



Netzwerk Lebenszyklusdaten

Arbeitskreis WERKSTOFF IM BAUWESEN



Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszyklusdaten

Projektbericht

im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

PE INTERNATIONAL GmbH

Leinfelden-Echterdingen Karlsruhe – August 2007

Hrsg.: Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse –
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Vorwort

Der vorliegende Projektbericht wird herausgegeben vom Netzwerk Lebenszyklusdaten (www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de).

Das Netzwerk Lebenszyklusdaten ist die gemeinsame Informations- und Koordinationsplattform aller in die Bereitstellung und Nutzung von Lebenszyklusdaten in Deutschland involvierten Gruppen – von Wissenschaft und Wirtschaft über Politik und Behörden hin zu Verbraucherberatung und allgemeiner interessierter Öffentlichkeit. Ziel des Netzwerks Lebenszyklusdaten ist es, das umfangreiche Knowhow auf dem Gebiet der Lebenszyklusdaten innerhalb Deutschlands zusammenzuführen und als Basis zukünftiger wissenschaftlicher Weiterentwicklung und praktischer Arbeiten für Nutzer in allen Anwendungsgebieten von Lebenszyklusanalysen bereitzustellen.

Das Netzwerk Lebenszyklusdaten wird getragen vom Forschungszentrum Karlsruhe. Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Projektförderung (2004 – 2008) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Förderung der Wissenskooperation zum Aufbau und Umsetzung des deutschen Netzwerks Lebenszyklusdaten“ erstellt. Weitere im Rahmen dieser Projektförderung erstellte Studien sind erhältlich unter <http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/content/Projektberichte>.

Kontakt Netzwerk Lebenszyklusdaten:

E-Mail: info@netzwerk-lebenszyklusdaten.de

Anschrift: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse,
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme (ITAS-ZTS)
Postfach 3640
76021 Karlsruhe
www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de



Das Netzwerk Lebenszyklusdaten wird gefördert durch das
Bundesministerium für Bildung und Forschung



Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszyklusdaten

Autoren:

Silke Nemuth
PE INTERNATIONAL GmbH

Johannes Kreißig
PE INTERNATIONAL GmbH

Kontakt:

PE INTERNATIONAL GmbH
Hauptstr. 111-113
70771 Leinfelden-Echterdingen
Germany
Tel +49 711 3418170

Email: [j.kreissig\(at\)pe-international.com](mailto:j.kreissig(at)pe-international.com)



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	3
Nomenklatur	4
1 Einleitung.....	5
2 Systembeschreibung und Untersuchungsrahmen.....	5
2.1 Produktdefinition.....	5
2.2 Hauptbestandteile der untersuchten Zemente	6
2.2.1 Portlandzementklinker	7
2.2.2 Calciumsulfat (Natürlicher Gips, Anhydrit, REA-Gips).....	8
2.2.3 Hüttensand	8
2.2.4 Kalkstein und Kreide.....	8
2.3 Zementklinker- und Zementherstellung.....	9
2.3.1 Eingesetzte Energieträger	10
2.4 Marktsituation und Verwendung der Produkte	11
2.5 Systemgrenzen.....	14
2.6 Abschneidekriterien	16
2.7 Datenqualität	17
2.8 Allokationen.....	17
2.9 Prozessdaten.....	17
3 Sachbilanz.....	18
3.1 Zementklinkerherstellung.....	18
3.2 Zementmahlung.....	19
3.3 Primärenergiebedarf	20
4 Wirkungsabschätzung	22
5 Sensitivitätsanalyse	26
6 Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse	28
7 Fortschreibung und Aktualisierung der Daten	28
8 Zusammenfassung	28
9 Literaturverzeichnis.....	30
Anhang A Sachbilanzdaten	32
Anhang B Beschreibung der Auswertegrößen.....	38
Anhang B 1 Primärenergieverbrauch	38
Anhang B 2 Abfallgrößen	38
Anhang B 3 Treibhauseffekt (GWP)	39
Anhang B 4 Versauerungspotenzial (AP)	39
Anhang B 5 Eutrophierungspotential (EP).....	40



Anhang B 6	Photooxidantienbildung (POCP)	41
Anhang B 7	Ozonabbaupotenzial (ODP)	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung A 1:	Anthropogener Treibhauseffekt (KREISSIG 1999)	39
Abbildung A 2:	Versauerung (KREISSIG 1999)	40
Abbildung A 3:	Quellen der Eutrophierung (KREISSIG 1999)	40
Abbildung A 4:	Bodennahe Ozonbildung (Sommermog) (KREISSIG 1999)	41
Abbildung A 5:	Ozonabbau (KREISSIG 1999)	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Zementarten und deren Hauptbestandteile (nach DIN EN 197-1)	6
Tabelle 2-2:	Rohstoffeinsatz für die Zementherstellung im Jahr 2004 [VDZ 2004]	7
Tabelle 2-3:	Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der deutschen Zementindustrie	11
Tabelle 2-4:	Stoff- und Energieströme in der Zementherstellung	14
Tabelle 2-5:	Zuordnung der Rohstoffe zu den Prozessabschnitten	15
Tabelle 3-1:	Sachbilanzdaten Zementklinkerherstellung (Input)	18
Tabelle 3-2:	Sachbilanzdaten Zementklinkerherstellung (Output)	19
Tabelle 3-3:	Sachbilanzdaten Zementmahlung (Input+Output)	20
Tabelle 4-1:	Umweltwirkungen der untersuchten Zementarten (Angaben je t Zement)	22



Nomenklatur

Abkürzung	Erläuterung
AP	Acidification Potential (dt. Versauerungspotential)
EP	Eutrophication Potential (dt. Eutrophierungspotential)
GWP	Global Warming Potential (dt. Treibhauspotential)
ODP	Ozone Depletion Potential (dt. Ozonabbaupotential)
PE	Primärenergie
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (dt. Photooxidantienbildungspotential)
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke e. V.



1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes "Förderung der Wissenschaftskooperation zum Aufbau und Umsetzung des deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten" (Förderkennzeichen: 01 RN 0401) im Bereich Werkstoffe im Bauwesen erfolgte die Erstellung von Grunddatensätze für folgende Ökobilanzdatensätze:

- Zement CEM I
- Zement CEM II/A-LL
- Zement CEM II/A-S
- Zement CEM II/B-S
- Zement CEM III/A
- Zement CEM III/B

Die Ökobilanzdatensätze stellen nationale Durchschnittswerte dar. Von den in DIN EN 197-1 festgeschriebenen möglichen Zusammensetzungen der einzelnen Zementarten wurde die mittlere Zusammensetzung zugrunde gelegt.

2 Systembeschreibung und Untersuchungsrahmen

2.1 Produktdefinition

Zement ist ein hydraulisch erhärtender Baustoff für Mörtel und Beton, der aus einem Gemisch von fein gemahlene mineralischen Bestandteilen besteht.

Aufgrund der vielseitigen Zusammensetzung werden Zemente nach der europäischen Norm für Normalzemente DIN EN 197-1 in fünf Hauptzementarten (CEM I – IV) eingeteilt: Portlandzement, Portlandkompositzement, Hochofenzement, Puzzolanzement und Kompositzement. Die Abkürzungen der Zementarten setzen sich aus der Hauptzementart, dem Zementklinkeranteil (z. B. A = hoher Anteil) und den anderen Hauptbestandteilen (z. B. D = Silicastaub) zusammen.

Tabelle 2-1 zeigt die Einteilung der Zementklassen mit ihren Hauptbestandteilen. Für die hervorgehobenen Zementarten wurden Datensätze erstellt. Sie gehören zu den am häufigsten eingesetzten Zementen (s. Abschnitt 2.4)

Es wurde ein durchschnittliches Aufmahlen der Zemente angenommen. Laut eine Schweizer Studie [NPK 2003] und VDZ-Informationen werden hauptsächlich Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 und 42,5 eingesetzt. 32,5- und 42,5-Zemente stellen jeweils etwa 40 % des Marktvolumens, 6 % gehören der Festigkeitsklasse 52,5 an, die restlichen 16 % fallen unter sonstige Zemente.



Tabelle 2-1: Zementarten und deren Hauptbestandteile (nach DIN EN 197-1)

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

Im Folgenden werden die Hauptbestandteile der untersuchten Zementarten und ihre Herstellungsverfahren beschrieben.

2.2 Hauptbestandteile der untersuchten Zemente

Die wichtigsten Ausgangsstoffe sind Kalkstein oder Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel. In Abhängigkeit von der Rohstoffsituation im Zementwerk werden den Rohstoffmischungen zum Auszug der fehlenden chemischen Bestandteile reiner Kalkstein, Eisenerz, Sand oder andere Korrekturstoffe zugesetzt. Neben natürlichen Rohstoffen kommen auch sekundäre Rohstoffe zur Anwendung (Kalkschlämme, Gießereialtsande, Flugaschen etc.), die ebenfalls als Hauptbestandteile Siliziumdioxid, Aluminium-, Eisen- und/bzw. Calciumoxid enthalten [VDZ 2004].



Die Rohstoffe werden hauptsächlich für die Zementklinkerherstellung benötigt. Ausnahmen sind Hüttensand, ein geringer Teil des Kalksteins, Ölschiefer und Trass, die nachträglich als so genannte Zumahlstoffe während der Mahlung zugesetzt werden. Gips wird in jedem Fall bis zu 5 Masse-% als Erstarrungsregler und zur Verbesserung der Mahlbarkeit zugegeben.

Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht über den jährlichen Rohstoffeinsatz in der Zementindustrie.

Tabelle 2-2: Rohstoffeinsatz für die Zementherstellung im Jahr 2004 [VDZ 2004]

Gruppe	Rohstoff	Einsatz in 1.000 t/a
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide	41.045
	Sonstige ¹	101
Si	Sand	1.334
	Gießereialsand	151
Si-Al	Ton	1.298
	Bentonit/Kaolinit	49
	Rückstände aus der Kohleaufbereitung	3
Fe	Eisenerz	134
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie ²	93
Si-Al-Ca	Hüttensand	5.110
	Flugasche	378
	Ölschiefer	164
	Trass	34
	Sonstige ³	170
S	Natürlicher Gips	569
	Natürlicher Anhydrit	541
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung	428
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie ⁴	60

Die wichtigen Rohmaterialien sind nachfolgend beschrieben.

2.2.1 Portlandzementklinker

Zementklinker wird durch das Brennen einer Mischung aus Kalkstein und Ton oberhalb der Sintergrenze bei 1.450 °C erzeugt (s. a. Abschnitt 2.3). Die Anteile der verschiedenen

¹ Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung, Kalk-, Porenbetongranulat, Calciumfluorid

² Kiesabbrand, verunreinigtes Erz, Eisenoxid/ Flugasche-Gemisch, Stahlwerksstäube, Walzzunder

³ Papierreststoffe, Aschen aus Verbrennungsprozessen, mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden

⁴ Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken, Aluminiumhydroxid



Oxide (Calcium-, Silizium-, Aluminium- und Eisenoxide) sind dabei genau festgelegt. Die Rohstoffmischung definiert die Eigenschaften des Zementklinkers im hydraulischen Erhärtungsprozess. Hohe Festigkeiten werden z. B. besonders durch Tri-Calciumsilicat erreicht, das durch die chemische Reaktion von Calciumoxid und Siliziumdioxid bei Temperaturen über 1.200 °C entsteht. Allerdings läuft dieser Prozess erst in Gegenwart einer Schmelze, die vorwiegend aus Calciumoxid, Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) besteht, ausreichend schnell ab.

2.2.2 Calciumsulfat (Natürlicher Gips, Anhydrit, REA-Gips)

Mit Hilfe des Calciumsulfates wird das Erstarrungsverhalten des Zementes gesteuert, um bei der Verarbeitung zu Beton optimale Qualitäten zu erzielen.

Gips ist Calciumsulfat, das in verschiedenen Hydratstufen in Bindung mit Kristallwasser oder auch vollständig ohne Wasser vorliegen kann. Bei natürlichem Gipsstein handelt es sich um Calciumsulfat-Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), bei der in der Natur vorkommenden wasserfreien Form des Calciumsulfates handelt es sich um Anhydrit. Durch Dehydratation des Calciumsulfat-Dihydrat kann der Gips in seine Halbhydratform ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, Calciumsulfat-Halbhydrat) oder in seine kristallwasserfreie Form, dem Anhydrit, überführt werden.

Zu ca. einem Drittel wird für die Zementherstellung REA-Gips verwendet, der aus den Abgasen bei der Rauchgasentschwefelung gewonnen wird.

2.2.3 Hüttensand

Hüttensand wird für die Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet. Er beteiligt sich langsamer an der Hydratationsreaktion im Beton und hat somit Auswirkungen auf die Festigkeit und die Hydratationswärmeentwicklung. Darüber hinaus sind Betone mit hohem Hüttensandanteil besonders resistent gegen chemische Angriffe sowie gegen die Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

Hüttensand ist ein Nebenprodukt der Roheisenherstellung im Hochofen und entsteht durch Granulation von flüssiger Hochofenschlacke mit Wasser oder Luft.

2.2.4 Kalkstein und Kreide

Diese Rohstoffe und deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, stellen die wichtigsten Bestandteile zur Herstellung von Zementklinker dar. In Portlandkalksteinzementen wird zusätzlich während der Mahlung 6 bis 20 % Kalkstein als Zumahlstoff zugegeben.

Der CaCO_3 -Gehalt des Kalksteins darf 75 M.-% nicht unterschreiten. Der Gehalt an organischer Substanz (TOC) ist auf maximal 0,2 M.-% begrenzt. Der Einfluss des Kalksteinmehls auf die Zementeigenschaften beruht im Wesentlichen auf einer Füllerwirkung. Die Korngrößenverteilung von Portlandkalksteinzement ist meist breiter als die von Portlandzement. Dementsprechend besitzen Portlandkalksteinzemente verbesserte Verarbeitungseigenschaften. Die gesteigerte Hohlraumfüllung durch den erhöhten Anteil feiner Kalksteinpartikel führt außerdem zu einer hohen Dauerhaftigkeit von Beton. [VDZ TB 2002, Kapitel I]

2.3 Zementklinker- und Zementherstellung

Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung von Zementklinker. Den größten Anteil an der Klinkerproduktionskapazität hat das Trockenverfahren. Ein geringer Teil der Zementherstellung wird im Nass- und Halbnass-/Halbtrockenverfahren hergestellt, jedoch macht der hohe Energieaufwand der nachträglichen Trocknung diese Verfahren zunehmend weniger konkurrenzfähig.

Beim Trockenverfahren kommen vorwiegend Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmer und Calcinator⁵ zum Einsatz. Sie verzeichnen in Deutschland einen Anteil von 88,2 % an der gesamten Herstellungskapazität. (VDZA 2004)

Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die Teilschritte der Zementproduktion.

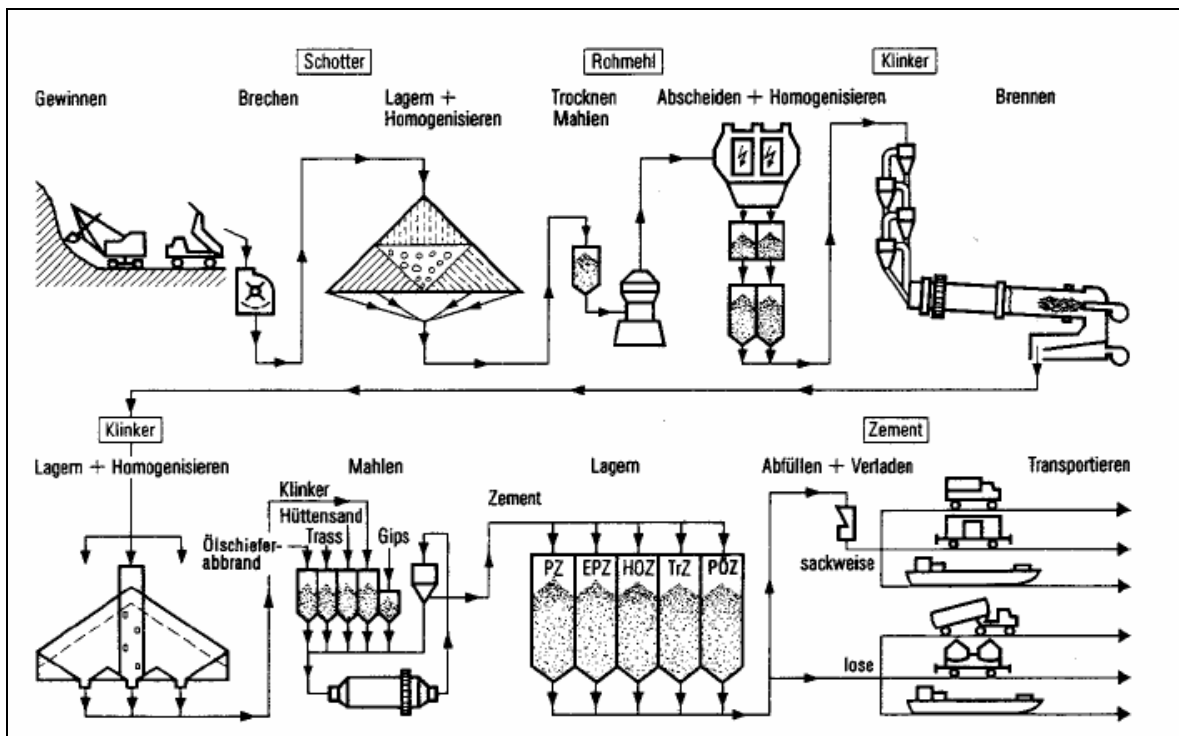


Abbildung 2-1: Produktionsfließbild der Zementklinker- und Zementherstellung
 ACHTERNBOSCH 2000

Im ersten Schritt werden die Rohstoffe Kalkstein, Ton und Kreide im Steinbruch abgebaut und in einem Brecher zerkleinert. Anschließend werden die Rohstoffe eingewogen und gemischt. Dem entstandenen Rohmehl können Korrekturstoffe wie Bauxit und Eisenoxid zugesetzt werden. Mit Mühlen wird das Rohmehl weiter zerkleinert und getrocknet, um dann dem Drehrohröfen in Staubform zugeführt zu werden. Bei hoher Temperatur entstehen nussgroße, graue, gebrannte Brocken von Zementklinker, die anschließend aktiv gekühlt werden.

Danach wird der Klinker je nach Zementart mit Zuschlagsstoffen zusammen zu Zement vermahlen und überwiegend als lose Ware auf Straßen- oder Schienenfahrzeuge bzw.

⁵ Erklärung Calcinator: Reaktor zur Einbindung von gasförmigen Schadstoffen mittels Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat (mit CO₂), Calciumsulfat (mit Schwefeldioxid) und Calciumchlorid (aus Chlorwasserstoff).

Schiffe verladen. Ein kleiner Anteil des Zementes erreicht den Kunden als Sackware, abgefüllt durch Rotorpacker und gestapelt über Palettieranlagen.

2.3.1 Eingesetzte Energieträger

Brennstoffenergie wird in der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers benötigt. In geringerem Umfang wird thermische Energie für die Trocknung von Rohstoffen, wie Hüttensand eingesetzt. Die notwendige Energie wird durch ein Gemisch verschiedener Brennstoffe erzeugt. Neben Sekundärbrennstoffen kommen vorwiegend Braun- und Steinkohle als Brennstoffe zum Einsatz. Die energetische Anteile der Brennstoffe zur Zementherstellung sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

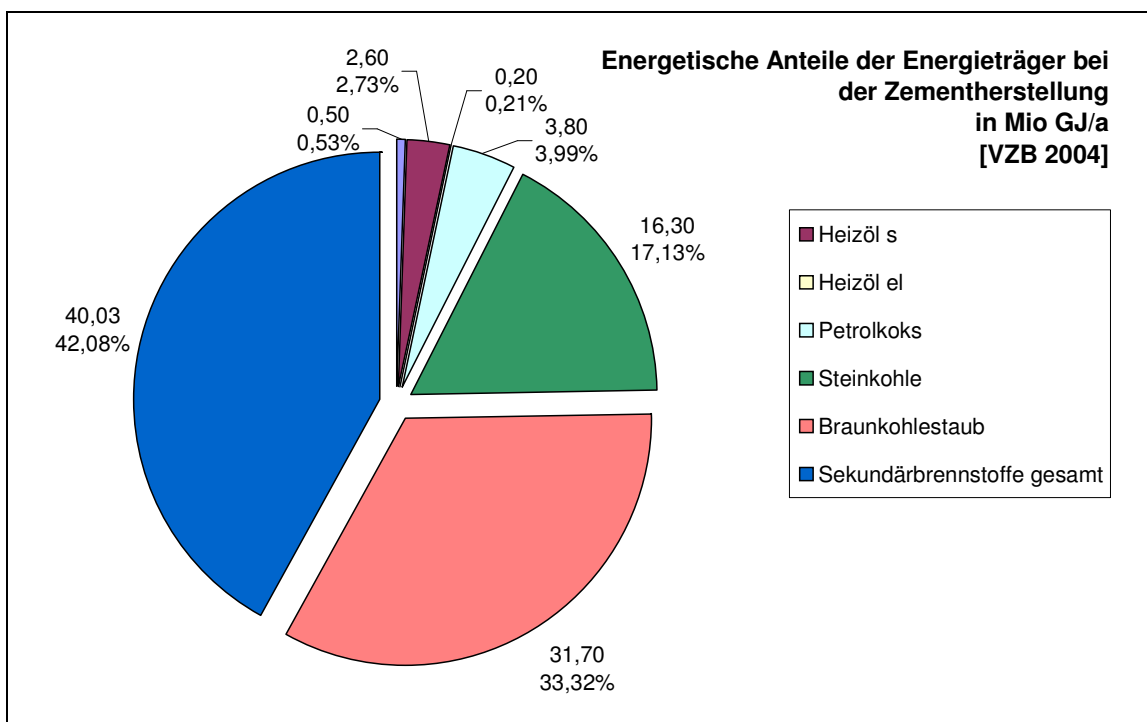


Abbildung 2-2: Brennstoffeinsatz in der Zementklinkerherstellung (Durchschnitt) [VDZ 2004]

Der durchschnittliche energetische Anteil von Sekundärbrennstoffen belief sich im Jahr 2004 auf 42 % des Energiebedarfs. Sie spielen aufgrund der hohen Temperaturen mit nahezu vollständiger Oxidation beim Brennen des Klinkers eine wesentliche Rolle als kostengünstige Brennstoffe. Gleichzeitig bietet sich durch die Zementherstellung eine risikoarme Entsorgungsmöglichkeit für problematische Abfälle. Besondere Bedeutung haben aufgrund des hohen Heizwertes Kunststoffe, Autoreifen und Tiermehle und -fette.

Welche Sekundärbrennstoffe in den Jahren 2002 bis 2004 im Einzelnen zum Einsatz kamen, zeigt Tabelle 2-3.

Tabelle 2-3: Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der deutschen Zementindustrie

Sekundärbrennstoff	2000	2003	2004
	in 1.000 t/a		
Reifen	248	247	290
Altöl	140	116	100
Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen, davon:	372	626	863
Zellstoff, Papier und Pappe		156	218
Kunststoff		177	229
Verpackungen		9	13
Abfälle aus der Textilindustrie		15	2
Sonstige		269	401
Tiermehl und -fette	⁶⁾	452	439
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	⁶⁾	155	157
Altholz	79	48	42
Lösungsmittel	31	48	72
Bleicherde	23	20	11
Klärschlamm	-	4	48
Sonstige ⁷	176	17	20

Die Rolle der traditionellen Stoffe Altreifen und Altöl relativ zu anderen Stoffen ab. Der jährliche Einsatz von Altreifen betrug 290.000 t in 2004. In den Vorjahren lag die eingesetzte Menge bei knapp 250.000 t/a. Die Altölmenge ging von 140.000 t/a im Jahr 2000 auf 100.000 t/a im Jahr 2004 zurück. Deutlich gesteigert wurde der Einsatz von Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen von 372.000 t/a in 2000 auf 863.000 t/a in 2004. Die jährliche Menge von eingesetzten aufbereiteten Fraktionen aus Siedlungsabfall erreichte in 2004 157.000 t. Der Verbrauch von Tiermehlen und -fetten lag in 2004 bei 452.000 t/a. [ICT 2007]

2.4 Marktsituation und Verwendung der Produkte

Die Zemente werden in Zementwerken mit und ohne Klinkererzeugung hergestellt. Abbildung 2-3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Klinker- und Zementproduktion in Deutschland sowie des Zementabsatzes im Zeitraum 2000 bis 2004.

⁶⁾ in VDZ 2000 unter Sonstige erfasst

⁷⁾ Ölschlamm und organische Destillationsrückstände

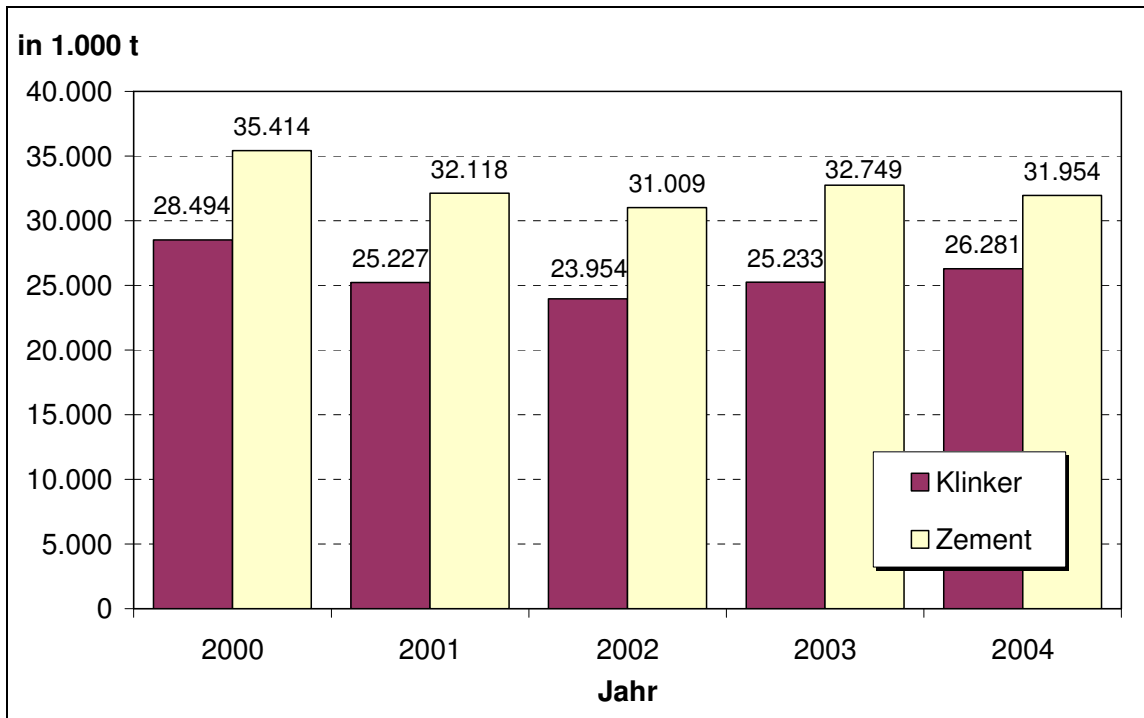


Abbildung 2-3: Klinker- und Zementproduktion in Deutschland VDZ 2004

Abbildung 2-4 zeigt die Verteilung des Inlandsabsatzes getrennt nach Zementarten in den Jahren 2000 bis 2004.

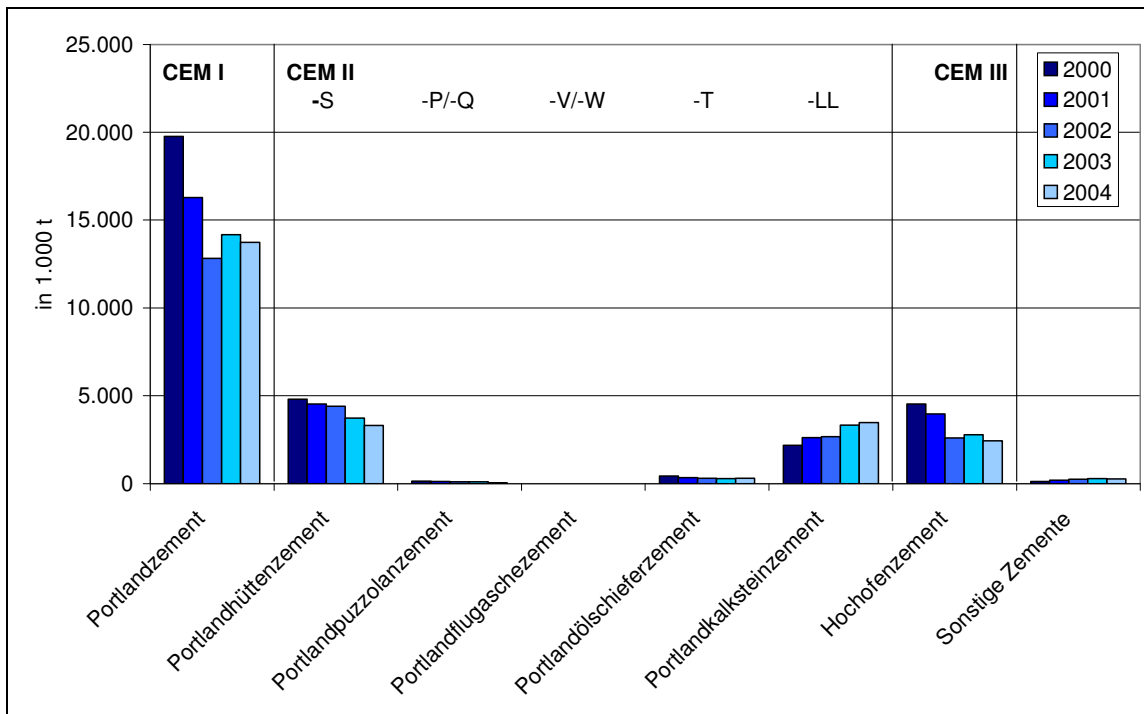


Abbildung 2-4: Inlandsabsatz nach Zementarten 2000-2004 ICT 2007

Für die vier wichtigsten Zementarten wurden Datensätze erstellt, wobei für Portlandhüttenzement und Hochofenzement zwischen hohem (Großbuchstabe A) und geringem Klinkeranteil (Großbuchstabe B) entsprechend der DIN EN 197-1 unterschieden wurde.

Hinsichtlich der Beton-Expositionsklassen weisen die untersuchten Zemente die volle Anwendbarkeit auf (Abbildung 2-5)

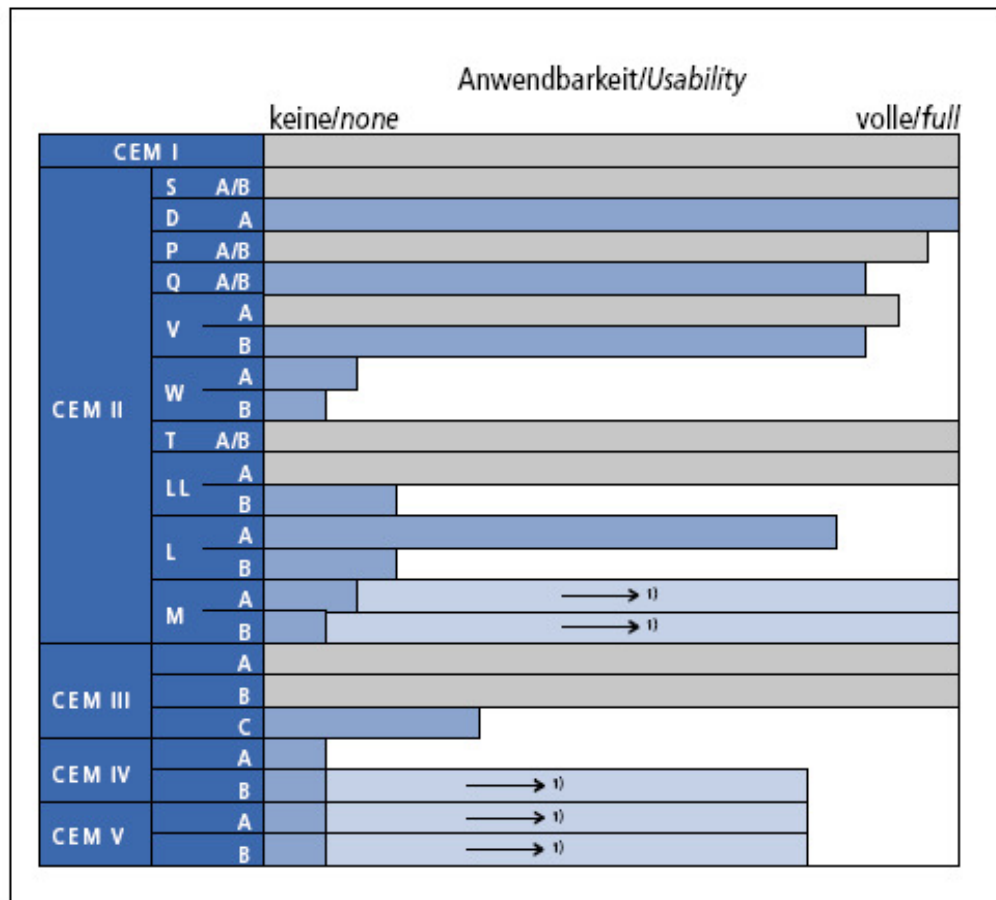


Abbildung 2-5: Anwendbarkeit von Zementarten in Beton-Expositionsklassen, neu in Norm aufgenommene Zementarten sind blau gekennzeichnet SYBERTZ 2001

Zu den Hauptabnehmern gehören die Transportbetonindustrie mit 49 % der Gesamtproduktion sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 25 %.



2.5 Systemgrenzen

Die Zementherstellung gliedert sich in Prozesskettenabschnitte „Klinkerherstellung“, „Zementmahlung“ und das „Werksmodul“, in dem der Strom- und Energieverbrauch für die Abfüllung, Verladung und allgemeine Betriebsabläufe (z. B. Beleuchtung der Produktionshallen, Pumpen) zusammengefasst ist.

Tabelle 2-4 benennt die betrachteten Stoff- und Energieströme in den einzelnen Prozesskettenabschnitten. Die Modellierung endet „am Werksausgang“, die Entsorgung des Produktes (EoL) wurde nicht betrachtet.

Der Transport von massenmäßig wichtigen Roh- und Brennstoffen wurde in die Berechnung einbezogen.

Tabelle 2-4: Stoff- und Energieströme in der Zementherstellung

Zementherstellung - Cradle to Gate					
Klinkerherstellung		Zementmahlung		Werksmodul	
Input	Output	Input	Output	Input	Output
Rohstoffe Kalkstein Ton Sand Betriebsstoffe Energie Strom Fossile ETs Sekundärbrennstoffe Diesel für Transport	Wertstoff Klinker Emissionen in Luft: anorganische, organische E. Schwermetalle Staub	Rohstoffe Klinker Hüttensand Gips Flugasche Ölschiefer Energie Strom	Wertstoff Zement Emissionen in Luft: Staub	Rohstoffe Zement Verpackung Stahlband Holzpaletten Energie Strom Erdgas Diesel	Abfälle Abwasser, gereinigt Gewerbemüll, deponiert

Zum Teil liegen die Daten in VDZ 2004 nur aggregiert vor, so dass eine Zuweisung von Rohstoff- und Energiemengen zu einzelnen Prozessabschnitten auf Basis anderer Quellen erfolgt.

Tabelle 2-5 gibt die Zuordnung der Rohstoffe zu den Prozessschritten Klinkerherstellung und Zementmahlung an. Sie ergibt sich aus der Analyse des Herstellungsverfahrens.



Tabelle 2-5: Zuordnung der Rohstoffe zu den Prozessabschnitten

Gruppe	Rohstoff	Klinkerherstellung	Zementmahlung
Ca	Kalkstein	x	x)*
	Sonstige, wie: Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung, Porenbetongranulat, Calciumchlorid, Industrielle Kalkabfälle	x	
Si	Sand	x	
	Gießereialtsand	x	
Si-Al	Ton	x	
	Bentonit/Kaolinit	x	
	Rückstände aus der Kohleaufbereitung	x	
Fe	Eisenerz	x	
	Sonstige: Kiesabbrand, verunreinigtes Erz, Stahlwerksstäube, Walzzunder	x	
Si-Al-Ca	Hüttensand		x
	Flugasche		x
	Ölschiefer		x
	Trass		x
	Sonstige, wie: Papierreststoffe, Eisenoxid/Flugasche-Gemisch, Schlacken		x
S	Natürlicher Gips		x
	Natürlicher Anhydrit		x
	REA-Gips		x
	Sonstige Gipse		x
Al	Einsatzstoffe aus der Metall-Industrie, wie: Aluminium-Werksstäube, Aufbereitungsrückstände von Salz- schlacken, Katalysatorstaub, Aluminium-Hydroxid	x	

)* Ableitung aus Produktionszahlen vom Portlandkalksteinzement (Anteil Kalksteinmehl 10 %)

Der Verbrauch an elektrischer Energie liegt in VDZ 2004 ebenfalls nur aggregiert vor. Deshalb wurde auf Daten aus dem Monitoringbericht VDZ 2000 zurückgegriffen, der Aussagen über anteilige Stromverbräuche in den einzelnen Prozessabschnitten enthält. Der Stromverbrauch der Herstellung von 1 t Zement mit 78 % Klinkeranteil (Durchschnitt Deutschland) verteilt sich auf die einzelnen Prozesskettenabschnitte, wie in Abbildung 2-6 gezeigt [VDZ 2000].

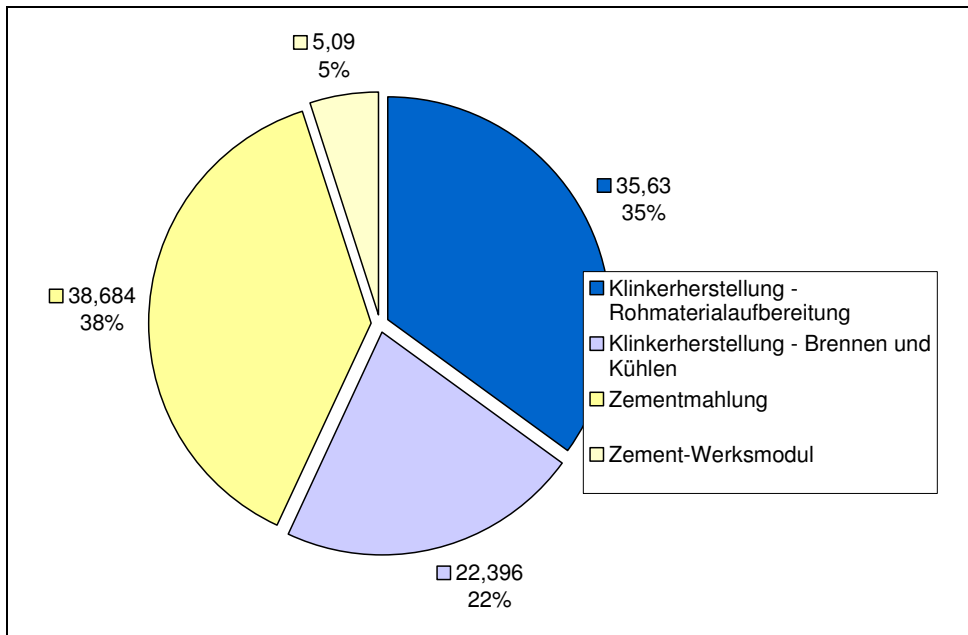


Abbildung 2-6: Stromverbrauch Zementherstellung (Klinkeranteil 78 %) [kWh/t Zement]

Brennstoffenergie wird im Wesentlichen für die Klinkerherstellung benötigt. Der geringe Teil, der für die Rohstofftrocknung aufgewendet wird, ist im Prozessschritt „Werksmodul“ enthalten.

Da die eingesetzten Sekundärbrennstoffe keinen bzw. einen negativen ökonomischen Wert besitzen, gehen sie ohne Umweltlast in das System ein. Der Transport zum Werk per LKW sowie der eingebundene Kohlenstoff der erneuerbaren Sekundärbrennstoffen (Tiermehl, Papier, Holz) wurde berücksichtigt. Ausgehend von 19 MJ/kg Heizwert für absolut trockenes Holz (50 % C-Gehalt) wurde die Einbindung von 0,07 kg CO₂/MJ angenommen. Dieser Wert dient auch für Tiermehl und Altpapier.

Recyclinggütern (REA-Gips, Hüttensand und Flugasche) mit einem ökonomischen Restwert wurden Umweltlasten aus der Vorketten zugewiesen. Näheres dazu unter 2.8.

2.6 Abschneidekriterien

Die Abschneidekriterien orientieren sich an den Massen- und Energiebilanzen der einzelnen Stufen der betrachteten Systeme. Somit wurden aus verfahrenstechnischer Sicht keine ergebnisrelevanten Massen- oder Energieströme abgeschnitten.

Die Abschneidekriterien der genutzten Hintergrund-Datensätze orientieren sich ebenfalls an der Massen- und Energieerhaltung. Besonderes Augenmerk wird dem Kriterium der ökologischen Relevanz in Bezug auf die betrachteten Wirkkategorien beigemessen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in diesen öffentlich verfügbaren Datensätzen lediglich diejenigen Inputs und Outputs unberücksichtigt bleiben, die vernachlässigbare Beiträge zum Gesamtergebnis leisten. Somit sind alle relevanten Prozesse vollständig erfasst. Nicht zu erwarten ist, dass wichtige Umweltwirkungen aufgrund der Vernachlässigung eines Prozessschrittes unerkannt bleiben. Alle relevanten Transporte wurden berücksichtigt und die Entfernungen dokumentiert und variiert um deren Einfluss einschätzen zu können.



2.7 Datenqualität

Die in der Modellierung eingesetzten Vordergrunddaten (Energie- und Stoffeinsatz) stammen aus dem Umweltbericht des Vereins Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) aus dem Jahr 2004. Zur Validierung der Daten wurden unter anderem Daten des Statistischen Bundesamtes herangezogen.

Die Daten beziehen sich auf Produktionsstätten in Deutschland. Die Hintergrunddaten, insbesondere die Energiebereitstellungsketten stellen Durchschnittswerte für Deutschland dar (z. B. „Strom Mix DE“).

2.8 Allokationen

Allokationen betreffen die bereits angesprochenen Recyclinggüter Hüttensand, Flugasche und REA-Gips. Sie erfolgen in der Regel nach Masse.

Hüttensand entsteht durch die Granulation von Hochofenschlacke. Diese wiederum entsteht beim Prozess der Eisenerzeugung unabdingbar und erfüllt zugleich metallurgische Aufgaben mit dem Ziel, die Roheisenqualität zu optimieren. Die Erzeugung von Hochofenschlacke und der damit verbundene Aufwand ist deshalb der Roheisenerzeugung zuzurechnen. Die Herstellung von Hüttensand durch Granulierung ist dagegen eine gezielte Maßnahme, die der Veredelung der Hochofenschlacke dient. Diese Maßnahme sowie der Transport zum Zementwerk wird deshalb der Erzeugung des Hüttensandes zugerechnet. Dieses Allokationsprinzip entspricht auch der Vereinbarung zwischen der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken und dem VDZ.

Ähnlich verhält es sich bei der Allokation des REA-Gipses. Die Rauchgasentschwefelung ist beim Betreiben eines Kraftwerkes unbedingt notwendig. Die Entstehung des Sulfatschlammes ist deshalb nicht mit Lasten für die REA-Gips-Verwendung verbunden. Jedoch wird die Aufbereitung des Sulfatschlammes, das Waschen und Entwässern sowie der weitere Transport dem REA-Gips angelastet. Dieses Allokationsprinzip entspricht auch der Vereinbarung zwischen dem Verband der Großkraftwerksbetreiber (VGB) und dem Bundesverband der Gipsindustrie e. V.

Flugasche, die bei der Entstaubung in Steinkohlekraftwerken anfällt, geht lastenfrei ein. Nur die Lagerung sowie der Transport werden der Flugasche angelastet. Dieses Allokationsprinzip entspricht der Vereinbarung zwischen dem Verband der Großkraftwerksbetreiber (VGB) und dem VDZ.

2.9 Prozessdaten

Die Hintergrunddaten für die Modellierung stammen aus der GaBi4-Datenbank. Hintergrunddaten wurden für Transport-Prozesse, die Bereitstellung von Energie (z. B. Diesel, elektrische Energie oder thermische Energie), sowie für Betriebsmittel verwendet. Die Hintergrunddaten haben jeweils den Bezugsraum Deutschland.

Die Modellierung des Vordergrundsystems erfolgte entsprechend der für Hintergrunddatensätze in der GaBi 4 Datenbank verwendeten Methodik, insbesondere in Bezug auf Hintergrunddaten, Systemgrenzen und Allokation. Somit ist auch die Konsistenz zwischen Vorder- und Hintergrundsystem sichergestellt.

3 Sachbilanz

3.1 Zementklinkerherstellung

Folgende Tabellen zeigen die Input- und Outputströme für die Produktion von 1 t Zementklinker. Da Zementklinker ein wesentlicher Bestandteil der meisten Zementarten ist, wird dessen Herstellung mit Energie- und Rohstoffbedarf im Einzelnen dargestellt.

Tabelle 3-1: Sachbilanzdaten Zementklinkerherstellung (Input)

Klinkerherstellung		
INPUT	Einheit pro t Klinker	Menge
Rohstoffe		
Kalkstein	[kg]	1552,41
Sand 0/2	[kg]	56,50
Ton	[kg]	49,39
Eisenerz 65%	[kg]	5,10
Bentonit	[kg]	1,86
Feuerfestmaterialien	[kg]	0,70
Aluminiumoxid (Tonerde) [Abfälle zur Verwertung]	[kg]	2,28
Walzzunder [Abfälle zur Verwertung]	[kg]	3,54
Betriebsstoffe		
Sprengstoff	[kg]	0,10
Brennstoffe		
Braunkohle	[kg]	128,36
Erdgas frei Abnehmer BRD	[kg]	0,47
Heizöl el	[kg]	0,18
Heizöl s	[kg]	2,43
Petrolkoks	[kg]	4,65
Steinkohle frei Abnehmer BRD	[kg]	21,79
Sekundärbrennstoffe		
Altöl	[kg]	3,81
Altreifen	[kg]	11,03
Papierfasern	[kg]	8,29
Kunststoff	[kg]	24,54
Tiermehl	[kg]	16,70
Hausmüllähnlicher Gewerbemüll	[kg]	5,97
Altholz atro (unbehandelt H1, 30% Feuchte)	[kg]	1,60
Lösungsmittel	[kg]	2,74
Ölschlamm	[kg]	0,76
Energie		
Strom	[MJ]	266,76

Tabelle 3-2: Sachbilanzdaten Zementklinkerherstellung (Output)

Klinkerherstellung		
OUTPUT	Einheit pro t Klinker	Menge
Anorganische Emissionen		
Beryllium	[kg]	8,00E-06
Chlorwasserstoff	[kg]	5,00E-03
Fluorwasserstoff	[kg]	4,00E-04
Kohlendioxid	[kg]	649,87
Kohlenmonoxid	[kg]	4,04
Schwefeldioxid	[kg]	0,24
Stickoxide	[kg]	1,06
Organische Emissionen		
Benzol	[kg]	3,20E-03
Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (2,3,7,8 - TCDD)	[kg]	2,00E-11
Polychlorierte Biphenyle (PCB unspezifisch)	[kg]	2,00E-08
Polyzykl. aromatische KW (PAH)	[kg]	1,40E-04
NMVOC	[kg]	0
Schwermetalle in Luft		
Antimon	[kg]	1,00E-05
Arsen	[kg]	1,00E-05
Blei	[kg]	3,00E-05
Cadmium	[kg]	7,00E-06
Chrom +III	[kg]	2,00E-05
Kobalt	[kg]	2,00E-05
Kupfer	[kg]	3,00E-05
Mangan	[kg]	1,00E-04
Nickel	[kg]	2,00E-05
Quecksilber	[kg]	4,00E-05
Rhodium	[kg]	0
Selen	[kg]	2,00E-05
Tellur	[kg]	4,00E-06
Thallium	[kg]	1,00E-05
Vanadium	[kg]	1,00E-05
Zink	[kg]	1,00E-04
Zinn	[kg]	2,00E-05
Emissionen in Wasser		
TOC [Analysewerte]	[kg]	0,04
Partikel in Luft		
Staub	[kg]	0,03

3.2 Zementmahlung

Im Prozessschritt Zementmahlung erfolgt das Einwiegen und die Mischung der spezifischen Zementbestandteile. In den folgenden Tabellen werden die In- und Outputströme entsprechend der Zementart aufgeschlüsselt.

Tabelle 3-3: Sachbilanzdaten Zementmahlung (Input+Output)

Zementmahlung							
INPUT	Einheit pro t Zement	CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/B
Rohstoffe							
Zementklinker	[kg]	950,0	830,0	810,0	680,0	475,0	690,0
Kalkstein	[kg]		120,0				
Ölschiefer (gebrannt)	[kg]						
Gips	[kg]	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Gips (REA)	[kg]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Hüttenwerk-Recyclinggut	[kg]			140,0	270,0	475,0	260,0
Flugasche (Recyclinggut)	[kg]						
Betriebsstoffe							
Ethylenglykol	[kg]	4,96E-05	4,96E-05	4,96E-05	4,96E-05	4,96E-05	4,96E-05
Energie							
Strom	[MJ]	139,26	139,26	139,26	139,26	139,26	139,26
OUTPUT							
Staub	[kg]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Aus den eingesetzten Energieträgern und dem Strommix leitet sich der Primärenergiebedarf ab, der als wichtige Sachbilanzgröße nachfolgend betrachtet wird.

Detaillierte Sachbilanzdaten der untersuchten Zementarten sind in Anhang A tabelliert.

3.3 Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf setzt sich zusammen aus dem Einsatz erneuerbarer und fossiler Ressourcen zur Energiegewinnung.

Abbildung 3-1 stellt die benötigte PE für die Herstellung der Zemente graphisch dar.

Der klinkerreiche CEM I weist den höchsten Primärenergiebedarf innerhalb der aufgeführten Zemente auf, CEM III/B mit 19 % Klinkeranteil benötigt im Vergleich 60 % weniger PE. Der Anteil regenerativer Energie ist mit 2,0 bis 3,5 % gering. Er resultiert ausschließlich aus dem Anteil regenerativer Energieträger im deutschen Strommix. Sekundärbrennstoffe sind in dieser Graphik nicht dargestellt, da diese nicht der Primärenergie zuzurechnen sind.

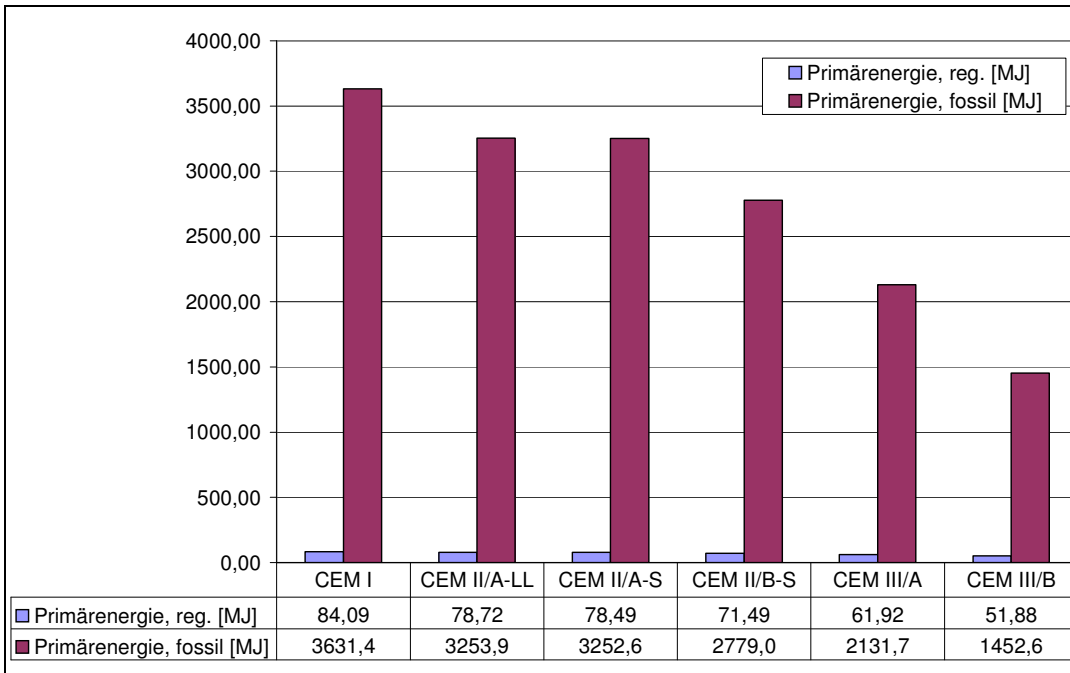


Abbildung 3-1: Primärenergieverbrauch (fossil und regenerativ) pro t Zement

Bezogen auf den fossilen Anteil des Primärenergiebedarfs zeigt Abbildung 3-2 die Anteile der einzelnen Prozesskettenabschnitte. Die Klinkerproduktion benötigt in allen Zementen den weitaus größten Teil der energetischen Ressourcen (58 bis 84 %). Der Energieträgermix wurde bereits in 2.3.1 dargestellt. Hauptenergieträger sind Stein- und Braunkohle, die 60 % des PE-Verbrauchs während der Klinkerherstellung verursachen. Der Beitrag des Rohstoffeinsatzes zum PE-Verbrauch in der Klinkerherstellung beträgt nur 4,5 %, die Strombereitstellung benötigt 35 % der PE. In der Zementmahlung wird PE ausschließlich für die Bereitstellung von Strom benötigt.

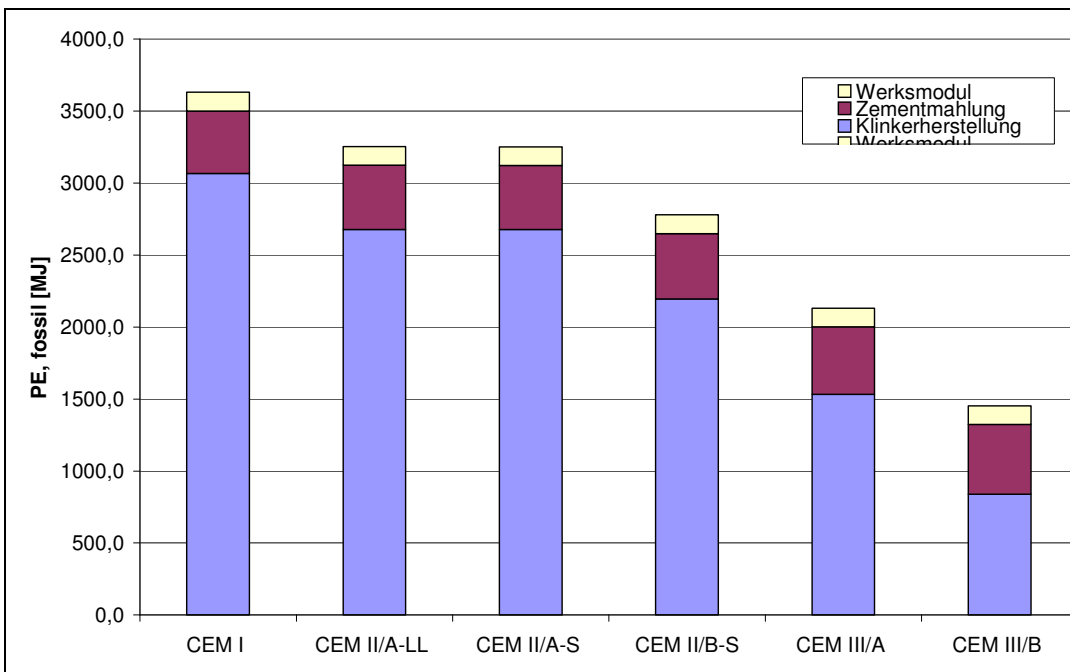


Abbildung 3-2: Primärenergieverbrauch (fossil) pro t Zement nach Prozessschritten

4 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung erfolgt auf Basis von Charakterisierungsfaktoren der Universität Leiden aus dem Jahr 2001 (CML 2001).

Folgende Wirkkategorien werden betrachtet:

- Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äquiv.]
- Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) [kg CO₂-Äquiv.]
- Versauerungspotenzial (AP) [kg AP-Äquiv.]
- Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äquiv.]
- Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) [kg Ethen-Äquiv.]
- Ozonabbaupotenzial (ODP) [kg R11-Äquiv.]

Zur Plausibilitätsprüfung und Sensibilitätsabschätzung werden darüber hinaus folgende CML-Kategorien betrachtet:

- Humantoxizitätspotenzial (HTP) [kg DCB-Äquiv.]
- Aquatisches Frischwasser Ökotoxpotenzial (FAETP) [kg DCB-Äquiv.]
- Aquatisches Salzwasser Ökotoxpotenzial (MAETP) [kg DCB-Äquiv.]
- Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial (TETP) [kg DCB-Äquiv.]

Die Autoren sind sich bewusst, dass die Gültigkeit dieser Toxizitätspotentiale heute noch mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Die humantoxische Wirkung von Substanzen erfolgt oft über Ingestion (Nahrungskette) oder durch Inhalation (Einatmen) und gerade die Weiterentwicklung und Berechnung der Ausbreitungs- und Expositionsmodelle zum Menschen und in der Ökosphäre wird von Wissenschaftlern, die sich mit der Wirkungsanalyse in der LCA-Methodik beschäftigen, als schwierig angesehen.

Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 zeigen die einzelnen Umweltwirkungen und Toxizitätspotentiale bei der Herstellung der betrachteten Zemente in Absolutwerten. Für die unterschiedlichen Umweltwirkungen ist der Klinkeranteil ausschlaggebend. Der Energieaufwand für die Mahlung und allgemeine Werksaufwendungen (Werksmodul) werden in der Modellierung als rezepturunabhängig angesehen.

Tabelle 4-1: Umweltwirkungen der untersuchten Zementarten (je t Zement)

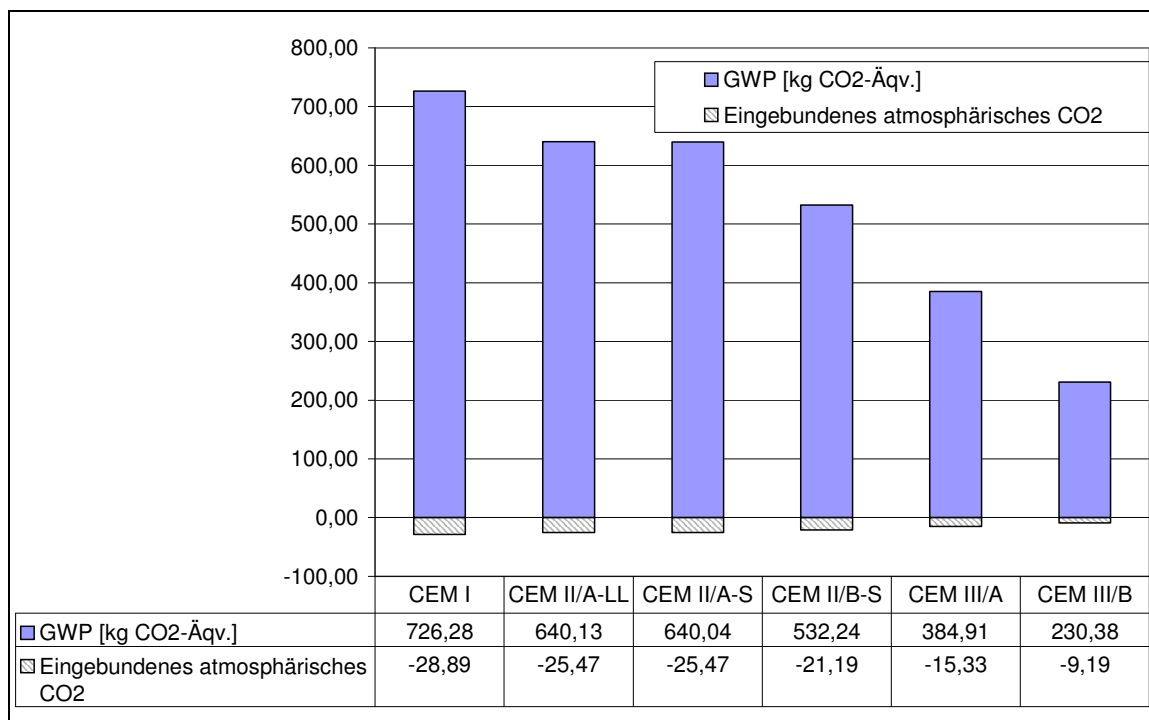
	CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/B
<i>Klinkeranteil</i>	95%	83%	83%	68%	47,5%	26%
ADP [kg Sb-Äqv.]	1,49	1,33	1,33	1,13	0,85	0,56
EP [kg Phosphat-Äqv.]	0,16	0,14	0,14	0,12	0,09	0,05
ODP [kg R11-Äqv.]	1,4E-05	1,3E-05	1,3E-05	1,2E-05	9,9E-06	7,8E-06
POCP [kg Ethen-Äqv.]	0,16	0,14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

Tabelle 4-2: Toxizitätspotentiale der untersuchten Zementarten (je t Zement)

	CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/B
FAETP [kg DCB-Äqv.]	0,50	0,44	0,44	0,37	0,28	0,18
MAETP [kg DCB-Äqv.]	29502,4	26180,2	26157,6	21976,7	16262,7	10269,9
HTP [kg DCB-Äqv.]	23,99	21,12	21,12	17,52	12,60	7,45
TETP [kg DCB-Äqv.]	1,27	1,11	1,11	0,92	0,65	0,37

Der Einfluss des Klinkeranteils ist in allen Kategorien sichtbar. Ein geringer Klinkeranteil korreliert mit geringeren Umweltauswirkungen und umgekehrt. Der Einfluss der zusätzlichen Rohstoffe, die in der Zementmahlung zugesetzt werden, sowie der allgemeinen Werksaufwendungen sind demnach gering.

Zur graphischen Verdeutlichung wird das Treibhauspotential in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 näher dargestellt.

**Abbildung 4-1: Treibhauspotential (GWP) und CO2-Einbindung pro t Zement**

Das Treibhauspotential (Abbildung 4-1) ist eng verknüpft mit dem Primärenergiebedarf. Beispielsweise werden pro Tonne CEM I 700 kg CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Bei dem klinkerarmen CEM III/B liegt das Treibhauspotential bei einem Drittel dieses Wertes – 220 kg CO₂-Äquivalente. Der Kohlendioxidanteil in den klimarelevanten Emissionen beträgt 98,5 %, der restliche Anteil ist durch Methan verursacht.

Im negativen GWP in Abbildung 4-1 spiegelt sich der Einsatz regenerativer Sekundärbrennstoffe wider. Das in Tiermehl, Papier und Altholz eingebundene CO₂ wird zwar bei der Verbrennung ebenso frei, wie auch CO₂ aus fossilen Brennstoffen, allerdings wurde dieses CO₂ beim Aufwuchs der Bäume und Tiere vorher der Atmosphäre entzogen und wird deshalb gegengerechnet.

Bezogen auf die Anteile der Prozesskettenabschnitte ergibt sich die in Abbildung 4-2 dargestellte Verteilung. Der Klinkerherstellungsprozess weist hier einen größeren Anteil auf als bezüglich des Primärenergiebedarfs. Grund hierfür ist v. a. der durch Sekundärenergieträger verursachte Ausstoß von Treibhausgas. Die Sekundärbrennstoffe fließen nicht in die Bilanz des PE-Verbrauchs ein, setzen aber Kohlendioxid frei, das zum Treibhauspotential beiträgt.

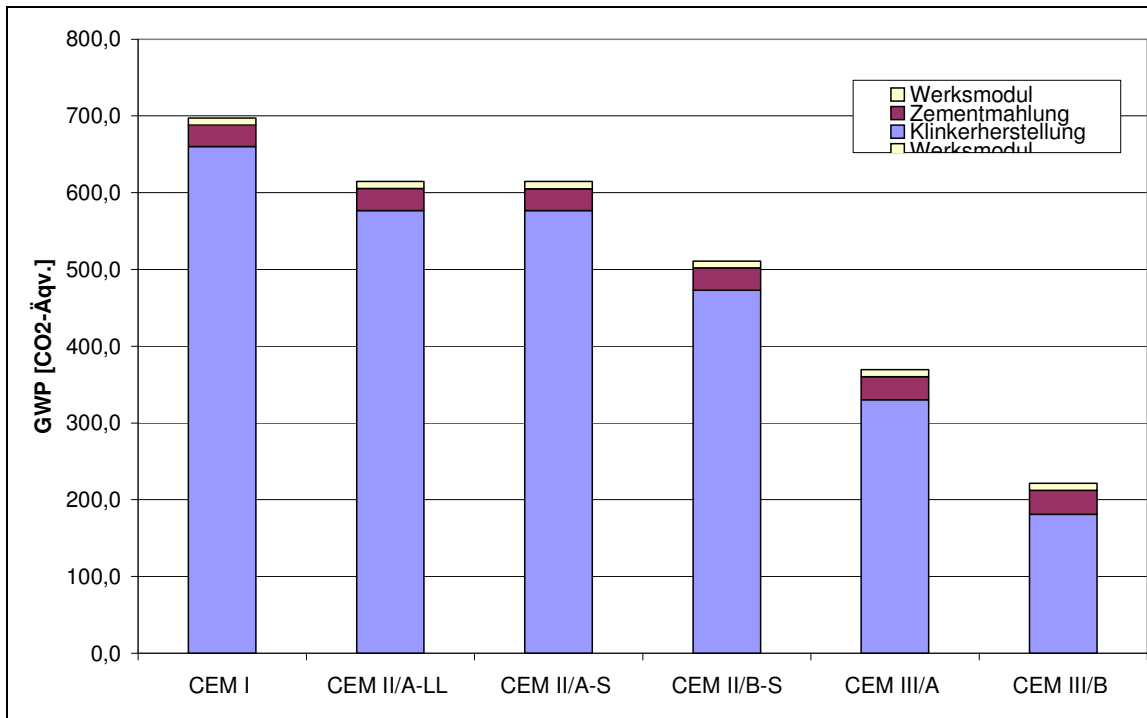


Abbildung 4-2: Treibhauspotential (GWP) pro t Zement nach Prozessschritten

Wie sich die anderen Wirkkategorien hinsichtlich der Verteilung in den einzelnen Prozesskettenabschnitten verhalten, soll nachfolgend in Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 anhand von CEM I und CEM III/B gezeigt werden.

Mit Ausnahme von PE regenerativ und ODP liegt der Anteil der Klinkerherstellung bei CEM I zwischen 85 und 98 %, bei CEM III/B zwischen 56 und 92 % der Gesamtumweltwirkung. Zu PE regenerativ und ODP trägt in der Zementherstellung maßgeblich der Stromverbrauch bei, da keine anderen regenerative Energieträger und ozonschädigenden Gase außerhalb der Stromerzeugung zum Einsatz kommen.

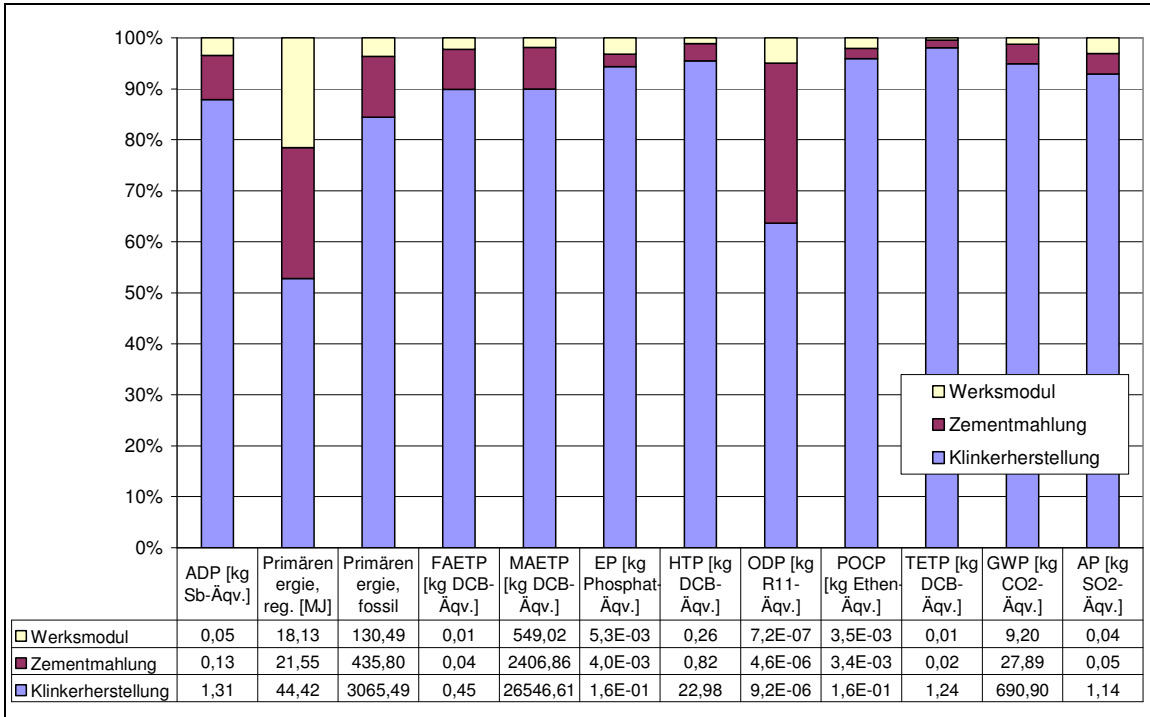


Abbildung 4-3: Umweltwirkungen der Herstellung von CEM I (pro t Zement)

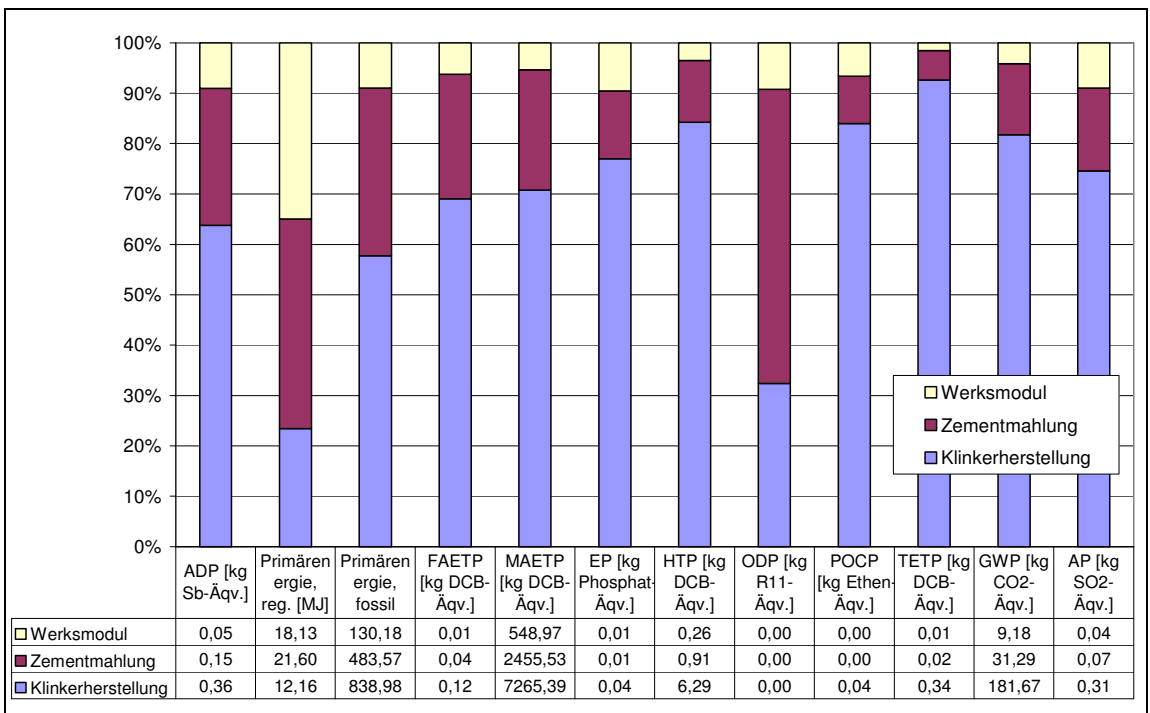


Abbildung 4-4: Umweltwirkungen der Herstellung von CEM III/B (pro t Zement)

5 Sensitivitätsanalyse

Für den Einsatz der bereitgestellten Datensätze ist die Frage von Bedeutung, welchen Einfluss Schwankungen in der Zusammensetzung der Zemente auf das umweltliche Gesamtergebnis haben. Für die einzelnen Zemente werden jeweils die mittleren Anteile für die einzelnen Rohstoffe angenommen. CEM I besteht neben etwa 5 % Gips ausschließlich aus Zementklinker und wird wegen der geringen Schwankungsbreite der Rezeptur hier nicht betrachtet.

Nachfolgend sind wichtige Umweltauswirkungen und der PE-Verbrauch der Zementarten in Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-5 dargestellt.

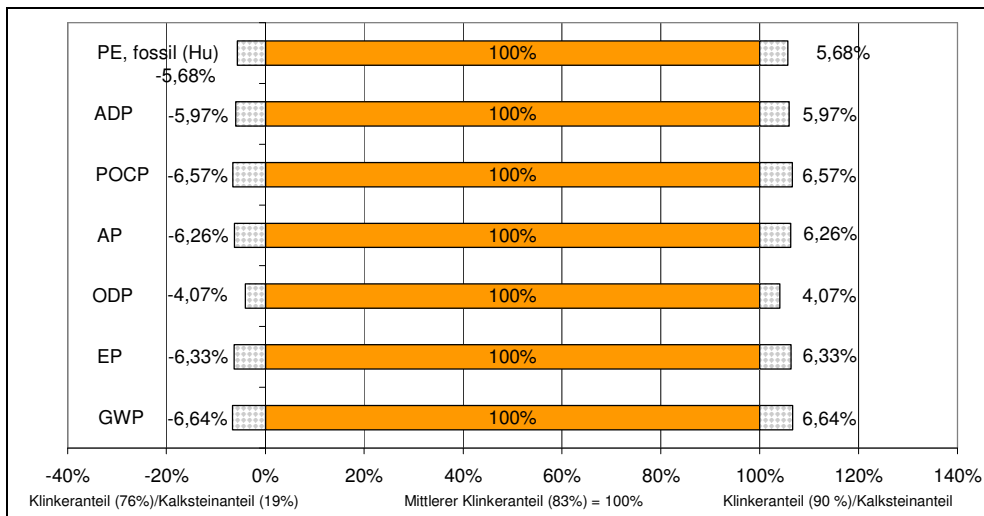


Abbildung 5-1: Umweltauswirkung bei unterschiedlicher Zusammensetzung CEM II/A-LL

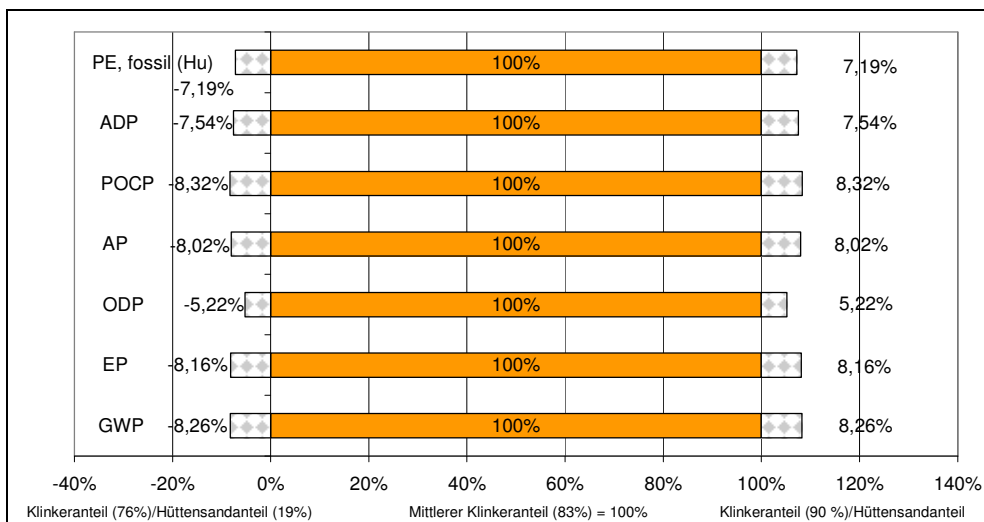


Abbildung 5-2: Umweltauswirkung bei unterschiedlicher Zusammensetzung CEM II/A-S

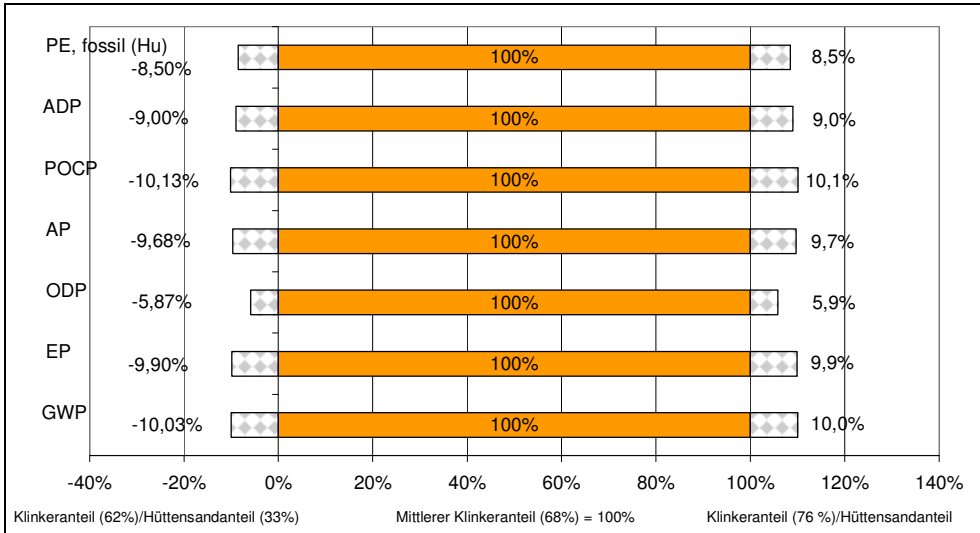


Abbildung 5-3: Umweltauswirkung bei unterschiedlicher Zusammensetzung CEM II/B-S

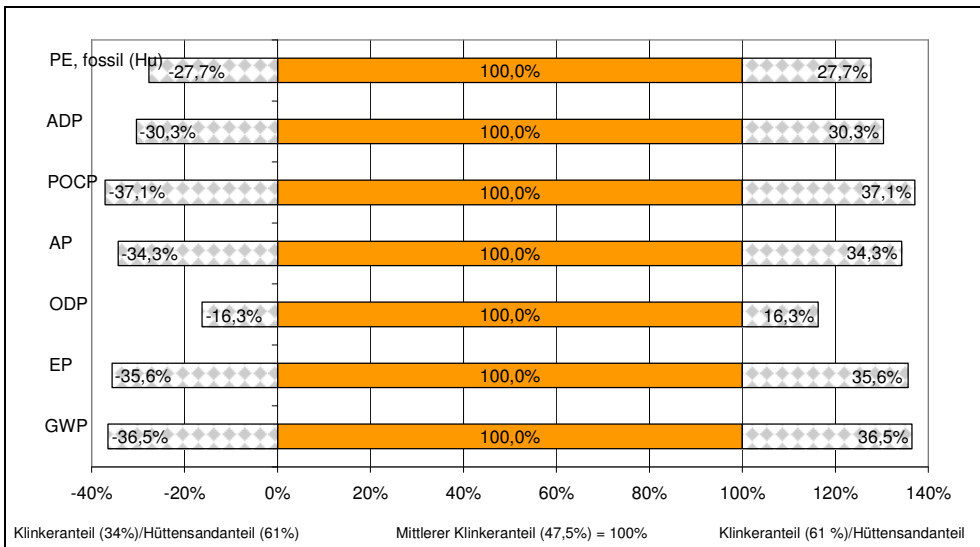


Abbildung 5-4: Umweltauswirkung bei unterschiedlicher Zusammensetzung CEM III/A

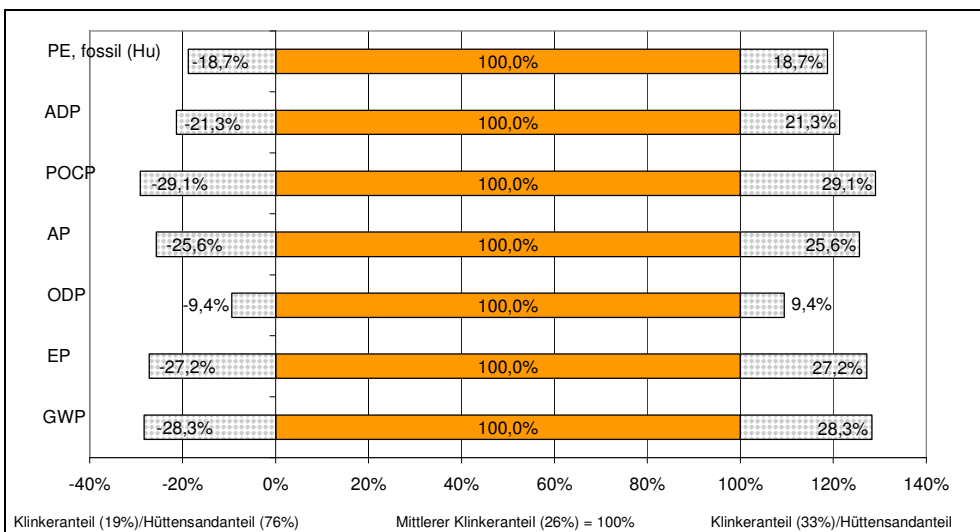


Abbildung 5-5: Umweltauswirkung bei unterschiedlicher Zusammensetzung CEM III/B

Fazit: Ein geringerer Klinkeranteil geht einher mit größeren Schwankungsbreiten in den Umweltwirkungen. Während sich in CEM I und CEM II die Umweltwirkungen bei Abweichungen von der mittleren Rezeptur um max. 10 % verringern bzw. erhöhen, variieren die Umweltwirkungen der Hochofenzementen bis zu 40 %.

Die größten Schwankungen treten bei allen Zementarten in den Wirkkategorien POCP, GWP, AP und EP auf. Auf ODP hat die Zusammensetzung den geringsten Einfluss, da diese Wirkkategorie ausschließlich durch den Stromverbrauch bzw. dessen Erzeugung verursacht ist.

6 Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse

Die erstellten Lebenszyklusinventare können für die Untersuchung baulicher Vorhaben eingesetzt werden, bei denen die entsprechenden deutschen Produkte zum Einsatz kommen. „Bauliche Vorhaben“ können dabei die Herstellung von Mörtel und Beton mit Hilfe der dargestellten Produkte sein.

Die Zement-Datensätze spiegeln jeweils die mittlere Zusammensetzung der entsprechenden Zementart wider, wie nach DIN EN 197-1 definiert. Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde, können vor allem im Falle von Hochofenzementen die umweltlichen Ergebnisse je nach Zusammensetzung erheblich (bis zu 40 %) abweichen. Bei der Betrachtung von Bauvorhaben mit breitem Einsatz von Hochofenzementen ist deshalb eine input-spezifische Untersuchung angeraten.

7 Fortschreibung und Aktualisierung der Daten

Eine kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz und Emissionssituation ist zu erwarten und innerhalb eines Zeitraums von ca. 5 Jahren ist eine Überprüfung der Daten daher empfehlenswert. Da das System insgesamt Energie-dominiert ist, empfiehlt sich außerdem eine regelmäßige Aktualisierung des Energie-Hintergrundsystems.

Für eine spätere Aktualisierung wird eine nähere Betrachtung der CO₂-Einbindung in regenerativen Sekundärbrennstoffen empfohlen. Bisher wurde hier für alle offensichtlich regenerativen Sekundärbrennstoffe von Durchschnittswerten auf Basis der CO₂-Einbindung in Holz ausgegangen. Nicht offensichtlich und deshalb nicht betrachtet ist bisher dagegen bspw. der Naturkautschukanteil in Altreifen, der je nach Reifenart bis zu 25 % betragen kann.

Ein weiterer Aspekt, der im Rahmen späterer Untersuchungen im Fokus stehen sollte, ist der Einfluss verschiedener Festigkeitsklassen der Zemente auf das umweltliche Gesamtergebnis. Die Anfangsfestigkeit wird v. a. durch unterschiedlich starkes Aufmahlen der Rohstoffe beeinflusst. Bisher wurde von einer durchschnittlichen Zementfestigkeit ausgegangen.

8 Zusammenfassung

Die Tendenz zum stärkeren Einsatz von Zementen mit höheren Anteilen an Zuschlagstoffen (CEM II und CEM III) ist aus Umweltsicht zu befürworten.



Laut SYBERTZ 2001 sind aber „in absehbarer Zeit vermutlich keine nennenswerten Veränderungen in Angebot und Nachfrage auf dem deutschen Zementmarkt“ zu erwarten, was nicht zuletzt mit dem begrenzten Angebot insbesondere von recycelten Zuschlagstoffen zusammenhängt. Hüttensande und Flugaschen werden heutzutage schon nahezu vollständig in der Zement- und Betonherstellung wiederverwertet.

Impulse gibt es dennoch durch die geänderte und erweiterte DIN EN 197-1: ein CEM II-A/M mit Hüttensand (S) und Kalkstein (LL) als Hauptbestandteil unterliegt bspw. zukünftig keinen Anwendungsbeschränkungen in den Beton-Expositionsklassen mehr. Dieser erweiterte Einsatzbereich gekoppelt mit der günstigeren Ökobilanz dieser Zemente könnte ein Anreiz sein, Portlandkompositzemente oder auch Hochofenzemente, wenn Kapazitäten vorhanden, verstärkt einzusetzen.



9 Literaturverzeichnis

- ACHTERNBOSCH 2000 Achternbosch, M; Bräutigam, K.-R.: Herstellung von Zementklinker –
 Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundär-
 brennstoffen, Forschungszentrum Karlsruhe, 2000
<http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6508.pdf>
 (letzter Zugriff: 16.05.2007)
- ARENDT 2000 M. Arendt: Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger
 Stoffströme am Beispiel von Gips, Dissertation, Karlsruhe 2000
- CML 2001 CML's impact assessment methods and characterisation factors Lei-
 den University, Institute of Environmental Science (CML). Online: URL:
<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/databases/cmlia/>
- GABI 2003 GaBi 4: Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. IKP,
 Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen,
 April 2003.“
- NPK 2003 NPK Merkblatt
http://www.crb.ch/_CRBInternet/images/CRB/Merkbl/de/Merkblatt_10d-05.pdf
- ISO 14040 : 1997 ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment –
 Principles and Framework, 1997
- ISO 14041 : 1998 ISO 14041 Environmental Management – Life Cycle Assessment –
 Goal and Scope Definition and Inventory Analysis
- ISO 14042 : 2000 ISO 14042 Environmental Management – Life Cycle Assessment –
 Life Cycle Impact Assessment, 2000
- ISO 14043 : 2000 ISO 14043 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life
 Cycle Interpretation, 2000
- ICT 2007 Thomas Hirth, Jörg Woidasky, Peter Eyerer (Hrsg.):
 Nachhaltige rohstoffnahe Produktion,
 Fraunhofer Institut Chemische Technologie, Fraunhofer IRB-Verlag,
 Stuttgart, 2007
- KREISSIG 1999 J. Kreißig und J. Kümmel (1999): Baustoff-Ökobilanzen. Wirkungsab-
 schätzung und Auswertung in der Steine-Erden-Industrie. Hrsg. Bun-
 desverband Baustoffe Steine + Erden e.V.
- SPADZ 2001 Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft der deutschen Zementindustrie e.
 V.
 Studie “Nachhaltigkeit und Zementindustrie”, Verlag Bau und Technik,
 Dezember 2001
- SYBERTZ 2001 Artikel „Die europäische Zementnorm und ihre Auswirkungen in
 Deutschland“
- VERHOFF 2005 F. H. Verhoff: Citric Acid, Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemis-
 try, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005



-
- VDZ 2000 Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2000 / Verein Deutscher Zementwerke e. V. - Düsseldorf, 2000
- VDZ TB 2002 Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.)
Zement-Taschenbuch, 2002, 50. Ausgabe
- VDZ 2004 Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2004 / Verein Deutscher Zementwerke e. V. - Düsseldorf, 2005
- VDZA 2004 Zahlen und Daten 2004 - 2005, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V. - Düsseldorf, 2005



Anhang A Sachbilanzdaten

Tabelle 9-1: Sachbilanzdaten pro t Zement für CEM I, CEM II/A-S und B-S

<i>Input</i>		CEM I	CEM II/A-S	CEM II/B-S
		je t	je t	je t
Energetische Ressourcen				
Braunkohle	MJ	1555,64	1375,41	1150,13
Erdgas	MJ	234,67	216,02	192,71
Erdöl	MJ	403,73	365,92	318,65
Steinkohle	MJ	899,91	801,08	677,53
Uran (U) natürlich	MJ	537,83	494,45	440,22
Primärenergie aus Sonnennutzung	MJ	14,78	14,53	14,21
Primärenergie aus Wasserkraft	MJ	31,47	28,92	25,74
Primärenergie aus Windkraft	MJ	34,59	31,80	28,30
Primärenergie aus Biomasse	MJ	3,21	3,21	3,21
Sekundärbrennstoffe, fossile Rohst.	MJ	1089,03	951,47	779,52
Sekundärbrennstoffe, erneuerbare	MJ	385,61	336,90	276,01
Stoffliche Ressourcen				
Deckschicht (Boden)	kg	146,70	128,18	105,03
Taubes Gestein	kg	2007,49	1775,73	1486,03
Kohlendioxid (CO ₂) aus Luft	kg	28,89	25,47	21,19
Mineralische Rohstoffe				
Rohkies/Sand	kg	56,30	49,21	40,34
Kalkstein (CaCO ₃)	kg	1628,34	1422,78	1165,82
Gips (Naturgips)	kg	30,00	30,00	30,00
Ton/Lehm	kg	46,94	41,01	33,60
Erze				
Bariterz und Bentonit	kg	2,19	1,91	1,57
Bauxit (Al ₂ O ₃ *H ₂ O)	kg	3,48	3,04	2,49
Eisenerz	kg	8,17	7,14	5,85
Zinkerz	kg	0,004	0,004	0,004
Kupfererz	kg	0,020	0,018	0,017
Manganerz	kg	0,002	0,002	0,002
Wasser				
Grundwasser	m ³	1,07	0,95	0,80
Oberflächenwasser	m ³	1,00	0,93	0,84
Output				
Anorg. Emissionen in Luft				
Kohlendioxid (CO ₂)	kg	718,67	633,14	526,23
Kohlenmonoxid (CO)	kg	3,90	3,41	2,80
Staub (Summenwert)	kg	0,19	0,18	0,17
Stickoxide (NO _x)	kg	1,23	1,08	0,91
Ammoniak (NH ₃)	kg	1,2E-03	1,1E-03	9,6E-04
Bor (B)	kg	1,9E-04	1,7E-04	1,5E-04
Chlorwasserstoff (HCl)	kg	0,006	0,005	0,004
Lachgas (N ₂ O)	kg	0,005	0,004	0,004
Beryllium	kg	0,028	0,025	0,022
Schwefeldioxid (SO ₂)	kg	0,36	0,32	0,27
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	kg	1,6E-04	1,5E-04	1,4E-04



Output		CEM I	CEM II/A-S	CEM II/B-S
		je t	je t	je t
Anorg. Emissionen in Luft				
Fluorwasserstoff (HF)	kg	5,8E-04	5,2E-04	4,4E-04
Wasserdampf	kg	229,47	211,04	188,00
Organische Emissionen in Luft				
NMVOG	kg	0,03	0,03	0,02
Methan (CH ₄)	kg	0,41	0,37	0,31
Benzol (C ₆ H ₆)	kg	3,1E-03	2,7E-03	2,2E-03
Phenol (C ₆ H ₅ OH)	kg	1,0E-10	9,2E-11	8,2E-11
Ethen (C ₂ H ₄)	kg	1,9E-06	1,9E-06	1,8E-06
Formaldehyd (COOH)	kg	1,2E-04	1,1E-04	9,8E-05
PAK (polyzyk. aromat. KW)	kg	1,6E-04	1,4E-04	1,2E-04
Benzo(a)pyren (C ₂₀ H ₁₂)	kg	1,1E-08	9,8E-09	8,8E-09
Dioxine (TCDD;TE)	kg	2,5E-14	2,3E-14	2,0E-14
Metalle in Luft				
Arsen (As)	kg	1,2E-05	1,1E-05	9,1E-06
Blei (Pb)	kg	3,9E-05	3,4E-05	2,9E-05
Cadmium (Cd)	kg	6,9E-06	6,1E-06	5,0E-06
Chrom (Cr ^{III+})	kg	2,0E-05	1,8E-05	1,5E-05
Kobalt (Co)	kg	2,0E-05	1,7E-05	1,4E-05
Kupfer (Cu)	kg	3,1E-05	2,7E-05	2,2E-05
Nickel (Ni)	kg	2,4E-05	2,1E-05	1,7E-05
Quecksilber (Hg)	kg	4,0E-05	3,5E-05	2,9E-05
Selen (Se)	kg	2,8E-05	2,5E-05	2,1E-05
Thallium (Tl)	kg	9,6E-06	8,4E-06	6,9E-06
Vanadium (V)	kg	3,6E-05	3,2E-05	2,7E-05
Zink (Zn)	kg	1,2E-04	1,1E-04	9,0E-05
Emissionen in Wasser				
Abwasser	kg	144,30	144,30	144,30
Analysewerte				
TOC	kg	0,040	0,035	0,029
CSB	kg	0,033	0,032	0,029
Anorganische Emissionen				
Ammonium (NH ₄ ²⁻)	kg	1,1E-03	1,0E-03	8,6E-04
Chlorid (Cl ⁻)	kg	1,19	1,06	0,90
Fluorid (F ⁻)	kg	0,102	0,093	0,083
Nitrat (NO ₃ ⁻)	kg	0,004	0,004	0,003
Phosphat (PO ₄ ⁽³⁻⁾)	kg	1,8E-05	1,6E-05	1,4E-05
Sulfat (SO ₄ ⁽²⁻⁾)	kg	0,65	0,58	0,49
Organische Emissionen				
HC (Kohlenwasserstoffe KW)	kg	4,7E-04	4,2E-04	3,6E-04
Schwermetalle				
Blei (Pb)	kg	2,0E-05	1,8E-05	1,6E-05
Cadmium (Cd)	kg	4,1E-06	3,7E-06	3,3E-06
Chrom (Cr ^{III+})	kg	1,1E-05	9,6E-06	8,3E-06
Kobalt (Co)	kg	2,3E-09	2,1E-09	1,8E-09
Kupfer (Cu)	kg	8,5E-06	7,8E-06	6,9E-06
Nickel (Ni)	kg	8,0E-06	7,2E-06	6,3E-06
Quecksilber (Hg)	kg	2,3E-07	2,1E-07	1,9E-07
Zink (Zn)	kg	1,2E-05	1,1E-05	9,4E-06



Output		CEM I	CEM II/A-S	CEM II/B-S
		je t	je t	je t
Emissionen in Boden				
Öle	kg	3,4E-05	3,2E-05	3,0E-05
PAK (polyzyk. aromat. KW)	kg	0	0	0
Benzo(a)pyren	kg	0	0	0
Dioxine (TCDD;TE)	kg	0	0	0
Schwermetalle				
Blei (Pb)	kg	5,9E-08	5,9E-08	5,9E-08
Cadmium (Cd)	kg	9,3E-09	8,6E-09	7,7E-09
Chrom (Cr ^{III+})	kg	2,1E-06	1,9E-06	1,7E-06
Kupfer (Cu)	kg	6,0E-08	5,8E-08	5,6E-08
Nickel (Ni)	kg	7,2E-07	6,6E-07	5,8E-07
Quecksilber (Hg)	kg	4,3E-10	4,3E-10	4,2E-10
Zink (Zn)	kg	3,9E-07	3,7E-07	3,4E-07
Auswertung Abfälle				
Abraum/Haldengüter	kg	2307,93	2038,19	1701,02
Siedlungsabfälle	kg	0,01	0,01	0,01
Sondermüll	kg	0,42	0,40	0,38
davon radioaktive Abfälle	kg	0,19	0,18	0,16



Tabelle 9-2: Sachbilanzdaten pro t Zement für CEM II/A-LL, CEM II/A und B

<i>Input</i>		CEM II/A-LL	CEM II/A	CEM III/B
		je t	je t	je t
Energetische Ressourcen				
Braunkohle	MJ	1376,62	842,24	519,33
Erdgas	MJ	216,60	160,85	127,13
Erdöl	MJ	362,59	254,04	186,29
Steinkohle	MJ	802,15	508,69	331,61
Uran (U) natürlich	MJ	496,28	366,11	288,38
Primärenergie aus Sonnennutzung	MJ	14,54	13,78	13,33
Primärenergie aus Wasserkraft	MJ	29,02	21,39	16,83
Primärenergie aus Windkraft	MJ	31,91	23,52	18,51
Primärenergie aus Biomasse	MJ	3,21	3,21	3,21
Sekundärbrennstoffe, fossile R.	MJ	951,47	544,52	298,05
Sekundärbrennstoffe, erneuerbare	MJ	336,90	192,80	105,53
Stoffliche Ressourcen				
Deckschicht (Boden)	kg	138,44	73,38	40,19
Taubes Gestein	kg	1777,34	1090,11	674,88
Kohlendioxid (CO ₂) aus Luft	kg	25,47	15,33	9,19
Mineralische Rohstoffe				
Rohkies/Sand	kg	49,21	28,22	15,51
Kalkstein (CaCO ₃)	kg	1555,09	814,65	446,35
Gips (Naturgips)	kg	30,00	30,00	30,00
Ton/Lehm	kg	41,01	23,47	12,85
Erze				
Bariterz und Bentonit	kg	1,91	1,10	0,61
Bauxit (Al ₂ O ₃ *H ₂ O)	kg	3,04	1,74	0,95
Eisenerz	kg	7,14	4,09	2,24
Zinkerz	kg	0,004	0,003	0,003
Kupfererz	kg	0,018	0,014	0,012
Manganerz	kg	0,002	0,002	0,002
Wasser				
Grundwasser	m ³	0,95	0,59	0,38
Oberflächenwasser	m ³	0,93	0,71	0,57
<i>Output</i>		CEM II/A-LL	CEM II/A	CEM III/B
Anorg. Emissionen in Luft				
Kohlendioxid (CO ₂)	kg	633,20	380,12	226,86
Kohlenmonoxid (CO)	kg	3,41	1,96	1,08
Staub (Summenwert)	kg	0,18	0,16	0,14
Stickoxide (NO _x)	kg	1,08	0,66	0,41
Ammoniak (NH ₃)	kg	1,1E-03	7,5E-04	5,3E-04
Bor (B)	kg	1,7E-04	1,3E-04	9,9E-05
Chlorwasserstoff (HCl)	kg	0,005	0,003	0,002
Lachgas (N ₂ O)	kg	0,005	0,003	0,002
Beryllium	kg	0,026	0,018	0,014
Schwefeldioxid (SO ₂)	kg	0,32	0,20	0,13
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	kg	1,5E-04	1,2E-04	1,0E-04
Fluorwasserstoff (HF)	kg	5,2E-04	3,3E-04	2,1E-04
Wasserdampf (H ₂ O)	kg	211,83	156,51	123,47



Output		CEM II/A-LL	CEM II/IA	CEM III/B
		je t	je t	je t
		CEM I	CEM II/A-S	CEM II/B-S
Organische Emissionen in Luft				
NMVOG	kg	0,03	0,02	0,01
Methan (CH ₄)	kg	0,37	0,24	0,16
Benzol (C ₆ H ₆)	kg	2,7E-03	1,6E-03	8,7E-04
Phenol (C ₆ H ₅ OH)	kg	9,3E-11	6,8E-11	5,3E-11
Ethen (C ₂ H ₄)	kg	1,9E-06	1,7E-06	1,6E-06
Formaldehyd (COOH)	kg	1,1E-04	8,2E-05	6,6E-05
PAK (polyzyk. aromat. KW)	kg	1,4E-04	8,3E-05	4,8E-05
Benzo(a)pyren (C ₂₀ H ₁₂)	kg	9,8E-09	7,4E-09	6,0E-09
Dioxine (TCDD;TE)	kg	2,3E-14	1,7E-14	1,3E-14
Metalle in Luft				
Arsen (As)	kg	1,1E-05	6,7E-06	4,1E-06
Blei (Pb)	kg	3,4E-05	2,1E-05	1,3E-05
Cadmium (Cd)	kg	6,1E-06	3,5E-06	2,0E-06
Chrom (Cr ^{III+})	kg	1,8E-05	1,0E-05	5,9E-06
Kobalt (Co)	kg	1,7E-05	9,9E-06	5,5E-06
Kupfer (Cu)	kg	2,7E-05	1,6E-05	9,0E-06
Nickel (Ni)	kg	2,1E-05	1,3E-05	7,3E-06
Quecksilber (Hg)	kg	3,5E-05	2,0E-05	1,1E-05
Selen (Se)	kg	2,5E-05	1,6E-05	1,0E-05
Thallium (Tl)	kg	8,4E-06	4,8E-06	2,7E-06
Vanadium (V)	kg	3,2E-05	2,0E-05	1,3E-05
Zink (Zn)	kg	1,1E-04	6,6E-05	4,1E-05
Emissionen in Wasser				
Abwasser	kg	144,30	144,30	144,30
Analysewerte				
TOC	kg	0,035	0,021	0,013
BSB	kg	0,004	0,004	0,004
CSB	kg	0,032	0,026	0,022
Anorganische Emissionen				
Ammonium (NH ₄ ²⁻)	kg	1,0E-03	6,6E-04	4,5E-04
Chlorid (Cl ⁻)	kg	1,06	0,69	0,46
Fluorid (F ⁻)	kg	0,094	0,069	0,055
Nitrat (NO ₃ ⁻)	kg	0,004	0,003	0,002
Phosphat (PO ₄ ⁽³⁻⁾)	kg	1,6E-05	1,2E-05	9,2E-06
Sulfat (SO ₄ ⁽²⁻⁾)	kg	0,58	0,37	0,24
Organische Emissionen				
HC (Kohlenwasserstoffe KW)	kg	4,4E-04	2,8E-04	1,9E-04
Schwermetalle				
Blei (Pb)	kg	1,8E-05	1,3E-05	1,0E-05
Cadmium (Cd)	kg	3,7E-06	2,6E-06	1,9E-06
Chrom (Cr ^{III+})	kg	9,6E-06	6,6E-06	4,8E-06
Kobalt (Co)	kg	2,0E-09	1,5E-09	1,1E-09
Kupfer (Cu)	kg	7,8E-06	5,6E-06	4,3E-06
Nickel (Ni)	kg	7,2E-06	5,0E-06	3,6E-06
Quecksilber (Hg)	kg	2,2E-07	1,6E-07	1,2E-07
Zink (Zn)	kg	1,1E-05	7,4E-06	5,4E-06



Output		CEM II/A-LL je t	CEM II/IA je t	CEM III/B je t
Emissionen in Boden				
Öle	kg	3,2E-05	2,7E-05	2,4E-05
PAK (polyzyk. aromat. KW)	kg	0	0	0
Benzo(a)pyren	kg	0	0	0
Dioxine (TCDD;TE)	kg	0	0	0
Schwermetalle				
		CEM I	CEM II/A-S	CEM II/B-S
Blei (Pb)	kg	5,9E-08	5,9E-08	5,9E-08
Cadmium (Cd)	kg	8,6E-09	6,6E-09	5,4E-09
Chrom (Cr ^{III+})	kg	1,9E-06	1,4E-06	1,1E-06
Kupfer (Cu)	kg	5,8E-08	5,3E-08	4,9E-08
Nickel (Ni)	kg	6,6E-07	4,8E-07	3,7E-07
Quecksilber (Hg)	kg	4,3E-10	4,2E-10	4,1E-10
Zink (Zn)	kg	3,7E-07	3,1E-07	2,7E-07
Auswertung Abfälle				
Abraum/Haldengüter	kg	2062,37	1240,23	756,95
Siedlungsabfälle	kg	0,01	0,01	0,01
Sondermüll	kg	0,40	0,35	0,31
davon radioaktive Abfälle	kg	0,18	0,13	0,10



Anhang B Beschreibung der Auswertegrößen

Anhang B 1 Primärenergieverbrauch

Der Primärenergiebedarf kann durch unterschiedliche Arten an Energiequellen gedeckt werden. Der Primärenergiebedarf ist das Quantum an direkt aus der Hydrosphäre, Atmosphäre oder Geosphäre entnommenen Energie oder Energieträger, die noch keiner anthropogenen Umwandlung unterworfen wurde. Bei fossilen Energieträgern und Uran ist dies z.B. die Menge entnommener Ressource ausgedrückt in Energieäquivalent (Energieinhalt der Energierohstoffe). Bei nachwachsenden Energieträgern wird z.B. die energetisch charakterisierte Menge eingesetzter Biomasse beschrieben. Bei Wasserkraft handelt es sich um die Energiemenge, die aus der Änderung der potentiellen Energie (aus der Höhendifferenz) des Wassers gewonnen wird. Als aggregierte Werte werden folgende Primärenergien ausgewiesen:

Der Summenwert „**Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar**“ angegeben in MJ charakterisiert im wesentlichen den Einsatz der Energieträger Erdgas, Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Uran. Erdgas und Erdöl werden sowohl zur Energieerzeugung, als auch stofflich als Bestandteil z.B. von Kunststoffen eingesetzt. Kohle wird im wesentlichen zur Energieerzeugung genutzt. Uran wird ausschließlich zur Stromgewinnung in Kernkraftwerken eingesetzt.

Der Summenwert „**Primärenergieverbrauch erneuerbar**“ angegeben in MJ wird in der Regel separat ausgewiesen und umfasst Wind- und Wasserkraft, Solarenergie und Biomasse.

Es ist in jedem Fall wichtig, dass genutzte Endenergie (z.B. 1 kWh Strom) und eingesetzte Primärenergie nicht miteinander verrechnet wird, da sonst der Wirkungsgrad zur Herstellung bzw. Bereitstellung der Endenergie nicht berücksichtigt wird.

Der Energieinhalt der hergestellten Produkte wird als stoffgebundener Energieinhalt ausgewiesen. Er wird durch den unteren Heizwert des Produkts charakterisiert. Es stellt den noch nutzbaren Energieinhalt dar.

Anhang B 2 Abfallgrößen

Abfall fällt in unterschiedlichen Qualitäten an. Abfälle sind nach §1 Abs. 1S. 1 AbfG „bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will“ oder „deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohl der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt, geboten ist“.

Aus Sicht der Bilanzierung ist eine Unterteilung der Abfälle in drei Kategorien sinnvoll. Es werden die Kategorien Abraum / Haldengüter, Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Sonderabfälle ausgewiesen.

Abraum/Haldengüter in kg: Diese Kategorie setzt sich aus abzuräumenden Deckschichten bei der Rohstoffgewinnung, Aschen und sonstigen, zu beseitigenden, rohstoffgewinnungsbedingten Materialien zusammen. Auch fallen Erzaufbereitungsrückstände wie Taubes Gestein, Schlacken, Rotschlämme, u.ä. darunter.

Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall in kg: Diese Größe enthält die aggregierten Werte von hausmüllähnlichem Gewerbeabfälle nach 3. AbfVwV TA SiedlABf.

Sonderabfälle in kg: Aggregiert sind in dieser Kategorie Stoffe, die einer Sondermüllverbrennung oder Sondermülldeponie zugeführt werden, wie Lackschlämme, Galvanikschlämme, Filterstäube oder sonstigem festen oder flüssigen Sondermüll und radioaktive Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken und der Brennelementherstellung.

Anhang B 3 Treibhauseffekt (GWP)

Der Wirkungsmechanismus des Treibhauseffektes kann im kleineren Maßstab, wie der Name schon sagt, in Gewächs- oder Treibhäusern beobachtet werden. Dieser Effekt findet auch im globalen Maßstab statt. Die eintreffende kurzwellige Sonnenstrahlung trifft auf die Erdoberfläche und wird dort teilweise absorbiert (was zu einer direkten Erwärmung führt) und teilweise als Infrarotstrahlung reflektiert. Der reflektierte Anteil wird in der Troposphäre durch sogenannte Treibhausgase absorbiert und richtungsunabhängig wieder abgestrahlt, so dass es teilweise wieder zur Erde zurückgestrahlt wird. Dies führt zu einer weiteren Erwärmung.

Zusätzlich zum natürlichen Treibhauseffekt ist aufgrund menschlicher Aktivitäten ein anthropogener Anteil am Treibhauseffekt zu verzeichnen. Zu den anthropogen freigesetzten Treibhausgasen gehören beispielsweise Kohlendioxid, Methan und FCKW's. Abbildung A 1 zeigt die wesentlichen Vorgänge des anthropogenen Treibhauseffekts. Die Bewertung des Treibhauseffekts sollte die mögliche langfristige globale Auswirkung berücksichtigen.

Das Treibhauspotential wird in Kohlendioxid - Äquivalent ($\text{CO}_2\text{-Äq.}$) angegeben. Dies bedeutet, dass alle Emissionen bezüglich ihres potentiellen Treibhauseffekts zu CO_2 ins Verhältnis gesetzt werden. Da die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre in die Berechnung mit einfließen, muss der für die Abschätzung betrachtete Zeithorizont immer mit angegeben werden. Üblich ist ein Bezug auf 100 Jahre.

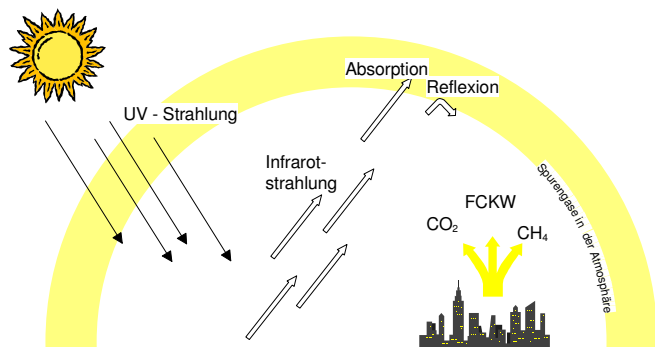


Abbildung A 1: Anthropogener Treibhauseffekt (KREISSIG 1999)

Anhang B 4 Versauerungspotenzial (AP)

Die Versauerung von Böden und Gewässern entsteht überwiegend durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren. Daraus resultiert eine Verringerung des pH-Werts von Regenwasser und Nebel von 5,6 auf 4 und darunter. Relevante Beiträge hierzu liefern Schwefeldioxid und Stickoxide mit ihren Säuren (H_2SO_4 und HNO_3). Schäden entstehen an Ökosystemen, wobei an erster Stelle das Waldsterben zu nennen ist. Dabei kann es zu einer direkten Schädigung oder indirekten Schädigung (Nährstoffauswaschung aus

den Böden, verstärkte Löslichkeit von Metallen im Boden) kommen. Aber auch bei Bauwerken und Baustoffen nehmen die Schäden zu. Beispiele hierzu sind Metalle und Natursteine, die verstärkter Korrosion oder Zersetzung ausgesetzt sind. Abbildung A 2 stellt den wesentlichen Wirkungspfad der Versauerung dar.

Das Versauerungspotential wird in Schwefeldioxid – Äquivalent (SO_2 -Äq.) angegeben. Es wird die Fähigkeit bestimmter Stoffe, H^+ -Ionen zu bilden und abzugeben, als Versauerungspotential bezeichnet. Bestimmten Emissionen kann ein Versauerungspotential zugewiesen werden, indem die vorhandenen S-, N- und Halogenatome zur Molmasse der Emission ins Verhältnis gesetzt werden. Bezugssubstanz ist Schwefeldioxid.

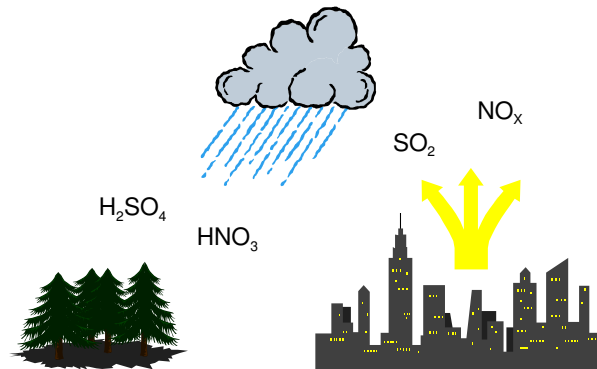


Abbildung A 2: Versauerung (KREISSIG 1999)

Bei der Bewertung der Versauerung ist zu berücksichtigen, dass es sich zwar um ein globales Problem handelt, die Effekte regional jedoch unterschiedlich ausfallen können.

Anhang B 5 Eutrophierungspotential (EP)

Unter Eutrophierung bzw. Nährstoffeintrag versteht man eine Anreicherung von Nährstoffen an einem bestimmten Standort. Man unterscheidet dabei zwischen aquatischem und terrestrischem Nährstoffeintrag. Beiträge zur Eutrophierung stammen aus Luftschadstoffen, Abwässern und der Düngung in der Landwirtschaft.

Die Folgen für Gewässer sind ein verstärktes Algenwachstum. Dadurch dringt weniger Sonnenlicht in tiefere Schichten vor. Dies führt zu einer verringerten Photosynthese verbunden mit einer niedrigen Sauerstoffproduktion. Auch wird für den Abbau abgestorbener Algen Sauerstoff benötigt. Beide Effekte bewirken eine verringerte Sauerstoffkonzentration im Wasser, was letztendlich zu Fischsterben und einer anaeroben Zersetzung (ohne Sauerstoff) führen kann. Es entsteht dabei unter anderem Schwefelwasserstoff und Methan. Man spricht auch von einem „Umkippen des Gewässers“. Quellen der Eutrophierung sind in Abbildung A 3 dargestellt.

Auf eutrophierten Böden kann man bei Pflanzen eine verstärkte Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen sowie eine Schwächung des Festigkeitsgewebes beobachten. Ein zu hoher Nährstoffeintrag führt durch Auswaschungsprozesse zu einem erhöhten Nitratgehalt im Grundwasser. Das Nitrat gelangt so auch ins Trinkwasser.

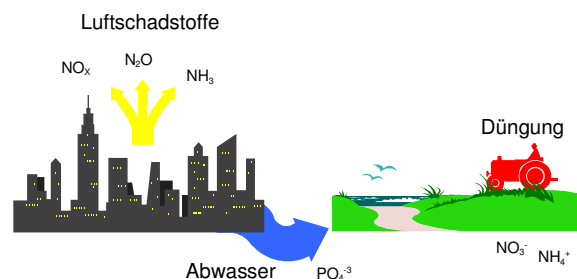


Abbildung A 3: Quellen der Eutrophierung (KREISSIG 1999)

Nitrat zumindest in geringen Mengen ist toxikologisch unbedenklich. Problematisch ist jedoch Nitrit als Reaktionsprodukt von Nitrat, welches beim Menschen toxisch wirkt.

Das Eutrophierungspotential geht als Phosphat – Äquivalent ($\text{PO}_4\text{-Äq.}$) in die Bilanz ein. Wie beim Versauerungspotential ist auch beim Eutrophierungspotential zu berücksichtigen, dass die Effekte regional sehr unterschiedlich sind.

Anhang B 6 Photooxidantienbildung (POCP)

Im Gegensatz zur Schutzfunktion in der Stratosphäre ist bodennahe Ozon als schädliches Spurengas einzuordnen. Photochemische Ozonbildung in der Troposphäre, auch als Sommersmog bezeichnet, steht im Verdacht, zu Vegetations- und Materialschäden zu führen. Höhere Konzentrationen von Ozon sind humantoxisch. Unter Einwirkung von Sonnenstrahlung entstehen aus Stickoxid und Kohlenwasserstoffemissionen unter komplexen chemischen Reaktionen aggressive Reaktionsprodukte, wobei das wichtigste Reaktionsprodukt Ozon ist. Stickoxide allein bewirken keine hohe Ozonkonzentration.

Kohlenwasserstoffemissionen treten bei unvollständiger Verbrennung, beim Umgang mit Ottokraftstoffen (Lagerung, Umschlag, Tanken etc.) oder beim Umgang mit Lösungsmitteln auf. Hohe Ozonkonzentrationen treten bei hohen Temperaturen, geringer Luftfeuchtigkeit, geringem Luftaustausch sowie hohen Kohlenwasserstoffkonzentrationen auf. Da das Vorhandensein von CO (meist vom Verkehr) das gebildete Ozon zu CO_2 und O_2 reduziert, kommt es in unmittelbarer Nähe der Emissionsquellen oft nicht zu den höchsten Ozonkonzentrationen. Diese treten eher in Reinluftgebieten (z.B. Wäldern) auf, in welchen kaum CO vorhanden ist (Abbildung A 4).

Das Photooxidantienpotential (POCP) wird in der Ökobilanz als Ethen-Äquivalent ($\text{C}_2\text{H}_4\text{-Äq.}$) angegeben. Bei einer Bewertung muss berücksichtigt werden, dass die tatsächlichen Ozonkonzentrationen von der Witterung abhängen. Ebenso muss der lokale Charakter der Ozonbildung integriert werden.

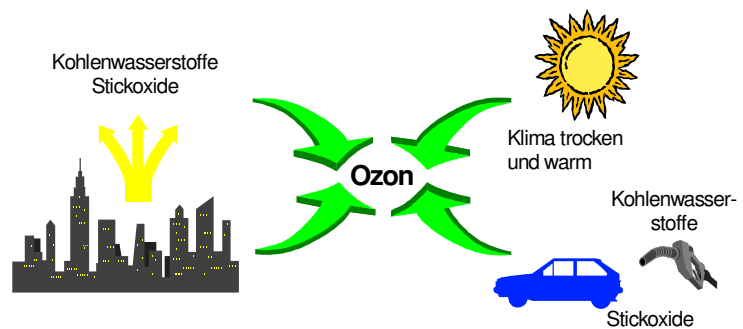


Abbildung A 4: Bodennahe Ozonbildung (Sommersmog) (KREISSIG 1999)

Anhang B 7 Ozonabbaupotenzial (ODP)

Ozon entsteht in großen Höhen durch die Bestrahlung von Sauerstoff-Molekülen mit kurzwelligem UV-Licht. Dies führt zur Bildung der sogenannten Ozonschicht in der Stratosphäre (15 - 50 km Höhe). Rund 10 % des Ozons gelangt durch Vermischungsvorgänge in die Troposphäre. Trotz seiner geringen Konzentration ist die Wirkung des Ozons wichtig für das Leben auf der Erde. Ozon absorbiert die kurzwellige UV-Strahlung und gibt diese richtungsunabhängig mit größerer Wellenlänge wieder ab. Nur ein Teil der UV-

Strahlung gelangt auf die Erde. Durch anthropogene Emissionen kommt es zum Abbau der Ozonschicht. Allgemein bekannt wurde dies durch Berichte über das Ozonloch. Beschränkte sich dies dabei auf die Gebiete der Antarktis, so ist jetzt auch, wenn auch nicht im selben Ausmaß, ein Ozonabbau über den mittleren Breiten (z.B. Europa) erkennbar.

Eine ozonabbauende Wirkung wird im Wesentlichen zwei Stoffgruppen zugeschrieben. Dies sind die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) und die Stickoxide (NO_x). Abbildung A 5 zeigt die wesentlichen Aspekte des Ozonabbaus.

Ein Effekt des Ozonabbaus ist die Erwärmung der Erdoberfläche. Zu berücksichtigen ist insbesondere aber auch die Empfindlichkeit von Mensch, Tier und Pflanzen gegenüber UV-B und UV-A Strahlung. Denkbare Auswirkungen sind z.B. Wuchsveränderungen bzw. Minderung der Ernteerträge (Störung der Photosynthese), Tumorindikationen (Hautkrebs und Augenerkrankungen) und die Abnahme des Meeresplankton, was erhebliche Auswirkungen auf die Nahrungskette nach sich ziehen würde.

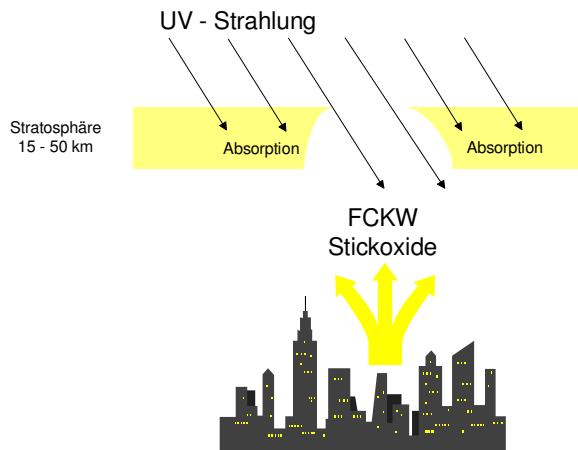


Abbildung A 5: Ozonabbau (KREISSIG 1999)

Im Rahmen des klassischen Konzeptes zur Berechnung des Ozonabbaupotentials werden vor allem anthropogen emittierte Halogenkohlenwasserstoffe, die als Katalysatormolekül viele Ozonmoleküle zerstören können, erfasst. Aus den Ergebnissen von Modellrechnungen für unterschiedliche ozonrelevante Stoffe ergeben sich sogenannte „Ozon-schädigende Potentiale“ (ODP: Ozone Depletion Potential). Dabei wird zunächst ein Szenario mit fester Emissionsmenge eines Referenz-FCKW (R11) durchgerechnet. Als Ergebnis erhält man im Gleichgewicht einen bestimmten Wert der Gesamtozonreduktion. Für jede Substanz, für die ein Ozonabbaupotential errechnet werden soll, wird das gleiche Szenario betrachtet, wobei R11 durch die gleiche Menge der Substanz ersetzt wird. Als Ergebnis erhält man das Ozonabbaupotential für die jeweilige Substanz, das in R11-Äquivalenten angegeben wird.

Eine Bewertung des Ozonabbaupotentials sollte die langfristigen, globalen und zum Teil irreversiblen Auswirkungen berücksichtigen.