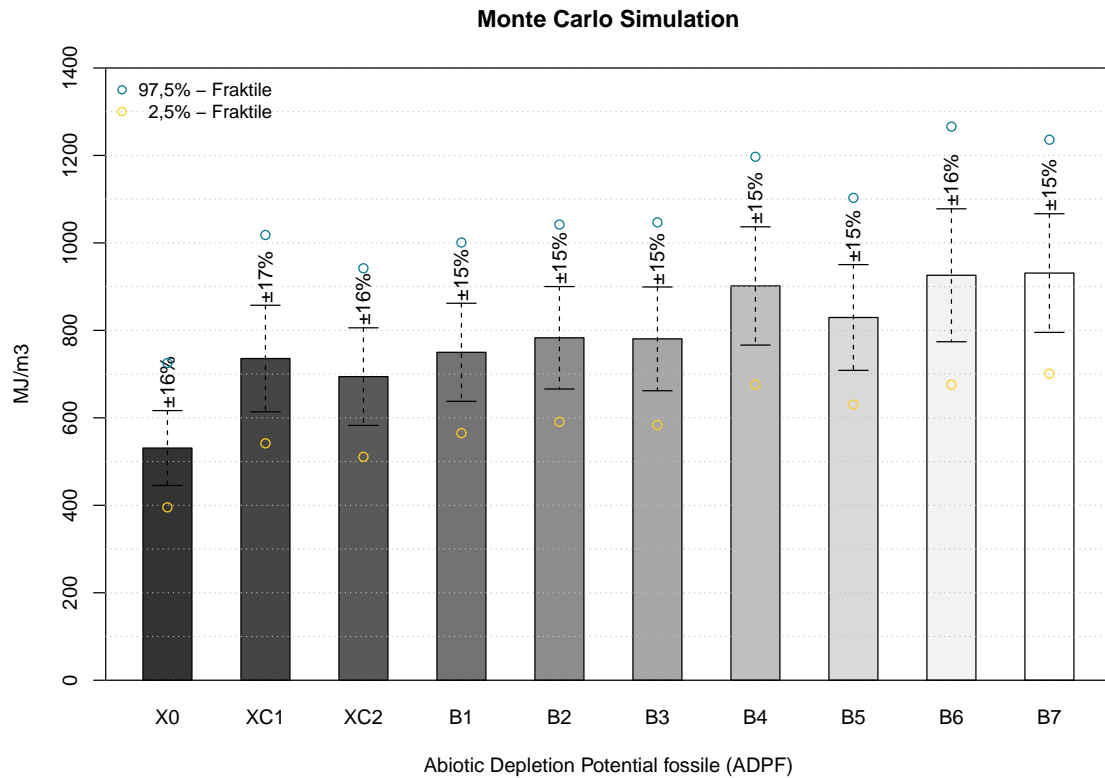


Abbildung H.6.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation ADPF

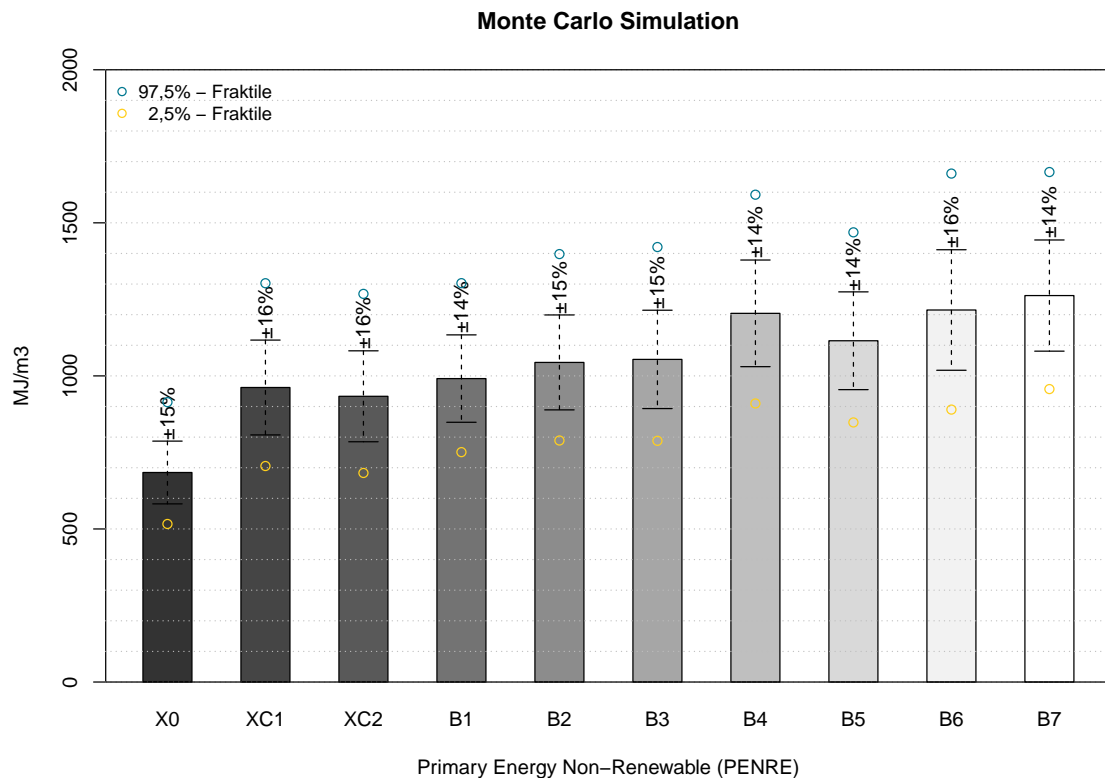
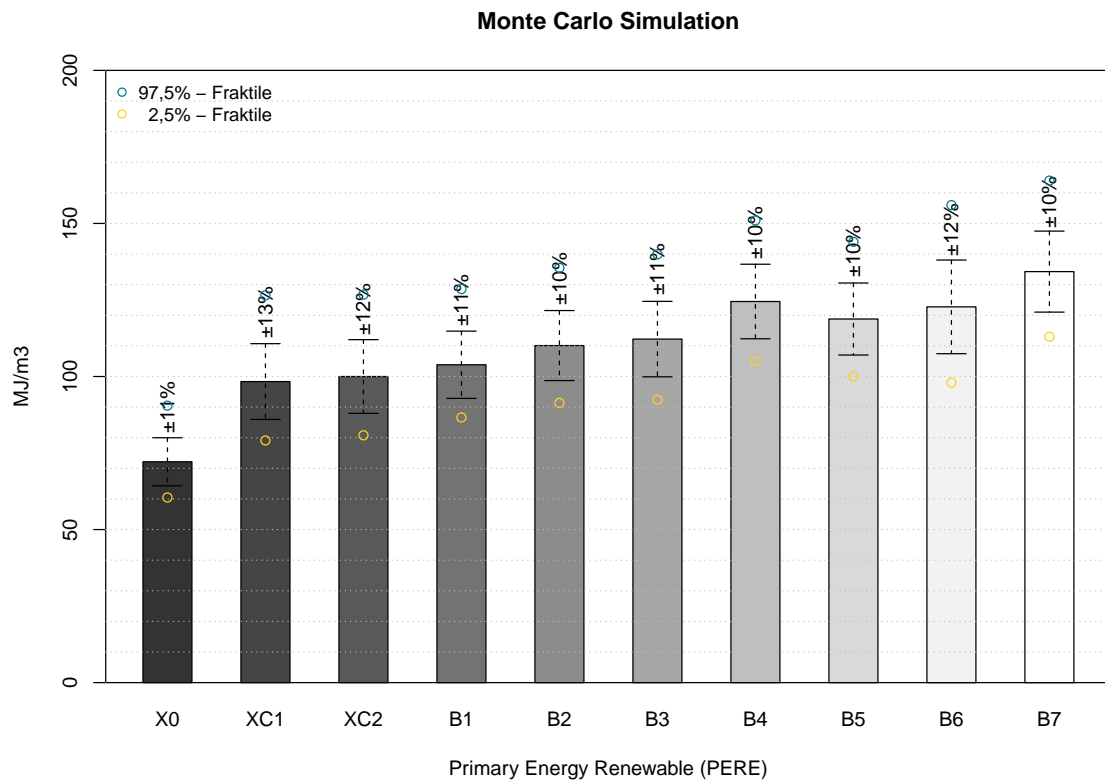


Abbildung H.7.: Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation PENRE

Abbildung H.8.: *Ergebnisse Monte-Carlo-Simulation PERE*

I. Anhang - Weitere Ergebnisse der Einordnung in die Literatur

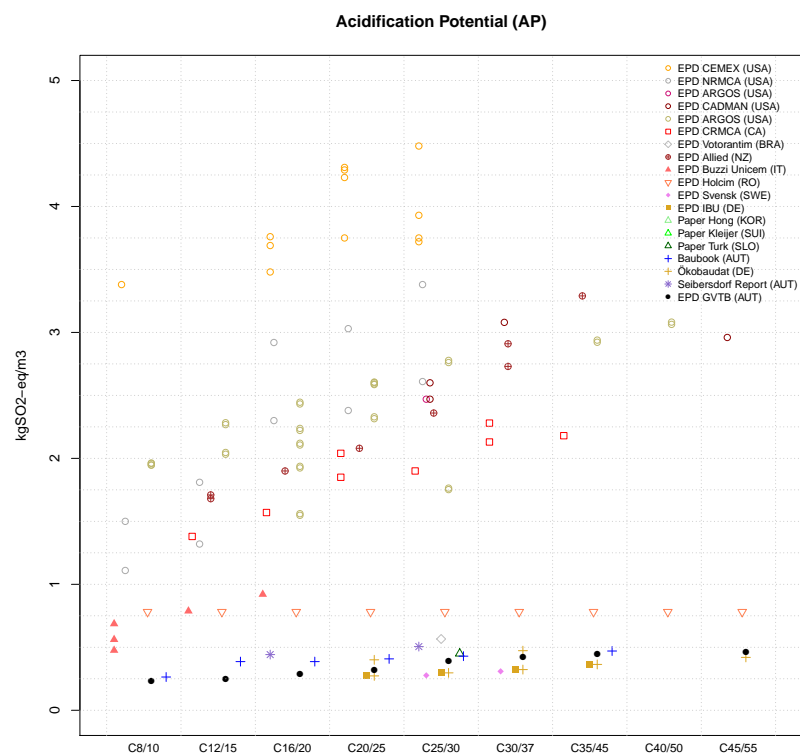


Abbildung I.1.: Einordnung der Ergebnisse von AP in die Literatur

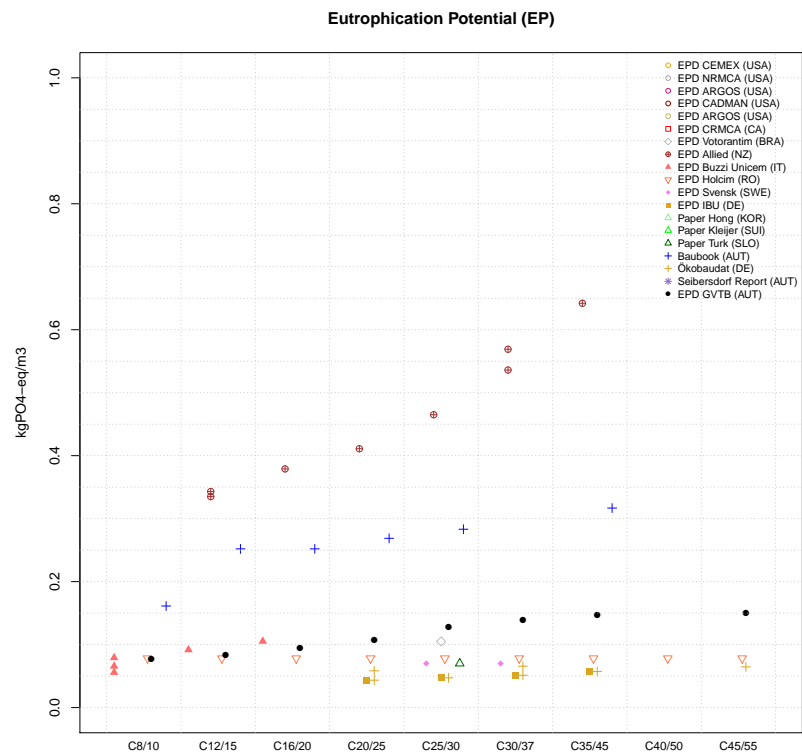


Abbildung I.2.: Einordnung der Ergebnisse von EP in die Literatur

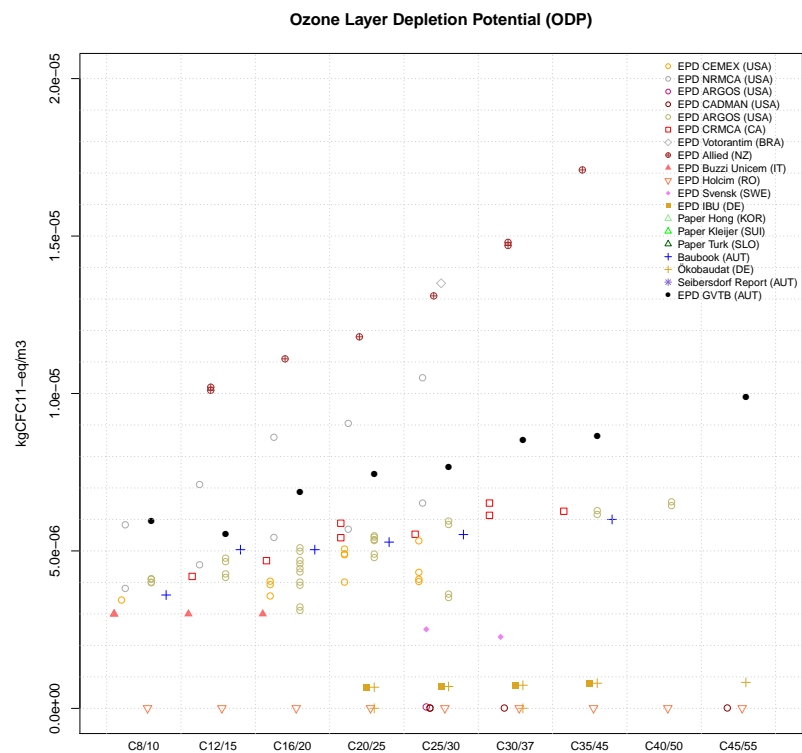


Abbildung I.3.: Einordnung der Ergebnisse von ODP in die Literatur

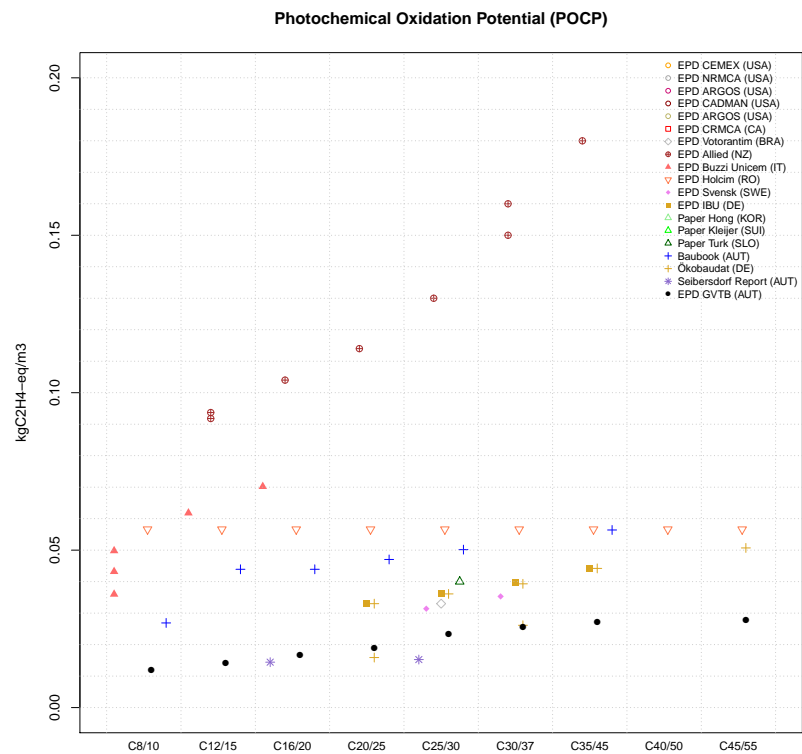


Abbildung I.4.: Einordnung der Ergebnisse von POCP in die Literatur

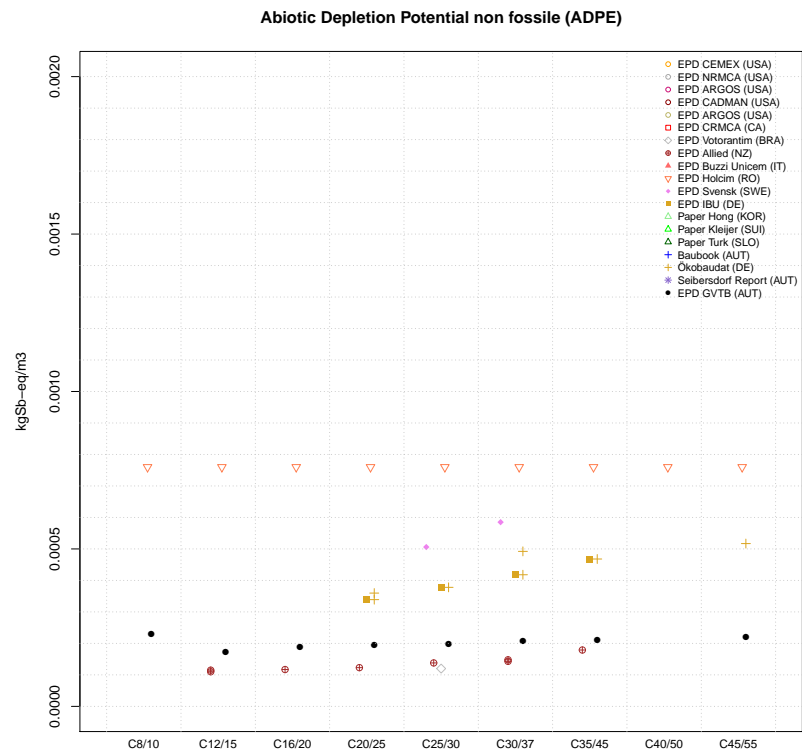


Abbildung I.5.: Einordnung der Ergebnisse von ADPE in die Literatur

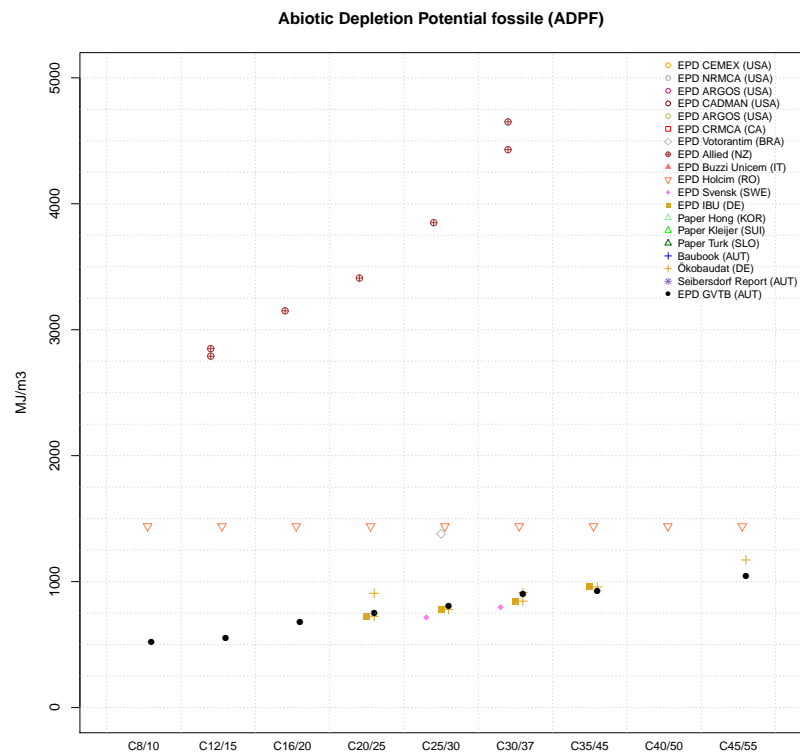


Abbildung I.6.: Einordnung der Ergebnisse von ADPF in die Literatur

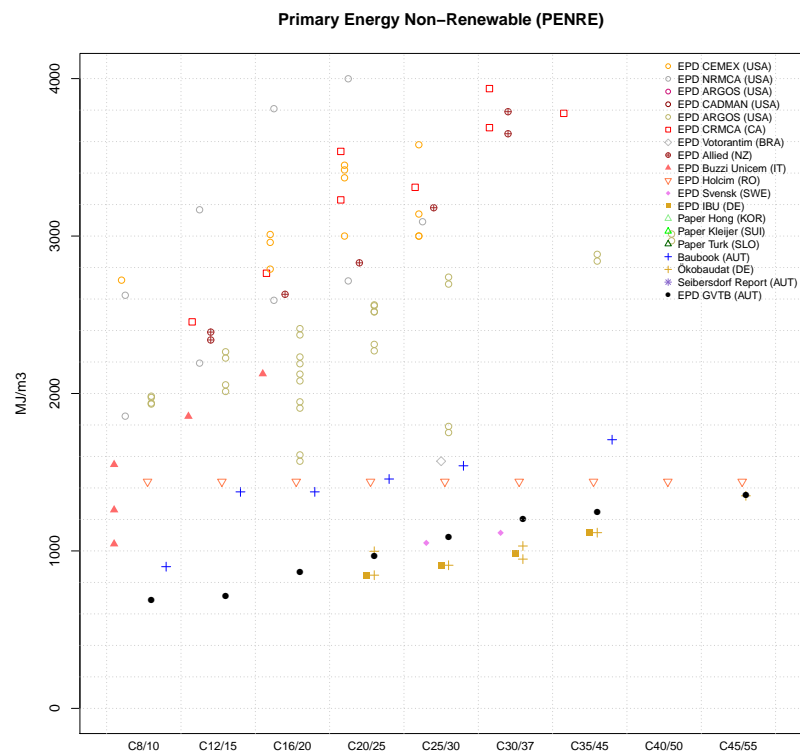


Abbildung I.7.: Einordnung der Ergebnisse von PENRE in die Literatur

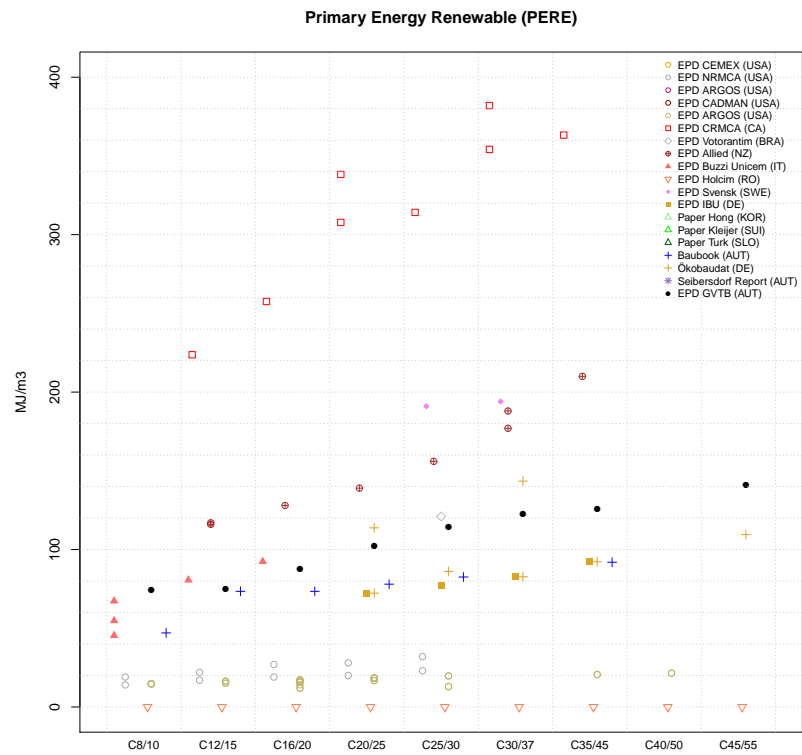


Abbildung I.8.: Einordnung der Ergebnisse von PERE in die Literatur

J. Anhang - Weitere Ergebnisse des funktionale Äquivalenzvergleichs

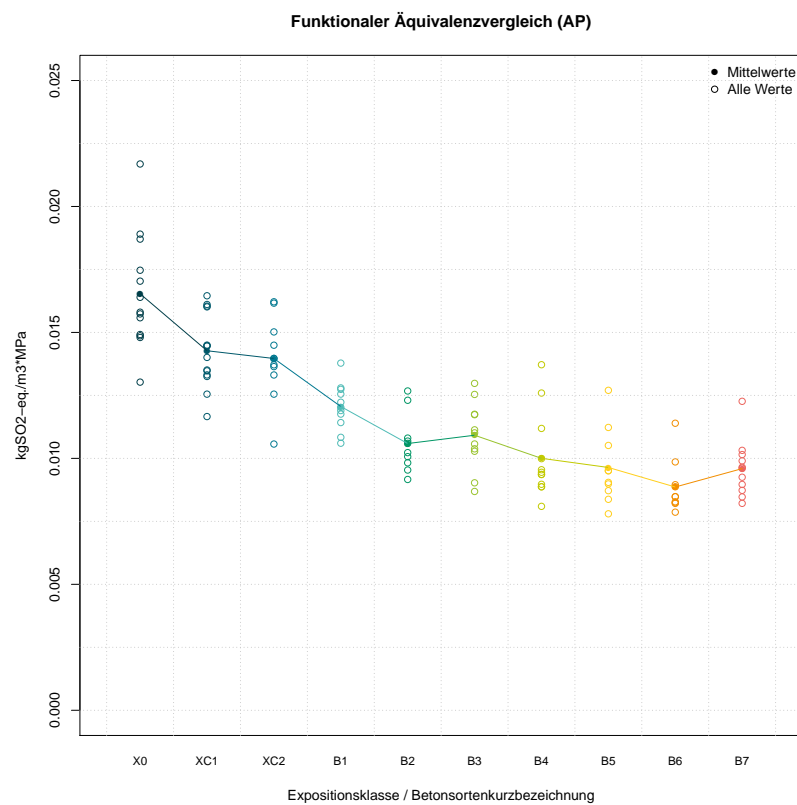


Abbildung J.1.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (AP)

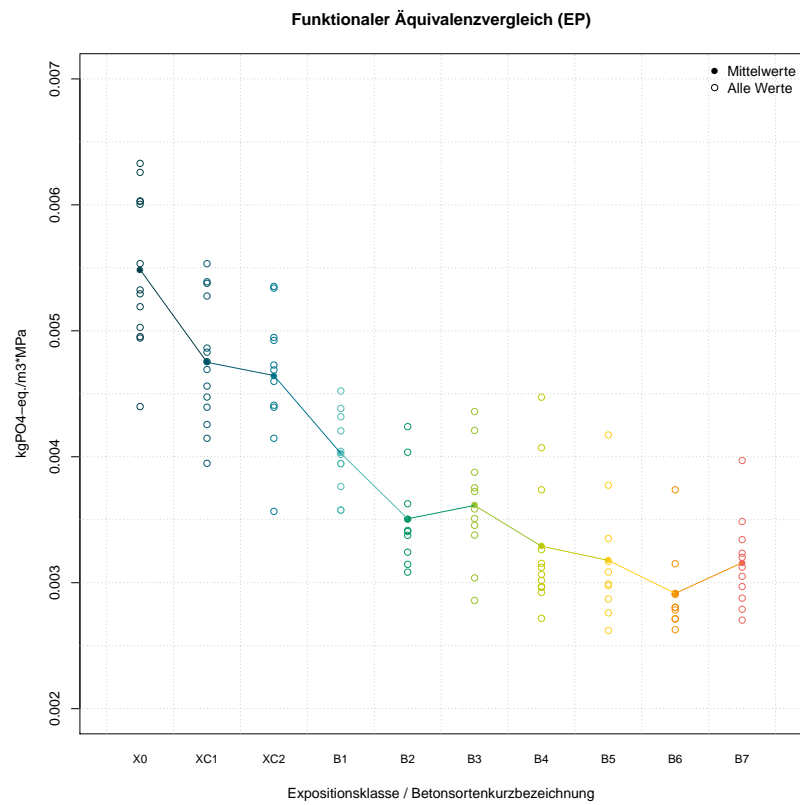


Abbildung J.2.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (EP)

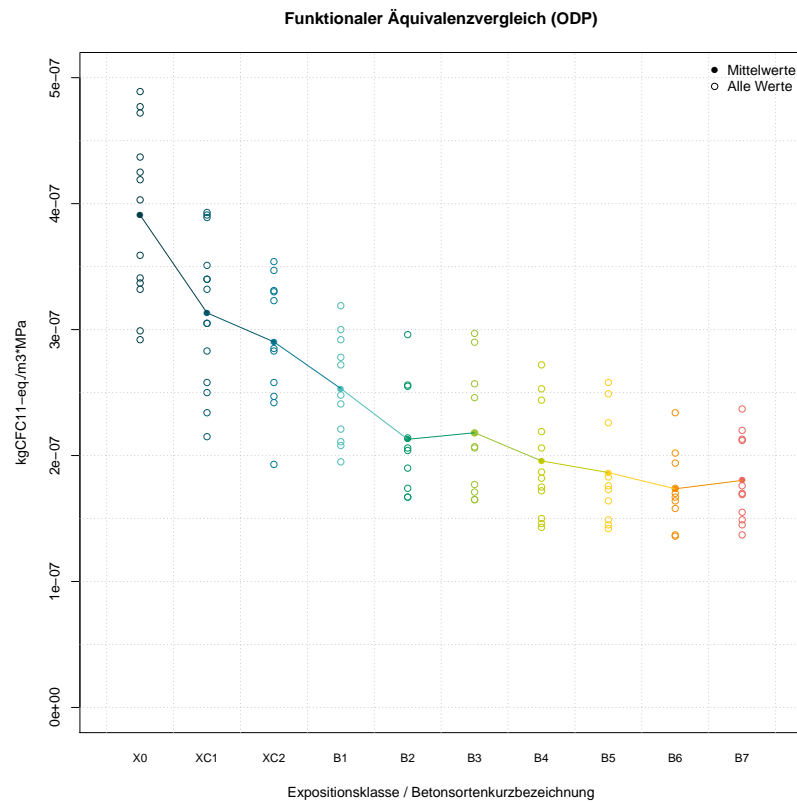


Abbildung J.3.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (ODP)

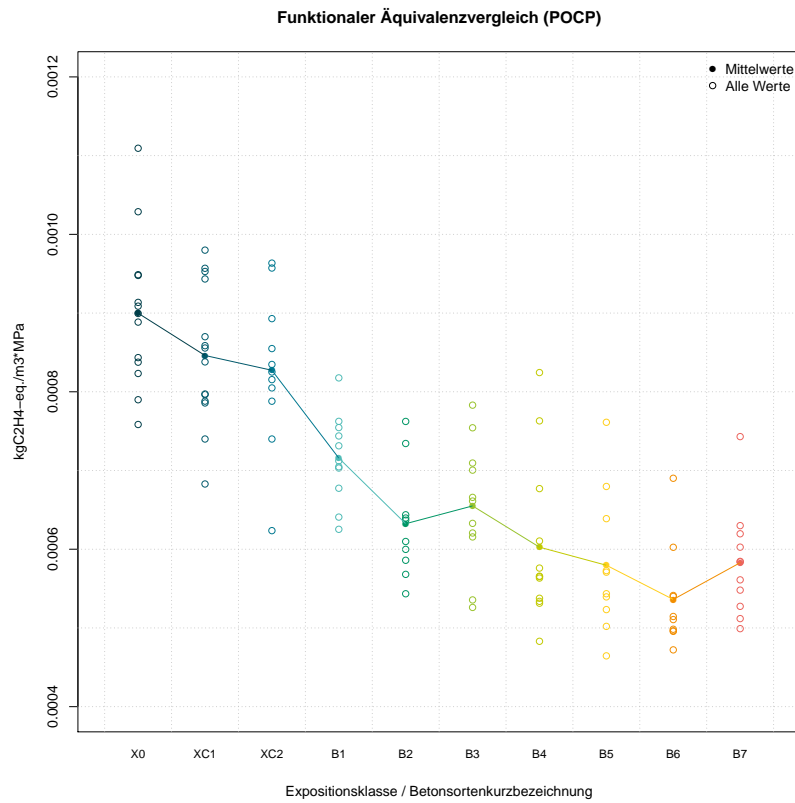


Abbildung J.4.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (POCP)

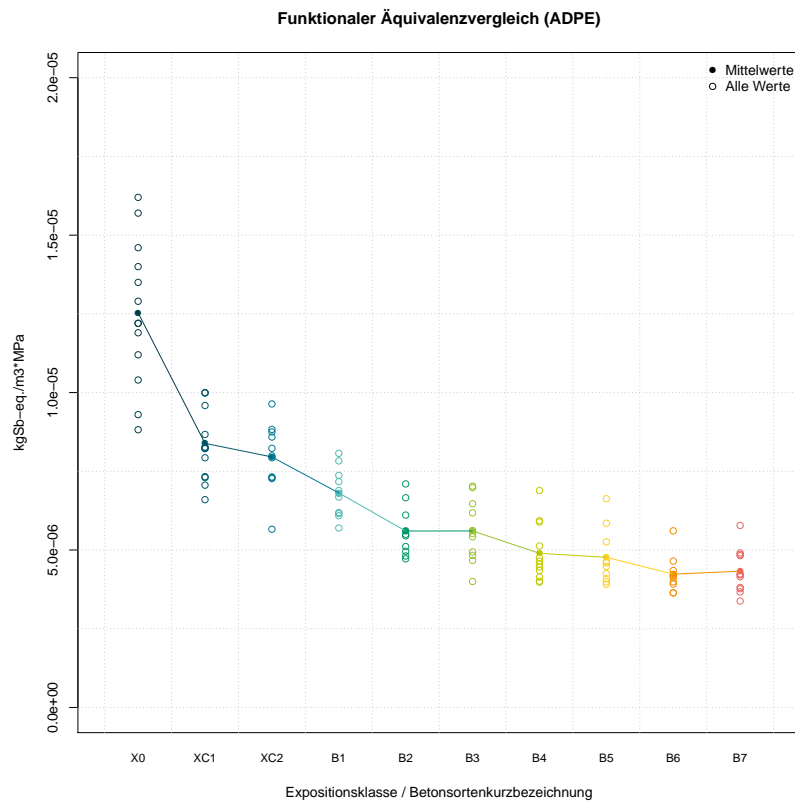


Abbildung J.5.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (ADPE)

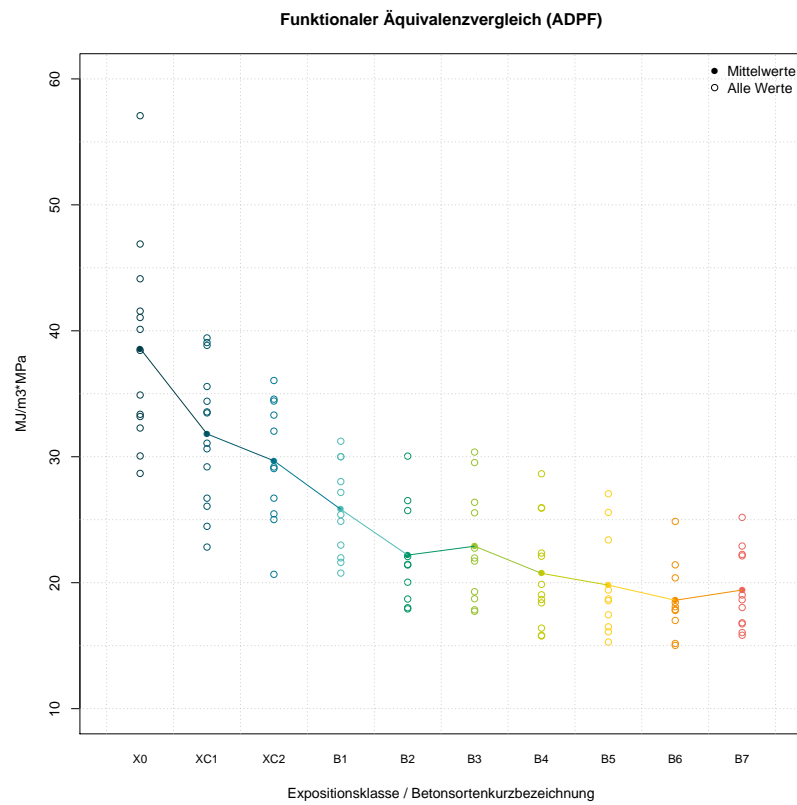


Abbildung J.6.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (ADPF)

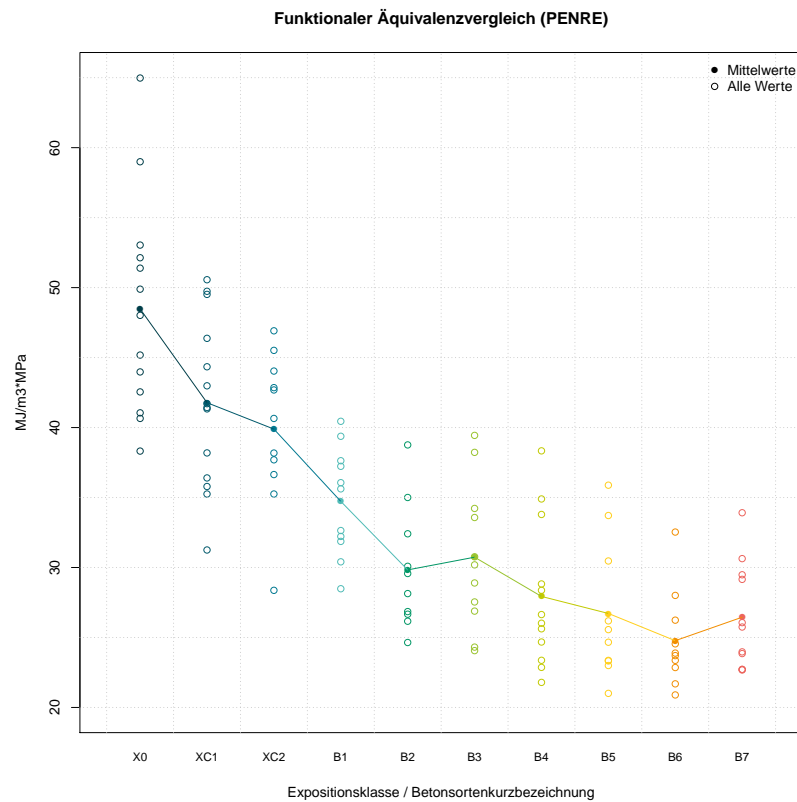


Abbildung J.7.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (PENRE)

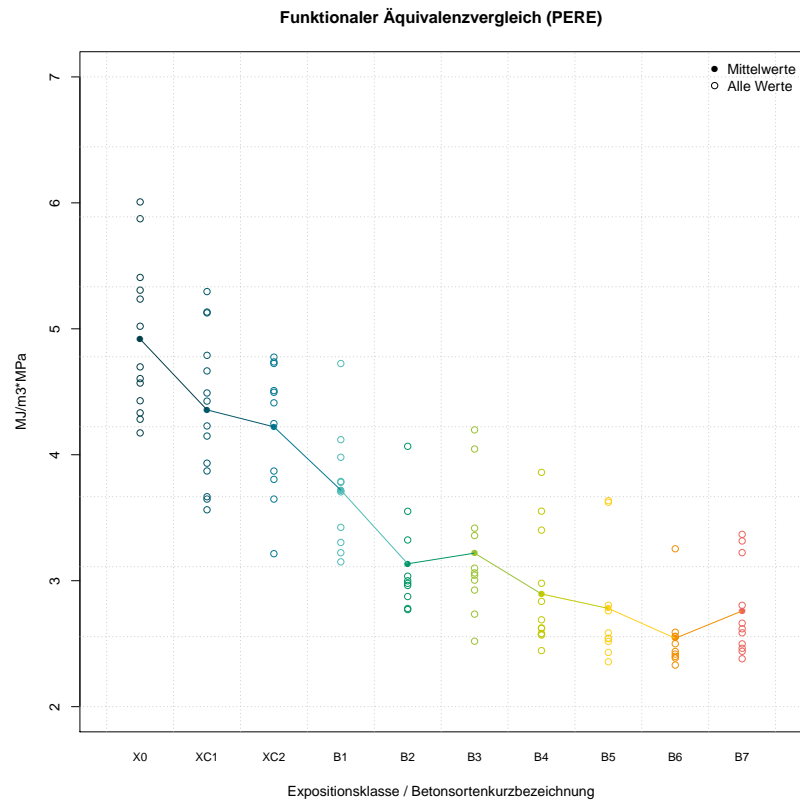


Abbildung J.8.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (PERE)

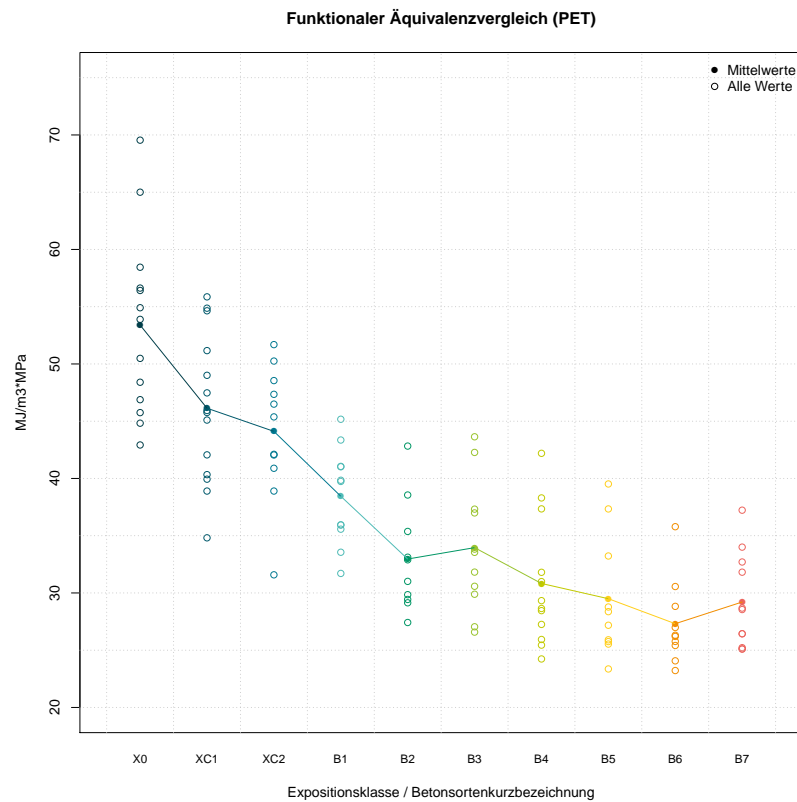


Abbildung J.9.: Funktionaler Äquivalenzvergleich (PET)

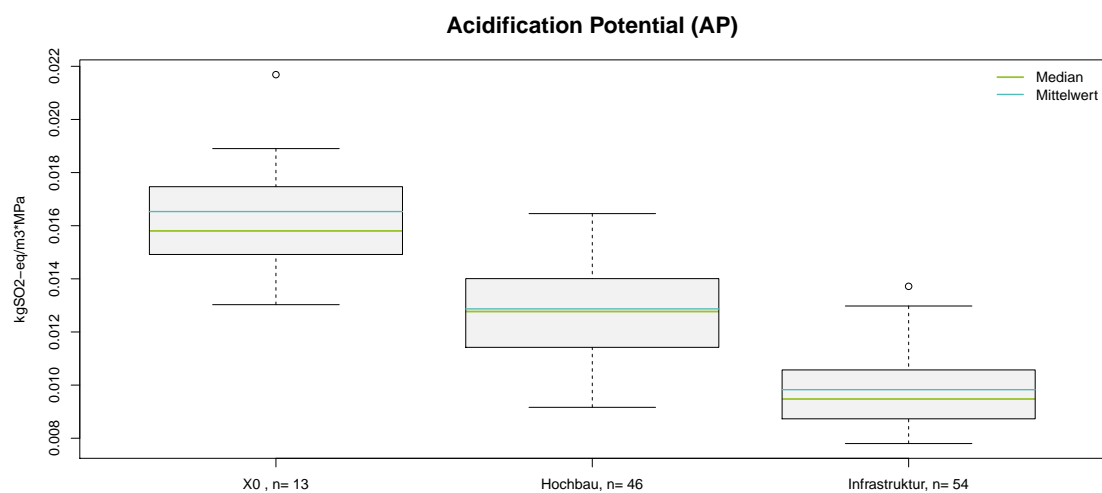


Abbildung J.10.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (AP)

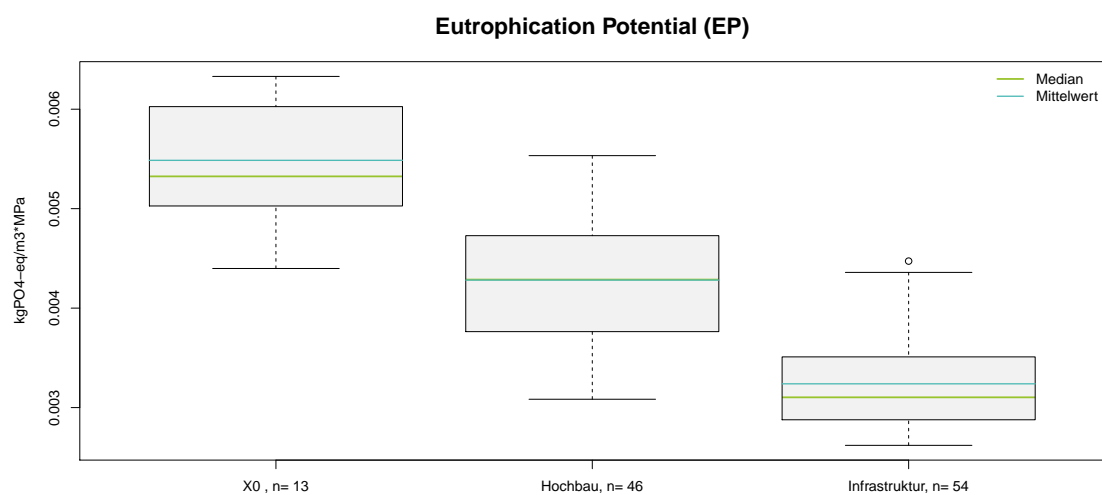


Abbildung J.11.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (EP)

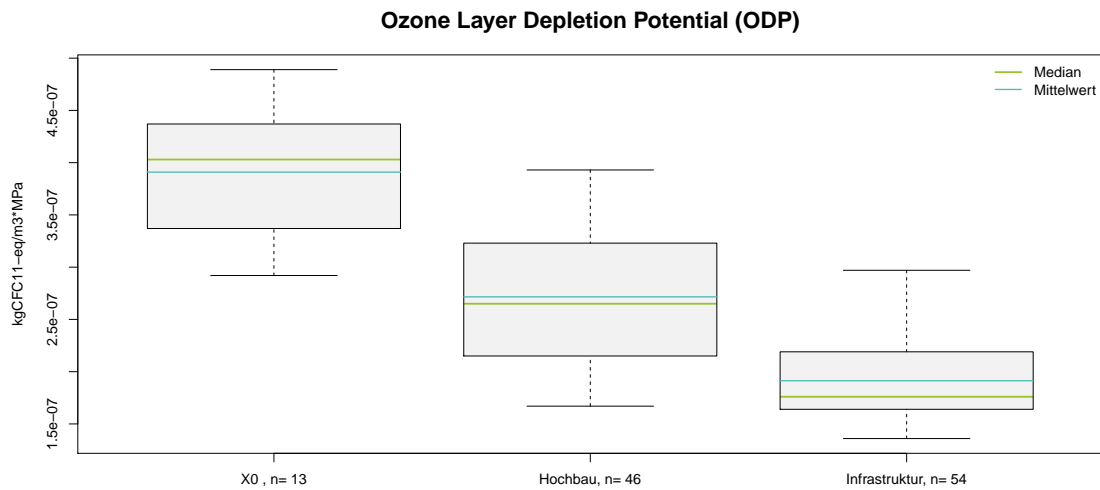


Abbildung J.12.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (ODP)

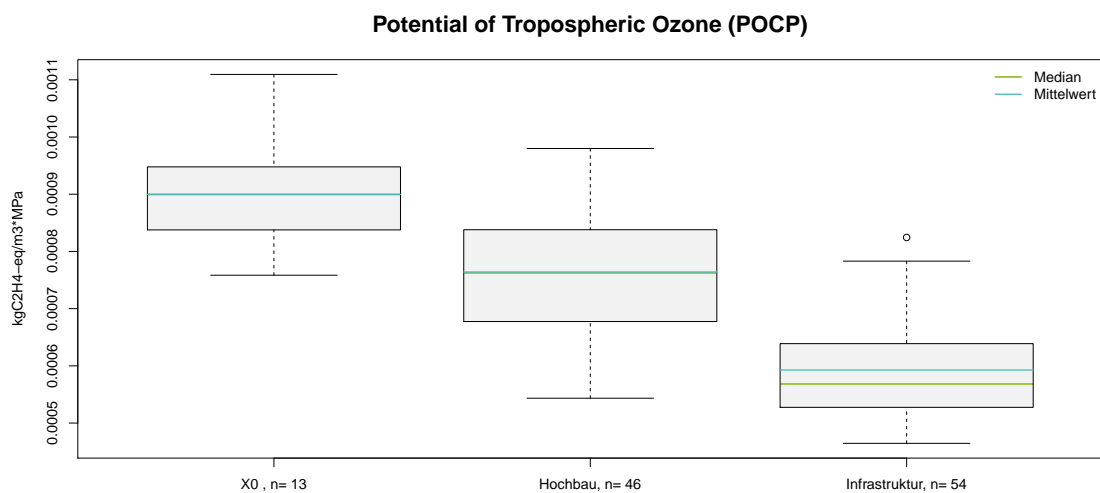


Abbildung J.13.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (POCP)

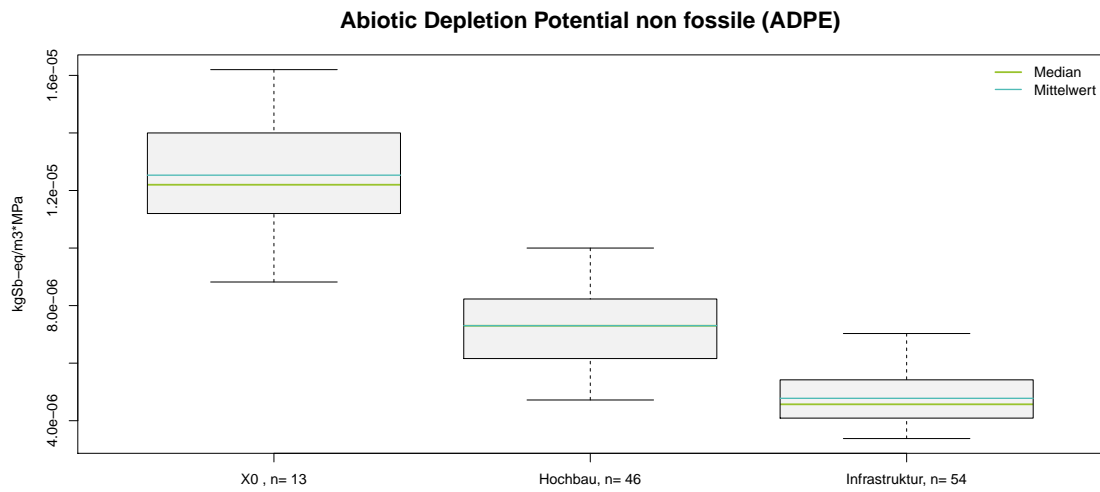


Abbildung J.14.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (ADPE)

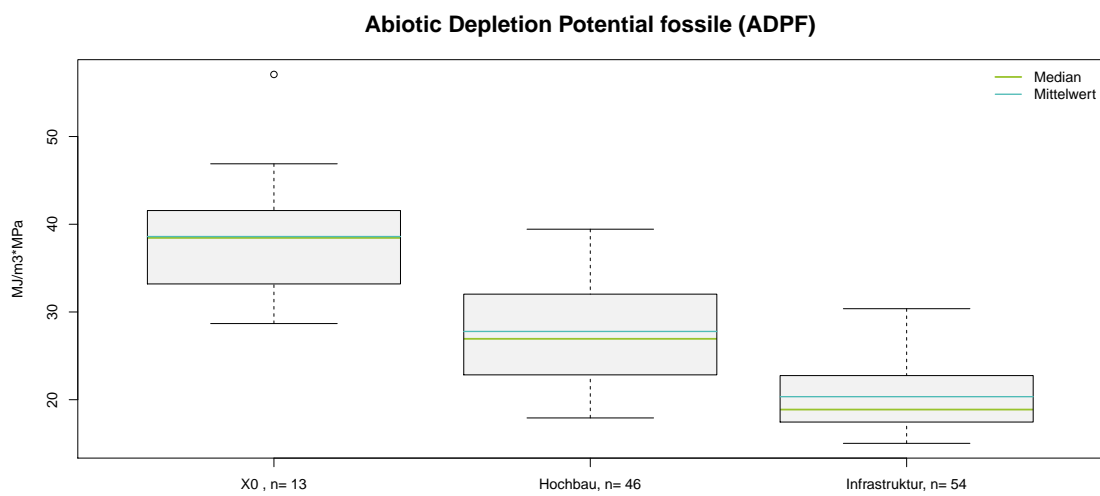


Abbildung J.15.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (ADPF)

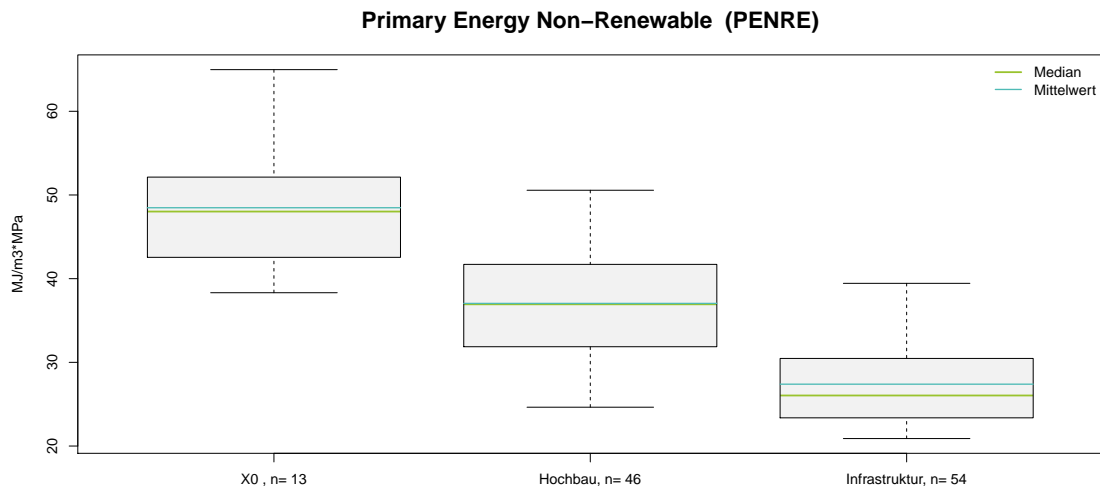


Abbildung J.16.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (PENRE)

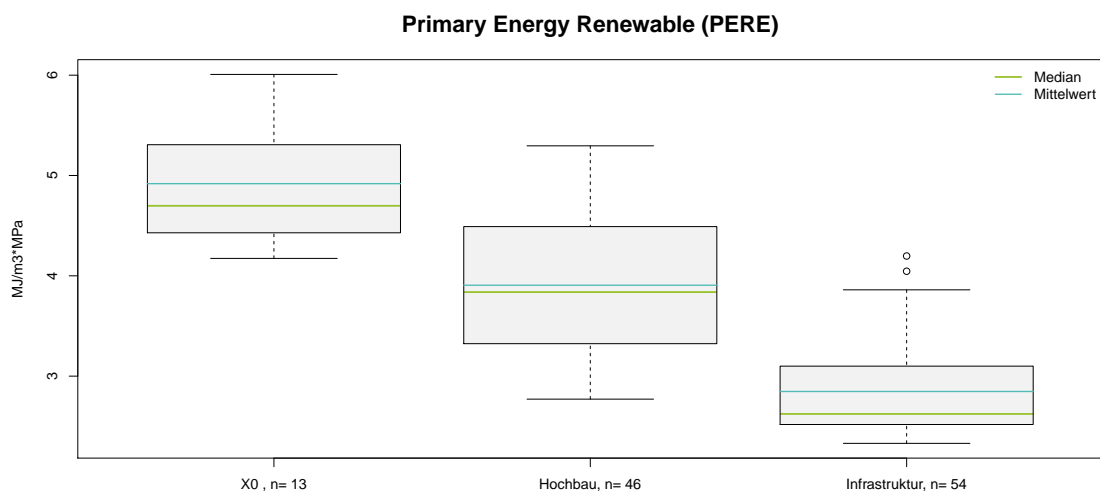


Abbildung J.17.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (PERE)

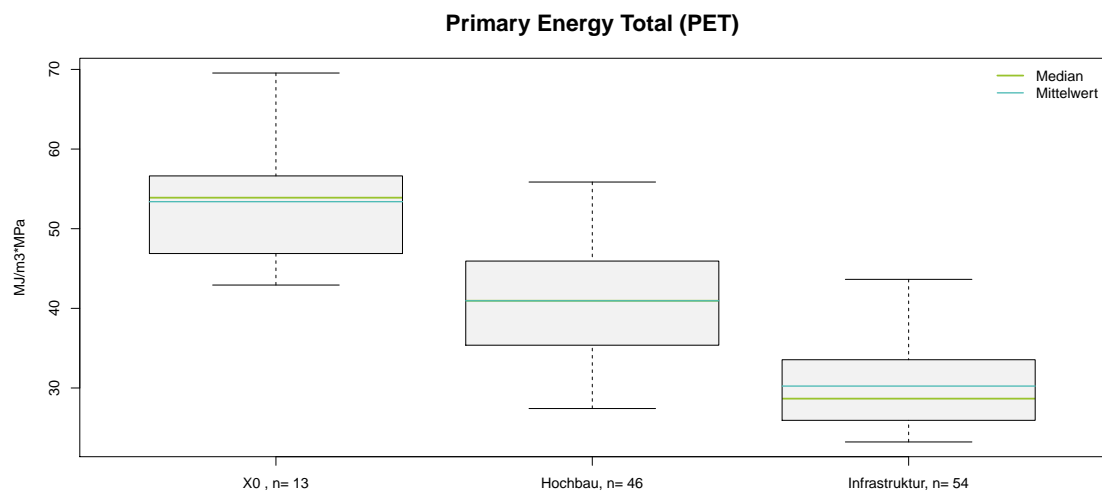


Abbildung J.18.: Funktionaler Äquivalenzvergleich der Einsatzbereiche (PET)