

Texte

29
06

ISSN
1862-4804

Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein und Ausweisung der CO₂-Emissionen

Umwelt
Bundes
Amt 

Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 205 41 217/02
UBA-FB 000949



Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein und Ausweisung der CO₂-Emissionen

von

Dipl.-Geogr. Stefan Lechtenböhrer
Dipl.-Ing. Sabine Nanning

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Dipl.-Oek. Hans-Georg Buttermann
Dipl.-Vw. Bernhard Hillebrand

EEFA GmbH, Münster

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 4.6
Robert Kludt

Dessau, November 2006

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB – 205 41 217/02	2.	3.
4. Titel des Berichts Umsetzung des Inventarplanes und nationale unabhängige Überprüfung der Emissionsinventare für Treibhausgase Teilvorhaben 02 „Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein und Ausweisung der CO ₂ -Emissionen“		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Lechtenböhmer, Stefan (Wuppertal Institut) Nanning, Sabine (Wuppertal Institut) Buttermann, Hans-Georg (EEFA GmbH)	8. Abschlußdatum 31.07.06	
	9. Veröffentlichungsdatum --	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Wuppertal Institut f. Klima, Umwelt und Energie GmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal EEFA GmbH Windthorststraße 13, 48143 Münster	10. UFOPLAN-Nr. 205 41 217/02	
	11. Seitenzahl 64	
	12. Literaturangaben 35	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, D-06813 Dessau	13. Tabellen und Diagramme 67	
	14. Abbildungen 1	
15. Zusätzliche Angaben --		
16. Kurzfassung Das Forschungsvorhaben leistet einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des nationalen Emissionsinventars. Im Bereich der Rohstoffemissionen konnten identifizierte Lücken aus der Nutzung von Kalkstein geschlossen werden. Sämtliche Einsätze von Kalkstein und Kalk in Wirtschaftszweigen, ihre Emissionsrelevanz sowie Berücksichtigung im deutschen Emissionsinventar wurden analysiert und für relevante Bilanzposten die Einsätze von Kalkstein und Kalk ermittelt. Neu in 2006 ins Inventar aufgenommene Bilanzposten wurden mit sämtlichen Detaildaten, die zur Neu-Implementierung des kompletten Zeitreihensatzes im Inventar erforderlich waren, zur Verfügung gestellt. Die Kalkstein- und Kalkbilanz für Deutschland wurde vollständig abgebildet. Die Emissionen für das Basisjahr 1990, die mit der Berichterstattung 2006 endgültig festgelegt worden sind, wurden um gut 3,5 Millionen Tonnen Kohlendioxid angepasst. Die Vollständigkeit des Inventars konnte damit erhöht werden.		
17. Schlagwörter Kalksteinnutzung Nationales Treibhausgasinventar Kalkstein- und Kalkbilanz		
18. Preis --	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB – 205 41 217/02	2.	3.
4. Report Title Implementation of the inventory plan and national independent verification of greenhouse gas inventories – Subproject 02 “Balance of Limestone Output and Use and calculation of the CO ₂ - Emissions”		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Lechtenböhmer, Stefan (Wuppertal Institute) Nanning, Sabine (Wuppertal Institute) Buttermann, Hans-Georg (EEFA GmbH)	8. Report Date 31.07.06	
	9. Publication Date --	
6. Performing Organisation (Name, Address) Wuppertal Institute f. Climate, Environment and Energy GmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal EEFA GmbH, Windthorststraße 13, 48143 Münster	10. UFOPLAN-Ref. No. 205 41 217/02	
	11. No. of Pages 64	
	12. No. of Reference 35	
	13. No. of Tables, Diagrams 67	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, D-06813 Dessau	14. No. of Figures 1	
	15. Supplementary Notes --	
16. Abstract The research project mainly contributes to the enhancement of the national emissions inventory. Lacks of limestone usage were identified in the field of resource emissions. All input of limestone and lime in any branches of the economy, the relevance for emissions, as well as the consideration in the German emissions inventory were analysed and acquired for any relevant item of the balance sheet. Items of balance which have been taken into the inventory in 2006 were made available, including all new and detailed information. The entire limestone and lime balance for Germany is represented there. The emissions in the base year 1990, which were definitely determined with the coverage for 2006, were adjusted to about 3,5 million tonnes carbon dioxide. Therefore the completeness of the inventory has been increased.		
17. Keywords limestone use National greenhouse gas inventory Limestone and lime balance		
18. Price --	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Anlagenverzeichnis

1	Einführung	7
2	Konzeption und Datenbasis	7
2.1	Aufbau des Endberichts	7
2.2	Konzeptionelle und methodische Aspekte	8
2.3	Empirische Aspekte und verwendete Datenquellen	10
2.4	Relevante Bilanzposten im Einzelnen (Verwendungsseite der Kalksteinbilanz)	12
3	Kalkstein- und Kalkeinsatz in den einzelnen Wirtschaftszweigen	14
3.1	Ermittlung der Kalksteineinsätze (Bilanzposten Kalksteinbilanz)	14
3.1.1	Rauchgasentschwefelung: Stromerzeugung GFA (1A1)	14
3.1.2	Zementherstellung (2A1)	16
3.1.3	Kalkherstellung: Brennen von Kalkstein und Dolomitstein (2A2)	18
3.1.4	Sodaherstellung (2A4)	19
3.1.5	Glasherstellung (2A7)	19
3.1.6	Ziegelherstellung (2A7)	22
3.1.7	Eisen- und Stahlherstellung (2C1)	24
3.1.8	Zuckerproduktion (2D2)	26
3.1.9	Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung (4D, 5D)	27
3.1.10	Wasser- und Schlammbehandlung (6B)	29
3.1.11	Übrige Sektoren	29
3.2	Zusammenstellung der Kalksteinbilanz	30
3.3	Ermittlung der Kalkeinsätze (Bilanzposten Kalkbilanz)	31
3.3.1	Rauchgasentschwefelung: Stromerzeugung GFA (1A1)	31
3.3.2	Kalksandsteinherstellung (2A7)	31
3.3.3	Porenbetonherstellung (2A7)	32
3.3.4	Kalziumkarbidherstellung (2B4)	33
3.3.5	Eisen- und Stahlherstellung (2C1)	34
3.3.6	Tonerdeproduktion (für Hüttenaluminium) (2C3)	34
3.3.7	Papierindustrie (2D1)	35
3.3.8	Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung (4D, 5D)	36
3.3.9	Wasser- und Schlammbehandlung (6B)	37
3.3.10	Übrige Sektoren (wie Baugewerbe, übrige Baustoffindustrie und Chemie usw.)	37
3.4	Zusammenstellung der Kalkbilanz	38
4	Zusammenfassung	39
5	Literaturverzeichnis	40

Anlage 1: Vorlagen zur Inventarbeschreibung (Inventarergänzungen 2006)	42
Inventarbeschreibung 1A1 Rauchgasentschwefelung in GFA	43
Inventarbeschreibung 2A7 Herstellung von Ziegeln	47
Inventarbeschreibung 2C1 Kalksteineinsatz bei der Eisen- und Stahlherstellung	50
Anlage 2: Vereinfachte Inventarbeschreibungen der restlichen kalksteinverwendenden Bilanzposten	53
2A1 Brennen von Zementklinker	54
2A2 Brennen von Kalkstein und Dolomit	55
2A4 Sodaherstellung	56
2A7 Glasherstellung	57
2D2 Zuckerproduktion	60
4D/5D Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung	61
6B Wasser- und Schlammbehandlung	63
Übrige Sektoren	64

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Relevante Bilanzposten</i>	13
<i>Tabelle 3-1: Gipsaufkommen aus Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken</i>	15
<i>Tabelle 3-2: Absatz Kalk und Kalkstein für die Luftreinhaltung</i>	15
<i>Tabelle 3-3: Kalksteineinsatz in Rauchentschwefelungsanlagen von Kraftwerken</i>	16
<i>Tabelle 3-4: Kalksteineinsatz für die Zementklinkerproduktion</i>	17
<i>Tabelle 3-5: Kalksteineinsatz in der Zementumahlung, in Mio. t</i>	18
<i>Tabelle 3-6: Einsatz von Kalk- und Dolomitstein bei der Produktion von Kalk und Dolomit</i>	19
<i>Tabelle 3-7: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Soda</i>	19
<i>Tabelle 3-8: Anteile der Glassorten an Gesamtproduktion</i>	20
<i>Tabelle 3-9: Spezifische Kalksteineinsätze in der Glasindustrie nach Sorten</i>	20
<i>Tabelle 3-10: Scherbeneinsatz in der Glasindustrie</i>	21
<i>Tabelle 3-11: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Glas</i>	21
<i>Tabelle 3-12: Spezifische Gewichte unterschiedlicher Dachziegelarten</i>	22
<i>Tabelle 3-13: Produktion der Ziegelindustrie</i>	23
<i>Tabelle 3-14: Kalksteineinsatz bei der Ziegelindustrie (in Ziegelrohstoffen)</i>	23
<i>Tabelle 3-15: Produktion von Sinter, Roheisen und Rohstahl</i>	25
<i>Tabelle 3-16: Spezifischer Einsatz von Kalkstein und Branntkalk in der Stahlindustrie</i>	26
<i>Tabelle 3-17: Kalksteinverbrauch in der Stahlindustrie</i>	26
<i>Tabelle 3-18: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Zucker</i>	27
<i>Tabelle 3-19: Inlandsabsatz von Kalkammonsalpeter und Kohlensaurem Kalk</i>	28
<i>Tabelle 3-20: Kalksteineinsatz bei der land- und forstwirtschaftlichen Bodenkalkung</i>	28
<i>Tabelle 3-21: Kalksteineinsatz bei Wasser- und Schlammbehandlung</i>	29
<i>Tabelle 3-22: Kalksteineinsatz Übrige Sektoren</i>	29
<i>Tabelle 3-23: Kalksteinbilanz</i>	30
<i>Tabelle 3-24: „Nebenbilanz“ Kalksteinanteil in Rohstoffen</i>	30
<i>Tabelle 3-25: Kalkeinsatz in REA in Kraftwerken</i>	31
<i>Tabelle 3-26: Produktion von Kalksandstein</i>	32
<i>Tabelle 3-27: Kalkeinsatz zur Herstellung von Kalksandsteinen</i>	32
<i>Tabelle 3-28: Produktion von Porenbeton</i>	33
<i>Tabelle 3-29: Kalkeinsatz bei der Porenbetonherstellung</i>	33
<i>Tabelle 3-30: Kalkeinsatz bei der Kalziumkarbidproduktion</i>	34
<i>Tabelle 3-31: Einsatzmengen Stahlwerkskalk für die Rohstahlerzeugung</i>	34
<i>Tabelle 3-32: Tonerdeproduktion in Deutschland</i>	35
<i>Tabelle 3-33: Kalkeinsatz bei der Herstellung von Tonerde</i>	35
<i>Tabelle 3-34: Produktion von Zellstoff</i>	36
<i>Tabelle 3-35: Kalkverbrauch bei der Zellstoffherstellung</i>	36
<i>Tabelle 3-36: Inlandsabsatz von Kalk an die Land- und Forstwirtschaft</i>	37
<i>Tabelle 3-37: Kalkeinsatz in der Wasser- und Schlammbehandlung</i>	37
<i>Tabelle 3-38: Kalkeinsatz Übrige Sektoren</i>	37
<i>Tabelle 3-39: Kalkbilanz</i>	38
<i>Tabelle 4-1: Inventarergänzungen 2006: CO₂-Emissionen aus der Anwendung von Kalkstein</i>	39
<i>Tabelle 4-2: Anpassungen der CO₂-Emissionen aus der Anwendung von Kalkstein</i>	39

Abkürzungsverzeichnis

Al(OH) ₃	Aluminiumhydroxid
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BV Glas	Bundesverband Glas
BV Kalk	Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie
BVSE	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
C	Kohlenstoff
Ca	Kalzium
Ca(OH) ₂	Kalkhydrat
CaCO ₃ MgCO ₃	Dolomitstein (Kalziummagnesiumkarbonat)
CaCO ₃	Kalkstein (Kalziumkarbonat)
CaO MgO	gebrannter Dolomit (Kalziummagnesiumoxid)
CaO	gebrannter Kalk (Kalziumoxid)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DESTATIS	Statistisches Bundesamt Deutschland
FKZ	Forschungskennziffer
GFA	Großfeuerungsanlagen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KAS	Kalkammonsalpeter
kWh	Kilowattstunde
Mg	Magnesium
MW	Megawatt
N	Stickstoff
Na ₂ CO ₃	Soda
O	Sauerstoff
REA	Rauchgasentschwefelung
SKE	Steinkohleneinheiten
UBA	Umweltbundesamt
VDEH	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
ZSE	Zentrales System Emissionen

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Vorlagen zur Inventarbeschreibung (Inventarerergänzungen 2006)
- Anlage 2 vereinfachte Inventarbeschreibungen der der restlichen kalksteinverwendenden Bilanzposten
- Anlage 3 grafische Darstellung der Kalkstein- und Kalkbilanz
- Anlage 4 Datei „Kalkstein_Bilanz_Modell.xls“ zur Herleitung der Bilanzposten (dynamisch)
- Anlage 5 Datei „Bilanzen-Tabellen.xls“ zur Dokumentation der Bilanzposten (statisch)

1 Einführung

Deutschland ist als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention dazu verpflichtet, Emissionsinventare zu erstellen und in regelmäßigem Abstand zu veröffentlichen. Zur Erfüllung dieser Berichtspflichten unterhält Deutschland das „Zentrale System Emissionen (ZSE)“, eine umfassende Inventardatenbank, die sowohl zur Berechnung als auch zur Verwaltung und Dokumentation relevanter Emissionsdaten eingesetzt wird. Im Rahmen kontinuierlicher Forschungsanstrengungen wird die Inventardatenbank laufend kritisch überprüft und mit dem Ziel der Inventarverbesserung werden systematisch Datenlücken aufgespürt und geschlossen.

Das vorliegende Forschungsprojekt (Umsetzung des Inventarplanes und nationale unabhängige Überprüfung der Emissionsinventare für Treibhausgase -Teilvorhaben 02 „Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein in Deutschland und Ausweisung der CO₂-Emissionen“ FKZ: 205 41 217/02) konnte einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des nationalen Emissionsinventars leisten. Insbesondere im Bereich der Rohstoffemissionen sind Lücken aus der thermischen Nutzung mineralischer Karbonate (vor allem Kalkstein) identifiziert worden. Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Lücken bei der Erfassung der Kalksteinnutzung und der damit verbundenen CO₂-Emissionen im ZSE zu schließen. Die besondere Bedeutung des Forschungsvorhabens besteht nicht nur in der Verbesserung und Qualitätssicherung des Inventars für Deutschland, sondern auch darin, die Emissionen für das Basisjahr 1990 zu vervollständigen, da diese mit der Berichterstattung im Jahr 2006 mit der Berücksichtigung der Daten bis 2004 endgültig festgelegt werden. Auch zum Projektende bleibt der Bearbeitungsumfang auf die Daten bis 2004 begrenzt und deshalb wird die Dokumentation zur Fortschreibung der Daten ab 2005 planungskonform an das UBA übergeben.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH (WI) in Wuppertal und das EEFA-Forschungsinstitut GmbH in Berlin und Münster beauftragt, alle empirischen Möglichkeiten zur Inventarverbesserung im Bereich der Kalksteinnutzung auszuloten und einer pragmatischen Lösung zur Nutzung im ZSE zuzuführen.

2 Konzeption und Datenbasis

2.1 Aufbau des Endberichts

Der hier vorgelegte Endbericht analysiert im ersten Schritt sämtliche Einsätze von Kalkstein und Kalk in Wirtschaftszweigen, ihre Emissionsrelevanz sowie Berücksichtigung im deutschen Emissionsinventar. Im nächsten Forschungsschritt wurden für relevante Bilanzposten die Einsätze von Kalkstein und Kalk ermittelt. Die Berechnungsverfahren werden im Folgenden in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben. Neu in 2006 ins Inventar aufgenommene Bilanzposten werden mit sämtlichen Detaildaten, die zur Neu-Implementierung des kompletten Zeitreihensatzes im Inventar erforderlich waren, zur Verfügung gestellt.

Die Gliederung dieser Dokumentation ergibt sich aus dem Verwendungszweck:

1. Lückenlose Dokumentation der erstellten Bilanzen zum Projektabschluss (konsistente statische Darstellung)
2. Bereitstellung von Vorlagen zur Anpassung von Berechnungen und Kapiteln der Inventarbeschreibung des UBA (dynamische Dokumente)

Zum Zeitpunkt der Bereitstellung des Endberichts gibt es also Redundanzen zwischen den Kapiteln 1 und 3 (statische Dokumentation) sowie den Anlagen 1 und 2 (dynamische Dokumentationsvorlagen). Nach Projektabschluss sind besonders die genutzten Vorlagen für die Inventarbeschreibung des UBA zu beachten und dort auch in der NaKo einsehbar.

Die Dokumentation der durch das Projekt erfolgten Inventarergänzungen ist in Anlage 1 als detaillierte Inventarbeschreibung diesem Bericht beigelegt. In Anlage 2 ist die Dokumentation der restlichen kalksteinverwendenden Bilanzposten als einfache Inventarbeschreibung zu finden.

Alle Bilanzposten sind in einer Excel-Datei ZSE-konform mit Dokumentationskomponenten zusammengefasst dargestellt (Anlage 5). Diese Datei stellt die Ergebnisse zum Projektende wiederum statisch dar, weil genau für diesen Stand die Dokumentation komplett vorliegen soll – damit die Inventarkategorie 2A3 Verwendung von Kalkstein und Dolomit konsistent belegt ist. In Anlage 4 ist das vollständige Modell, die vollständige Herleitung aller Bilanzposten, dokumentiert. Diese Datei ist für die Datenfortschreibung geeignet, also dynamisch angelegt und kann für neue Berechnungen einzelner Bilanzposten angepasst werden. In Sonderfällen sind weitere externe Dateien notwendig, Daten mit Betriebsgeheimnissen sind in separaten Dateien UBA-intern vorhanden.

In Anlage 3 werden die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Kalkstein- und Kalkbilanzen unter Berücksichtigung der Emissionsrelevanz grafisch dargestellt.

2.2 Konzeptionelle und methodische Aspekte

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde im ersten Schritt geklärt, in welchen Wirtschaftszweigen Kalkstein oder Kalk eingesetzt wird und welche Emissionsrelevanz damit verbunden ist. Insbesondere bei Produktionsprozessen, die auf dem Brennen von Kalkstein basieren, entstehen CO₂-Emissionen. Kalkgestein, das hauptsächlich aus Kalziumkarbonat (CaCO₃) besteht, reagiert bei Temperaturen bis 1.150 °C in einem Entsäuerungsprozess unter Abgabe von CO₂ zu Kalziumoxid (CaO). CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung karbonatischer Rohstoffe fallen vor allem in den Hochtemperaturprozessen der Steine- und Erdenindustrie (Zementindustrie, Kalkindustrie oder Ziegelindustrie u.a.) aber auch in der Glas- oder in der Stahlindustrie an, die ebenfalls ungebrannte karbonatische Rohstoffe verbrauchen. Die spezifischen, rohstoffbedingten CO₂-Freisetzungen hängen in den genannten Produktionsbereichen von der verwendeten Rohstoffmischung, also dem CaCO₃-Gehalt ab.

In einigen Produktionsprozessen z.B. in der Zuckerindustrie werden zwar eigene Schachtöfen zum Brennen von Kalk betrieben. Allerdings nutzt die Zuckerindustrie den Kalk (in Form von Kalkmilch), und das anfallende Kohlendioxid wird in Form von Kohlensäure im anschließenden Verarbeitungsprozess gebunden. Deshalb kann das Brennen von Kalkstein bei der Zuckerherstellung als CO₂-neutral betrachtet werden. Bedeutsame CO₂-Emissionen verursachen darüber hinaus nicht-thermi-

sche Kalksteinanwendungen. Relevante Quellen für CO₂-Emissionen aus nichtthermischen Kalksteinanwendungen sind die Verwendung kalksteinhaltiger Düngemittel (land- und forstwirtschaftliche Bodenkalkung) sowie Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA).

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand letztlich darin, für emissionsrelevante Prozesse der Kalksteinnutzung, die bisher nicht im Emissionsinventar enthalten sind, die anfallenden CO₂-Emissionen detailliert auszuweisen. Im ersten Analyseschritt wurden dazu Produktionsmengen an Kalkstein sowie die Verwendungen quantifiziert bzw. physische Kalksteinbilanzen für die Berichtsjahre 1990 (Basisjahr), 1995 (Stützjahr nach Statistikumbrüchen) und 2004 (aktuelles Jahr) erstellt.

Dazu nutzte dieses Forschungsvorhaben eine Konzeption, die als Kombination aus „bottom-up“- und „top-down“-Ansatz bezeichnet werden kann. Die Aufkommenseite der Kalksteinbilanz (also die Gewinnung von Kalkstein abzüglich Exporte zuzüglich Importe) wurde von der „top-down“-Seite vornehmlich aus der amtlichen Statistik und verfügbaren Verbandsangaben erstellt. Da vor allem im Bereich der Kalksteinverwendung erhebliche Datenrestriktionen bestehen, mussten die Kalksteineinsätze in einzelnen Wirtschaftszweigen (in der hier erforderlichen tiefen Untergliederung) im Rahmen detaillierter Einzelberechnungen ermittelt werden („bottom-up“).

Um dieses „Bilanz-Konzept“ umzusetzen, wurden

- die spezifischen Produktionsbedingungen analysiert, um geeignete Indikatoren identifizieren zu können (z. B. Gipsanfall aus der Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken, Produktionsentwicklung (teilweise für einzelne Produktionsstufen, Vorprodukte); der Schwefelgehalt der eingesetzten Brennstoffe, die chemische Zusammensetzung des erzeugten Produkts (CaO-Anteile) oder bereits die Prozessemissionen aus der Kalksteinnutzung) und
- stöchiometrische Berechnungen oder spezifische Kalksteineinsätze (die der Literatur entnommen wurden) genutzt, um den gesamten Verbrauch an karbonatischen Rohstoffen berechnen zu können.

Durch diese Vorgehensweise erschließt das Forschungsvorhaben eine große, zuvor nur sehr verstreut und lückenhaft vorliegende Datenmenge, um sie für die Berechnung der CO₂-Emissionen für das nationale Emissionsinventar nutzbar zu machen.

Mit der hier entwickelten Kalksteinbilanz konnten Stoffflüsse von Kalkstein transparent gemacht und damit mögliche Doppelzählungen von Emissionen im Inventar oder die intransparente Struktur in Teilbereichen des Inventars sichtbar gemacht werden. Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen resultieren nur aus der Verwendung ungebrannter karbonatischer Rohstoffe.

Begriffe:

Zur Vereinfachung wird im Folgenden von Kalkstein gesprochen, auch wenn Kalkstein und Dolomitstein betrachtet werden. Weitere Karbonate werden als nicht relevant vernachlässigt und lediglich CaCO₃-haltige Rohstoffe wie z.B. Mergel für die Zementherstellung werden nicht dargestellt.

In dieser Begriffsabgrenzung werden alle gebrannten Erzeugnisse vereinfachend als Kalk bezeichnet, in herausgehobenen Fällen explizit in Branntkalk (aus Kalkstein) und Dolomitmalk (aus Dolomitstein) unterschieden.

Hinsichtlich der großen Komplexität der Kalkstein- und Kalkverwendung wird in diesem Forschungsvorhaben sowohl eine Kalkstein- als auch eine Kalkbilanz – ergänzt um eine sogenannte „Nebenbilanz“ - erstellt.

Zusammenfassend wurden folgende Schwerpunkte erarbeitet:

- 1) Aufbau einer vollständigen, konsistenten Kalkstein- und Kalkbilanz für Deutschland. In Analogie zur Energiebilanz wird in horizontaler Gliederung eine Aufkommensrechnung, Umwandlungsbilanz und Endverbrauch (differenziert nach Sektoren) unterschieden. In vertikaler Gliederung werden Kalkstein und Kalk unterschieden. Die vollständigen Bilanzen werden für die drei Berichtsjahre 1990, 1995 und 2004 entsprechend den Anforderungen der Leistungsbeschreibung dargestellt.
- 2) Bildung/Berechnung vollständiger Zeitreihen des Kalksteineinsatzes nach Wirtschaftszweigen/Sektoren für den Zeitraum von 1990 bis zum aktuellen Rand (2004). Diese Zeitreihen können als eigenständige Kalkstein-Zeitreihen im ZSE verschlagwortet oder an bereits im ZSE vorhandene Zeitreihen gekoppelt werden. Unabhängig von der Art der Implementierung der Zeitreihen im ZSE wurden zwei Fälle unterschieden: Zum einen sind die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen des Sektors bereits über produktionsbezogene Emissionsfaktoren im ZSE berücksichtigt; es fehlt nur die Berechnung bzw. Implementierung der Kalkstein-Zeitreihe oder andererseits sind weder die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen des Sektors aus dem Kalksteineinsatz noch der Kalksteineinsatz selbst bislang im ZSE berücksichtigt (vollständige Fehlstelle). Für die Konsistenz der Emissionsberechnungen ist im ersten Fall zu beachten, dass der Berechnungsansatz der zur Herleitung der Kalkstein-Zeitreihe mit der bereits im ZSE verwendeten Berechnung der rohstoffbedingten CO₂-Emissionen kompatibel ist.
- 3) Explizite Darstellung der CO₂-relevanten Kalksteinmengen und ggf. Berechnung der daraus resultierenden CO₂-Emissionen für die Bilanzposten, die neu ins Inventar aufgenommen werden.

2.3 Empirische Aspekte und verwendete Datenquellen

Der konzeptionelle Rahmen des Forschungsvorhabens lässt bereits erkennen, dass die praktische Umsetzung erhebliche Anforderungen an die Verfügbarkeit empirischer Informationen stellt. Die wichtigsten empirischen Grundlagen zur Berechnung des Kalksteinaufkommens sind in Statistiken des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR) publiziert.

Die Ermittlung der inländischen Gewinnung von Kalkstein und Dolomit stützt sich grundsätzlich auf die amtliche Produktionsstatistik. Die Gewinnung von Kalkstein untergliedert sich nach den Bereichen:

- Kalkstein für die Herstellung von Zement, Branntkalk und Kalkstein für Industrie und Umwelttechnik (Melde-Nr. 1412 10 530)

- Kalkstein, gemahlen (Melde-Nr. 1412 10 550)
- Dolomit weder gebrannt noch gesintert (Melde-Nr. 1412 20 530)
- Gebrochener Kalkstein für den Betonbau oder als Steinmaterial im Wege- und Bahnbau (Melde-Nr. 1421 20 301)

Es gibt mehrere Gründe dafür, dass die in der Produktionsstatistik ausgewiesenen Daten zur Förderung von Kalkstein von der tatsächlichen Produktion im Inland abweichen können. Zunächst ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass die amtliche Produktionsstatistik im Sektor 14.21 nur Betriebe mit mehr als 10, im Sektor 14.12 sogar nur Betriebe mit mehr als 20 Beschäftigten berücksichtigt. Die „Gewinnung von Steinen und Erden“ ist naturgemäß durch einen hohen Mechanisierungsgrad gekennzeichnet. In der Folge ist die Arbeitsproduktivität der Beschäftigten in diesem Bereich traditionell höher als in anderen Wirtschaftszweigen des Verarbeitenden Gewerbes. Die Zahl der Kalkstein erzeugenden Betriebe, die mit wenigen Beschäftigten hohe Produktionsleistungen erzielen, dürfte deshalb recht groß sein. Entsprechende Daten für diese von der Produktionsstatistik nicht erfassten Betriebe liegen allerdings nicht vor, so dass sich aus der Produktionsstatistik keine exakte Gesamtaussage zur Höhe der Kalksteingewinnung in Deutschland herleiten lässt.

Die Datenlage ist auch bei der Kalksteinverwendung in vielerlei Hinsicht nur sehr eingeschränkt. Originäre empirische Angaben für den Absatz der deutschen Kalkindustrie an ungebrannten Erzeugnissen liegen ab 1998 vor. Der Bundesverband der Kalkindustrie hat im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Absatzstatistik - die jedoch nicht bilanzpostenscharf vorliegt - zur Verfügung gestellt (BV Kalk 2006b).

Eine exakte Zuordnung aller Positionen zu den Wirtschaftszweigen der amtlichen Statistik, deren Kalksteineinsatz als CO₂-emissionsrelevant eingestuft wurde, ist allerdings auf der Basis des vom Bundesverband der deutschen Kalkindustrie veröffentlichten Materials nicht möglich.

Die Kalksteinnachfrage auf der Ebene einzelner Wirtschaftszweige hängt vereinfacht dargestellt ab von der Höhe der Produktion, den Anteilen einzelner Verfahrensrouten oder der Produktionsstruktur (Aktivitätsraten). Die Stahlindustrie beispielsweise setzt Kalkstein nur bei Aufbereitung der Eisenerze (Sinteranlagen) und bei der Roheisenerzeugung im Hochofen ein. Auf der Ebene des eigentlichen Frischens von Rohstahl im Oxygenstahl- oder Elektrostahlverfahren kommt hingegen (gebrannter) Stahlwerkskalk u.a. als Schlackenbildner zum Einsatz. In diesem Forschungsvorhaben werden möglichst technische Einsatzverhältnisse zur Abbildung der sektoralen Kalksteineinsatzmengen herangezogen. Für die Berechnung des Kalksteineinsatzes in der Stahlindustrie bedeutet dies, dass der Kalksteinverbrauch sich formal als das Summenprodukt aus dem spezifischen Kalksteineinsatz (in kg je Tonne) multipliziert mit der Roheisen- bzw. Sintererzeugung (in Tonnen) ergibt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass technische Kalksteineinsatzraten auf der Ebene konkreter Produktionstechnologien (z.B. Hochofen) weit gehend unabhängig sind von ökonomisch motivierten Substitutionsprozessen (intra-sektoraler Strukturwandel) und nur innerhalb enger technischer Grenzen schwanken können. Bei Übernahme der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Datensätze in das ZSE können zudem im Falle zukünftig notwendiger Aktualisierungen fehlende Daten für die spezifischen Kalksteineinsatzmengen ohne die Gefahr größerer Verzerrungen einfach fortgeschrieben werden.

Zur Berechnung des Kalksteineinsatzes auf der Nachfrageseite nutzt dieses Forschungsvorhaben unterschiedliche Datenquellen. Die Herleitung der zunächst benötigten Produktionskennziffern (Aktivitätsraten) stützt sich sowohl auf die amtliche Produktionsstatistik (Produktion im Produzierenden Gewerbe, Fachserie 4 Reihe 3.1) als auch auf diverse Erhebungen und Statistiken der Verbände. Verbandsstatistiken ermöglichen in einigen Fällen die Herleitung eines umfassenderen Produktionsausdrucks als die amtliche Statistik, da einerseits auch Betriebe mit weniger als 20 Beschäftigten erfasst werden und andererseits aus diesen Publikationen zumindest teilweise auch für das Basisjahr 1990 gesamtdeutsche Daten zur Produktion abgeleitet werden können.

Kennziffern, die den spezifischen Kalksteineinsatz je Produkteinheit beschreiben, wurden hingegen aus technischen Fachbeiträgen (Fachzeitschriften wie z.B. „Ziegelindustrie International“, „Zement-Kalk-Gips“ usw.), Richtlinien (z.B. VDI), Expertenwissen bei Wirtschaftsverbänden Kalksteinverbrauchender Industrien oder stöchiometrischen Berechnungen gewonnen.

2.4 Relevante Bilanzposten im Einzelnen (Verwendungsseite der Kalksteinbilanz)

In enger Abstimmung mit dem Auftraggeber und Fachverantwortlichen im Umweltbundesamt wurden zahlreiche Bilanzposten ermittelt, die in diesem Forschungsvorhaben näher beleuchtet wurden. Für die Berechnung der Kalksteinbilanz (bzw. Kalkbilanz) fällt den einzelnen Bilanzposten eine unterschiedliche Bedeutung zu. Ähnliches gilt für den Bezug der Bilanzposten zum bestehenden Emissionsinventar. Tabelle 2-1 stellt alle in diesem Forschungsvorhaben als relevant erachteten Bilanzposten, in denen Kalkstein oder Kalk eingesetzt wird, dar.

Die Tabelle zeigt darüber hinaus die Emissions-Relevanz der Bilanzposten. Die kurze Skizzierung der relevanten Bilanzposten stellt dar, dass es keinen „idealen“ Berechnungsansatz, Quellgruppen übergreifend und in Übereinstimmung mit den Qualitätsanforderungen des Emissionsinventars, im besten Fall empirisch realisierbaren und universell nutzbaren Ansatz zur Berechnung des Kalkstein- und Kalkeinsatzes gibt. In diesem Forschungsvorhaben ist die Herleitung vor diesem Hintergrund immer aus einer Mischung verschiedener praktikabler Berechnungsansätze zusammengesetzt. Die konkreten im Einzelfall genutzten Berechnungsverfahren sowie deren Resultate werden im dritten Kapitel für jeden Wirtschaftszweig differenziert dargestellt.

Tabelle 2-1: Relevante Bilanzposten

CRF	Sektor/Bezeichnung	Einsatz		CO ₂ -emissionsrelevant?	Inventarergänzung im Rahmen des Vorhabens
		CaCO ₃	CaO		
1A1	Stromerzeugung Rauchgas-Entschwefelung	x	x	ja	ja
2A1	Zementherstellung	x		ja	nicht notwendig
2A2	Kalkherstellung: Brennen von Kalkstein und Dolomitstein	x		ja	nicht notwendig
2A4	Sodaherstellung	x		nein	nicht notwendig
2A7	Glaserherstellung	x		ja	nicht notwendig
2A7	Ziegelherstellung (Anteil im Rohmehl)	x		ja	ja
2B4	Kalziumkarbidherstellung		x	nein	nicht notwendig
2C1	Eisen- u. Stahlherstellung	x	x	ja	ja
2C3	Tonerdeproduktion (für Hüttenaluminium)		x	nein	nicht notwendig
2D1	Papierindustrie	x	x	nein	nicht notwendig
2D2	Zuckerproduktion	x		nein	nicht notwendig
4D, 5D	Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung	x	x	ja	nicht notwendig
6B	Wasser- und Schlammbehandlung	x	x	nein	nicht notwendig
	Übrige Sektoren (wie Baugewerbe, übrige Baustoffindustrie und Chemie usw.)	x	x	nein	nicht notwendig

Quelle: Eigene Darstellung

In Anlage 3 dieses Endberichts ist die Kalkstein- und Kalkbilanz grafisch dargestellt.

Im Rahmen der Untersuchung wurden Bilanzposten gefunden, in denen Kalkstein oder Kalk verwendet werden, jedoch ohne belastbares Datenmaterial, um daraus die tatsächlichen Kalkstein- oder Kalkeinsätze zu berechnen. Dies betrifft den Bereich Düngerherstellung (2.B.5) - allerdings wird in diesem Bereich lediglich Kalkstein zugemischt und ist nicht emissionsrelevant. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Menge Kalkstein aus der Düngerherstellung im Bilanzposten Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung bilanziert und ist auch dort emissionsrelevant. Ein weiterer Bereich der Kalkstein- und Kalkanwendung, für den mangels geeigneter Daten keine Einsatzmengen berechnet werden konnten, ist der Bilanzposten Asphaltmischgutherstellung (2A6). Die Einsätze in diesem Bilanzposten werden innerhalb des Bilanzpostens „Übrige Sektoren“ zusammengefasst und sind nicht emissionsrelevant. Für den Bilanzposten Rauchgasentschwefelung Industrie (1A2) wurden Kalkeinsätze auf der Grundlage der Schwefelgehalte der eingesetzten Brennstoffe sowie der tatsächlich emittierten Schwefeldioxidmengen berechnet. Zusätzlich wurde die chemische Gleichung für das Sprühabsorptionsverfahren mit Kalkhydrat verwendet. Mangels genauerer Daten ergeben sich aus diesem Berechnungsverfahren allerdings sehr große Unsicherheiten, so dass dieser Bilanzposten nicht in die Bilanz einfließt sondern unter „Übrige Sektoren“ berücksichtigt wird.

3 Kalkstein- und Kalkeinsatz in den einzelnen Wirtschaftszweigen

3.1 Ermittlung der Kalksteineinsätze (Bilanzposten Kalksteinbilanz)

3.1.1 Rauchgasentschwefelung: Stromerzeugung GFA (1A1)

Rauchgasentschwefelungsanlagen haben die Aufgabe, das in den Verbrennungsgasen enthaltene Schwefeldioxid durch chemisch-physikalische Prozesse in weniger schädliche Substanzen umzuwandeln. Kalkstein dient bei der Entschwefelung von Rauchgasen typischerweise als Reagenz.

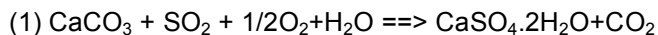
Die Entschwefelungstechnik richtet sich im Wesentlichen nach dem Schwefelgehalt der eingesetzten Brennstoffe im Zusammenhang mit der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung und der ökonomischen und der ökonomischen Verwertbarkeit der anfallenden Reststoffe (Gips). Zur Entschwefelung von Rauchgasen in Kraftwerken stehen grundsätzlich mehrere Verfahren zur Verfügung. Im Bereich der Stromerzeugungsanlagen dominiert das Kalkstein-Waschverfahren. Gemessen an der installierten Leistung nutzen etwa 87% der Kraftwerke in Deutschland dieses Verfahren. Das Sprühabsorptionsverfahren dient zur Entschwefelung von Rauchgasen durch Zugabe von Kalkhydrat (Ca(OH)₂); es kommt vor allem bei Kraftwerken mittlerer Anlagengröße zum Einsatz (in Deutschland 8% der Stromerzeugungsanlagen). Das sog. Trocken-Additiv-Verfahren (also die Direktentschwefelung durch Zugabe von Kalk oder Kalksteinmehl zum Brennstoff oder in die Feuerung) findet nur in kleineren Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von bis zu 300 MW Anwendung. Nur etwa 4% der Kraftwerke nutzen diese Entschwefelungstechnik, deren Abscheidegrad im Vergleich zum Kalkstein-Wasch-Verfahren und zur Sprühabsorption (bis zu 95%) mit 60% relativ niedrig ausfällt.

Prozessbedingte CO₂-Emissionen aus Kalksteinnutzung fallen vor allem bei der Rauchgasentschwefelung im Kalkstein-Waschverfahren an.

Mit den einzelnen Rauchgasentschwefelungstechniken sind nicht nur spezifische Einsatzbedingungen und Abscheidegrade verbunden, sondern auch unterschiedliche Einsätze an Kalkstein, Kalkhydrat oder Kalk. Der Verbrauch an Kalkstein in einem bestimmten Jahr beispielsweise ergibt sich formal aus der Verteilung der Stromerzeugungsanlagen mit Kalkstein-Waschverfahren im gesamten Kraftwerkspark (in MW), der Nutzungsdauer dieser Anlagen (in Stunden), dem spezifischen Brennstoffeinsatz (in kg SKE/kWh) und dem Schwefelgehalt der eingesetzten Brennstoffe (in g/kg SKE). Eine derart formale Berechnung des Kalksteinverbrauchs erfordert detaillierte Informationen über die unter dem Begriff „Kraftwerkspark“ zusammengefassten Stromerzeugungstechniken. Insbesondere müssen die in den einzelnen Investitionsjahrgängen inkorporierte Wirkungsgrade, Schwefelgehalte der Brennstoffe und Rauchgasentschwefelungstechniken mit den daraus ableitbaren anlagenspezifischen Kalksteinverbräuchen (Marginalkonzept) bekannt sein. Derart detaillierte Informationen, die zur Berechnung des Kalksteineinsatzes der Stromerzeugungsanlagen auf Anlagenebene genutzt werden könnten, liegen nicht flächendeckend vor.

Dieses Forschungsvorhaben muss sich folglich allein auf aggregierte Daten stützen, die den Stromerzeugungssektor insgesamt beschreiben.

Das mit Abstand am weitesten verbreitete Rauchgasentschwefelungsverfahren ist nasse Kalksteinwäsche. Die Entschwefelung erfolgt nach mehreren Teilreaktionen. Für die Berechnung des Kalksteineinsatzes im Kalkstein-Waschverfahren wird die relevante chemische Brutto-Reaktionsgleichung



zugrunde gelegt (Strauß 1998).

Eine direkte Möglichkeit, den theoretischen Kalkstein- und Kalkeinsatz zu berechnen, bietet das Gipsaufkommen der Kraftwerke. Dieses wird zumindest eingeschränkt vom VGB in der Statistik „Aufkommen und Verwertung von Nebenprodukten aus kohlebefeuerten Kraftwerken in Deutschland“ veröffentlicht (VGB 2004). Originaldaten liegen für die Jahre von 1996 bis 2004 vor, für die fehlenden Jahre lagen für das Gipsaufkommen lediglich Ablesewerte aus Grafiken vor.

Tabelle 3-1: Gipsaufkommen aus Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken

Gipsaufkommen (in kt)	1990	1995	2004
Steinkohlekraftwerke	1.300	1.510	1.930
Braunkohlekraftwerke	1.900	2.190	5.730

Quelle: VGB PowerTech, versch. Jahrgänge und eigene Schätzungen

Um vom Gipsaufkommen auf den Einsatz von Kalkstein zu schließen, ist eine zusätzliche Annahme notwendig. Geht man davon aus, dass als Rauchgasreinigungsverfahren in erster Linie die Nasswäsche mit Kalkmilch zum Einsatz kommt, so lässt sich aus der Stöchiometrie der Verfahrensgleichung ein spezifischer Faktor für den Kalksteineinsatz pro Tonne Gips herleiten. Aus der Reaktionsgleichung (1) für das Verfahren kann das molare Gewichts-Verhältnis von Kalkstein zu Gips berechnet werden. Daraus folgt, dass pro angefallener Tonne Gips 581,39 Kilogramm Kalkstein eingesetzt werden¹. Aus diesen Angaben lässt sich der Kalksteineinsatz für REA in Stein- und Braunkohlekraftwerken ableiten. Aus dem Gipsaufkommen ist nicht ersichtlich, ob Kalkstein oder Kalk eingesetzt wird. Um hierzu eine Aussage treffen zu können, werden Angaben des BV Kalk aus der Absatzstatistik herangezogen (BV Kalk 2006b).

Tabelle 3-2: Absatz Kalk und Kalkstein für die Luftreinhaltung

Absatz für die Luftreinhaltung (in t)	Einheit	1990	1995	2004
Ungebrannt (Kalkstein)	kt	1.229	1.320	1.850
Gebrannt (Kalk)	kt	252	304	752

Quelle: Absatzstatistik des Bundesverbandes der Deutschen Kalkindustrie 2006

Aus den Angaben des BV Kalk wurde das Verhältnis von Kalkstein zu Kalk gebildet und dieses Verhältnis auf die berechneten Ergebnisse von Kalkstein angewandt. Damit lassen sich die Kalkstein- und Kalkeinsätze in REA vollständig ableiten – hier im Fokus die Kalksteineinsätze. Diese liegen

¹ Molares Gewicht CaCO₃: 100g/mol, CaSO₄·2H₂: 172g/mol

erwartungsgemäß höher, als aus der Absatzstatistik entnehmbar. Somit führt die Berechnung zu vollständigeren Angaben als die Übernahme der Verbandsstatistik.

Tabelle 3-3: Kalksteineinsatz in Rauchentschwefelungsanlagen von Kraftwerken

Kalkstein und Kalk in REA Kraftwerke insgesamt	1990	1995	2004
CaCO ₃	1.544	1.748	3.167

Quelle: Eigene Berechnung

Dieser emissionsrelevante Kalksteineinsatz wurde bis zur Berichterstattung 2005 nicht im Emissionsinventar abgebildet und wurde deshalb zur Berichterstattung 2006 neu implementiert.

3.1.2 Zementherstellung (2A1)

Die in der Zementindustrie anzutreffenden Produktionsprozesse sind außerordentlich energie- und rohstoffintensiv. Der Prozess der Zementherstellung lässt sich in zwei Stufen trennen: das Brennen der kalk- und tonmineralhaltigen Ausgangsstoffe zu Zementklinker und das Mahlen des Klinkers zu Zement. Die Rohstoffe werden zur Vorbereitung des Brennvorganges zerkleinert, homogenisiert und gemahlen. Anschließend durchläuft das fein aufgemahlene und homogenisierte Rohmehl den vorge-schalteten Zyklonvorwärmer im Gegenstrom der Ofenabgase. Der eigentliche Brennvorgang erfolgt im Drehrohrofen. Hier wird das vorgewärmte Brenngut bei Temperaturen bis 1.450°C zu Klinker ge-brannt. Der im Drehrohrofen gebrannte, steinharte Klinker wird in Mahlanlagen (ggf. unter Zusatz von weiteren Haupt- und Nebenbestandteilen) zu Zement verarbeitet.

Die mit Abstand bedeutendste Komponente des Rohstoffverbrauchs sind die im Tagebau gewonne-nen natürlichen Ausgangsrohstoffe (Kalkstein, Ton, Sand und Mergel u.a.), die als Ausgangsmate-rial zum Brennen des Zementklinkers dienen.¹ Der Rohmehleinsatz für den Brennprozess steht in einem linear-limitationalen Verhältnis zur Klinkerproduktion und hat sich im Laufe der Zeit nicht ver-ändert; je Tonne Zementklinker werden rund 1,5 t Rohmehl benötigt. Bei den in Deutschland übli-chen Rohstoffmischungen besteht dieses Rohmehl zu 78,9% aus Kalkstein (VDZ 2002). Daraus lässt sich der Kalksteinsatz mit 1.166,93 kg pro Tonne Klinker ableiten.

Produktionsdaten der Zementindustrie (Zement- und Klinkererzeugung) werden vom Verein Deut-scher Zementwerke bereitgestellt und sind bereits im ZSE als Zeitreihen abgelegt.

Mit Hilfe dieser Angaben wurde der Kalksteineinsatz bei der Zementklinkerproduktion berechnet.

¹ Neben natürlichen werden zur Zementklinkerproduktion in geringem Umfang auch sekundäre Rohstoffe wie z.B. Kalkschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung, Flugaschen oder Gießereisande eingesetzt (VDZ 2002, Zementrohstoffe in Deutschland)

Tabelle 3-4: Kalksteineinsatz für die Zementklinkerproduktion

	Einheit	1990	1995	2004
Zementproduktion	Mio. t	37,8	37,5	31,4
Klinkerproduktion	Mio. t	28,6	29,1	26,3
Kalksteineinsatz (für Klinker)	Mio. t	33,4	33,9	30,7

Quelle: Eigene Berechnungen nach VDZ

Kalkstein wird in der Zementindustrie darüber hinaus auch als Zumahlkomponente bei der Herstellung spezieller Kompositzemente eingesetzt. Der Einsatz von Rest- und Zumahlstoffen hat in der Zementindustrie eine lange Tradition und kann zu einer deutlichen Verringerung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe bzw. natürlicher Rohstoffe und den damit verbundenen Umweltbelastungen bzw. CO₂-Emissionen führen. Neben Hüttensand¹ stellen Sulfatträger und Kalkstein die mengenmäßig bedeutendsten Nebenbestandteile bei der Zementmahlung dar. Für das Jahr 2000 hat der VDZ den Einsatz von Kalkstein für die Zementmahlung genauer beleuchtet. Die Rechnung des VDZ zeigt, dass im Jahr 2000 insgesamt mehr als 1,4 Mio. t Kalkstein als Substitut für Zementklinker verwertet wurden. Deutlich wird aber auch, dass der spezifische Kalksteinverbrauch für die Mahlung je nach betrachteter Zementsorte erheblich variiert. So werden beispielsweise bei der Herstellung von Portlandzementhüttzementen im Durchschnitt 25 kg/t Kalkstein zugemahlen, hingegen sind es bei Portlandzement 35 kg/t und beim Portlandkalksteinzement sogar 150 kg/t.

Die in der Zementmahlung eingesetzten Kalksteinmengen unterliegen keiner thermischen Behandlung und sind im Gegensatz zu den Kalksteinmengen im Rohmehl deshalb als CO₂-neutral einzustufen. Im Hinblick auf die Vollständigkeit und Konsistenz der Gesamtbilanz sind diese Kalksteinmengen dennoch als Bilanzposition zu berücksichtigen. In diesem Forschungsvorhaben werden die hier eingesetzten Kalksteinmengen rechnerisch aus der o.g. stofflichen Zusammensetzung und dem Inlandsabsatz der einzelnen Zementsorten bestimmt. Um einen Gesamteindruck von der Bedeutung des Kalksteineinsatzes bei der Zementmahlung zu erhalten, ist es notwendig, auch die Zementausfuhren zu berücksichtigen. Entsprechend differenzierte Daten wie beim Inlandsabsatz liegen hier allerdings nicht vor, so dass für die Exporte ein Kalksteingehalt in Höhe von 39 kg/t Zement angenommen wurde. Dieser Wert entspricht dem spezifischen Kalksteingehalt der gesamten Zementproduktion des Jahres 2000.

Die folgende Tabelle fasst die berechneten absoluten Kalksteinmengen in der Zementmahlung zusammen. Mit Blick auf die zeitliche Entwicklung fällt auf, dass der Kalksteineinsatz seit 1990 um rund 40% gestiegen ist. Ursächlich dafür ist einerseits die zunehmende Bedeutung von Portlandkalksteinzement im Inlandsversand der Werke, zum anderen die rasante Entwicklung bei den Zementexporten. Der Inlandsabsatz von Portlandkalksteinzementen hat sich seit 1990 mehr als verdreifacht und liegt gegenwärtig bei 3,4 Mio. t. Die Zementexporte erreichten im Jahr 2004 ein Niveau von mehr als 5,9 Mio. t und damit den mit Abstand höchste Stand seit 1990 (1,9 Mio. t).

¹ Bei Hüttensand handelt es sich um Hochofenschlacke, die in einer Schlackengranulationsanlage durch gezielte Abkühlung mit Wasser zu einem feinkörnigen glasartigen Produkt, dem granulierten Hüttensand verarbeitet wird. Hüttensand kann aufgrund seiner latent-hydraulischen Eigenschaften energieintensiv gebrannten Klinker im Verhältnis 1:1 substituieren.

Hingegen haben Portlandzemente auch aufgrund des Vordringens hüttensandhaltiger Zemente Marktanteile verloren. Infolgedessen ist auch der Kalksteineinsatz bei der Herstellung von Portlandzement seit 1990 um fast 200.000 t gesunken. Seit 2002 übersteigt der Kalksteineinsatz bei der Herstellung von Portlandkalksteinzement den von Portlandzement.

Tabelle 3-5: Kalksteineinsatz in der Zementzumahlung, in Mio. t

Zementart	1990	1995	2004
Portlandzement	0,6	0,8	0,5
Portlandhüttenzement	0,0	0,0	0
Portlandkalksteinzement	0,1	0,2	0,5
Sonstige Zemente	0	0,1	0
Exporte	0,1	0,1	0,2
Insgesamt	0,8	1,2	1,2

Quelle: Eigene Berechnungen nach VDZ

Die genaue Herleitung der Kalksteineinsatzmengen aus der Zementherstellung bei der Zumahlung sind in der externen Datei „Zement_Zumahlung.xls“ zu entnehmen.

3.1.3 Kalkherstellung: Brennen von Kalkstein und Dolomitstein (2A2)

Die Herstellung von Kalk lässt sich in drei Verfahrensstufen aufteilen: Auf der ersten Stufe findet die Exploration, Gewinnung und Aufbereitung des Kalksteins statt. Das gereinigte und klassierte Korngemisch wird beim Schachtofenbetrieb, der vorherrschenden Brenntechnik, im zweiten Schritt auf der Gichtbühne des Ofens aufgegeben. Das Kalkgestein, das hauptsächlich aus Kalziumkarbonat besteht, sinkt nach unten durch den Schacht; dort wird das Kalziumkarbonat in einem Entsäureungsprozess (bei Temperaturen bis 1.150°C) unter Abgabe von CO₂ zu Kalzumoxid (CaO) stofflich umgewandelt. Das Ergebnis wird als Branntkalk bezeichnet und am unteren Ende des Schachtofens abgezogen. Branntkalk gelangt entweder stückig, zu Feinkalk gemahlen (dritte Stufe) oder als Kalkhydrat in den Versand.

Ausgangrohstoffe der Kalkproduktion sind Kalk- und Dolomitgestein. Hauptbestandteil von Kalkstein ist Kalziumkarbonat (CaCO₃), Hauptbestandteil von Dolomit hingegen ist Kalzium-Magnesium-Karbonat CaMg(CO₃)₂. Wie in der Zementindustrie stehen die Ausgangrohstoffe auch in der Kalkindustrie in einem nahezu unveränderlichen Verhältnis zur Produktion. Beim Brennen von Kalkstein und Dolomitstein entstehen Kalk und gebrannter Dolomit. Zur Herstellung von einer Tonne (ge-

branntem) Kalk werden (stöchiometrisch berechnet¹) 1.768 kg Kalkstein und für eine Tonne (gebrannter) Dolomit 1.913 kg Dolomitstein eingesetzt. Die eingesetzten Mengen Kalk- und Dolomitstein für die Herstellung von Kalk und Dolomit sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3-6: Einsatz von Kalk- und Dolomitstein bei der Produktion von Kalk und Dolomit

	Einheit	1990	1995	2004
Kalkstein	Mio. t	12,60	13,10	11,51
Dolomitstein	Mio. t	1,13	1,04	0,88

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA und NIR 2006

3.1.4 Sodaherstellung (2A4)

Soda (Na₂CO₃) ist ein wichtiger Grundstoff in der Glas- und Keramikindustrie, der Metallurgie, für die Herstellung von Wasch- und Reinigungsmitteln sowie von Chemikalien. Soda wird in Deutschland nach dem Solvay-Verfahren hergestellt. Während des Solvay-Prozesses wird CO₂ benötigt, das durch die Verbrennung von Kalkstein und Koks erzeugt wird. Das gesamte im Solvay-Prozess erzeugte Kohlendioxid wird während des Verfahrensablaufs und in Folgeprozessen gebunden. Die Sodaherstellung ist deshalb als nicht emissionsrelevant einzustufen. Zur Herstellung von einer Tonne Soda im Solvay-Verfahren werden 1.200 kg Kalkstein eingesetzt (UBA 2001). Zur Ermittlung des Kalksteineinsatzes bei der Sodaproduktion werden die Produktionszahlen aus dem ZSE mit dem Kalksteineinsatzfaktor multipliziert. In der folgenden Tabelle sind die Kalksteineinsätze in der Sodaproduktion zusammengestellt.

Tabelle 3-7: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Soda

	1990	1995	2004
Kalkstein in kt	2.275	1.831	1.696

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA

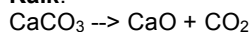
3.1.5 Glasherstellung (2A7)

Glassand und Soda sowie Kalk und Dolomit sind die natürlichen Ausgangsrohstoffe der Glasproduktion. Zur Herstellung sind je nach Glassorte weitere Rohmaterialien erforderlich. Glasscherben, die weniger Aufschmelzenergie benötigen als das übrige Gemenge, stellen einen wichtigen Sekun-

¹ Stöchiometrische Herleitung:

Molare Masse (in g/mol)	
Ca	40,07
C	12,01
O	15,99
Mg	24,3

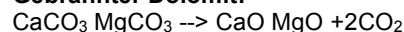
Kalk:



Kalksteineinsatzfaktor:

$$= (99,06 \text{ g/mol} / 56,03 \text{ g/mol}) * 1.000 \text{ kg} \\ = 1.768 \text{ kg}$$

Gebrannter Dolomit:



Dolomitsteineinsatzfaktor:

$$= (184,33 \text{ g/mol} / 96,35 \text{ g/mol}) * 1.000 \text{ kg} \\ = 1.913 \text{ kg}$$

därrohstoff dar. Zunächst werden die Glasrohstoffe zu einem homogenen Glasgemenge gemischt. Dieses wird anschließend in Schmelzöfen aufgeschmolzen. Große Mengen Flach- oder Hohlglas werden in kontinuierlich arbeitenden Glaswannen erschmolzen. Tageswannen oder Hafenöfen werden hingegen zur Erzeugung kleinerer Glasmengen in diskontinuierlicher Fahrweise genutzt.

Der Kalksteineinsatz für die Glasherstellung wurde aus den Angaben des UBA zur Herleitung der Emissionsfaktoren (UBA 2006) aus den Angaben zum CaO-Anteil der einzelnen Glassorten abgeleitet. Für die Position „Glas: nicht disaggregierbar“, in der Glasmengen im ZSE in den NBL bis 1994 enthalten sind, wurde zur Ermittlung des Kalksteineinsatzes der Produktions-Mix von Glas in Deutschland im Jahr 1990 angesetzt, die entsprechenden Anteile der einzelnen Glassorten an der Gesamtproduktion wurde auf die Kalziumkarbonateinsätze dieser Glassorten angesetzt. Daraus wurde der Kalziumkarbonateinsatz abgeleitet. Die Anteile der einzelnen Glassorten an der Gesamtproduktion 1990 und die ermittelten spezifischen Kalziumkarbonatanteile sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 3-8: Anteile der Glassorten an Gesamtproduktion

Glassorte	Anteil an Gesamtproduktion 1990 (in %)
Behälterglas	63
Flachglas	23
Wirtschaftsglas	2
Spezialglas	6
Glasfaser	5
Steinwolle	0

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA 2006

Tabelle 3-9: Spezifische Kalksteineinsätze in der Glasindustrie nach Sorten

Glassorte	CaO-Anteil, in %	in kg CaCO ₃ /t
Behälterglas	10,5	187,95
Flachglas	8,6	153,94
Wirtschaftsglas	5,5	98,45
Spezialglas	3,2	57,28
Glasfaser	20,5	366,95
Steinwolle	24,5	438,55
Glas: nicht disaggregierbar		178,12

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA 2006

Die genaue Herleitung der Kalksteineinsätze ist in der externen Datei „Kalksteineinsatz_Glas.xls“ nachzuvollziehen.

In der Glasindustrie führte insbesondere die Altglasverwertung zu deutlichen Einsparungen an Energie und primären Rohstoffen. Der bei der Glasverarbeitung anfallende Glasbruch (Kreislaufmaterial) wird zu 98 % recycelt, da er nahezu sortenrein klassiert werden kann.

Der Wiedereinsatz von Altglas in der Behälterglasproduktion hat sich zwischen 1990 und 2004 von 2,3 auf 2,7 Mio. t erhöht. Bezogen auf die Produktionsmenge entspricht dies einer Steigerung der Verwertungsquote von 57,5% auf 65,9%. Auch im Flachglasbereich hat der Einsatz von Scherben inzwischen einen erheblichen Stellenwert. Der Bundesverband Sekundärrohstoffe schätzt das Aufkommen an Flachglasscherben für das Jahr 1998 auf 495.000 t; davon wurden 60% (300.000 t) verwertet (vgl. Daten zur Umwelt 2005, S. 305). Der absolute Kalksteineinsatz wird in diesem Forschungsvorhaben überschlägig abgeschätzt, indem die Produktion der jeweiligen Sorte um den Scherbeneinsatz verringert wird.¹ In der folgenden Tabelle ist der Scherbeneinsatz in der Glasindustrie zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 3-10: Scherbeneinsatz in der Glasindustrie

Scherbeneinsatz Glasindustrie (in kt)	1990	1995	2004
Behälterglas	2.295	2.784	2.684
Flachglas	235	265	133

Quelle: Eigene Berechnung nach Angaben von BVSE, BV Glas

Die daraus resultierenden Kalksteineinsätze, verknüpft mit den Aktivitätsraten, die um den Scherbeneinsatz vermindert wurden, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3-11: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Glas

Glassorte	Kalksteineinsatz (in kt)		
	1990	1995	2004
Behälterglas	269	338	267
Flachglas	212	249	232
Wirtschaftsglas	12	10	32
Spezialglas	22	19	21
Glasfaser	100	114	134
Steinwolle	NE	160	211
Glas: nicht disaggregierbar	85	IE	IE
Summe	700	890	897

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA 2006

Unter diesen Prämissen zeigen die Berechnungen, dass in der Glasindustrie im Jahr 2004 etwa 0,9 Mio. t Kalkstein verbraucht wurden. Der Anteil des Behälter- und Flachglasbereiches am ge-

¹ Zur Verwertung von Flachglasscherben liegt – wie erwähnt – nur ein Beobachtungspunkt (1998) vor. Die Entwicklung der Fahrzeuglöschungen und der Gebäudeabgänge wurde herangezogen, um daraus hilfsweise eine Zeitreihe für die Jahre von 1990 bis 2004 abzuleiten.

samten Kalksteineinsatz der Branche (insgesamt mehr als 77% der Produktion) liegt bei etwa 53%. Eine relativ hohe Bedeutung haben die Produktion von Stein- und Glaswolle nur aufgrund der hohen spezifischen Kalksteineinsätze.

3.1.6 Ziegelherstellung (2A7)

Das Produktionsprogramm der Ziegelindustrie umfasst die Erzeugung von Mauer- und Dachziegeln sowie Klinkersteinen und Pflasterklinker. Etwa 10% der gesamten Ziegelproduktion entfällt auf Schornsteinteile, keramische Rohr- und Rauchleitungen sowie sonstige Baukeramik.

Der Produktionsprozess gliedert sich wie folgt: Die tonhaltigen Ausgangsmaterialien werden im ersten Produktionsschritt zerkleinert und zu einer nassen Masse aufbereitet. Die verschiedenen Lehme und Tone unterschiedlicher Zusammensetzung können Kalksteinanteile enthalten. Umgekehrt wird bei sehr fetten (feinkörnigen) Tonen zur Magerung Kalkgranulat zugemischt. Die Produktion von Schalldämmziegeln erfordert höhere Rohdichten; dazu wird dem Tonmaterial im Kollergang ggf. zusätzlich Kalk- oder Steinmehl zugemischt.

Die Formgebung der meist quaderförmigen Bausteine erfolgt maschinell im Strangpressverfahren. Nach der Trocknung erfolgt das Brennen der Ziegel. Das Standardbrennaggregat ist heute der Tunnelofen, lediglich für Spezialerzeugnisse (z.B. Zubehörteile für Dachziegeln) kommen Kammeröfen zum Einsatz.

Angaben zur Produktionsentwicklung der Ziegelindustrie waren bis zur Berichterstattung 2006 im Inventar nur zusammengefasst im Bilanzposten 2A7 unter „Grobkeramik“ zu finden.

Die Abbildung der tatsächlichen Produktionsentwicklung (Tonnage) der Ziegelindustrie ist auch mit dem verfügbaren Datenmaterial aus der amtlichen Statistik nur eingeschränkt möglich, da hier die Herstellung von Mauerziegeln in Kubikmetern und von Dachziegeln in Stückzahlen angegeben wird. Aus diesem Grund wurde die Tonnenproduktion anhand von Erfahrungswerten (des Bundesverbandes der Ziegelindustrie) ermittelt, indem für den Kubikmeter Mauerziegel ein Durchschnittsgewicht von 1.300 kg und für einen Dachziegel von etwa 3 kg (vgl. Tabelle 3-12) angesetzt wurde. Statistische Grundlage zur Bestimmung der Aktivitätsrate ist die amtliche Produktionsstatistik (DESTATIS).

Tabelle 3-12: Spezifische Gewichte unterschiedlicher Dachziegelarten

Dachziegelart	Gewicht/Stück (in kg)
Pressdachziegel	2,9
Biberschwänze	2
Andere Strangziegel	3,5
Sonst. Dachziegel und Zubehörteile	2,8

Quelle: Eigene Berechnungen

Unter diesen Prämissen kann mit Hilfe der amtlichen Statistik die Produktionsmenge der Ziegelindustrie in Tonnen ermittelt werden. Die Produktionsmengen an Mauer- und Dachziegeln sind in Tabelle 3-13 zusammengestellt. Die Ziegelindustrie produzierte nach Angaben des Bundesverbandes der deutschen Ziegelindustrie im Jahr 1990 15,8 Mio. t Mauerziegel, Klinker und Dachziegel. Insgesamt zeigen die Daten zur Produktionsstruktur der Ziegelindustrie bis 1995 eine kräftige Aus-

weitung der Ziegelproduktion auf mehr als 21 Mio. t. Bedingt durch die rasche Abnahme der Produktion von Mauerziegeln ist seit 1995 eine Verschiebung der Produktstruktur zugunsten von Dachziegeln zu beobachten. Der Rückgang der Ziegelproduktion insgesamt ist auf diesen Einbruch der Produktion von Mauerziegeln zurückzuführen.

Tabelle 3-13: Produktion der Ziegelindustrie

	Einheit	1990	1995	2004
Mauerziegel (WZ 2640 ohne 2640 12 503 bis 509)	in cbm		14. 407	8 .998
Dachziegel (WZ 2640 12 503 bis 509)	Stck.		838. 807	866. 837
Ziegelproduktion insgesamt	in Mio. t	15,8	21,3	14,3
davon Dachziegel	in Mio. t	1,3	2,2	2,6
davon Mauerziegel		14,5	19,1	11,9

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Abbau der erforderlichen Rohstoffe geschieht oberflächennah in Tongruben auf dem Werksge-
lände oder in der unmittelbaren Nähe des Ziegelwerks. Im Rohmehl für die Ziegelherstellung können
maximal bis zu 25% Kalkstein enthalten sein (persönliche Information Bundesverband Ziegelin-
dustrie). Da keine Daten über genauere Kalksteinanteile im Rohmehl für die Ziegelherstellung vor-
liegen, wird hilfsweise angenommen, dass pro Tonne Rohmehl 65 Kilogramm Kalkstein enthalten
sind.¹ Da auch keine Angaben darüber vorliegen, welche Rohstoffmengen für die Ziegelherstellung
eingesetzt werden, wird die Kalksteinmenge überschlägig aus dem Produkt der Produktionsmenge
(vgl.Tabelle 3-14) und dem abgeschätzten Anteil Kalkstein im Rohmehl gebildet. Damit ergeben sich
die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Kalksteineinsätze bei der Ziegelherstellung.

Tabelle 3-14: Kalksteineinsatz bei der Ziegelindustrie (in Ziegelrohstoffen)

	Einheit	1990	1995	2004
Kalkstein in Ziegerohstoffen	Mio. t	1,0	1,4	0,9

Quelle: Eigene Berechnungen

Ziegel werden in Tunnelöfen bei hohen Temperaturen zwischen 1.000 °C und 1.100 °C etwa
24 Stunden gebrannt. Angesichts dieser Produktionsverhältnisse kann davon ausgegangen werden,
dass die in den Ziegelrohstoffen enthaltenen Kalksteinmengen zu einem erheblichen Teil entsäuert
werden. Ein Teil der CO₂-Emissionen in der Ziegelindustrie resultiert daher „rohstoffbedingt“ aus der
thermischen Dissoziation des Kalksteins.

Die in den in Ziegelrohstoffen enthaltenen Kalksteinanteile werden statistisch deshalb nicht geson-
dert erfasst und sind in der inländischen Gewinnung von Kalkstein nicht enthalten. Dieser emissi-
onsrelevante Kalksteinanteil im Rohmehl wurde bis zur Berichterstattung 2005 nicht im Emissionsin-
ventar abgebildet und wurde deshalb zur Berichterstattung 2006 neu implementiert. Innerhalb der

¹ Die Annahme ist in Übereinstimmung mit dem Fachverantwortlichen des UBA getroffen worden. In
Einzelfällen können erhebliche Abweichungen von den hier verwendeten Mittelwerten auftreten.

Kalksteinbilanz wird der Anteil am Rohmehl nicht abgebildet sondern wird in einer so genannten „Nebenbilanz“ extra dargestellt.

3.1.7 Eisen- und Stahlherstellung (2C1)

Die moderne Stahlerzeugung basiert im Wesentlichen auf zwei unterschiedlichen Verfahrenstechniken: Entweder wird Eisenerz in Hochofen zu Roheisen verhüttet und anschließend in Stahlkonverter zu Rohstahl gefrischt (Hochofen-Oxygenstahlroute) oder unmittelbar durch Umschmelzen von Schrott gewonnen (Elektrostahlroute). Die Art des Stahlerzeugungsverfahrens ist für den Rohstoffverbrauch von essentieller Bedeutung. In der Stahlerzeugung lassen sich drei Produktionsstufen unterscheiden: die Aufbereitung der Rohstoffe, die Erzeugung des Roheisens im Hochofen sowie die Umwandlung des Roheisens zu Stahl. Die Aufbereitung der Rohstoffe und Energieträger bzw. Reduktionsmittel ist erforderlich, weil sie nur in agglomerierter Form eingesetzt werden können. Dazu sind dem Hochofen umfangreiche Aufbereitungsanlagen vorgeschaltet (z.B. Kokerei, Sinter- und Pelletanlage). Um z.B. Erze aufzubereiten, werden sie gebrochen, gesiebt und auf einen engen Kornbereich klassiert. Anschließend gelangen die Feinerze zusammen mit den Zuschlagstoffen (insbesondere Koks und Kalkstein) in die Sinteranlage. Dort wird die angefeuchtete und homogenisierte Materialmischung auf ein umlaufendes Rost gegeben und an der Oberfläche gezündet. Der Kohlenstoff verbrennt und bewirkt das Zusammenbacken (Sintern) der Erzkörner. Im Hochofen selbst wird mit Hilfe von Kohlenstoffträgern (Koks, Kohle, Öl und Gas) aus Möller (Sinter, Pellets, Erze und kalksteinhaltige Zuschläge) Roheisen gewonnen. Die Einsatzstoffe werden an der Gicht des Hochofens lagenweise aufgegeben und sinken im Gegenstrom der heißen Ofengase von oben nach unten durch den Schacht. Bei der Reduktion des Eisenoxids zu Eisen laufen komplexe chemisch-physikalische Vorgänge ab. Sobald Eisen entstanden ist, nimmt es Kohlenstoff auf, und die Schmelztemperatur der Masse nimmt ab. Es sinkt unter die Schlacke aus der Gangart der Erze und wird bei Temperaturen um 1.500°C abgestochen.

Roheisen enthält prozessbedingt Begleitelemente wie Kohlenstoff, Silizium, Mangan und Schwefel; es ist spröde und lässt sich ohne Vorbehandlung weder walzen noch schmieden. Es muss deshalb vor der Weiterverarbeitung in Oxygenstahlkonvertern zu Stahl gefrischt werden.

Als Alternative zur energieintensiven Primärproduktion (Hochofenroute-Oxygenstahlroute) hat sich das Recycling von Sekundärrohstoffen herausgebildet, indem Rohstahl in einem zylindrischen Ofengefäß (Lichtbogen- oder Induktionsofen) überwiegend aus Schrott erschmolzen wird.

Auf der Stufe der Sinter- und Roheisenerzeugung wird Kalkstein vor allem in Form von Kalk- bzw. Dolomitstein bzw. –splitt eingesetzt. Im Hochofen reduziert Kalkstein, der mit dem Sinter oder direkt als Zuschlagstoff in den Möller gelangt, den Schmelzpunkt der Schlacke, die unerwünschte Begleitelemente (Silizium, Phosphor, Schwefel usw.) bindet. Zur eigentlichen Stahlschmelze in Oxygen- oder Elektrostahlöfen (Einschmelzphase) aber auch für die weitere metallurgische Arbeit im Ofen oder in der Pfannenbehandlungsanlage wird heute hauptsächlich Kalk (Stahlwerkskalk) als Schlackenbildner eingesetzt.

Die Unternehmen der Stahlindustrie produzierten im Jahr 1990 rund 44 Mio. t Rohstahl. Neben erheblichen Mengen Schrott benötigte die Stahlindustrie dazu etwa 30 Mio. t Sinter und 31,7 Mio. t Roheisen. Im Jahr 2004 übertraf die Rohstahlerzeugung das Produktionsergebnis des Jahres 1990

um 2,5 Mio. t. Aufgrund des um rund 11%-Punkte gestiegenen Elektrostahlanteil schlägt sich der Produktionsanstieg nicht in der Entwicklung der Sinter- und Roheisenerzeugung nieder, die sich im gleichen Zeitraum um etwa 2 Mio. t verringerte (Substitution von Primärrohstoffen wie Kalkstein, Kohle oder Erz durch den Sekundärrohstoff Schrott).

Die von DESTATIS veröffentlichten Produktionsdaten sind im ZSE als Aktivitätsraten implementiert.

Tabelle 3-15: Produktion von Sinter, Roheisen und Rohstahl

	Einheit	1990	1995	2004
Sinter	Mio. t	29,9	28,2	27,9
Roheisen	Mio. t	32,3	30,0	30,8
Rohstahl	Mio. t	43,9	42,1	46,4
darunter				
Oxygenstahl	Mio. t	35,1	31,9	33,1
Elektrostahl	Mio. t	8,8	10,2	13,3

Quelle: DESTATIS

Aus den bisher angesprochenen Zusammenhängen ergeben sich Implikationen für das Niveau und die Struktur des Kalkstein bzw. Kalkverbrauchs in der Stahlindustrie.

Der Kalksteineinsatz je Tonne Rohstahl ist seit 1990 deutlich gesunken und zwar von etwa 130 kg Kalkstein auf etwa 109 kg Kalkstein im Jahr 2004. Ursächlich dafür sind die bereits angesprochenen Substitutionsprozesse bzw. der verfahrenstechnische Strukturwandel (Vordringen des Schrott basierten Elektrostahlverfahrens).

Auf der Ebene der vorgelagerten Produktionsstufen (Sinter- und Hochofenanlagen) sind Einsparungen beim spezifischen Kalksteineinsatz hingegen kaum auszumachen: Die Sinterbänder werden mit einem Gemisch aus Koksgrus, Erz und Kalkstein beschickt und verbrauchen in Deutschland im Durchschnitt 155 kg Kalkstein zur Erzeugung einer Tonne Sinter. Der direkte Kalksteineinsatz der Roheisenstufe (Hochofen) ist hingegen deutlich niedriger: Je Tonne Roheisen werden um 26 kg Kalkstein eingesetzt (vg. Tabelle 3-16).

Tabelle 3-16: Spezifischer Einsatz von Kalkstein und Branntkalk in der Stahlindustrie

	Einheit	1990	1995	2004
Sinter	kg CaCO ₃ /t	156,7	162,9	150,9
Roheisen	kg CaCO ₃ /t	23,4	25,0	28,2
Rohstahl	kg CaO/t	50,6	54,6	48,8
darunter				
Oxygenstahl	kg CaO/t	48,4	54,4	46,8
Elektrostahl	kg CaO/t	60,4	55,5	53,4

Quelle: DESTATIS Produzierendes Gewerbe, Eisen und Stahl (Fachserie 4 Reihe 8.1, Vierteljahreshefte)

Dem Umweltbundesamt liegen diese Daten zusammengefasst vom VDEH in der Datei „Schlackebildner_VDEH-Angaben.xls“ vor, ab 1996 entsprechen die hier dargestellten Summen der Kalkstein- und Kalkeinsätze exakt dem Produkt der Produktionsmenge und dem spezifischen Einsatzfaktor der o.g. Statistik. Differenzen in den vorangegangenen Jahren ergeben sich aus den Abweichungen der Produktionsmengen.

Tabelle 3-17: Kalksteinverbrauch in der Stahlindustrie

	Einheit	1990	1995	2004
Sinter	Mio. t	4,7	4,6	4,2
Roheisen	Mio. t	0,8	0,8	0,8

Quelle: Eigene Berechnungen nach DESTATIS

Fasst man die Produktionsentwicklung und die spezifischen Einsatzraten an Kalkstein und Stahlwerkskalk auf den jeweiligen Produktionsstufen zusammen, zeigt sich, dass die Stahlindustrie im Jahr 2004 rund 5 Mio. t Kalkstein verbraucht hat (vgl. Tabelle 3-17). Dieser emissionsrelevante Kalkeinsatz wurde bis zur Berichterstattung 2005 nicht im Emissionsinventar abgebildet und wurde deshalb zur Berichterstattung 2006 neu implementiert.

Es ist zu vermuten, dass die CO₂-Emissionen aus der Nutzung von Kalkstein bei der Roheisenerzeugung nicht sofort emittiert werden, sondern zumindest teilweise im Hochofengas enthalten sind. Die Stahlindustrie verbraucht Hochofengas nicht vollständig selbst, sondern gibt erhebliche Mengen auch an Dritte (Stromerzeugung) ab. Eine korrekte Bilanzierung der rohstoffbedingten Emissionen muss diese produktionsspezifischen Rahmenbedingungen z.B. im Emissionsfaktor explizit berücksichtigen, um Doppelzählungen im ZSE zu vermeiden.

3.1.8 Zuckerproduktion (2D2)

Die Herstellung von Zucker lässt sich grob in die Verfahrensschritte

- Rübenvorbereitung,
- Rohsaftgewinnung,
- Saffreinigung,

- Dünnsaftgewinnung,
- Saftedampfung und
- Kristallisation

einteilen. Die Rüben gelangen vom Lager über Schwemmrinnen in die Zuckerfabrik. Vor der Zerkleinerung zu Schnitzeln werden sie von Erdanhang und Blattresten befreit und gewaschen. In kontinuierlich arbeitenden Extraktionsapparaten wird anschließend aus der 70°C heißen Schnitzelmischung mit Hilfe von heißem Wasser der Rohsaft abgezogen. Die gepressten und getrockneten Schnitzeln finden in der Landwirtschaft als Futtermittel Verwendung. Der Rohsaft wird unter Zugabe von Kalkmilch und Kohlensäure gereinigt. Der so gewonnene Dünnsaft gelangt in die Saftedampfung. Hier wird dem Dünnsaft in einem mehrstufigen Verdampfungsprozess Wasser entzogen. Die Verdampfungskristallisation erfolgt in Kochapparaten unter vermindertem Druck und entzieht dem Dicksaft zunächst weiteres Wasser. Hat der Dicksaft eine bestimmte Viskosität erreicht, werden ihm sog. Impfkristalle zugegeben, die unter weiterem Wasserentzug zur gewünschten Größe heranwachsen. Die Abkühlung der Zuckerkristalle erfolgt in liegenden Rührgefäßen (Kristallisationsmischen). Schließlich wird das Kristallinat in Großraum-Zentrifugen von anhaftenden Sirupresten getrennt, mit Wasser oder Dampf nachgewaschen und der Weißzucker aus der Trommel entleert.

Bei der Herstellung von Zucker werden für die Reinigung des Rohsaftes 185 kg Kalkstein pro Tonne Zucker eingesetzt (BV Kalk). Der verwendete Kalkstein wird in eigenen Kalköfen gebrannt, das entstehende CO₂ wird während des Prozesses gebunden, entsprechend ist der Prozess nicht emissionsrelevant. In der folgenden Tabelle sind die Kalksteineinsätze bei der Zuckerproduktion zusammengestellt.

Tabelle 3-18: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Zucker

Kalkstein	1990	1995	2004
in kt	686	784	849

Quelle: Eigene Berechnung nach BVK und UBA

3.1.9 Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung (4D, 5D)

Angaben zu genauen Produktionsdaten von Kalkdüngern sind weder in der amtlichen Statistik noch im ZSE enthalten. Auch die Angaben des BV Kalk in der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellten Absatzstatistik können nicht herangezogen werden, weil sie nicht bilanzpostenscharf abgebildet werden und so eine exakte Zuordnung nicht möglich ist. Die Daten müssen hilfsweise hergeleitet werden. Relevant in diesem Bilanzposten sind die Düngerarten Kalkammonsalpeter und Kohlensäure Kalk, alle anderen (Kalk-) Dünger enthalten gebrannten Kalk. Entsprechend sind nur die Emissionen aus der Anwendung dieser Dünger der Land- und Forstwirtschaft zuzuordnen. Kalkammonsalpeter, der zu den am häufigsten eingesetzten Stickstoffdüngern zählt, enthält ungefähr 22 Prozent Kalkstein (YARA 2006). Die Produktion bei YARA (früher Hydro Agri), dem einzigen Hersteller von Kalkammonsalpeter, liegt nach Angaben des Umweltbundesamtes bei etwa 1,5 Mio. t (UBA 2001). Hilfsweise werden statistische Angaben zum Inlandsabsatz von Kalkammon-

salpeter und Kohlensaurem Kalk verwendet (DESTATIS, Düngemittelversorgung; Fachserie 4 Reihe 8.2), die Angaben daraus sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3-19: Inlandsabsatz von Kalkammonsalpeter und Kohlensaurem Kalk

Düngerart	1990	1995	2004
KAS (in kt Nährstoff)	885	1.048	832
KAS gesamt (in kt)	3.277	3.880	3.081
Kohlensaurer Kalk (in kt Nährstoff)	958	1.329	1.380
Kohlensaurer Kalk gesamt (in kt)	1.716	2.379	2.470

Quelle: DESTATIS und eigene Berechnungen

Für die Berechnung des Kalksteineinsatzes muss berücksichtigt werden, dass der Inlandsabsatz an Kalkammonsalpeter in der Statistik nicht in Tonnen sondern in Tonnen Nährstoff (Stickstoff) angegeben wird. Das bedeutet, die angegebene Menge stellt nur den Stickstoffanteil von Kalkammonsalpeter dar, das sind 27% von der Gesamtmenge des Inlandsabsatzes (YARA 2006). Der Kalksteinanteil von Kalkammonsalpeter (bezogen auf die Gesamtmenge des Düngers) beträgt 22% (YARA 2006). Entsprechend lässt sich die Kalksteineinsatzmenge ermitteln. Bei den Angaben zu Kohlensaurem Kalk ist zu berücksichtigen, dass in der Statistik das Wirkstoffgewicht in CaO-Tonnen angegeben ist, die in CaCO₃-Tonnen umgerechnet werden müssen. Eine Tonne CaO entspricht ca. 1,79 Tonnen CaCO₃, entsprechend wird die in der Statistik angegebene Menge mit dem Faktor 1,79 multipliziert. Unter den getroffenen Annahmen kann aus dem Inlandsabsatz der Kalksteineinsatz berechnet werden. In der folgenden Tabelle ist der Kalksteineinsatz bei der Bodenkalkung mit Kalkammonsalpeter und Kohlensaurem Kalk zusammengestellt.

Tabelle 3-20: Kalksteineinsatz bei der land- und forstwirtschaftlichen Bodenkalkung

Kalksteineinsatzmenge in Dünger (in kt)	1990	1995	2004
Kalkammonsalpeter	721	854	678
Kohlensaurer Kalk	1.716	2.379	2.470
Summe	2.437	3.233	3.148

Quelle: Eigene Berechnung nach DESTATIS und YARA

Der Inlandsabsatz spiegelt die tatsächlich auf den Boden gebrachte Düngermenge nur unzureichend wider, da es sich bei dieser Größe um die Lieferungen der Produzenten und Importeure an Endverbraucher im Inland handelt, Ex- und Importe bleiben hierbei unberücksichtigt.

Es wird empfohlen, den Bereich Bodenkalkung im Inventar hinsichtlich der Emissionsrelevanz zu prüfen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand werden in diesem Bereich die Emissionen sämtlicher (Kalk-) Dünger zugerechnet, tatsächlich ist hier jedoch nur der Einsatz der CaCO₃-haltigen Dünger relevant. Daraus resultiert eine – geringe – Doppelzählung von CO₂-Emissionen, weil die Emissionen der Kalkherstellung (also dem Brennen von CaCO₃) für die kalkhaltigen Dünger bereits im Sektor 2A2 bilanziert werden.

3.1.10 Wasser- und Schlammbehandlung (6B)

Für den Kalksteineinsatz in diesem Bilanzposten liegen weder Daten im ZSE vor noch konnten geeignete Einsatzfaktoren ermittelt werden. Zur Darstellung wird die Absatzstatistik des BV Kalk, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt wurde, herangezogen.

Tabelle 3-21: Kalksteineinsatz bei Wasser- und Schlammbehandlung

Kalksteineinsatz (in kt)	1990	1995	2004
Wasser- und Schlammbehandlung	51	62	38

Quelle: Absatzstatistik BV Kalk 2006

Der Kalksteineinsatz in diesem Bereich ist nicht emissionsrelevant.

In der Statistik des BV Kalk sind nur die Kalksteinmengen für die Stützjahre 1990, 1995 und 2004 erfasst, in der Berechnung der Gesamtbilanz werden die Zwischenjahre interpoliert. Vermutlich sind innerhalb der hier erfassten Kalksteinmenge auch Anteile in unbekannter Größenordnung, unterteilt in spezifische Verwendungen von Kalkstein oder Kalk, für die Trink- und Brauchwasseraufbereitung enthalten.

3.1.11 Übrige Sektoren

Dieser Bilanzposten bildet sämtliche übrige Sektoren ab, für die keine Angaben eruiert werden konnten, aus denen der Kalksteineinsatz abgeleitet werden kann. Das sind hauptsächlich das Baugewerbe, die übrige Baustoffindustrie u.a. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von Kalkstein in diesen Bereichen nicht emissionsrelevant ist. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Menge in diesem Bereich aus der Differenz aus dem Aufkommen (BGR 1991, 1996, 2005) an Kalkstein und der Summe der Einsätze der sämtlichen anderen Bilanzposten (außer Keramik) gebildet. Die so ermittelten Einsätze von Kalkstein sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3-22: Kalksteineinsatz Übrige Sektoren

Kalksteineinsatz (in kt)	1990	1995	2004
Übrige Sektoren	49,5	15,5	16,9

Quelle: Eigene Berechnung nach BGR

Der Bruch von 1995 gegenüber 1990 resultiert aus den unterschiedlichen Datenquellen, die von der BGR ab 1995 gegenüber der Zeit bis 1994 verwendet wurden. Nach Angaben des BV Kalk wird vermutet, dass in den Angaben für 1990 der gesamte Sektor Straßen- und Wegebau enthalten ist und ab 1995 nicht mehr berücksichtigt wird. Der nicht mehr in der Statistik enthaltene Anteil kann vermutlich als nicht CO₂-emissionsrelevant betrachtet werden.

3.2 Zusammenstellung der Kalksteinbilanz

Werden alle Einsätze von Kalkstein in sämtlichen relevanten Wirtschaftszweigen addiert und mit dem Aufkommen verglichen, ergibt sich die in der folgenden Tabelle zusammengestellte Kalksteinbilanz.

Tabelle 3-23: Kalksteinbilanz

in Mio. t	1990	1995	2004
Gewinnung im Inland	110,50	76,79	74,10
Einfuhr	0,13	2,28	2,71
Ausfuhr	0,02	0,40	0,86
Aufkommen (= Gewinnung im Inland + Einfuhr – Ausfuhr)	110,61	78,66	75,96
Verwendung			
Kalkindustrie	13,73	14,14	12,39
Zementindustrie	34,20	35,13	31,83
Sodaherstellung	2,27	1,83	1,70
Glas	0,70	0,89	0,90
Stahl und Eisen	5,44	5,35	5,06
Zucker	0,69	0,78	0,85
REA Kraftwerke	1,54	1,75	3,17
Land- u. Forstwirtschaft	2,44	3,23	3,15
Wasser- u. Schlammbehandlung	0,05	0,06	0,04
Übrige Bereiche (wie Baugewerbe, übrige Baustoffindustrie und Chemie usw.)	49,54	15,49	16,88
Summe Verwendung	110,61	78,66	75,96

Quelle: Eigene Darstellung, siehe Anlage 4 und 5

Zusätzlich als so genannte „Nebenbilanz“ sind die Anteile Kalkstein im Rohmehl bei der Ziegelherstellung zu berücksichtigen.

Tabelle 3-24: „Nebenbilanz“ Kalksteinanteil in Rohstoffen

	Einheit	1990	1995	2004
Kalkstein in Ziegerohstoffen	Mio. t	1,0	1,4	0,9

Quelle: Eigene Berechnungen

3.3 Ermittlung der Kalkeinsätze (Bilanzposten Kalkbilanz)

Sämtliche Prozesse der Kalkanwendung sind nicht emissionsrelevant. Die CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Kalk aus Kalziumkarbonat werden vollständig im Sektor 2A.2 erfasst.

3.3.1 Rauchgasentschwefelung: Stromerzeugung GFA (1A1)

Die Berechnung der Kalkstein- und Kalkeinsätze in Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken im Kalkstein-Waschverfahren ist ausführlich in 3.1.1 beschrieben. Auf der Basis des Gipsaufkommens der Kraftwerke, dem molaren Verhältnis von Kalk/Kalkstein zu Gips und dem aus der Absatzstatistik entnommenen Verhältnis von Kalk und Kalkstein für die Luftreinhaltung wurden die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Kalkeinsätze für REA in Kraftwerken ermittelt.

Tabelle 3-25: Kalkeinsatz in REA in Kraftwerken

Kalk	Einheit	1990	1995	2004
	kt	316	403	1.286

Quelle: Eigene Berechnung

3.3.2 Kalksandsteinherstellung (2A7)

Der Produktionsprozess zur Herstellung von Kalksandsteinen umfasst folgende Schritte: Auf der ersten Stufe steht die Mischung der in Silos vorgehaltenen Rohstoffe (Sand und Kalk). Dazu werden Kalk und Sand im Verhältnis 1:12 vermischt und gelangen anschließend in einen Reaktionsbehälter. Dort löscht der Kalk unter Zugabe von Wasser zu Kalkhydrat ab. Anschließend wird das Mischgut (auf Pressfeuchte gebracht) und in Pressen zu Rohlingen geformt. Die Steinrohlinge werden unter hohem Druck mit heißem Dampf (bei Temperaturen bis 220°C) einige Stunden in sog. Autoklaven gehärtet. Nach Abkühlung sind die Kalksandsteine gebrauchsfertig; sie gelangen in unterschiedlichen Formaten in den Handel.

Zur Herstellung einer Tonne Kalksandstein werden insgesamt 1.067 kg an Rohstoffen benötigt. Neben großen Mengen Sand (etwa 949 kg) werden rund 85 kg Kalk und 33 kg Steinmehl eingesetzt (AGIMUS 1995).

Produktionszahlen für die Kalksandsteinindustrie sind aus dem ZSE bislang nicht erhältlich. In der amtlichen Statistik wird die Produktion von Kalksandsteinen (in t und in m³) unter den Meldenummern (WZ93):

2661 11 307 Vormauersteine und Verblender aus Kunststein (Kalksandstein)

2661 11 308 Vollsteine aus Kunststein (Kalksandstein)

2661 11 308 Andere Baublöcke und Mauersteine aus Kunststein (Kalksandstein)

ausgewiesen. Darüber hinaus enthalten aber auch die Produktionszahlen, die unter den Meldenummern WZ 2661 11 501 bis WZ 2661 11 509 sowie WZ 2661 12 001 bis WZ 2661 12 009 zu-

sammengefasst sind, vorgefertigte Bauteile aus Kalksandstein. Allerdings sind in den zuletzt genannten Meldenummern Bauteile aus Beton und Kalksandstein vermischt dargestellt, so dass eine Trennung der Produktionskennziffern für die Kalksandsteinindustrie hier unmöglich erscheint.

Daten zur Entwicklung der Kalksandsteinindustrie werden alternativ in den Jahresberichten des Bundesverbandes der Kalksandsteinindustrie publiziert. Die Statistik des Bundesverbandes der Kalksandsteinindustrie weist bis 1990 Produktionsdaten für die Zeit nach 1991 ab Vertriebs- bzw. Absatzzahlen aus. Alle Angaben werden in Mio. Vol.-NF (Normalformat) dargestellt. Kalksandsteine im Normalformat haben bei einer Abmessung 240 x 1.115 x 71 (in mm) ein Steingewicht von etwa 3,7 kg. Für die Abschätzung der Tonnenproduktion der Kalksandsteinindustrie wurden die Produktions- bzw. Absatzangaben mit einem Steingewicht von 3,7 kg multipliziert. Geht man weiter davon aus, dass Absatzdaten der Kalksandsteinindustrie, die Produktionsentwicklung gut widerspiegeln, ergeben sich die in der folgenden Tabelle zusammengefassten Aktivitätsdaten.

Tabelle 3-26: Produktion von Kalksandstein

	Einheit	1990	1995	2004
Kalksandstein (Absatz)	Mio. vol. NF	3 441	5 209	2 250
Kalksandstein (Absatz)	Mio. t	12,7	19,3	8,3

Quelle: Eigene Berechnungen nach Angaben des Bundesverbandes Kalksandsteinindustrie

Aufgrund der skizzierten Produktionsentwicklung ergeben sich die in der unten dargestellten Tabelle zusammengestellten Kalksteineinsätze bei der Kalksandsteinherstellung.

Tabelle 3-27: Kalkeinsatz zur Herstellung von Kalksandsteinen

	Einheit	1990	1995	2004
Kalkeinsatz der Kalksandsteinindustrie	Mio. t	1,1	1,6	0,7

Quelle: Eigene Berechnung

3.3.3 Porenbetonherstellung (2A7)

Quarzhaltiger Sand, Kalk, Zement und Aluminiumpulver sowie Wasser u.a. sind die Ausgangsrohstoffe bei der Porenbetonproduktion. Zur Herstellung werden die fein gemahlene Rohstoffe in einer Mischanlage zu einer wässrigen Suspension vermischt. Das Mischungsverhältnis der eingesetzten Rohstoffe beeinflusst die Rohdichte und die damit verbundene Festigkeit des Porenbetons. Nach Einstellung der gewünschten Eigenschaften wird das Rohstoffgemisch in Gießformen gegeben. Das Wasser löscht den Kalk unter Wärmeentwicklung ab. Das Aluminiumpulver reagiert mit dem entstandenen Kalkhydrat; dabei entsteht gasförmiger Wasserstoff, der die Mischung auftreibt. Der Wasserstoff entweicht und die Poren bleiben in der Rohmasse zurück. Nach Verfestigung der Rohmasse zu einem standfesten Rohblock wird dieser in Schneideanlagen (mit straff gespannten Stahlseilen) zu Bauteilen zerschnitten. Nach dem Schneiden wird das Porenbetonbauteil unter Satteldampfdruck in Autoklaven bei Temperaturen von 190°C 6 bis 12 Stunden gehärtet.

Daten zur Entwicklung der Porenbetonproduktion in der Zeit zwischen 1990 und 2004 sind im ZSE nicht enthalten. Produktionsangaben für die Porenbetonindustrie hält amtliche Produktionsstatistik bereit unter folgenden Meldenummern bereit (WZ):

2661 11 301 Baublöcke und Mauersteine aus Porenbeton

2661 11 302 Vollsteine aus Leichtbeton

2661 11 303 Andere Baublöcke und Mauersteine aus Leichtbeton

Die in Kubikmetern dargestellten Produktionszahlen für die Porenbetonindustrie sind in Tabelle 3-28 zusammenfassend für die Jahre 1990, 1995 und 2004 dargestellt. Insgesamt werden in Deutschland etwa 5,1 Mio. m³ Porenbeton hergestellt.

Tabelle 3-28: Produktion von Porenbeton

	Einheit	1990	1995	2004
Porenbeton	1000 m ³	5.396	5.959	5.134

Quelle: DESTATIS Produktion im Produzierenden Gewerbe (Fachserie 4 Reihe 3.1), versch. Jahre

Der Kalkeinsatz bei der Produktion von Porenbeton streut in Abhängigkeit von der gewählten Rezeptur (die der Einstellung der Rohdichte bzw. Festigkeitsklasse dient) in einem Bereich zwischen 35 und 100 kg/m³ Porenbeton. Rein rechnerisch ergibt sich ein Kalkeinsatz in der Porenbetonindustrie in der Größenordnung von 0,3 bis 0,4 Mio. t Kalk, wenn man einen Mittelwert von 67,5 kg Kalk/m³ Porenbeton zugrunde legt (vgl. Tabelle 3-29).

Tabelle 3-29: Kalkeinsatz bei der Porenbetonherstellung

	Einheit	1990	1995	2004
Kalkeinsatz der Porenbetonindustrie	Mio. t	0,4	0,4	0,3

Quelle: Eigene Berechnung

3.3.4 Kalziumkarbidherstellung (2B4)

Kalziumkarbid (CaC₂) wird in elektrischen Karbidöfen bei Temperaturen bis 2.000 °C aus Kalk und Koks (Möller) erzeugt. Als Kuppelprodukt fällt Karbidofengas (CO-Gas) an, das in gedeckelten Öfen vollständig aufgefangen und einer Nutzung zugeführt wird. In Deutschland erfolgt die Karbidproduktion heute nur noch bei der Stahl-Technik-GmbH am Standort Hart. Kalziumkarbid ist ein wichtiger Grundstoff zur Hydrolyse von Acetylen (C₂H₂), zur exothermen Azotierung¹ von Kalziumkarbid (dabei entsteht als Zwischenprodukt Kalziumcyanamid (Kalkstickstoff) und zur Herstellung von Roheisenentschwefelungsmitteln. Ausgehend von den spezifischen Verbrauchskennziffern und den Angaben zur Entwicklung der Kalziumkarbidproduktion in Deutschland, die in der Datenbank des ZSE enthalten sind - jedoch geheim sind – ergeben sich die in Tabelle 3-30 zusammengestellten Einsatzmengen für Kalk in diesem Produktionszweig. Die genaue Berechnung des Kalkeinsatzes lässt sich

¹ Bei der Azotierung wird Stickstoff chemisch eingebunden.

mittels der Datei „Kalkstein_Karbid_intern.xls“ nachvollziehen. Diese Datei und weitere Dokumente sind nur in der NaKo archiviert und bleiben zur Wahrung von Betriebsgeheimnissen unveröffentlicht.

Tabelle 3-30: Kalkeinsatz bei der Kalziumkarbidproduktion

	Einheit	1990	1995	2004
Kalkeinsatz bei der Kalziumkarbidherstellung	Mio. t	0,8	0,2	0,1

Quelle: Eigene Berechnungen

3.3.5 Eisen- und Stahlherstellung (2C1)

Der Einsatz von Kalkstein und Kalk als Schlackebildner wird in 3.1.7 ausführlich beschrieben. Bei der Herstellung von Oxygen- und Elektro Stahl wird als Schlackebildner Stahlwerkskalk eingesetzt. Die spezifischen Einsatzmengen sind in Tabelle 3-16 zusammengestellt. Daraus lassen sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Einsatzmengen von Stahlwerkskalk berechnen.

Tabelle 3-31: Einsatzmengen Stahlwerkskalk für die Rohstahlerzeugung

	Einheit	1990	1995	2004
Oxygenstahl	Mio. t	1,7	1,7	1,5
Elektrostahl	Mio. t	0,5	0,6	0,8
Insgesamt	Mio. t	2,2	2,3	2,3

Quelle: Eigene Berechnungen nach DESTATIS

3.3.6 Tonerdeproduktion (für Hüttenaluminium) (2C3)

Die Primärproduktion von Aluminium vollzieht sich in einer mehrstufigen Verfahrenskette. Auf der ersten Produktionsstufe findet die Aufbereitung von Bauxit zu Aluminiumoxid statt. Dazu wird Bauxit nass aufgemahlen, anschließend im Bayer-Aufschlussverfahren unter Zugabe von wässriger Natronlauge zu Aluminiumhydroxid (Al(OH)₃) umgewandelt und schließlich im Drehrohröfen bei 1.300°C zu Tonerde (Aluminiumoxid Al₂O₃) dehydriert. Das Aluminiumoxid wird in den Aluminiumhütten bei Temperaturen um 950°C in einer Kryolith-Schmelze gelöst und elektrolytisch zersetzt (Hall Héroult-Verfahren). Der Elektrolyseofen ist ein mit Kohlenstoffsteinen ausgekleidetes zylindrisches Gefäß, in das von oben aus Teer und Petrolkoks bestehende Anoden hereinragen. Der Kohleboden dient als Kathode. Der bei der Elektrolyse des Aluminiumoxids freiwerdende Sauerstoff verbindet sich mit dem Kohlenstoff der Anode zu Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid und entweicht. Flüssiges Aluminium sammelt sich am Boden der Elektrolysezelle; es wird in der Hüttengießerei im Strang oder als Masseln vergossen. Kalk wird im Prozess der Hüttenaluminiumherstellung im Prozess der Tonerdeherstellung eingesetzt. Zur Herstellung von einer Tonne Tonerde werden 46 Kilogramm Kalk eingesetzt und 1,9 Tonnen Tonerde werden für die Produktion von einer Tonne Aluminium benötigt (Wuppertal Institut 1995). Damit nur der Kalkeinsatz für die inländische Tonerdeproduktion berücksichtigt wird, sollte in diesem Bilanzposten die Tonerdeproduktion und nicht die Hüttenaluminiumproduktion Basis der Berechnung sein. Sonst müsste jährlich der resultierende Kalkeinsatzfaktor, abhängig von der Importquote, neu ermittelt werden. Dazu wurden Produktionsdaten für Tonerde

aus den Rohstofflichen Länderstudien (BGR 90, 91, 92) sowie DESTATIS (DESTATIS FS4 R31) verwendet. Die Produktionsmengen für fehlende Jahre wurden interpoliert. In den folgenden beiden Tabellen ist die inländische Tonerdeproduktion sowie der entsprechende Kalkeinsatz zusammengestellt.

Tabelle 3-32: Tonerdeproduktion in Deutschland

Tonerde	1990	1995	2004
In kt	1.213,8	750,4	720,0

Quelle: BGR und DESTATIS

Tabelle 3-33: Kalkeinsatz bei der Herstellung von Tonerde

Kalk	1990	1995	2004
In kt	55,8	34,5	33,1

Quelle: Eigene Berechnung nach BGR und DESTATIS

3.3.7 Papierindustrie (2D1)

Die Papierherstellung lässt sich in die Verfahrensschritte Gewinnung und Aufbereitung der Faserstoffe, ihre Transformation in der Papiermaschine und Veredlung und Ausrüstung des Papiers unterteilen. Auf der ersten Stufe des Produktionsprozesses werden die erforderlichen Primärfaserstoffe Zellstoff und Holzschliff gewonnen.

Zellstoff ist mit einem Anteil von 20% am gesamten Rohstoffeinsatz beteiligt. Zellstoff wird durch Isolierung von Zellulose aus Holz gewonnen. Dazu wird Holz in einem Kochprozess unter Zugabe chemischer Substanzen (neben Natronlauge kommen vor allem Natriumsulfat oder Natriumsulfid zum Einsatz) aufgeschlossen. Je nach verwendeten Chemikalien unterscheidet man Sulfit- oder Sulfatzellstoffe. In Deutschland wurde Zellstoff bis vor wenigen Jahren ausschließlich im Sulfitverfahren erzeugt. Erst in den letzten Jahren wird an zwei Standorten (in Stendal und Blankenstein) Zellstoff im Sulfatverfahren gewonnen.

Die heimische Zellstoffproduktion schwankt seit 1990 zwischen 1,1 und 0,7 Mio. t. Gegenwärtig werden rund 48kt Zellstoff im Sulfat- und 620.000 t im Sulfitverfahren erzeugt (vgl. Tabelle 3-34).

Tabelle 3-34: Produktion von Zellstoff

	Einheit	1990	1995	2004
Sulfitzellstoff	Mio. t	1,1	0,7	0,6
Sulfatzellstoff	Mio. t	NO	NO	0,5
Insgesamt	Mio. t	1,1	0,7	1,1

Quelle: Verband Deutscher Papierfabriken

Bei der Zellstoffherstellung geht verfahrensbedingt etwa die Hälfte der Holzsubstanz verloren. Die hierbei anfallenden Ablaugen werden im Rahmen eines internen Recyclings eingedampft und als Energieträger eingesetzt. Speziell beim Verbrennen der Sulfat-Ablauge (Grünlaug) entsteht dabei zunächst Natriumcarbonat (sowie Natriumsulfit). Aus der Natriumcarbonat-Schmelze wird durch Behandlung mit gelöschtem Kalk (Kalziumhydroxid) Natronlaug (NaOH) zurückgebildet (Kaustifizierung). Die gewonnene Weißlaug wird zusammen mit frischer Natronlaug wieder im Kochprozess eingesetzt. Der bei der Kaustifizierung anfallende Kalkschlamm (CaCO₃) wird in einem Kalkbrennofen zu Kalziumoxid zurück gebrannt (Quelle: Grundlagen der Zellstofftechnologie. Vorlesungsskriptum zum Lehrgang "Papiertechnik" an der Berufsakademie Karlsruhe).

Hingegen erfolgt beim Sulfit-Verfahren der Aufschluss mit Kalziumbisulfit-Lösung, die aus Kalk und Schwefeldioxid hergestellt wird. Die Rückgewinnung der Chemikalien hier des Schwefeldioxides kann durch eine spezifische Behandlung des ligninsulfonhaltigen Abwassers erreicht werden.

Der spezifische Kalkverbrauch der Zellstoffherstellung wird in der Literatur mit ca. 20 kg/t Zellstoff (BV Kalk 2006a, Teil 2, S. 35). Geht man mangels differenzierter Daten davon aus, dass dieser Wert, der sich ausschließlich auf das Sulfitverfahren bezieht, für die gesamte Zellstoffproduktion gilt, ergeben sich die in Tabelle 3-35 dargestellten Kalkeinsätze.

Tabelle 3-35: Kalkverbrauch bei der Zellstoffherstellung

	Einheit	1990	1995	2004
Sulfitzellstoff	kt	22	14	12
Sulfatzellstoff	kt	-	-	10
Insgesamt	kt	22	14	22

Quelle: Eigene Berechnungen

Im letzten Prozess der Papierherstellung, der Veredlung und Ausrüstung, werden (wahrscheinlich) geringe Mengen Kalkstein und Kalk als Füllstoffe und Weißmacher eingesetzt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnten jedoch keine Hinweise darauf gefunden werden, welche Mengen Kalkstein und Kalk hierfür benötigt werden.

3.3.8 Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung (4D, 5D)

Angaben zu genauen Produktionsdaten von Kalkdüngern sind weder in der amtlichen Statistik noch im ZSE enthalten. Auch die Angaben des BV Kalk aus der zur Verfügung gestellten Absatzstatistik lassen sich nicht verwenden, weil sie nicht bilanzpostenscharf sind. Die Kalkeinsätze müssen hilfsweise hergeleitet werden. Dazu werden statistische Angaben zum Inlandsabsatz von Kalk verwen-

det (DESTATIS, Düngemittelversorgung (Fachserie 4 Reihe 8.2). Der Inlandsabsatz an Kalk in die Land- und Forstwirtschaft, der hier hilfsweise als Aktivitätsrate zugrunde gelegt wird, ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3-36: Inlandsabsatz von Kalk an die Land- und Forstwirtschaft

	1990	1995	2004
Brannkalk (in kt)	204,8	124,5	74,7

Quelle: Eigene Darstellung nach DESTATIS

3.3.9 Wasser- und Schlammbehandlung (6B)

Für den Kalkeinsatz in diesem Bilanzposten liegen weder Daten im ZSE vor noch konnten geeignete Einsatzfaktoren ermittelt werden. Zur Darstellung wird die Absatzstatistik des BV Kalk, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt wurde, herangezogen. In der Statistik des BV Kalk sind nur die Kalkmengen für die Stützjahre 1990, 1995 und 2004 erfasst, in der Berechnung der Gesamtbilanz werden die Zwischenjahre interpoliert. Die Kalkeinsätze sind in der folgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 3-37: Kalkeinsatz in der Wasser- und Schlammbehandlung

Kalkeinsatz	1990	1995	2004
(in kt)	597	661	569

Quelle: Absatzstatistik BV Kalk 2006

Es wird vermutet, dass innerhalb der hier erfassten Kalkmenge auch Anteile in unbekannter Größenordnung für die Trinkwasseraufbereitung und Klärschlammbehandlung enthalten sind.

3.3.10 Übrige Sektoren (wie Baugewerbe, übrige Baustoffindustrie und Chemie usw.)

Dieser Bilanzposten bildet sämtliche übrige Sektoren ab, für die keine Angaben eruiert werden konnten, aus denen der Kalkeinsatz abgeleitet werden kann. Das sind hauptsächlich das Baugewerbe, die übrige Baustoffindustrie, Chemie u.a. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Menge in diesem Bereich aus der Differenz aus dem Aufkommen an Kalk und der Summe der Einsätze aller anderen Bilanzposten gebildet. Die so ermittelten Einsätze von Kalk sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3-38: Kalkeinsatz Übrige Sektoren

Kalkeinsatz	1990	1995	2004
(in kt)	18,3	16,4	6,8

Quelle: Eigene Berechnung

3.4 Zusammenstellung der Kalkbilanz

Werden sämtliche Kalkeinsätze in allen relevanten Wirtschaftszweigen zusammengefasst und mit dem Kalk-Aufkommen verglichen, ergibt sich die in der folgenden Tabelle dargestellte Kalkbilanz.

Tabelle 3-39: Kalkbilanz

in Mio. Tonnen			
	1990	1995	2004
Produktion im Inland	7,72	7,95	6,97
Einfuhr	0,59	0,84	0,62
Ausfuhr	0,40	0,94	1,04
Aufkommen (= Produktion Inland + Einfuhr – Ausfuhr)	7,91	7,86	6,54
Verwendung			
Kalksandstein	1,08	1,64	0,71
Porenbeton	0,36	0,44	0,35
Kalziumcarbid	0,82	0,19	0,13
Stahl und Eisen	2,23	2,30	2,26
Sonstige Industrie (Aluminiumoxid, Papier)	0,08	0,05	0,05
Rauchgasreinigung			
Stromerzeugung	0,32	0,40	1,29
Landwirtschaft	0,20	0,12	0,07
Wasser- u. Schlammbehandlung	0,60	0,66	0,57
Übrige Sektoren (wie Baugewerbe, übrige Baustoffindustrie und Chemie usw.)	2,21	2,06	1,10
Summe Verwendung	7,91	7,86	6,54

Quelle: Eigene Darstellung, siehe Anlage 4 und 5

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte die Kalkstein- und Kalkbilanz für Deutschland vollständig abgebildet werden. Damit wurde der Forschungsauftrag erfüllt, insbesondere im Bereich der Rohstoffemissionen Lücken aus der thermischen Nutzung von Kalkstein zu identifizieren und diese bei der Erfassung der Kalksteinnutzung und der damit verbundenen CO₂-Emissionen im ZSE zu schließen.

Die folgende Tabelle zeigt die mit der Berichterstattung 2006 neu ins Emissionsinventar aufgenommenen Bilanzposten. Dabei handelt es sich um Daten, die im Rahmen des Forschungsvorhabens aus der Anwendung von Kalkstein bzw. dem Kalksteinanteil in Rohstoffen ermittelt wurden und um konservative Bewertungen des UBA für den Bereich REA.

Tabelle 4-1: Inventarergänzungen 2006: CO₂-Emissionen aus der Anwendung von Kalkstein

CRF-Bereich	Bezeichnung	Einheit	1990	1995	2004
1A1	REA in GFA	kt	932	1.229	1.764
2A7	Keramikherstellung (im Rohstoff enthalten) Ziegelproduktion	kt	490	670	475
2C1	Eisen und Stahl Roheisen Sinter	kt	2.370	2.257	2.233

Quelle: NIR 2006 (inclusive Errata 2C1)

Damit konnten die Emissionen für das Basisjahr 1990, die mit der Berichterstattung 2006 endgültig festgelegt wurden, um gut 3,5 Millionen Tonnen Kohlendioxid angepasst und somit die Vollständigkeit des Inventars erhöht werden.

Durch geringfügige Datenanpassungen im weiteren Projektverlauf nach der Berichterstattung 2006 stellen sich die Inventarergänzungen folgendermaßen dar, wobei die Daten erst in die Berichterstattung 2007 eingehen und dort (speziell bei der Keramikindustrie) der Überarbeitung und der Fortschreibung der Fachverantwortlichen des UBA unterliegen.

Tabelle 4-2: Anpassungen der CO₂-Emissionen aus der Anwendung von Kalkstein

CRF-Bereich	Bezeichnung	Einheit	1990	1995	2004
1A1	REA in GFA	kt	679	769	1.394
2A7	Keramikherstellung (im Rohstoff enthalten) Ziegelproduktion	kt	452	609	409
2C1	Eisen und Stahl Roheisen Sinter	kt	2.392	2.354	2.225

Quelle: Eigene Berechnungen zum Projektabschluss

5 Literaturverzeichnis

- AGIMUS 1995: Ökobilanz für Kalksandstein. Im Auftrag des Bundesverbands Kalksteinindustrie e.V. AGIMUS Umweltberatungsgesellschaft mgH, Braunschweig 1995
- BGR 1998: Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe; Teilstudie Aluminium. Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1998
- BGR: Rohstoffsituation Bundesrepublik Deutschland. Rohstoffliche Länderstudien, versch. Jahrgänge. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft 2004: Nationaler Inventarbericht 2004 – Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen – Teilbericht für die Quellgruppe Landwirtschaft. Sonderheft 260. Braunschweig 2004
- Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft 2006: Zuarbeit auf eine persönliche Anfrage an Dr. Lütich, Braunschweig 2004
- BV Kalk 2006a: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie: Kalkkompendium. Unter: www.kalk.de. Nur zum Download (<http://www.kalk.de/aktuelles/kompendium> „Teil 1-3.pdf“), Nachfolge von Kalk-Taschenbuch (Aufl. 67 von 2001)
- BV Kalk 2006b: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie: Absatzstatistik der Kalkindustrie, veröffentlicht über Datei auf Begleitdatenträger dieses Endberichts
- DESTATIS (verschiedene Jahrgänge): Statistisches Bundesamt; Fachserie 4, Reihe 8.1; Eisen und Stahl, Poeschel-Verlag, versch. Jahrgänge
- DESTATIS: Aussenhandel nach Waren und Ländern. Fachserie 7 Reihe 2, CD-ROM
- DESTATIS: Düngemittelversorgung; Fachserie 4 Reihe 8.2
- DESTATIS: Fachserie 4, Reihe 3.1, Produzierendes Gewerbe. Poeschel-Verlag, versch. Jahrgänge
- DESTATIS: Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland. Versch. Jahrgänge
- DESTATIS: Umweltökonomische Gesamtrechnungen 2005
- Eurostat: Export-/Importbilanz 1958 – 2003, Europäische Kommission, Luxemburg
- Forschungszentrum Jülich: Politiksznarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Band 2: Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen Energie bedingtes CO₂. Jülich 1997
- Rentz et al 2002: O. Rentz, K. Gütling und U. Karl 2002: Erarbeitung der Grundlagen für das BVT-Merkblatt Großfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustausches nach Art. 16(2) IVU-Richtlinie, Forschungsbericht 200 46 317, Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2002
- Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung: CO₂-Emissionen und wirtschaftliche Entwicklung. Monitoring-Bericht 1998. Essen 1998
- Solvay Soda 2004: Persönliche Zuarbeit von Herrn Dr. Kleiböhmer. Solvay Soda Deutschland, Werk Rheinberg. Rheinberg 2004
- Statistisches Bundesamt: Aufkommen und Verwendung von Düngemitteln, Zusammenstellung auf eine persönliche Anfrage, Wiesbaden 2006

- Statistisches Bundesamt: Fachserie 4, Reihe 3.1, Produzierendes Gewerbe. Poeschel-Verlag, versch. Jahrgänge
- Statistisches Bundesamt: Fachserie 4, Reihe 8.1; Eisen und Stahl, Poeschel-Verlag, versch. Jahrgänge
- Strauß 1998: Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen/ Karl Strauß. - 4. Auflage, Springer-Verlag, 1998
- UBA 2001: German Notes on BAT for the production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals: Kalkammonsalpeter; erstellt v. Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin 2001
- UBA 2001: German Notes on BAT for the production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals: Soda; erstellt v. Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin 2001
- UBA 2006: Herleitung der Emissionsfaktoren Glas für den NIR 2006, Datei „EF-Glas.xls“ wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt
- VDZ 2000: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Herausgegeben von Verein Deutscher Zementwerke e.V. und dem Forschungsinstitut der Zementindustrie. Düsseldorf 2000
- VDZ 2002: Zementrohstoffe in Deutschland. Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele. Herausgegeben von Verein Deutscher Zementwerke e.V. und dem Forschungsinstitut der Zementindustrie. Düsseldorf 2002
- VDZ 2004: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Herausgegeben von Verein Deutscher Zementwerke e.V. und dem Forschungsinstitut der Zementindustrie. Düsseldorf 2004
- VGB 2004: Aufkommen und Verwertung von Nebenprodukten aus Kohle befeuerten Kraftwerken in Deutschland
- VGB 2004: VGB PowerTech e.V.: Produkte aus Verbrennungsanlagen – Statistik 2004
- Wuppertal Institut 1995: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (1). Die Werkstoffe Beton und Stahl. Wuppertal Paper Nr. 27. Januar 1995
- Wuppertal Institut 1995: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (2). Der Werkstoff Aluminium. Wuppertal Paper Nr. 37. Juni 1995
- YARA GmbH 2006: Auskunft auf eine persönliche Anfrage an Dr. Ortseifen, Yara GmbH Dülmen, 2006
- Ziegelindustrie International. Zeitschrift für die Ziegel-, Baukeramik-, Feuerfest- und Steinzeugröhren-Industrie
- ZKD International: Zement, Kalk, Gips. Zeitschrift; Bertelsmann Springer Bauverlag GmbH; Gütersloh

Anlage 1: Vorlagen zur Inventarbeschreibung (Inventarergänzungen 2006)

Inventarbeschreibung 1A1 Rauchgasentschwefelung in GFA

1. Beschreibung der Quellgruppe

Die Entschwefelungstechnik richtet sich im Wesentlichen nach den immissionsschutzrechtlichen Anforderungen und der ökonomischen Verwertbarkeit der anfallenden Reststoffe (Gips). Zur Entschwefelung von Abgasen in Kraftwerken stehen grundsätzlich mehrere Verfahren zur Verfügung. Im Bereich der Stromerzeugungsanlagen dominiert das Kalkstein-Waschverfahren. Gemessen an der installierten Leistung nutzen etwa 87% der Kraftwerke in Deutschland dieses Verfahren (Rentz et al. 2002). Das Sprühabsorptionsverfahren dient der Entschwefelung von Abgasen durch Zugabe von Kalkhydrat (Ca(OH)₂); es kommt vor allem bei Kraftwerken mittlerer Anlagengröße zum Einsatz (in Deutschland 8% der Stromerzeugungsanlagen). Das sog. Trocken-Additiv-Verfahren (also die Direktentschwefelung durch Zugabe von Kalk oder Kalksteinmehl zum Brennstoff oder in die Feuerung) findet nur in kleineren Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von bis zu 300 MW Anwendung. Nur etwa 4% der Kraftwerke nutzen diese Entschwefelungstechnik, deren Abscheidegrad im Vergleich zum Kalkstein-Wasch-Verfahren und zur Sprühabsorption (bis zu 95%) mit 60% relativ niedrig ausfällt.

2. Herleitung von Primär-Aktivitätsraten

Prozessbedingte CO₂-Emissionen aus der Kalksteinnutzung fallen nur beim Kalkstein-Waschverfahren an. Entsprechend werden die hier eingesetzten Kalksteinmengen stöchiometrisch hergeleitet. Zur Ermittlung der Kalksteineinsatzmengen in Kraftwerken wird der Gipsanfall der Kraftwerke verwendet. Dazu werden die jährlichen Veröffentlichungen des VGB (VGB 2004) herangezogen.

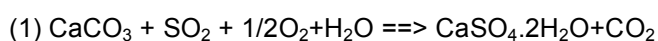
Tabelle 0-1: Gipsaufkommen aus Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken

Gipsaufkommen (in kt)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Steinkohlekraftwerke	1.300	1.400	1.360	1.440	1.360	1.510	2.000	1.900	2.000	2000	1.900	1.800	1.700	1.929	1.930
Braunkohlekraftwerke	1.900	2.100	2.040	2.160	2.040	2.190	2.900	3.200	3.000	3.800	4.700	4.500	5.400	5.728	5.730

Quelle: VGB PowerTech, versch. Jahrgänge und eigene Schätzungen (s. Anlage 4, Datenblatt: REA-Inventarmodell_Gips-CaCO₃)

3. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors und der Kalkstein-Aktivitätsrate

Die Entschwefelung mit CaCO₃ erfolgt nach mehreren Teilreaktionen. Zur stöchiometrischen Berechnung des Kalksteineinsatzes im Kalkstein-Waschverfahren wird die relevante chemische Brutto-Reaktionsgleichung



für das Verfahren zugrunde gelegt (Strauß 1998).

Daraus kann das molare Gewichts-Verhältnis von Kalkstein zu Gips abgeleitet werden. Daraus folgt, dass pro angefallener Tonne Gips 581,39 Kilogramm Kalkstein eingesetzt werden¹. Aus diesen Angaben lässt sich der Kalksteineinsatz für REA in Stein- und Braunkohlekraftwerken ableiten. Aus dem Gipsaufkommen ist nicht ersichtlich, ob Kalkstein oder Kalk eingesetzt wird. Um hierzu eine Aussage treffen zu können, werden Angaben des BV Kalk aus der Absatzstatistik, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt wurden, herangezogen.

Tabelle 0-2: Absatz Kalk und Kalkstein für die Luftreinhaltung

Absatz für die Luftreinhaltung (in t)	1990	1995	2004
Ungebrannt (Kalkstein)	1.229	1.320	1.850
Gebrannt (Kalk)	251,8	304,1	751,6

Quelle: BVK 2006 (s. Anlage 4, Datenblatt: REA-Inventarmodell_Gips-CaCO₃)

Aus den Angaben des BV Kalk (fehlende Jahre wurden interpoliert) wurde das Verhältnis von Kalkstein zu Kalk gebildet und dieses Verhältnis auf die berechneten Modellergebnisse von Kalkstein angewandt. Damit lassen sich die Kalkstein- und Kalkeinsätze in REA vollständig ableiten. Entsprechend ergibt sich die in Tabelle 0-3 zusammen gestellte rechnerisch ermittelte Einsatzmenge von Kalkstein.

Tabelle 0-3: Kalksteineinsatz in REA in Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken

Kalksteineinsatz (in kt)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Kalkstein	1.544	1.679	1.623	1.716	1.631	1.748	2.279	2.342	2.267	2.596	2.878	2.710	3.013	3.205	3.167

Quelle: Eigene Berechnung (s. Anlage 4, Datenblatt 3a_CaCO₃-Zeitreihen)

Die in Tabelle 0-3 zusammen gestellten Einsatzmengen von Kalkstein sind im ZSE im Februar 2006 von I 4.6 in folgender Weise verschlagwortet worden und über das Strukturelement auffindbar:

¹ Molares Gewicht CaCO₃: 100g/mol, CaSO₄·2H₂: 172g/mol

Dimension	Deskriptor
Name	Karbonatmissionen
Strukturelement	REA (CaCO ₃) in öffentlichen Kraftwerken
Material	Kalkstein (CaCO ₃)
Raumbezug	D
Wertetyp	AR
Schadstoff	
Emittentengruppe	Entschwefelung in Feuerungen
Verwendungsart	Rauchgasreinigung
Produkt	REA-Gips
Maß- name	13. BImSchV
Technik	
Betriebsart	
EBFlag	
EBZ	
Einheit	t
Zeitaufl.	a
Hypothese	REF

Das Berechnungsverfahren entspricht dem Tier 1 nach IPCC.

4. Abschätzung der Unsicherheiten

Insgesamt betrachtet ist die Abschätzung des Kalksteineinsatzes in diesem äußerst heterogenen Bereich aufgrund des eingeschränkten empirischen Materials relativ ungenau. Eine exakte Analyse des tatsächlichen Kalksteineinsatzes kann nur mit Hilfe anlagenscharfer Daten (Wirkungsgrad, Brennstoffeinsatz, Rauchgasentschwefelungsverfahren, Adsorbens) erfolgen. Insgesamt wird die Unsicherheit mit +/-10% eingeschätzt.

5. Verifikation

Die Modellierung wurde Fachverantwortlichen im UBA sowie dem BV Kalk zur Diskussion übergeben. Verifikationen konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht endgültig abgestimmt werden. Die Daten des BV Kalk geben keine eindeutigen Hinweise für die Richtigkeit und können selbst nicht als Primärdatenquelle dienen, weil die Absatzzahlen des BV Kalk niedriger liegen. Eine alternative Berechnung über die Schwefeldioxidemissionen ist nicht vollständig abgestimmt.

Als Grundlage für Verifikationen über die Schwefeldioxidemissionen dient die Datei „X1_REA-Modell_(Verifikation Schwefelgehalt).xls“

6. Verbesserungsvorschläge

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Verifizierung der Herleitung der Kalksteineinsätze auf der Basis der Schwefelgehalte der Brennstoffe entwickelt. Dieses Berechnungsverfahren konnte in wenigen Details noch nicht abschließend mit Fachverantwortlichen

im UBA abgestimmt werden. Es wird vorgeschlagen, im UBA eine endgültige Klärung dieser noch nicht abgestimmten Details zu erreichen. Dies könnte eine Untermauerung des entwickelten Berechnungsverfahrens über das Gipsaufkommen und damit eine qualitative Verbesserung des Ergebnisses in diesem Bilanzposten bedeuten.

7. Literatur

- Rentz et al 2002: O. Rentz, K. Gütling und U. Karl 2002: Erarbeitung der Grundlagen für das BVT-Merkblatt Großfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustausches nach Art. 16(2) IVU-Richtlinie, Forschungsbericht 200 46 317, Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2002
- Strauß 1998: Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen/ Karl Strauß. - 4. Auflage, Springer-Verlag, 1998
- VGB 2004: VGB PowerTech e.V.: Produkte aus Verbrennungsanlagen – Statistik 2004
- BVK 2006b: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie: Absatzstatistik, veröffentlicht über Datei auf Begleitdatenträger dieses Endberichts

Inventarbeschreibung 2A7 Herstellung von Ziegeln

1. Beschreibung der Quellgruppe

Rohstoff für Ziegel sind verschiedene Lehme und Tone in unterschiedlicher Zusammensetzung. Im Rohmehl enthalten ist in unterschiedlichen Anteilen auch Kalkstein. Die tonhaltigen Ausgangsmaterialien werden im ersten Produktionsschritt zerkleinert und zu einer nassen Masse aufbereitet. Die Formgebung der meist quaderförmigen Bausteine erfolgt maschinell im Strangpressverfahren. Nach der Trocknung erfolgt das Brennen der Ziegel. Das Standardbrennaggregat der Ziegelindustrie ist heute der Tunnelofen, lediglich für Spezialerzeugnisse (z.B. Dachziegel) kommen Kammeröfen zum Einsatz. Im Gegenstrom der heißen Ofenabgase durchlaufen die Rohlinge die Vorwärmzone des Tunnelofens und werden schließlich bei Temperaturen zwischen 840 und 1.060°C gebrannt (Brennzone).

2. Herleitung von Primär-Aktivitätsraten

Die Abbildung der tatsächlichen Produktionsentwicklung (Tonnage) der Ziegelindustrie ist mit dem verfügbaren Datenmaterial nur eingeschränkt möglich, da die amtliche Statistik die Herstellung von Mauerziegeln in Kubikmetern und von Dachziegeln in Stückzahlen bemisst. Aus diesem Grund wurde die Tonnenproduktion anhand von Erfahrungswerten (des Bundesverbandes der Ziegelindustrie) ermittelt, indem für den Kubikmeter Mauerziegel ein Durchschnittsgewicht von 1.300 kg und für einen Dachziegel von etwa 3 kg (siehe Tabelle 0-1) angesetzt wurde. Statistische Grundlage zur Bestimmung der Aktivitätsrate ist die amtliche Produktionsstatistik (DESTATIS).

Tabelle 0-1: Gewichte ausgewählter Dachziegelarten

Dachziegelart	Gewicht/Stück (in kg)
Pressdachziegel	2,9
Biberschwänze	2
Andere Strangziegel	3,5
Sonst. Dachziegel und Zubehörteile	2,8

Quelle: Eigene Berechnung

Unter diesen Annahmen und Interpolation der Mengen Dachziegel für die fehlenden Jahre kann die Produktionsmenge in Tonnen ermittelt werden. Die so ermittelte Produktionsmenge Ziegel ist in Tabelle 0-2 zusammengestellt.

Tabelle 0-2: Berechnete Produktionsmenge Ziegel (in kt)

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Ziegelproduktion	15.820	16.914	18.008	19.102	20.196	21.290	19.557	19.869	19.706	19.439	18.306	15.416	14.067	14.015	14.298

Quelle: Eigene Berechnung (s. Anlage 4, Datenblatt: 1_Aktivität)

3. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors und der Kalkstein-Aktivitätsrate

Im Rohmehl für die Ziegelherstellung können bis zu 25% Kalkstein enthalten sein (persönliche Information Bundesverband Ziegelindustrie). Da keine Daten über genauere Kalksteinanteile im Rohmehl für die Ziegelherstellung vorliegen, wird hilfsweise angenommen, dass pro Tonne Rohmehl 65 Kilogramm Kalkstein enthalten sind. Da auch keine Angaben darüber vorliegen, welche Rohstoffmengen für die Ziegelherstellung eingesetzt werden, wird die Kalksteinmenge überschlägig aus dem Produkt der Produktionsmenge (siehe Tabelle 0-2) und dem abgeschätzten Anteil Kalkstein im Rohmehl gebildet. Damit ergeben sich die in der folgenden Tabelle zusammen gestellten Kalksteineinsätze bei der Ziegelherstellung.

Tabelle 0-3: Abgeschätzte Kalksteinmenge bei der Ziegelherstellung (Anteil im Rohmehl)

Anteil Kalkstein im Rohmehl (in kt)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Ziegel	1.028	1.099	1.171	1.242	1.313	1.384	1.271	1.292	1.281	1.264	1.190	1.002	914	911	929
dav. Dachziegel	85	95	106	117	129	140	147	144	154	164	169	153	139	139	151

Quelle: Eigene Berechnung (s. Anlage 4, Datenblatt: 3a_CaCO₃-Zeitreihen)

Die in Tabelle 0-3 zusammen gestellten Einsatzmengen von Kalkstein sind im ZSE im Februar 2006 von I 4.6 in folgender Weise verschlagwortet worden und über das Strukturelement aggregiert auffindbar:

Dimension	Deskriptor	Deskriptor
Name	Karbonatmissionen	Karbonatmissionen
Strukturelement	Herstellung von Ziegeln	Herstellung von Ziegeln
Material	Kalkstein (CaCO ₃)	Kalkstein (CaCO ₃)
Raumbezug	D	D
Wertetyp	AR	AR
Schadstoff		
Emittentengruppe	Steine und Erden	Steine und Erden
Verwendungsart	Produktion	Produktion
Produkt	Dachziegel	Mauerziegel
Maßname		
Technik		
Betriebsart		
EBFlag		
EBZ		
Einheit	t	t
Zeitaufl.	a	a
Hypothese	REF	REF

Das Berechnungsverfahren entspricht dem Tier 1 nach IPCC.

4. Abschätzung der Unsicherheiten

Die Unsicherheit wird wegen der mangelnden Datenlage als relativ hoch bewertet. Sie wird mit +/- 25% eingeschätzt.

5. Verifikationen

Zur Zeit nicht möglich: keine ausreichenden Daten von der DEHSt, vom BV Kalk oder anderen Modellen.

6. Verbesserungsvorschläge

Es wird vorgeschlagen, die Quellgruppe im Inventar unter 2A7: Grobkeramik: Mauerziegel, Dachziegel, geformte feuerfeste Erzeugnisse neu zu strukturieren und entsprechend den neu gewonnenen Ergebnissen aus diesem Forschungsvorhaben transparent die emissionsrelevanten Kalksteinanteile im Rohmehl bei der Ziegelproduktion darzustellen.

7. Literatur

DESTATIS: Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, Reihe 3.1; Produktion im Produzierenden Gewerbe, Poeschel-Verlag

Inventarbeschreibung 2C1 Kalksteineinsatz bei der Eisen- und Stahlherstellung

1. Beschreibung der Quellgruppe

Die moderne Stahlerzeugung basiert im Wesentlichen auf zwei unterschiedlichen Verfahrenstechniken: Entweder wird Eisenerz in Hochofen zu Roheisen verhüttet und anschließend in Stahlkonverter zu Rohstahl gefrischt (Hochofen-Oxygenstahlroute) oder unmittelbar durch Umschmelzen von Schrott gewonnen (Elektrostahlroute). Die Art des Stahlerzeugungsverfahrens ist für den Rohstoffverbrauch von essentieller Bedeutung. In der Stahlerzeugung lassen sich drei Produktionsstufen unterscheiden: die Aufbereitung der Rohstoffe, die Erzeugung des Roheisens im Hochofen sowie die Umwandlung des Roheisens zu Stahl. Die Aufbereitung der Rohstoffe und Energieträger bzw. Reduktionsmittel ist erforderlich, weil sie nur in agglomerierter Form eingesetzt werden können. Dazu sind dem Hochofen umfangreiche Aufbereitungsanlagen vorgeschaltet (z.B. Kokerei, Sinter- und Pelletanlage). Um z.B. Erze aufzubereiten, werden sie gebrochen, gesiebt und auf einen engen Kornbereich klassiert. Anschließend gelangen die Feinerze zusammen mit den Zuschlagstoffen (insbesondere Koks und Kalkstein) in die Sinteranlage. Dort wird die angefeuchtete und homogenisierte Materialmischung auf ein umlaufendes Rost gegeben und an der Oberfläche gezündet. Der Kohlenstoff verbrennt und bewirkt das Zusammenbacken (Sintern) der Erzkörner. Im Hochofen selbst wird mit Hilfe von Kohlenstoffträgern (Koks, Kohle, Öl und Gas) aus Möller (Sinter, Pellets, Erze und kalksteinhaltige Zuschläge) Roheisen gewonnen. Auf der Stufe der Sinter- und Roheisenerzeugung wird Kalkstein vor allem in Form von Kalk- bzw. Dolomitstein bzw. -splitt eingesetzt. Im Hochofen reduziert Kalkstein, der mit dem Sinter oder direkt als Zuschlagstoff in den Möller gelangt, den Schmelzpunkt der Schlacke, die unerwünschte Begleitelemente (Silizium, Phosphor, Schwefel usw.) bindet. Zur eigentlichen Stahlschmelze in Oxygen- oder Elektrostahlöfen (Einschmelzphase) aber auch für die weitere metallurgische Arbeit im Ofen oder in der Pfannenbehandlungsanlage wird heute hauptsächlich Kalk (Stahlwerkskalk) als Schlackenbildner eingesetzt.

2. Herleitung von Primär-Aktivitätsraten

Es werden die Produktionsmengen von Sinter und Roheisen und Rohstahl aus dem aktuellen Inventar verwendet, die identisch sind mit den Angaben der amtlichen Statistik.

3. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors und der Kalkstein-Aktivitätsrate

Die Stahlindustrie setzt Kalkstein (CaCO₃) nur bei Aufbereitung der Eisenerze (Sinteranlagen) und bei der Roheisenerzeugung im Hochofen ein. Beim Frischen von Rohstahl im Oxygenstahl- oder Elektrostahlverfahren kommt Stahlwerkskalk (CaO) als Schlackenbildner zum Einsatz.

Die Kalksteineinsätze bei der Sinter- und Roheisenherstellung werden jährlich in der Eisen- und Stahlstatistik veröffentlicht (DESTATIS versch. Jahrgänge). Pro Tonne Sinter werden ca. 151 kg Kalkstein als Schlackebildner eingesetzt und pro Tonne Roheisen 30 kg. Die genauen Kalksteineinsätze pro Tonne Sinter und Roheisen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 0-1: Spezifischer Kalksteineinsatz bei der Herstellung von Sinter und Roheisen

Kalksteineinsatz (in kg pro Tonne)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Sinter	157	156	158	153	153	163	160	155	159	155	153	153	151	151	151
Roheisen	23	24	23	23	24	25	25	20	22	29	30	30	28	28	28

Quelle: DESTATIS (s. Anlage 4, Datenblatt: 2_Spezifisch)

Damit ergibt sich der in der folgenden Tabelle zusammengestellte Kalksteineinsatz bei der Sinter- und Roheisenherstellung.

Tabelle 0-2: Kalksteineinsatz bei der Sinter- und Roheisenherstellung

Kalksteineinsatz gesamt (in kt)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Sinter	4.681	4.532	4.198	3.891	4.173	4.600	4.350	4.471	4.588	4.144	4.273	4.136	3.940	4.047	4.210
Roheisen	756	757	666	627	733	751	686	629	677	817	924	866	831	833	848

Quelle: Eigene Berechnung (s. Anlage 4, Datenblatt 3a_CaCO₃-Zeitreihen)

Die in Tabelle 0-2 zusammen gestellten Einsatzmengen von Kalkstein sind im ZSE im Februar 2006 von I 4.6 in folgender Weise verschlagwortet worden und über das Strukturelement aggregiert auffindbar:

Dimension	Deskriptor	Deskriptor
Name	Karbonatmissionen	Karbonatmissionen
Strukturelement	Stahlerzeugung: Aufblas-Stahl-Produktion	Stahlerzeugung: Aufblas-Stahl-Produktion
Material	Kalkstein (CaCO ₃)	Kalkstein (CaCO ₃)
Raumbezug	D	D
Wertetyp	AR	AR
Schadstoff		
Emittentengruppe	Stahlerzeugung	Stahlerzeugung
Verwendungsart	Produktion	Produktion
Produkt	Roheisen	Sinter
Maßname		
Technik		
Betriebsart	Hochofen	Sinteranlage
EBFlag		
EBZ		
Einheit	t	t
Zeitaufl.	a	a
Hypothese	REF	REF

Das Berechnungsverfahren entspricht der Tier 1-Methodik nach IPCC.

4. Abschätzung der Unsicherheiten

Eine quantitative Herleitung von Bandbreiten (Konfidenzintervallen) zur Beschreibung von Unsicherheiten wurde im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt. Die Aktivitätsdaten zum Einsatz von Kalkstein bei der Sinter- und Roheisenerzeugung werden im Rahmen der jährlichen Stahlstatistik explizit erfasst. Die für die Stahlindustrie verwendeten Angaben stammen ausschließlich aus diesen statistischen Erhebungen. Die Genauigkeit dieser primär erhobenen Daten zum Einsatz von Kalkstein in der Stahlindustrie kann vor diesem Hintergrund als sehr hoch eingestuft werden. Die Unsicherheit wird wegen der guten Datenbasis relativ gering mit +/-2% eingeschätzt.

5. Verifikation

Dem Umweltbundesamt liegen die Daten für die Kalkstein- und Kalkeinsätze in bei der Eisen- und Stahlerzeugung zusammengefasst vom VDEH in der Datei „Schlackebildner_VDEH-Angaben.xls“ vor, ab 1996 entsprechen die hier dargestellten Summen der Kalk- und Kalksteineinsätze exakt dem Produkt der Produktionsmenge und dem spezifischen Einsatzfaktor aus der Eisen-Stahl-Statistik. Differenzen in den vorangegangenen Jahren ergeben sich aus den Abweichungen der Produktionsmengen.

6. Verbesserungsvorschläge

Keine

7. Literatur

DESTATIS (verschiedene Jahrgänge): Statistisches Bundesamt; Fachserie 4, Reihe 8.1; Eisen und Stahl, Poeschel-Verlag, versch. Jahrgänge

Anlage 2: Vereinfachte Inventarbeschreibungen der restlichen kalksteinverwendenden Bilanzposten

2A1 Brennen von Zementklinker

1. Herleitung der Aktivitätsraten

Für die Herleitung des Kalksteineinsatzes beim Brennen von Zementklinker wurden die entsprechenden Aktivitätsraten aus dem ZSE zugrunde gelegt.

2. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Bei den in Deutschland üblichen Rohstoffmischungen für die Herstellung von Klinker besteht das Rohmehl zu 78,9% aus Kalkstein (VDZ 2002) und für eine Tonne Klinker werden 1,479 Tonnen Rohmehl eingesetzt. Entsprechend wurde der Kalksteineinsatzfaktor mit 1.166,931 Kilogramm Kalkstein pro Tonne Zementklinker verwendet. Damit ergeben sich die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Kalksteineinsätze aus dem Brennen von Zementklinker.

Tabelle 0-1: Kalksteineinsatz bei der Herstellung von Zementklinker

Kalkstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in Mio. t	33,35	29,96	31,49	31,68	33,44	33,93	32,29	33,30	33,89	34,38	33,25	29,44	27,95	29,45	30,67

Quelle: Eigene Berechnung nach VDZ 2002 und UBA 2006

Kalkstein wird in der Zementindustrie darüber hinaus auch als Zumahlkomponente bei der Herstellung spezieller Kompositzemente eingesetzt. Der spezifische Kalksteinverbrauch für die Mahlung je nach betrachteter Zementsorte variiert entsprechend der Rezeptur erheblich (VDZ 2002). Auf der Basis der Rezeptur für die einzelnen Zemente und dem Inlandsabsatz kann die Menge zugemahlener Kalkstein ermittelt werden. Die bei der Zementmahlung eingesetzten Kalksteinmengen werden nicht gebrannt und sind im Gegensatz zu den Kalksteinmengen im Rohmehl deshalb CO₂-neutral. In der folgenden Tabelle ist die Menge des zugemahlener Kalksteins für alle Zementarten zusammengefasst dargestellt (ausführliche Rechnung siehe externe Datei „Zement_Zumahlung.xls“ im Forschungsvorhaben).

Tabelle 0-2: Kalksteineinsatz für die Zumahlung

Kalkstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in kt	855	991	1.048	1.113	1.243	1.206	1.160	1.136	1.212	1.301	1.271	1.195	1.044	1.181	1.165

Quelle: Eigene Berechnung nach VDZ 2002

3. Unsicherheiten

Die Anteile von Kalziumkarbonat am Rohmehl bei der Zementklinkerherstellung können geringfügig variieren, ebenso die Reinheit des Kalziumkarbonats. Entsprechend wird die Bandbreite des Kalksteineinsatzes sowohl für die Klinkerherstellung als auch für die Zumahlung von Rohmehl vorsichtig mit +/- 5% abgeschätzt.

2A2 Brennen von Kalkstein und Dolomit

1. Herleitung der Aktivitätsraten

Die Aktivitätsraten aus dem ZSE (aggregiert) und aus dem NIR (disaggregiert) wurden zugrunde gelegt.

2. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Beim Brennen von Kalkstein und Dolomitstein entstehen Kalk und gebrannter Dolomit. Zur Herstellung von einer Tonne Kalk werden (stöchiometrisch berechnet¹) 1.768 kg Kalkstein und für eine Tonne gebrannter Dolomit werden 1.913 kg Dolomitstein eingesetzt.

Tabelle 0-1: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Kalk

Kalkstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in Mio. t	12,60	11,14	11,31	11,79	12,93	13,10	12,08	12,25	11,70	11,72	12,03	11,46	11,34	11,58	11,51

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA

Tabelle 0-2: Dolomitsteineinsatz bei der Produktion von gebranntem Dolomit

Dolomitstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in Mio. t	1,13	1,13	1,10	0,99	0,97	1,04	1,04	1,01	1,07	0,92	1,00	0,98	0,99	0,83	0,88

Quelle: Eigene Berechnung nach NIR (2006)

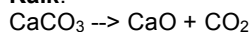
3. Unsicherheiten

Die stöchiometrische Berechnung stellt ein theoretisches Ideal dar, beeinflussende Faktoren wie Feuchtigkeit, Reinheit des Ausgangsmaterials u. a. werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Unsicherheitsbandbreite für den Kalkstein- bzw. Dolomitsteineinsatzfaktor wird deshalb vorsichtig mit +/- 5% abgeschätzt.

¹ Stöchiometrische Herleitung:

Molare Masse (in g/mol)	
Ca	40,07
C	12,01
O	15,99
Mg	24,3

Kalk:

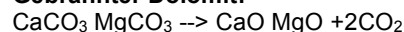


Kalksteineinsatzfaktor:

$$= (99,06 \text{ g/mol} / 56,03 \text{ g/mol}) * 1.000 \text{ kg}$$

$$= 1.768 \text{ kg}$$

Gebrannter Dolomit:



Dolomitsteineinsatzfaktor:

$$= (184,33 \text{ g/mol} / 96,35 \text{ g/mol}) * 1.000 \text{ kg}$$

$$= 1.913 \text{ kg}$$

2A4 Sodaherstellung

1. Herleitung der Aktivitätsraten

Die Aktivitätsraten aus dem ZSE wurden verwendet.

2. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Zur Herstellung von einer Tonne Soda im Solvay-Verfahren werden 1.200 kg Kalkstein eingesetzt (UBA 2001).

Tabelle 0-1: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Soda

Kalkstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in kt	2.275	2.080	1.847	1.862	1.618	1.831	1.910	1.907	1.970	1.906	1.706	1.741	1.762	1.727	1.696

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA

3. Unsicherheiten

Die Bandbreite des Kalksteineinsatzes bei der Sodaproduktion wird mit +/- 5% angenommen (grobe Schätzung).

2A7 Glasherstellung

1. Herleitung der Aktivitätsraten

Zur Berechnung der Kalksteineinsätze bei der Glasherstellung wurden die Aktivitätsraten aus dem ZSE zugrunde gelegt. Zu berücksichtigen ist der Scherbeneinsatz in der Glasindustrie, der den Einsatz von Karbonaten und damit von Emissionen verringert. Es liegen Angaben zum Scherbeneinsatz bei der Herstellung von Behälterglas von BV Glas vor. Auch im Flachglasbereich hat der Einsatz von Scherben einen erheblichen Stellenwert. Der Bundesverband Sekundärrohstoffe schätzt das Aufkommen an Flachglasscherben für das Jahr 1998 auf 495.000 t; davon wurden 60% (300.000 t) verwertet (vgl. Daten zur Umwelt 2005, S.305). Der absolute Kalksteineinsatz wird deshalb in diesem Forschungsvorhaben überschlägig abgeschätzt, indem die Produktion der jeweiligen Sorte um den Scherbeneinsatz verringert wird.¹ Zur Ermittlung des Kalksteineinsatzes wird der Scherbeneinsatz von den entsprechenden Aktivitätsraten abgezogen. Die Scherbeneinsatzmengen bei der Herstellung von Glas sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 0-1: Scherbeneinsatz in der Glasindustrie

Scherbeneinsatz Glasindustrie (in kt)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Behälterglas	2.295	2.295	2.289	2.390	2.763	2.784	2.839	2.737	2.773	2.845	2.838	2.666	2.684	2.689	2.684
Flachglas	235	231	212	238	251	265	261	281	300	271	244	279	283	263	133

Quelle: Eigene Berechnung nach Angaben BV Glas

2. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Der Kalksteineinsatz für die Glasherstellung wurde aus den Angaben des UBA zur Herleitung der Emissionsfaktoren (UBA 2006) aus den Angaben zum CaO-Anteil der einzelnen Glassorten abgeleitet. Für die Position „Glas: nicht disaggregierbar“, in der Mengen im ZSE in den NBL bis 1994 enthalten sind, wurde zur Ermittlung des Kalksteineinsatzes der Produktions-Mix von Glas in Deutschland im Jahr 1990 angesetzt, die entsprechenden Anteile der einzelnen Glassorten an der Gesamtproduktion wurde auf die Kalziumkarbonateinsätze dieser Glassorten angesetzt. Daraus wurde der Kalziumkarbonateinsatz abgeleitet. Die Anteile der einzelnen Glassorten an der Gesamtproduktion 1990 und die ermittelten spezifischen Kalziumkarbonatanteile sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

¹ Zur Verwertung von Flachglasscherben liegt – wie erwähnt – nur ein Beobachtungspunkt (1998) vor. Die Entwicklung der Fahrzeuglöschungen und der Gebäudeabgänge wurde herangezogen, um daraus hilfsweise eine Zeitreihe für die Jahre von 1990 bis 2004 abzuleiten.

Tabelle 0-2: Anteile der Glassorten an Gesamtproduktion

Glassorte	Anteil an Gesamtproduktion 1990 (in %)
Behälterglas	63
Flachglas	23
Wirtschaftsglas	2
Spezialglas	6
Glasfaser	5
Steinwolle	0

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA 2006

Tabelle 0-3: Spezifische Kalksteineinsätze in der Glasindustrie nach Sorten

Glassorte	CaO-An- teil, in %	in kg CaCO ₃ /t
Behälterglas	10,5	187,95
Flachglas	8,6	153,94
Wirtschaftsglas	5,5	98,45
Spezialglas	3,2	57,28
Glasfaser	20,5	366,95
Steinwolle	24,5	438,55
Glas: nicht disaggregierbar		178,12

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA 2006

Die daraus resultierenden Kalksteineinsätze, verknüpft mit den Aktivitätsraten, die um den Scher-
beneinsatz vermindert wurden, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 0-4: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Glas

Glassorte	Kalkstein in kt															
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
Behälterglas	269	414	395	340	314	338	313	293	291	284	288	321	271	285	267	
Flachglas	212	222	240	246	260	249	272	306	276	310	296	277	274	230	232	
Wirtschaftsglas	12	11	11	11	11	10	11	10	10	10	11	33	32	31	32	
Spezialglas	22	18	19	16	19	19	19	22	27	23	27	27	23	22	21	
Glasfaser	100	102	94	105	107	114	129	127	126	133	135	121	125	128	134	
Steinwolle	0	0	0	0	0	160	177	168	167	197	214	188	187	200	211	
Glas: nicht dis- aggregierbar	85	98	98	92	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summe	700	865	857	810	807	890	920	925	898	958	970	966	912	897	897	

Quelle: Eigene Berechnung nach UBA 2006

3. Unsicherheiten

Die Unsicherheit des Kalksteineinsatzes wird für alle Glassorten mit +/- 5% und für Glas: nicht disaggregierbar etwas höher mit +/- 7% abgeschätzt (grobe Schätzung).

2D2 Zuckerproduktion

1. Herleitung der Aktivitätsraten

Zur Berechnung der Kalksteineinsätze bei der Zuckerproduktion wurden die Aktivitätsraten aus dem ZSE zugrunde gelegt.

2. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Bei der Herstellung von Zucker werden 185 kg Kalkstein pro Tonne Zucker eingesetzt (BV Kalk). Der verwendete Kalkstein wird in eigenen Kalköfen gebrannt, das entstehende CO₂ wird während des Prozesses gebunden, entsprechend ist der Prozess nicht emissionsrelevant. In der folgenden Tabelle sind die Kalksteineinsätze bei der Zuckerproduktion zusammengestellt.

Tabelle 0-1: Kalksteineinsatz bei der Produktion von Zucker

Kalkstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in kt	686	653	690	714	707	784	844	793	834	785	796	700	728	724	849

Quelle: Eigene Berechnung nach BVK und UBA

3. Unsicherheiten

Die Bandbreite des Kalksteineinsatzes wird hier vorsichtig mit +/- 5% abgeschätzt (grobe Schätzung).

4D/5D Landwirtschaftliche und Forstwirtschaftliche Bodenkalkung

1. Herleitung der Aktivitätsraten

Angaben zu genauen Produktionsdaten von Kalkdüngern sind weder in der amtlichen Statistik noch im ZSE enthalten. Auch die Angaben des BV Kalk in der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellten Absatzstatistik können nicht herangezogen werden, weil sie nicht bilanzpostenscharf abgebildet werden und so eine exakte Zuordnung nicht möglich ist. Die Daten müssen hilfsweise hergeleitet werden. Relevant in diesem Bilanzposten sind die Düngerarten Kalkammonsalpeter und Kohlensäurer Kalk, alle anderen (Kalk-) Dünger enthalten gebrannten Kalk. Entsprechend sind nur die Emissionen aus der Anwendung dieser Dünger der Land- und Forstwirtschaft zuzuordnen. Kalkammonsalpeter, der zu den am häufigsten eingesetzten Stickstoffdüngern zählt, enthält ungefähr 22 Prozent Kalkstein (YARA 2006). Die Produktion bei YARA (früher Hydro Agri), dem einzigen Hersteller von Kalkammonsalpeter, liegt nach Angaben des Umweltbundesamtes bei etwa 1,5 Mio. t (UBA 2001). Hilfsweise werden statistische Angaben zum Inlandsabsatz von Kalkammonsalpeter und Kohlensäurem Kalk verwendet (DESTATIS, Düngemittelversorgung; Fachserie 4 Reihe 8.2), die Angaben daraus sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 0-1: Inlandsabsatz von Kalkammonsalpeter und Kohlensäurem Kalk

Düngerart	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
KAS (in kt Nährstoff)	885	858	840	993	1.091	1.048	1.002	985	993	1.058	897	851	823	835	832
KAS gesamt (in kt)	3.277	3.178	3.111	3.677	4.039	3.880	3.710	3.647	3.677	3.918	3.321	3.152	3.048	3.094	3.081
Kohlensäurer Kalk (in kt Nährstoff)	958	981	923	1.087	1.316	1.329	1.321	1.568	1.630	1.861	1.530	1.650	1.460	1.517	1.380
Kohlensäurer Kalk gesamt (in kt)	1.716	1.756	1.652	1.946	2.356	2.379	2.364	2.806	2.918	3.331	2.738	2.954	2.613	2.716	2.470

Quelle: DESTATIS und eigene Berechnungen

Für die Berechnung des Kalksteineinsatzes muss berücksichtigt werden, dass der Inlandsabsatz an Kalkammonsalpeter in der Statistik nicht in Tonnen sondern in Tonnen Nährstoff (Stickstoff) angegeben wird. Das bedeutet, die angegebene Menge stellt nur den Stickstoffanteil von Kalkammonsalpeter dar, das sind 27% von der Gesamtmenge des Inlandsabsatzes (YARA 2006). Der Kalksteinanteil von Kalkammonsalpeter (bezogen auf die Gesamtmenge des Düngers) beträgt 22% (YARA 2006). Entsprechend lässt sich der Kalksteinanteil ermitteln. Bei den Angaben zu Kohlensäurem Kalk ist zu berücksichtigen, dass in der Statistik das Wirkstoffgewicht in CaO-Tonnen angegeben ist, die in CaCO₃-Tonnen umgerechnet werden müssen. Eine Tonne CaO entspricht ca. 1,79 Tonnen CaCO₃, entsprechend wird die in der Statistik angegebene Menge mit dem Faktor 1,79 multipliziert.

2. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Unter den getroffenen Annahmen kann aus dem Inlandsabsatz von Düngern der Kalksteineinsatz ermittelt werden. In der folgenden Tabelle ist der Kalksteineinsatz bei der Bodenkalkung mit Kalkammonsalpeter und Kohlensaurem Kalk zusammengestellt.

Tabelle 0-2: Kalksteineinsatz bei der land- und forstwirtschaftlichen Bodenkalkung

Kalksteinanteil in Dünger (in kt)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Kalkammonsalpeter	721	699	685	809	889	854	816	802	809	862	731	694	671	681	678
Kohlensaurer Kalk	1.716	1.756	1.652	1.946	2.356	2.379	2.364	2.806	2.918	3.331	2.738	2.954	2.613	2.716	2.470
Summe	2.437	2.455	2.337	2.755	3.245	3.233	3.181	3.608	3.727	4.193	3.469	3.648	3.284	3.396	3.148

Quelle: Eigene Berechnung nach DESTATIS und YARA

Es wird empfohlen, den Bereich Bodenkalkung im Inventar hinsichtlich der Emissionsrelevanz zu prüfen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfolgte ein enger Informationsaustausch mit der FAL, die Daten zur Herleitung der Emissionen aus der Bodenkalkung für die Quellgruppe Land- und Forstwirtschaft im Rahmen des NIR zur Verfügung gestellt hat. Die Basis der Berechnungen bildet auch hier die Düngemittelabsatzstatistik. Allerdings werden nach gegenwärtigem Kenntnisstand diesem Bereich die Emissionen sämtlicher (Kalk-) Dünger zugerechnet, tatsächlich ist hier jedoch nur der Einsatz der CaCO₃-haltigen Dünger relevant. Daraus resultiert eine – geringe – Doppelzählung von CO₂-Emissionen, weil die Emissionen aus der Kalkherstellung (also dem Brennen von CaCO₃) für die kalkhaltigen Dünger bereits im Sektor 2A2 bilanziert werden.

3. Unsicherheiten

Der Inlandsabsatz spiegelt die tatsächlich auf den Boden gebrachte Düngermenge nur unzureichend wider, da es sich bei dieser Größe um die Lieferungen der Produzenten und Importeure an Endverbraucher im Inland handelt, Ex- und Importe bleiben hierbei unberücksichtigt. Die Bandbreite des Kalksteineinsatzes wird darum grob mit +/- 15% abgeschätzt.

6B Wasser- und Schlammbehandlung

1. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Für den Kalksteineinsatz in diesem Bilanzposten liegen weder Daten im ZSE vor noch konnten geeignete Einsatzfaktoren ermittelt werden. Zur Darstellung wird die Absatzstatistik des BV Kalk, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt wurde, herangezogen. In der Statistik des BV Kalk sind nur die Kalksteinmengen für die Stützjahre 1990, 1995 und 2004 erfasst, in der Modellierung der Gesamtbilanz werden die Zwischenjahre interpoliert. Die Kalksteineinsätze sind in der folgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 0-1: Kalksteineinsatz für die Wasser- und Schlammbehandlung

Kalkstein	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
in kt	51	54	57	59	62	62	58	54	50	47	45	43	41	38	38

Quelle: Absatzstatistik BV Kalk 2006, fehlende Jahre interpoliert (kursiv dargestellt)

Es wird vermutet, dass innerhalb der hier erfassten Kalksteinmenge auch Anteile in unbekannter Größenordnung für die Trink- und Brauchwasseraufbereitung enthalten sind.

2. Unsicherheiten

Weil keine Informationen darüber vorliegen, wie der BV Kalk die Statistik erstellt, lassen sich keine Unsicherheiten ableiten.

Übrige Sektoren

1. Herleitung des Kalksteineinsatzfaktors

Dieser Bilanzposten bildet sämtliche übrige Sektoren ab, für die keine Angaben eruiert werden konnten, aus denen der Kalksteineinsatz abgeleitet werden kann. Das sind hauptsächlich das Baugewerbe, die übrige Baustoffindustrie, Chemie u.a. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von Kalkstein in diesen Bereichen nicht emissionsrelevant ist. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Menge in diesem Bereich aus der Differenz aus dem Aufkommen (BGR, 1991, 1996, 2005) an Kalkstein und der Summe der Kalksteineinsätze sämtlicher anderer Bilanzposten (außer Keramik) gebildet. Die so ermittelten Einsätze von Kalkstein sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 0-1: Kalksteineinsatz Übrige Sektoren

Kalksteineinsatz (in kt)	1990	1995	2004
	49,5	15,5	16,9

Quelle: Eigene Berechnung nach BGR

Der Bruch von 1995 gegenüber 1990 resultiert aus den unterschiedlichen Datenquellen, die vom BGR verwendet wurden. Nach Angaben des BV Kalk wird vermutet, dass in den Angaben für 1990 der gesamte Sektor Straßen- und Wegebau enthalten ist und ab 1995 nicht mehr berücksichtigt wird.

2. Unsicherheiten

Ausgehend von den Unsicherheiten sämtlicher anderer Bilanzposten, die in diesem Sektor berücksichtigt werden müssen, wird die Unsicherheit relativ hoch mit +/- 26% angegeben (grobe Schätzung).

CRF 2.A.3: Verwendung von Kalkstein: Grafische Darstellung der Stoffströme

mit Emissionsrelevanz für Kohlendioxid (laut IPCC: Quellenprinzip)

