



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Ab- fallvermeidung und Abfallrecyc- ling der EU

(Projekt EnBa)

ACTION 7.2

Operationalisierung der thematischen
Strategie für Abfallvermeidung und –
recycling für Baurestmassen II: Ein-
führung des Lebenszyklusdenkens
auf der (Werk-) Stoffebene

Endbericht



Dieses Projekt wird im Rahmen
von LIFE+ von der Europäischen
Union finanziert

finanziert durch:

Bundesministerium für Land- u. Forstwirtschaft,
Umwelt u. Wasserwirtschaft

Land Niederösterreich Land Oberösterreich
Land Steiermark Land Kärnten



Die Ressourcen Management Agentur (RMA)
ist ein Klimabündnisbetrieb





TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Ab- fallvermeidung und Abfallrecyc- ling der EU

(Projekt EnBa)

ACTION 7.2

Operationalisierung der thematischen
Strategie für Abfallvermeidung und –
recycling für Baurestmassen II: Ein-
führung des Lebenszyklusdenkens
auf der (Werk-) Stoffebene

Endbericht

**Loréne Anger
David Clement
Kerstin Hammer**

finanziert
im Rahmen von LIFE+ von der Europäischen Union
durch das
Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und
Wasserwirtschaft
Amt der Niederösterreichischen Landesregierung
Amt der Oberösterreichischen Landesregierung
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Amt der Kärntner Landesregierung

Wien, Juni 2011

IMPRESSUM :

(Vers.1.0)

Projektsachbearbeitung:

Loréne Anger, David Clement, Kerstin Hammer

TU Wien

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft,
Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement

Karlsplatz 13/226

1040 Wien

Tel.: +43 (0)1 58801.22641

Fax: +43 (0)1 58801.22697

Email: office@iwa.tuwien.ac.at; <http://iwr.tuwien.ac.at/ressourcen>

Leadpartner :

Ressourcen Management Agentur (RMA)

Initiative zur Erforschung einer umweltverträglichen nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung

ZVR Zahl: 482686233

Argentinierstraße 48/2. Stock

1040 Wien

Tel.: +43 (0)1 913 22 52.0

Fax: +43 (0)1 913 22 52.22

Email: office@rma.at; www.rma.at

Kurzfassung

Durch die Zunahme der anfallenden Baurestmassen sowie des enormen Landschaftsverbrauchs durch den Abbau mineralischer Rohstoffe wird deren Verwertung in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Problematisch dabei ist die ökologische Qualität der zurückgewonnenen RC-Baustoffe, denn durch die Herstellung und Nutzung der Baustoffe in Gebäuden findet eine Anreicherung an Schadstoffen statt. Um zu beurteilen, ob der Einsatz mineralischer Baurestmassen zu einer Veränderung der Schadstoffkonzentration in den Baustoffen führt, muss der Lebenszyklus der verbauten Materialien berücksichtigt werden. Es zeigt sich der Trend der Anreicherung von Schadstoffen durch die Herstellungsprozesse der Baustoffe aus RC-Materialien. Somit besteht die Gefahr, den Schadstoffpool im Gebäudelager aus langfristiger Sicht zu erhöhen. Diese Annahmen werden in dieser Action am Beispiel des Betons untersucht. Um zu prüfen, ob die Gefahr einer Schwermetallanreicherung im Bauwesen besteht, wird die Entwicklung der Schwermetallbelastung im Baustoff Beton unter unterschiedlichsten Annahmen wie RC-Quoten oder auch Schadstoffeinträgen durch diverse Quellen (z.B. Zement, RC-Zuschlagsstoffe) ermittelt. Es wird also untersucht, in wie weit sich Schadstoffe durch den Einsatz von Sekundärmaterial bei der Betonherstellung anreichern. Des Weiteren wird die Nutzungsphase des Gebäudes berücksichtigt, in welcher es aus verschiedenen Quellen (Anstriche, Putze, äußere Faktoren wie Zigarettenrauch etc.) zu einer Anreicherung der Schadstoffe kommen kann. Die konkrete Fragestellung hierbei ist, ob derartige Einträge relevanten Einfluss auf die stoffliche Zusammensetzung des Abbruchmaterials haben oder sie vernachlässigt werden können.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analyse zeigen, dass die Zementherstellung der bedeutendste Faktor für den Schwermetalleintrag im Beton ist. Der Vergleich zwischen verschiedenen Zementgehalten belegt eindeutig, dass die Schwermetallkonzentration im Beton sehr stark von der Zunahme des Zementanteils abhängt. Jedoch stellt beim Baustoff Beton der Schwermetallgehalt in keinem Fall ein wirkliches Problem dar. Sogar bei der extremen Annahme eines steigenden Zementgehaltes bei jedem Recyclingzyklus überschreiten die Werte nach mehrfachen Recyclingzyklen nicht die Grenzwerte für die Deponierung auf Baurestmassendeponien. Betonabbruch ist somit vom ökologischen Standpunkt gesehen ein optimaler RC-Baustoff. Die derzeitigen Aufbereitungstechnologien sind zwar nicht imstande, im Beton gebundene Schadstoffe aus dem Materialfluss zu entfernen, wodurch bei mehrmaligem Recycling von einer Schadstoffanreicherung im Beton auszugehen ist, die Konzentrationen nehmen jedoch in den meisten Fällen sehr langsam zu. Aufgrund der relativ langen Lebensdauer von Bauwerken werden Grenzwerte der QK A+ bei den ungünstigsten Annahmen (Erhöhung des Zementanteiles, hoher Anteil an RC- Zuschlag im neuen Beton usw.) nach dem 2. – 3. Lebenszyklus überschritten, die der QK B nach dem 5. – 6. Lebenszyklus. Unter realistischen Annahmen verschiebt sich jedoch der Zeitpunkt der Überschreitung nach hinten. Somit kann man bei Beton von einem sehr hochwertigen RC- Baustoff sprechen.

Zusammenfassend zeigt das Beispiel Beton eindeutig, dass die Schadstoffkonzentrationen im Endprodukt hauptsächlich vom Anteil des RC-Zuschlags abhängen und Einträge aus der Nutzungsphase nicht relevant sind. Somit kann man bei Beton von einem sehr hochwertigen

RC-Baustoff sprechen. Diese Tatsache wird auch durch die gegenwärtigen RC-Quoten für Betonabbruch von 95-98% belegt. Vom technischen Standpunkt her zeigen viele Studien, dass Betonrecycling mittlerweile ein dem Primärbetonzuschlag gleichwertiges Produkt liefern kann.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	V
INHALTSVERZEICHNIS	I
1 EINLEITUNG	1
2 ZIELSETZUNG, FRAGESTELLUNG.....	3
3 ALLGEMEINES	5
3.1 Schwermetallbelastung im Beton.....	5
3.1.1 Zement.....	5
3.1.1.1 Ressourcen- und Energieverbrauch der Zementherstellung	5
3.1.1.2 Brennstoffe und Ersatzbrennstoffe	6
3.1.1.3 Sekundärrohstoffe in der Zementherstellung.....	6
3.1.1.4 Zementproduktion in Österreich.....	6
3.1.2 Beton.....	10
3.1.3 Schwermetalle im Beton	10
3.1.3.1 Durchschnittliche Schwermetallkonzentrationen	10
4 METHODEN.....	15
4.1 Die Stoffflussanalyse (SFA)	15
4.1.1 Einleitung.....	15
4.1.2 Ablauf einer SFA.....	16
4.1.3 Transferkoeffizient	16
5 DURCHFÜHRUNG DER STOFFFLUSSANALYSE	19
5.1.1 Ziel.....	19
5.1.2 Die Systemgrenze.....	19
5.1.3 Berücksichtigte Prozesse und Flüsse.....	19
5.1.4 Eingangswerte	21
5.1.5 Schwermetallkonzentration im Betonabbruch.....	24
5.1.6 Aufstellung eines SFA- Systems und Darstellung der Stoffflüsse	25
6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	30
6.1 Ergebnisse	30

6.1.1	<i>Vergleich der Eingangswerte</i>	30
6.1.2	<i>Schwermetallanreicherung im Recyclingbeton</i>	30
6.1.3	<i>Mehrfaches Recycling</i>	31
6.1.4	<i>Funktion für die Schwermetallanreicherung</i>	35
6.1.5	<i>Variation der Recyclingrate</i>	38
6.1.6	<i>Variation des Zementanteiles</i>	40
6.1.6.1	<i>Schadstoffkonzentrationen in Abhängigkeit des Zementanteiles</i>	43
6.1.6.2	<i>Einmalige Zunahme des Zementanteils</i>	44
6.1.6.3	<i>Abschätzung des Schwermetalleintrages in Beton während der Bau- und Nutzungsphase von Gebäuden</i>	45
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	47
8	LITERATUR.....	49
9	ANHANG	51

1 Einleitung

Die thematische Strategie für Abfallvermeidung und –recycling nennt u. a. als Maßnahme, die Lebenszyklusbetrachtung von Ressourcen einzuführen und die Wissensbasis über die Umweltwirkungen der Ressourcennutzung auszubauen. Dadurch besteht auch ein Konnex zur „Thematischen Strategie zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen“.

In Österreich stellen die Baurestmassen mit in etwa 6,8 Mio. t/a Bauabfälle den mengenmäßig bedeutendsten Abfallstrom dar. Die durchschnittliche Recyclingquote liegt bei ca. 70% (Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft 2006), wobei sich dieser im europäischen Durchschnitt hoher Wert vor allem aus den hohen Recyclingraten von Beton und Asphalt aus dem Straßenbau ergibt. Ein weiterer bedeutender Fluss ist der Sekundärbaustofffluss Baurestmassen aus dem Hochbau in den Tiefbau als Schotter- und Sandersatz. Ein wesentlich kleinerer Anteil der RC-Baustoffe aus dem Hochbau wird als Betonzuschlag oder in der Zementindustrie als Tonersatz verwertet und findet somit seinen Weg zurück in den Hochbau.

Der „Lebensabschnitt“ der verbauten Materialien und der darin enthaltenen Stoffe vom Zeitpunkt des Einbaus über den Abriss bis zum Wiederaustritt aus dem Recyclingprozess bzw. dem Verbleib in einer Deponie wird quantitativ beschrieben. Somit kann der langfristige Verbleib der Stoffe und damit die potentielle Schädigung oder Nutzbarmachung bestimmt werden. Anders als bei den meisten „werkstoffbezogenen“ Recyclingverfahren, die chemische oder physikalische Aufbereitungstechniken zur Reinigung der Werkstoffe benutzen (z.B. Schrottschmelze und Refining, Cellulosefasergewinnung aus Altpapier), ist die Abtrennung diffus eingemischter Verunreinigungen (z.B. Schwermetallhaltiger Farben) aus den mineralischen Baurestmassen nicht möglich. Die mineralische Baustoffmasse stellt überdies durch den Eintrag von Schwermetallen über abfallbürtige Brennstoffe und Zuschlagstoffe bei der Zementherstellung eine Senke für Schadstoffe dar. Es ist daher von großer Bedeutung, die Lebenszyklusbetrachtung der mineralischen Baustoffmassen d.h. die Gesamtnutzungsphase vom Steinbruch über mehrere Nutzungs- und Recyclingzyklen anzuwenden, um eine etwaige Schadstoffanreicherung erkennen zu können und diese unter „Kontrolle“ zu bringen. Es soll verhindert werden, dass langfristig große Massenströme aufgrund diffus verteilter Schadstoffe aus der Nutzung ausgeschieden und deponiert werden müssen.

Die Bedeutung der RC-Baustoffe wird mit dem zu erwartenden Anstieg des Aufkommens von Baurestmassen in den nächsten Jahrzehnten zunehmen. Um diese Ressource von den Deponien fernzuhalten, ist es notwendig, ihren Einsatz im Tiefbau wie im Hochbau zu fördern. Deshalb müssen neue Recyclingmöglichkeiten und Absatzmärkte geschaffen werden.

Zurzeit steht das Baurestmassenrecycling vor vielen Schwierigkeiten. In erster Linie sind RC-Baustoffe im marktwirtschaftlichen Konkurrenzkampf gegenüber Primärrohstoffen unterlegen. Dies beruht einerseits auf dem großen Angebot und somit niedrigem Preis in Österreich der Primärrohstoffe, andererseits auf der niedrigen Akzeptanz gegenüber RC-Baustoffe von Seiten der Bauherren hinsichtlich der Rechtssicherheit sowie bautechnischen Kriterien. Des Weiteren wird oft die geforderte Umweltqualität der Sekundärbaustoffe nicht erreicht. Die derzeit

eingesetzten Verfahren des Gebäudeabbruches und der Bauschutttaufbereitung sind nicht immer imstande, hohe Sortenreinheit und Umweltqualität zu gewährleisten. Vor allem aus wirtschaftlicher Sicht ist sachgemäßes Recycling teuer. Abbruch- und Recyclingunternehmen sind häufig nicht bereit, den dazu erforderlichen selektiven Rückbau durchzuführen. In der Aufbereitung der RC-Baustoffe werden selten Separationsverfahren mit hoher Trennleistung eingesetzt (Windsichter, Nassaufbereitung, sensorgestützte Sortierung), da diese kostenintensiv sind. Aufgrund der geringeren Akzeptanz müssten RC-Baustoffe zu einem niedrigeren Preis als Primärbaustoffe angeboten werden, was das hochwertige Recycling erschwert.

Auf der anderen Seite hat der jährliche Abbau von 100 Mio. t Schotter, Naturstein und Sand starke Auswirkungen auf die Umwelt. Veränderung des Landschaftsbildes, Störung des Lebensraumes von Fauna und Flora sowie des Wasserhaushaltes sind direkte Folgen des Abbaus mineralischer Primärressourcen. Zusätzlich kommen Lärm- und Staubbelastung und der Flächenverbrauch dazu. Angesichts dieser Effekte ist es sinnvoll, trotz der vorher genannten Schwierigkeiten, das Recycling von Baurestmassen zu fördern.

Aus ökologischer Sicht ist die Gewährleistung der Umweltqualität unumgänglich. Stör- und Schadstoffe müssen aus dem Baurestmassenfluss an den geeigneten Stellen entfernt und sachgerecht entsorgt werden.

Die gesamthafte Berücksichtigung des Lebenszyklusdenkens im Bereich des Wohnbaus ist ein sehr ambitioniertes und aufwendiges Unterfangen, welches den Rahmen dieses Projektes bei Weitem sprengen würde, bzw. ein separates Projekt bedingt. Es erscheint jedoch möglich in diesem Projekt erste Schritte in Richtung „Einführung des Lebenszyklusdenkens auf Werkstoffebene“ setzen zu können. Anhand des Beispiels RC- Beton soll das Problem aufgezeigt werden.

Da, wie die Experimente in Aktion 2 gezeigt haben, RC-Baustoffe gewöhnlich höhere Schadstoffkonzentrationen als die Erdkruste aufweisen, stellt sich die Frage, ob mehrmaliges Recycling Baustoffe schafft, die für die Umwelt und die Gesundheit schädlich sind. In Action 7.2 wird diese Frage anhand einer Modellierung von mehrmaligem Betonrecycling erörtert.

2 Zielsetzung, Fragestellung

Baustoffe haben im anthropogenen Stoffhaushalt eine bedeutende Stellung. Sie machen mengenmäßig den Großteil des anthropogenen Lagers aus, haben eine sehr lange Verweilzeit (bis zu 100 Jahren oder mehr) und sind der Nachlass für die nächsten Generationen. Auf der einen Seite bilden sie das Rohstofflager für die Zukunft, auf der anderen Seite können sie eine Quelle für zukünftige schädliche Emissionen darstellen. Aus diesem Grund muss die Bewirtschaftung der Baurestmassen unter dem Aspekt der Ressourcenschonung sowie unter dem des Umweltschutzes erfolgen.

Action 7.2 beschäftigt sich hauptsächlich mit der Qualität der Recyclingbaustoffe. Als exemplarisches Beispiel werden Schwermetallgehalte für Recyclingbeton bestimmt. Folgende Fragen werden beantwortet:

- (1) In welcher Lebenszyklusphase reichern sich Schwermetalle im Beton an?
- (2) Soweit sich Schwermetalle anreichern, inwiefern ist Betonrecycling aus ökologischer Sicht sinnvoll?
- (3) Inwiefern werden gesetzliche Grenzwerte für die Deponierung und für die Wiederverwertung überschritten?
- (4) Wie wirkt sich mehrmaliges Betonrecycling auf den Schwermetallgehalt aus?

3 Allgemeines

Beton ist ein formbarer Baustoff, der aus einem Gemisch aus Zement, Gesteinskörnung (Zuschlag) und Wasser hergestellt wird und außerdem Zusatzstoffe und Zusatzmittel enthalten kann. Es handelt sich also um ein System aus zwei Komponenten. Prinzipiell kann man Betone mit verschiedenen Bindemitteln herstellen: mit Zement (und Wasser), mit Bitumen (für Asphaltbeton) oder Kunststoffen (Polymerbeton). Im Allgemeinen denkt man aber, wenn von Beton die Rede ist, an den wichtigsten Beton, den Zementbeton. Der Zement verkittet die Zuschlagteilchen miteinander. Der Frischbeton wird an Ort und Stelle produziert oder als Transportbeton angeliefert und in eine vorgefertigte Form (Schalung) eingebracht, verdichtet und gegen das Austrocknen geschützt. Ist der Beton ausreichend erhärtet wird die Schalung entfernt. Die zweite Möglichkeit ergibt sich durch die Herstellung von Fertigteilen, die zum Bauwerk transportiert werden und dort am entsprechenden Ort eingebaut werden. In diesem Bericht wird ausschließlich Zementbeton betrachtet.

3.1 Schwermetallbelastung im Beton

Schwermetallanreicherung findet in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus von Beton statt, am stärksten jedoch während der Zementherstellung. Der Eintrag findet entweder über Zusatzstoffe bei der Produktion von Zementklinker oder über die Brennstoffe statt. Da die Zementherstellung ein energieintensives Verfahren ist, war die Zementindustrie einer der ersten Sektoren, der Ersatzbrennstoffe einsetzte. Diese können höhere Schwermetallkonzentrationen enthalten und somit zur Schwermetallbelastung im Beton entscheidend beitragen.

3.1.1 Zement

Zement besteht aus den Rohstoffen Kalk (CaO) (zwischen 77 und 83%), der aus Kalkstein, Siliziumdioxid (SiO_2) (13 bis 14%), Aluminiumoxid (Al_2O_3) (2 bis 4%) und Eisenoxid (Fe_2O_3) (1,5 bis 3%) gewonnen wird, welche im Ton enthalten sind. Nach dem Abbau werden Kalkstein und Ton miteinander vermischt und bei ca. 1.450°C zu Zementklinker gebrannt. Der Klinker wird abgekühlt, in einer Kugelmühle zermahlen und dabei mit Gips ($\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oder Anhydrid (CaSO_4) (1 bis 5%) zum fertigen Zement vermischt. Klinker ist also der gebrannte Bestandteil des Zements, der für die Aushärtung unter Beimengung von Wasser zuständig ist.

3.1.1.1 Ressourcen- und Energieverbrauch der Zementherstellung

Die Zementherstellung ist ein rohstoff- und energieintensiver Prozess. Für 1 t Zement werden zwischen 1,2 und 1,6 t Rohstoffe benötigt, in erster Linie Kalkstein und Ton. Die dafür erforderliche Energie beträgt zwischen 3.200 und 4.200 kJ pro Tonne gebranntem Klinker. Zur Zeit werden weltweit jährlich 2 Mrd. t Zement verbraucht (Lafarge 2007).

3.1.1.2 Brennstoffe und Ersatzbrennstoffe

Für das Brennen des Klinkers können feste (Kohle), flüssige (Erdöl) oder gasförmige (Erdgas) Brennstoffe eingesetzt werden. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen werden heute verstärkt Ersatzbrennstoffe eingesetzt, vor allem Abfälle aus Landwirtschaft und Industrie. Zudem werden feste Siedlungsabfälle mitverbrannt, die ansonsten teuer in Müllverbrennungsanlagen (MVA) thermisch behandelt und anschließend auf Deponien entsorgt werden müssten.

3.1.1.3 Sekundärrohstoffe in der Zementherstellung

Der Ersatz von Klinker im Zement durch latent hydraulische Zusatzstoffe (Senkung des Klinker/Zement – Faktors) wirkt sich vor allem positiv auf die Treibhauswirksamkeit der Zementherstellung aus (M. Achternbosch, Ch. Kupsch et al. 2005). Bei einer Klinkersubstitution durch 30% Zusatzstoffe können 230 kg CO₂ eingespart werden, was einer CO₂ – Reduktion von 27% gegenüber einem Zement ohne Zusatzstoff entspricht. Zusatzstoffe können gewonnen werden aus:

1. Hochofenschlacken aus der Stahlindustrie
2. Flugaschen aus Kohlekraftwerken
3. Kalksteingranulat
4. Künstliche oder natürliche Puzzolane.

Je nach Zusammensetzung und Anteil an Zusatzstoffen, werden Zemente unterschiedlich bezeichnet:

CEM I: ist die Bezeichnung für Portlandzement ohne Zusatzstoffe

CEM II: ist Portlandzement mit unterschiedlichen Zusatzstoffen (Aschen, Kalksteingranulat)

CEM III: bezeichnet Hochofenzement

CEM IV: ist Puzzolanzement

CEM V: steht für Kompositzement

In Österreich wurden im Jahr 2006 Zemente nach folgenden Anteilen eingesetzt: 11% CEM I, 85% CEM II, 2% CEM III, 2% andere (Vereinigung der österreichischen Zementindustrie 2007). Der Gesamtanteil an Zusatzstoffen als Klinkerersatz betrug weltweit 2005 und 2006 15% (Lafarge 2010), während der in Österreichischen Zementwerken eingesetzte Anteil 19% beträgt (Mauschitz 2008). Zusatzstoffe können auch aus Baurestmassen gewonnen werden, z.B. durch Einsatz von Ziegelsplitt als Tonersatz.

3.1.1.4 Zementproduktion in Österreich

Für die Darstellung und Bilanzierung der Zementproduktion durch die Methode der SFA werden zwei Prozesse berücksichtigt. Der erste besteht aus dem Brennen des Rohmehls im Zementofen, während der zweite aus dem Zermahlen und Vermischen mit Gips oder Anhydrid besteht. Eingangsgüter im ersten Prozess sind das Rohmehl, konventionelle Brenn-

stoffe und Ersatzbrennstoffe. Es entstehen Luftemissionen und der Klinker. Dieser wird im zweiten Prozess mit Zumahlstoffen, Gips oder Anhydrid zu Zement vermischt. Bei keinem der beiden Prozesse entstehen Abfälle. Der nächste Prozess ist die Betonherstellung. Der Zement wird mit Wasser, Zuschlagstoffen und Zumahlstoffen zu Beton vermischt. Abbildung 1 zeigt schematisch vereinfacht den Prozess der Zement- und Betonherstellung. Der Vergleich zwischen verschiedenen Quellen (Mauschitz 2008), (Vereinigung der österreichischen Zementindustrie 2007), (Fehringer, Rechberger et al. 1999) ergibt ähnliche Anteile für die verschiedenen Materialien, die zur Zement- und Betonproduktion eingesetzt werden. In dieser Studie werden die Werte des Berichtes über die Emissionen der Anlagen der österreichischen Zementindustrie herangezogen (Mauschitz 2008).

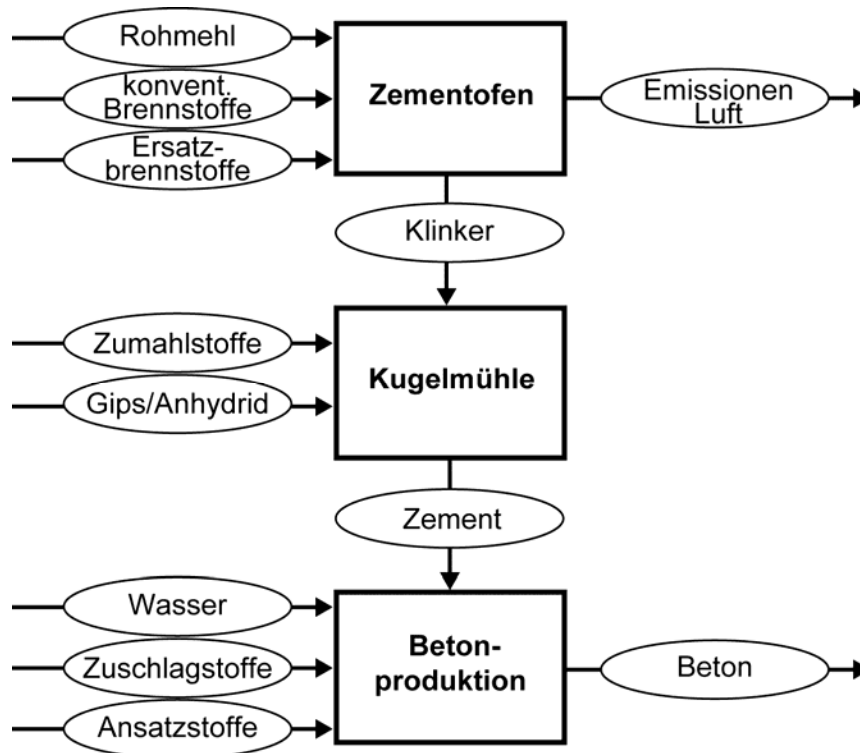


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses für Beton

In Tabelle 1 sind die Transferkoeffizienten des Zementofens für die Emissionen von vier Schwermetallen in die Luft angeführt.

Tabelle 1: Transferkoeffizienten des Zementofens

	Transferkoeffizienten für Luftemissionen
Cd	0,000208
Hg	0,40244
Pb	0,000351
Zn	0,000111

Tabelle 2: Verhältnis der In- und Outputstoffe der österreichischen Zementindustrie 2007 (Mauschitz 2008).

Input	%
Rohmehl	121,05
<i>Davon Sekundärrohstoffe</i>	<i>9,1</i>
Zumahlstoffe	19,23
Brennstoffe (tot.)	11,74
<i>Davon Ersatzbrennstoffe</i>	<i>6,43</i>
Output	
Zement	100
Emissionen Luft	52,02

Die Werte weichen leicht von Angaben anderer Quellen ab. So gibt z.B. (Lafarge 2007) für den weltweiten Anteil an Ersatzbrennstoffen 12% an, sowie einen höheren Verbrauch an Rohmehl pro Tonne Zement (160%). Abweichungen gibt es auch bei der Angabe des Gipsanteiles. Während bei (Mauschitz 2008) der verwendete Gipsanteil in Österreich 1,5% ausmacht, geben (Ciments Calcia Italcementi Group) und (Lafarge 2007) dafür Werte zwischen 3 und 5% an.

Tabelle 3: Mengen und Anteile der in Österreich für die Zementproduktion eingesetzten Materialien (Mauschitz 2008).

	Produktion 2007	Anteil in Bezug auf Zement
	10 ³ t/a	%
Rohmehl	6298	121,05
Klinker	3992	76,74
Zement	5203	100
Konventionelle Brennstoffe		
Kohle	149	2,86
Braunkohlestaub	82	1,57
Heizöl L (0,2m% S)	0,6	0,01
Heizöl S (1,0 – 3,5m% S)	16	0,29
Erdgas	4	0,08
Petrolkoks	18	0,34
Andere	10	0,18
Gesamt	279,6	5,34
Ersatzbrennstoffe		
Altreifen	32	0,61
Kunststoffabfälle	164	3,14
Altöle	24	0,46
Lösungsmittel	15	0,29
Landwirtschaftliche Abfälle	3	0,05
Abfälle der Papierindustrie	36	0,69
Andere	61	1,18
Gesamt	335	6,43
Zumahlstoffe		
Schlacken	39	0,76
Gießereisand	28	0,53
Andere	407	7,82
Gesamt	474	9,1
Zementzusatz (Abbinderegler)		
Hochofenschlacke	709	13,62
Gips	76	1,47
Andere	72	1,39
Gesamt	1000	19,23

3.1.2 Beton

Beton besteht aus einer Mischung aus Zement, Wasser und Zuschlagstoffen, welche bei speziellen Ansprüchen dem Beton zugefügt werden können. (Boeraeve 2010), (Rosenberger 1997), (Weil 2002), (Stengel 2007) wurden für die Ermittlung der durchschnittlichen Zusammensetzung (Tabelle 4) von Beton in Europa herangezogen.

Tabelle 4: Durchschnittliche Zusammensetzung von Beton in Europa

	% im Durchschnitt
Wasser	7,61
Zuschlagstoffe	78,26
Zement und Zusatzstoffe	14,13
Beton	100

3.1.3 Schwermetalle im Beton

Der Einsatz von Recyclingbaustoffen und Ersatzbrennstoffen wird derzeit gefördert und als ökologisch vorteilhaft betrachtet. Dadurch werden einerseits Abfallprodukte als Rohstoffe aufgewertet und andererseits Primärrohstoffe eingespart. Für deren Einsatz werden an die Ersatzbrennstoffe folgende Bedingungen gestellt (Trezza und Scian 2004):

1. Die Emissionen der Zementproduktion dürfen durch die Verwendung von Ersatzbrennstoffen nicht ansteigen
2. Die Qualität des Zements und seine Umweltverträglichkeit dürfen in keinem Fall abnehmen
3. Die Verwendung von Ersatzbrennstoffen soll keine Erhöhung der Kosten bewirken, sondern kostensparend sein.

Ersatzbrennstoffe und Sekundärrohstoffe beinhalten häufig erhebliche Mengen an Schwermetallen (Guo und Eckert 1996). Diese werden zusammen mit den im Rohmehl enthaltenen Schwermetallen zum Großteil bei 1450 °C in den kristallinen Strukturen des Klinkers gebunden. Mehrere Autoren sehen die Zementproduktion als einen geeigneten Prozess zur Schwermetallstabilisierung (Trezza und Scian 2004) (Zhanga und Won 2007). Weiters haben sich zahlreiche Autoren mit der Freisetzung und Auswaschung von Schwermetallen aus Beton in die Natur beschäftigt. Diese Prozesse sind jedoch noch nicht vollständig erfasst.

3.1.3.1 Durchschnittliche Schwermetallkonzentrationen

Für die Untersuchung des Lebenszyklus von Beton wurde die Anzahl der betrachteten Schadstoffe auf 4 Schwermetalle reduziert. Da es sich bei dieser Aktion um das Verhalten der Schwermetalle bei Anreicherungsprozessen handelt, ausgehend von konstanten Belastungen der Rohstoffe, können 4 ausgewählte Schwermetalle diese ausreichend beschreiben. Im folgenden Abschnitt wird die Schwermetallbelastung von Zement und dessen Ausgangsstoffen genauer dargestellt. Tabelle 5 führt mittlere Schwermetallgehalte für österreichischen

Zement an (Vereinigung des österreichischen Zementindustrie 2010) und setzt diese in Relation zur mittleren Konzentration des Elements in der Erdkruste (Brunner und Stämpfli 1993a).

3.1.3.1.1 Zement

Tabelle 5: Durchschnittliche Schwermetallkonzentrationen im Zement für Österreich (Mittelwert aus 70 Stichproben)

Metall	Zement (Durchschnitt)	Erdkruste	Verhältnis Ze- ment/Erdkruste
	mg/kg	mg/kg	
Cd	0,4	0,1	4
Hg	0,01	0,02	0,5
Pb	19	13	1,46
Zn	201	70	2,87

Eine ähnliche Studie aus Deutschland zeigt Schwermetallkonzentrationen in derselben Größenordnung (Verein Deutscher Zementwerke 2001):

Tabelle 6: Durchschnittliche Schwermetallkonzentrationen im Zement für Deutschland (Mittelwert aus 415 Stichproben)

Metall	Zement (Durchschnitt)	Erdkruste	Verhältnis Ze- ment/Erdkruste
	mg/kg	mg/kg	
Cd	0,4	0,1	4
Hg	0,06	0,02	3
Pb	17	13	1,31
Zn	192	70	2,74

3.1.3.1.2 Konzentrationen der einzelnen Komponenten des Zements

Eine Studie, ausgeführt von der TU Wien und von der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) im Jahre 1999 (Projekt PRIZMA), zeigt folgende Konzentrationen für die Komponenten des Zements:

Tabelle 7: Durchschnittliche Konzentrationen von Cd, Hg, Pb und Zn in Österreich für Boden, Schotter, Rohmehl und Klinker (Fehring, Rechberger et al. 1999)

	Cd mg/kg	Hg mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
Hauptkomponenten				
Boden	0,29	0,15	40	94
Schotter	0,11	0,1	15	72
Rohmehl	0,5	0,5	15	37
Klinker	0,37	0,25	32	72
Zumahlstoffe				
Gips	0,14	0,18	1,5	23
Flugasche	2,5	0,18	88	270
Hochofenschlacke	0,5	0,1	12	280
Gießereisand	0,5	0,6	73	195
Ersatzbrennstoffe				
Altreifen	5	0,001	250	16000
Kunststoffabfälle	6	0,6	92	114
Altöle	2	0,1	200	600
Lösungsmittel	10	0,1	200	400
Abfälle der Papierindustrie	1,5	0,3	12	200
Andere	5	0,05	100	200
konventionelle Brennstoffe				
Kohle	1	0,5	80	85
Braunkohlestaub	0,3	0,2	5	25
Petrolkoks	1		50	100
Heizöl S	1	0,006	10	20

3.1.3.1.3 Sekundärrohstoffe (als Zuschlagstoffe)

Aus einer Literaturrecherche wurden die in Tabelle 8 angeführten mittleren Schwermetallkonzentrationen für Abbruchmaterialien ermittelt {Walker, 1994 #393}, {Brunner, 1993 #1}, {Sindt, 1997 #394}, {Townsend, 2004 #74}, {Sieber Cassina + Partner AG, 1991 #395}.

Tabelle 8: Mittlere Schwermetallkonzentrationen für Abbruchmaterialien

	Mittelwerte aus Literatur
	mg/kg
Cd	0,7
Hg	0,14
Pb	187,73
Zn	342,47

Da diese Werte Abbruchmaterialien an sich beschreiben und nicht reine Betonfraktionen, fallen diese eher hoch aus. Tabelle 9 zeigt die im Rahmen von Action 2 ermittelten Schwermetallkonzentrationen für verschiedene Betonbauteile in Abbruchgebäuden.

Tabelle 9: Mittelwerte aus Analysen für Betonbauteile in Abbruchgebäuden (Action 2)

	Mittelwerte aus Action 2
	mg/kg
Cd	1,1
Hg	<3
Pb	8,9
Zn	30,7

4 Methoden

4.1 Die Stoffflussanalyse (SFA)

4.1.1 Einleitung

Innerhalb der Anthroposphäre verlaufen Prozesse (wirtschaftliche und soziale Aktivitäten), die natürliche Rohstoffe und Energie verbrauchen um eine Vielzahl an Gütern zu produzieren. Im Zuge dieser Prozesse entstehen Schadstoffflüsse, die zu einer Dispersion oder Akkumulation dieser Stoffe in der Umwelt führen. Die durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen Schadstoffflüsse sind meistens viel höher als die natürlichen geogenen Flüsse wodurch sie eine Gefahr für die Umwelt und den Menschen darstellen. Die SFA ermöglicht es, diese Flüsse zu quantifizieren und darzustellen.

Die Methode der Stoffflussanalyse ist ein Werkzeug zur Beschreibung und Analyse beliebig komplizierter Systeme und dient gemäß ÖNORM S 2096-1 (ÖNORM, 2005a) zur Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Stoffen in einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System sowie der Bilanzierung der Stoffe innerhalb dieses Systems. Sie erlaubt die Darstellung und Modellierung von Betrieben, privaten Haushaltungen, von Städten und Regionen. Der Vorteil der Stoffflussanalyse ist, dass ein komplexes System auf die für eine Fragestellung relevanten Güter und Prozesse reduziert wird. Damit werden die Grundlagen geschaffen, um beispielsweise zielgerichtete Maßnahmen abzuleiten oder um Szenarien zur Optimierung zu vergleichen. Die SFA ist somit eine Methode, um Stoffflüsse des anthropogenen Haushaltes sowie der natürlichen Umwelt zu ermitteln, darstellen und evaluieren. Herkunft, Lagerbildung, Umsatz, Verteilung und letztlich auch der „Export“ von Gütern und Stoffen in weitere Systeme können bestimmt und dargestellt werden. Vor allem eignet sich die SFA als Instrument des Stoffflussmanagements. Sie ermöglicht es, kritische Stoffflüsse zu ermitteln und Maßnahmen für deren Umlenkung zu beurteilen (Office fédéral de l'environnement des forêts et des paysages 1996).

Die SFA unterscheidet zwischen Gütern (z.B. Beton, Zement, usw.) und Stoffen (Cd, Pb, Zn). Güterflüsse können direkt kontrolliert werden, während Stoffflüsse meist über Güterflüsse beeinflusst werden. Z.B. kann der Schwermetallfluss der durch Klärschlammausbringung im Boden zu einer Akkumulation führt, nur über den Güterfluss „Klärschlamm“ beeinflusst werden. Zur Berechnung muss jedoch die Konzentration von Stoffen, vor allem von Schadstoffen, in Güterflüssen bekannt sein. Je höher der Gehalt eines bestimmten Stoffes in einem Gut, desto geringer muss der Fluss desselben gehalten werden um seine ökologische Verträglichkeit zu gewährleisten.

Die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Stoffflussanalyse ist nicht linear, der Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte erfolgt vielmehr iterativ und ist im Regelblatt 514 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes detailliert beschrieben (ÖWAV, 2003) sowie in der am 01.01.2005 veröffentlichten ÖNORM S 2096, Teil 1 und Teil 2 (ÖNORM, 2005a; 2005b) normativ geregelt.

4.1.2 Ablauf einer SFA

Der erste Schritt einer SFA ist die Problem- und Zieldefinition. Eine klare Darstellung des zu untersuchenden Problems und der zu beantwortenden Fragen ist Voraussetzung für die Durchführung einer SFA. Als zweiter Schritt werden die Systemgrenzen festgelegt, durch die das System zeitlich und räumlich abgegrenzt wird. Räumlich können Systemgrenzen geographisch oder thematisch (ein Industriezweig, eine Anlage, usw.) definiert sein. Zeitlich erstrecken sie sich meistens über ein Jahr. Nun werden die, das System betreffenden Prozesse dargestellt. In Prozessen werden Güter und Stoffe umgewandelt, transportiert oder gelagert. Güter werden in der SFA als „Güterflüsse“ dargestellt. Nach Erstellung der Güterbilanz werden die zu untersuchenden Stoffe festgelegt. Diese werden quantifiziert und falls notwendig mit Unsicherheiten versehen. Diese Schritte müssen nicht der Reihe nach durchgeführt werden; die SFA sollte iterativ angepasst und optimiert werden. Die SFA sollte dauernd überprüft werden, und falls notwendig, den Projektzielen angepasst werden (Brunner und Rechberger 2004).

4.1.3 Transferkoeffizient

Die zentrale Größe in einer MFA ist der Transferkoeffizient. Der Transferkoeffizient beschreibt die Aufteilung eines Materials in einem Prozess und ist für jeden Output eines Prozesses definiert (Brunner und Rechberger 2004). Er beschreibt den Anteil eines bestimmten Stoffes / Materials, der durch einen bestimmten Fluss den Prozess verlässt.

$$k_{rz} = \frac{F_{rz}}{\sum F_M} \quad (\text{Formel 1})$$

wobei

k_{rz} = Transferkoeffizient für best. Stoff / Material von Bilanzprozess r nach Zielprozess z

F_{rz} = Stoff- / Materialanteil von Bilanzprozess r nach Zielprozess z

F_M = Input- Fluss in Bilanzprozess r (von Herkunftsprozess h) für best. Stoff / Material

Anhand von Abbildung 2 wird beispielsweise der Transferkoeffizient einer mobilen Aufbereitungsanlage für den Stoff Eisen in die mineralische Fraktion >32 mm erklärt.

Der Transferkoeffizient wird wie folgt berechnet:

$$k_{1e} = \frac{F_e}{F_1 + F_2} \quad (\text{Formel 2})$$

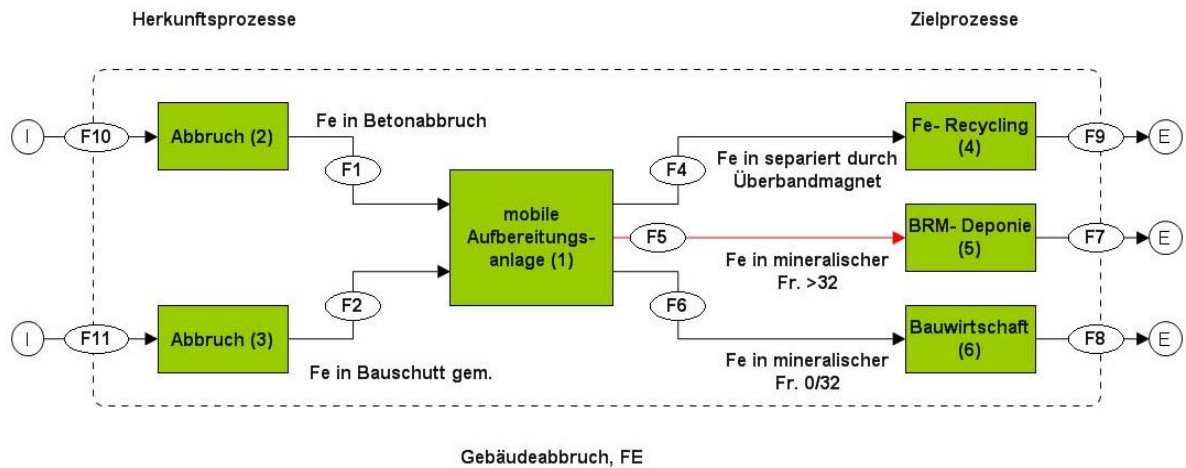


Abbildung 2: Transferkoeffizient einer mobilen Aufbereitungsanlage für Eisen.

Der Transferkoeffizient gibt die Leistungsfähigkeit von Sortieranlagen und –prozessen an. Er bestimmt, ob und zu welchem Anteil Stoffflüsse in die gewünschten Bahnen gelangen oder ob sie als Emissionen in die Umwelt gelangen.

5 Durchführung der Stoffflussanalyse

5.1.1 Ziel

Ziel der SFA ist die Analyse der Stoffflüsse von 4 Schwermetallen (Cd, Pb, Hg und Zn) im Beton und die Darstellung der Veränderung ihrer Konzentrationen im Laufe eines mehrmaligen Recyclings des Betons.

5.1.2 Die Systemgrenze

Die räumliche Systemgrenze ist das Staatsgebiet von Österreich, die zeitliche das Jahr 2007. Die SFA wird für 2 Mio. t Beton durchgeführt, die im Jahr 2007 abgebrochen wurden.

5.1.3 Berücksichtigte Prozesse und Flüsse

Im Lebenszyklus von Beton sind sechs Prozesse relevant:

1. Zementproduktion
2. Betonherstellung
3. Bauwerkerrichtung
4. Nutzungsphase
5. Abbruch
6. Verwertung

Bei der Zementherstellung können Schwermetalle über 4 Flüsse eingetragen werden: sie können im Rohmehl, in den Zuschlagstoffen sowie in konventionellen und Ersatzbrennstoffen enthalten sein. Die eingetragenen Schwermetalle werden über zwei Flüsse aus dem Prozess ausgetragen: im Zement und über die Luftemissionen. Der Prozess „Betonherstellung“ hat 5 Importflüsse, über die Schwermetalle eingetragen werden können. Diese können nämlich im Zement sowie in Zuschlag- und Zusatzstoffen enthalten sein.

Während der Nutzungsphase von Gebäuden können in den Beton ebenfalls Schwermetalle eingetragen werden. Ein Beispiel hierfür ist Cadmium aus dem Zigarettenrauch, welches in die Bausubstanz eindringen kann.

Nach dem Abbruch wird der Großteil des Betonabbruchs aufbereitet und verwertet. Die Recyclingquote in Österreich beträgt 95% (siehe Aktion 1). Einsatzgebiet ist vor allem der Tiefbau, wo Betonabbruch als Schotterersatz wieder eingesetzt wird. In dieser Studie jedoch wird davon ausgegangen, dass Abbruchbeton mit einer sehr hohen Recyclingquote (95%) im Hochbau als Zuschlagstoff für Beton eingesetzt wird. Dieses „Extrem Szenario“ soll es ermöglichen, die Umweltqualität des Baustoffes Beton bei mehrmaligem Recycling und massivem

Einsatz von Recyclingzuschlag in der Bauwirtschaft zu bewerten. Zusammenfassend aufgelistet sind die Prozesse, sowie die In- und Outputflüsse des zu untersuchenden Systems in „Recycling von Betonabbruch im Hochbau, Österreich 2007“.

Tabelle 10: Prozesse und Flüsse des Systems „Recycling von Betonabbruch im Hochbau, Österreich 2007“

Prozess	Inputflüsse	Outputflüsse
Zementproduktion	Rohmehl	Emissionen
	Konventionelle Brennstoffe	Zement
	Ersatzbrennstoffe	
	Zumahlstoffe	
	Zusatzstoffe	
Betonherstellung	Zement	Frischbeton
	Zuschlagstoffe primär	
	Zuschlagstoffe sekundär	
	Zusatzstoffe	
	Wasser	
Bau- und Nutzungsphase	Baustoffe	Beton
	Beton Frisch	
Gebäudeabbruch	Beton 2	Betonabbruch
		Beton- Deponie
Verwertung	Recyclingbeton	Recyclingbeton Tiefbau
		Recyclingbeton Hochbau

Der Prozess „Zementproduktion“ wird durch ein Subsystem, welches wiederum aus zwei Prozessen besteht, dargestellt: der Zementofen und die Kugelmühle.

Tabelle 11: Prozesse und Flüsse des Subsystems „Zementproduktion“

Prozess	Inputflüsse	Outputflüsse
Zementofen	Rohmehl	Emissionen
	Konventionelle Brennstoffe	Klinker
	Ersatzbrennstoffe	
Kugelmühle	Klinker	Zement
	Zumahlstoffe	
	Zusatzstoffe	

5.1.4 Eingangswerte

Im Jahr 2007 fielen 2 Mio. t Betonabbruch an. Davon wurden 95% verwertet (siehe Aktion 1). Der Einsatz von Betonabbruch als Zuschlagstoff ist in Österreich zurzeit vernachlässigbar; in der Modellierung wird jedoch davon ausgegangen, dass 95% dieses Materials als Zuschlagstoff in die Betonproduktion eingesetzt wird. führt die Mengen an Produktionsgütern an bezogen auf den im Jahr 2007 abgebrochenen Beton.

Tabelle 12: Güter für die Produktion von 2.000.000 t Beton (Menge, die im Jahr 2007 abgebrochen wurde (Fehring, Rechberger et al. 1999))

	Prozentueller Anteil bezogen auf Beton	Menge
	%	t/a
Rohmehl	17,1	342.081
Klinker	10,84	216.865
Zement	14,13	282.600
Wasser	7,61	152.200
Zuschlagstoffe	78,26	1.565.200
Beton	100	2.000.000
Konventionelle Brennstoffe		
Kohle	0,4	8.084
Braunkohlestaub	0,22	4.444
Heizöl L (0,2 m% S)	0	31
Heizöl S (1,0-3,5 m% S)	0,04	829
Erdgas	0,01	219
Petrolkoks	0,05	960
Andere	0,03	520
Gesamt	0,75	15.087
Ersatzbrennstoffe		
Altreifen	0,09	1.715
Kunststoffabfälle	0,44	8.887
Altöle	0,06	1.293
Lösungsmittel	0,04	824
Landwirtschaftliche Abfälle	0,01	150
Abfälle aus der Papierindustrie	0,1	1.957
Andere	0,17	3.339
Gesamt	0,91	18.166
Zumahlstoffe		
Schlacken	0,11	2.134
Gießereisand	0,08	1.509
Andere	1,1	22.087
Gesamt	1,29	25.730
Zusatzstoffe		
Hochofenschlacke	1,92	38.497
Gips	0,21	4.149
Flugasche	0,39	7.780
Andere	0,2	3.924
Gesamt	2,72	54.349

Für die Berechnung der Stoffflüsse werden nun Stoffkonzentrationen in den berücksichtigten Gütern festgelegt und daraus die Mengen (Fracht) errechnet. (Fehring, Rechberger et al. 1999).

Tabelle 13: Mengen an Cd, Hg, Pb und Zn in den Gütern für die Produktion vom im Jahre 2007 abgebrochenen Beton, nach (Fehring, Rechberger et al. 1999).

	Cd	Hg	Pb	Zn
	t/a	t/a	t/a	t/a
Rohmehl	0,17	0,17	5,13	12,66
Klinker	0,08	0,05	6,94	15,61
Zement				
Wasser				
Zuschlagstoffe	0,17	0,16	23,48	112,69
Beton	0,3	0,22	32	150
Konventionelle Brennstoffe				
Kohle	0,01	0	0,65	0,69
Braunkohlestaub	0	0	0,02	0,11
Heizöl L (0,2 m% S)	-	-	-	-
Heizöl S (1,0-3,5 m% S)	0	-	0,01	0,02
Erdgas	-	-	-	-
Petrolkoks	0	-	0,05	0,1
Andere				
Gesamt	0,01	0	0,73	0,91
Ersatzbrennstoffe				
Altreifen	0,01	0	0,43	27,45
Kunststoffabfälle	0,05	0,01	0,82	1,01
Altöle	0	0	0,26	0,78
Lösungsmittel	0,01	0	0,16	0,33
Landwirtschaftliche Abfälle				
Abfälle aus der Papierindustrie	0	0	0,02	0,39
Andere	0,02	0	0,33	0,67
Gesamt	0,09	0	2,03	30,63
Zumahlstoffe				
Schlacken				
Gießereisand	0	0	0,11	0,29
Andere				
Gesamt	0	0	0,11	0,29
Zusatzstoffe				
Hochofenschlacke	0,02	0	0,46	10,78
Gips	0	0	0,01	0,1
Flugasche	0,02	0	0,68	2,1
Andere				
Gesamt	0,04	0	1,15	12,98

5.1.5 Schwermetallkonzentration im Betonabbruch

Da im Bauwerk der Beton im Verbund mit anderen Materialien steht (Anstrich, Verputz, Fugendichtungen), beeinflussen diese die Eigenschaften des Abbruchmaterials bezüglich des Schwermetallgehalts. Der durch andere Baustoffe bedingte Schwermetallgehalt des Betonabbruchs wird ermittelt, indem Werte für Abbruchmaterialien aus der Literatur mit den Resultaten einer SFA, die den Eintrag durch die Bau- und Nutzungsphase nicht berücksichtigt, verglichen werden. Die Differenz zwischen beiden Werten stellt den Schwermetalleintrag während der Bau- und Nutzungsphase dar.

Die SFA wird für einen Betonlebenszyklus gerechnet. Folgende Quellen wurden für die Ermittlung der Werte des Abbruchmaterials herangezogen: (Brunner und Stämpfli 1993b), (Townsend, Tolaymat et al. 2004), (Walker und Dohmann 1994), (Sindt, Ruch et al. 1997), (Sieber cassina + partner AG 1991). Die Ergebnisse aus Action 2 wurden für diesen Vergleich nicht herangezogen, da sie teilweise unter den Werten für Frischbeton liegen. Dies zeigt, dass Schwermetallkonzentrationen im Beton und vor allem der durch die Nutzungsphase bedingte Eintrag mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet ist.

Tabelle 14: Schätzungen für den Eintrag an Cd, Hg, Pb und Zn während der Bau- und Nutzungsphase von Gebäuden

	Mittelwert aus der Literatur für Abbruchmaterial	Berechnung mittels SFA	Differenz*	Mittelwerte aus Aktion 2
	t/kg	t/kg	t/kg	t/kg
Cd	0,7	0,24	0,46	1,1
Hg	0,14	0,14	0	<3
Pb	187,73	16,31	171,42	8,9
Zn	342,47	85,08	257,39	30,7

*entspricht Eintrag durch Bau- und Nutzungsphase

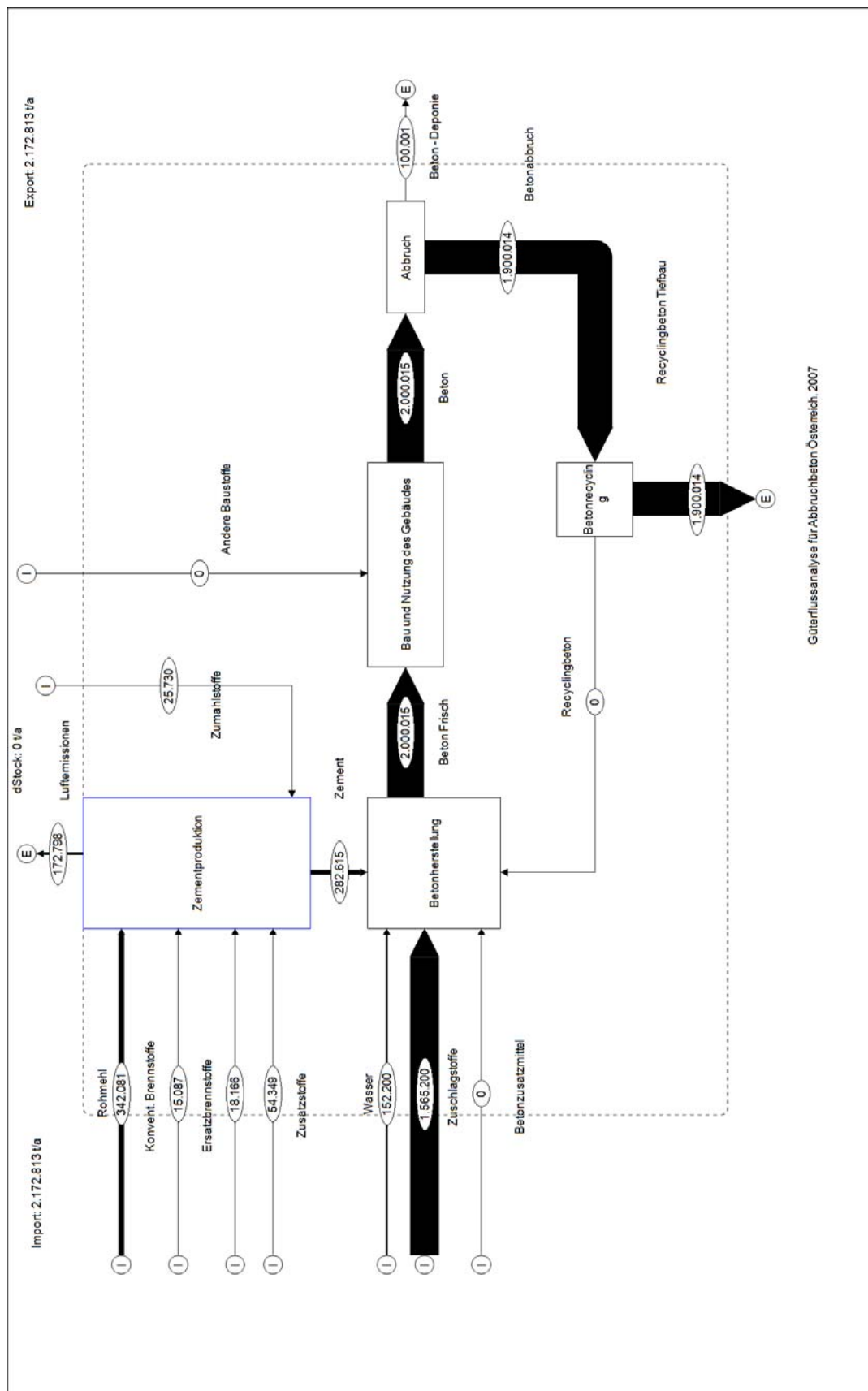
	Mittelwert aus der Literatur für Abbruchmaterial	Berechnung mittels SFA	Differenz (Eintrag durch Bau- und Nutzungsphase)	Mittelwerte aus Aktion 2
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cd	0,7	0,24	0,46	1,1
Hg	0,14	0,14	0,00	<3
Pb	187,73	16,31	171,42	8,9
Zn	342,47	85,08	257,39	30,7

5.1.6 Aufstellung eines SFA- Systems und Darstellung der Stoffflüsse

Die bisher angeführten Daten werden nun in einer SFA eingesetzt. Für die Modellierung wird das Programm STAN verwendet.

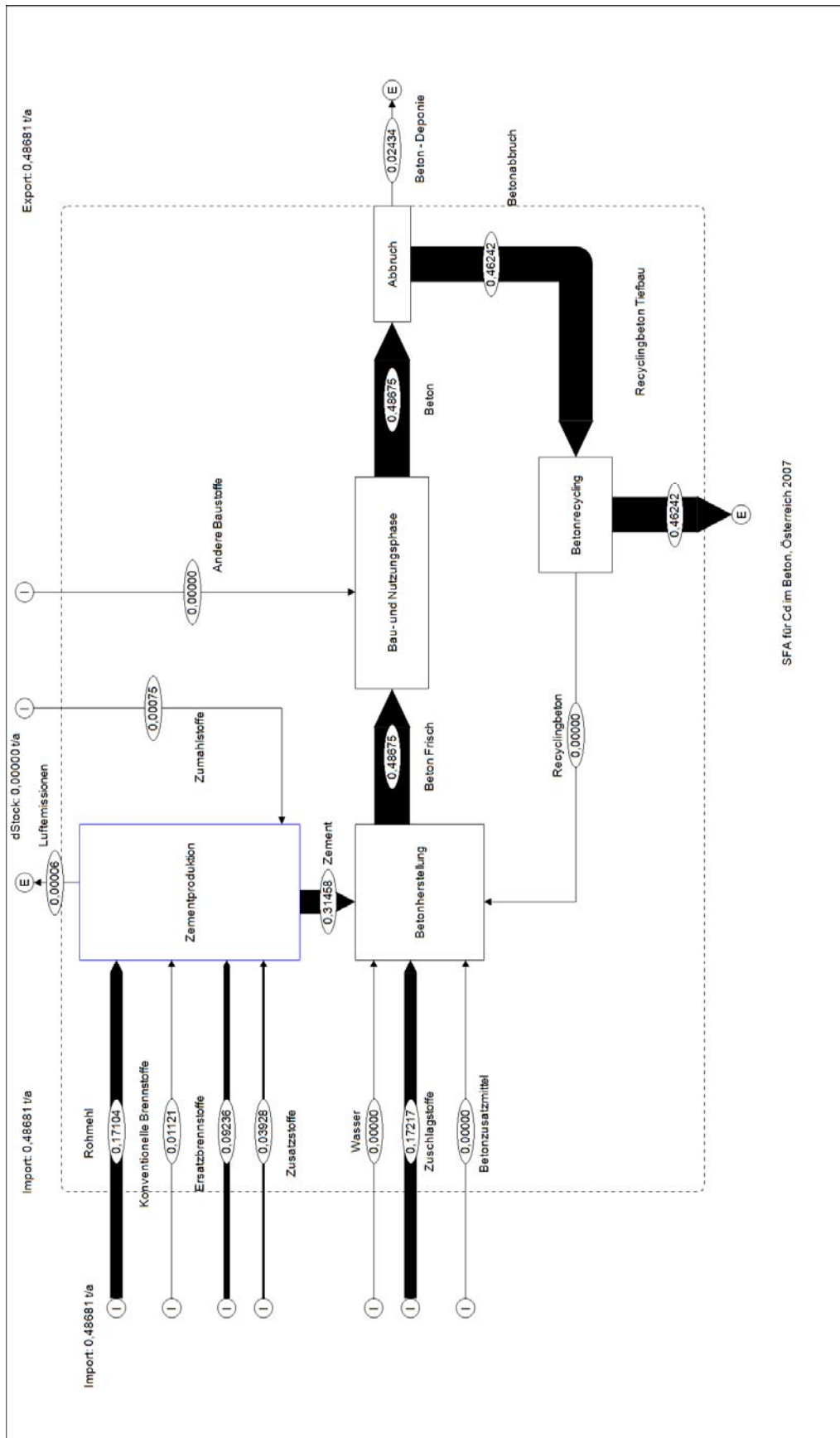
Die Stoffflüsse in Abbildung 3 sind in t/a angeführt. Betonabbruch wird in diesem Fall nicht als Zuschlagstoff für Beton im Hochbau eingesetzt, sondern nur im Tiefbau. 5% des Betons werden in Baurestmassendeponien endgelagert.

Abbildung 4 zeigt die Güterflüsse der im System bedingten Cadmiumflüsse. Der Schwermetalleintrag über die Bau- und Nutzungsphase wird aufgrund der sehr hohen Unsicherheiten nicht berücksichtigt. Die entsprechenden SFA – Bilder für Hg, Pb und Zn sind im Anhang zu finden.



Güterflussanalyse für Abbruchbeton Österreich, 2007

Abbildung 3: Güterflussanalyse Betonabbruch in Österreich, 2007.



SFA für Cd im Beton, Österreich 2007

Abbildung 4: SFA Cadmium im Betonabbruch in Österreich, 2007.

Da die Zementherstellung der komplexeste und aufwendigste Prozess des Systems ist, wird diese eigens durch eine SFA dargestellt.

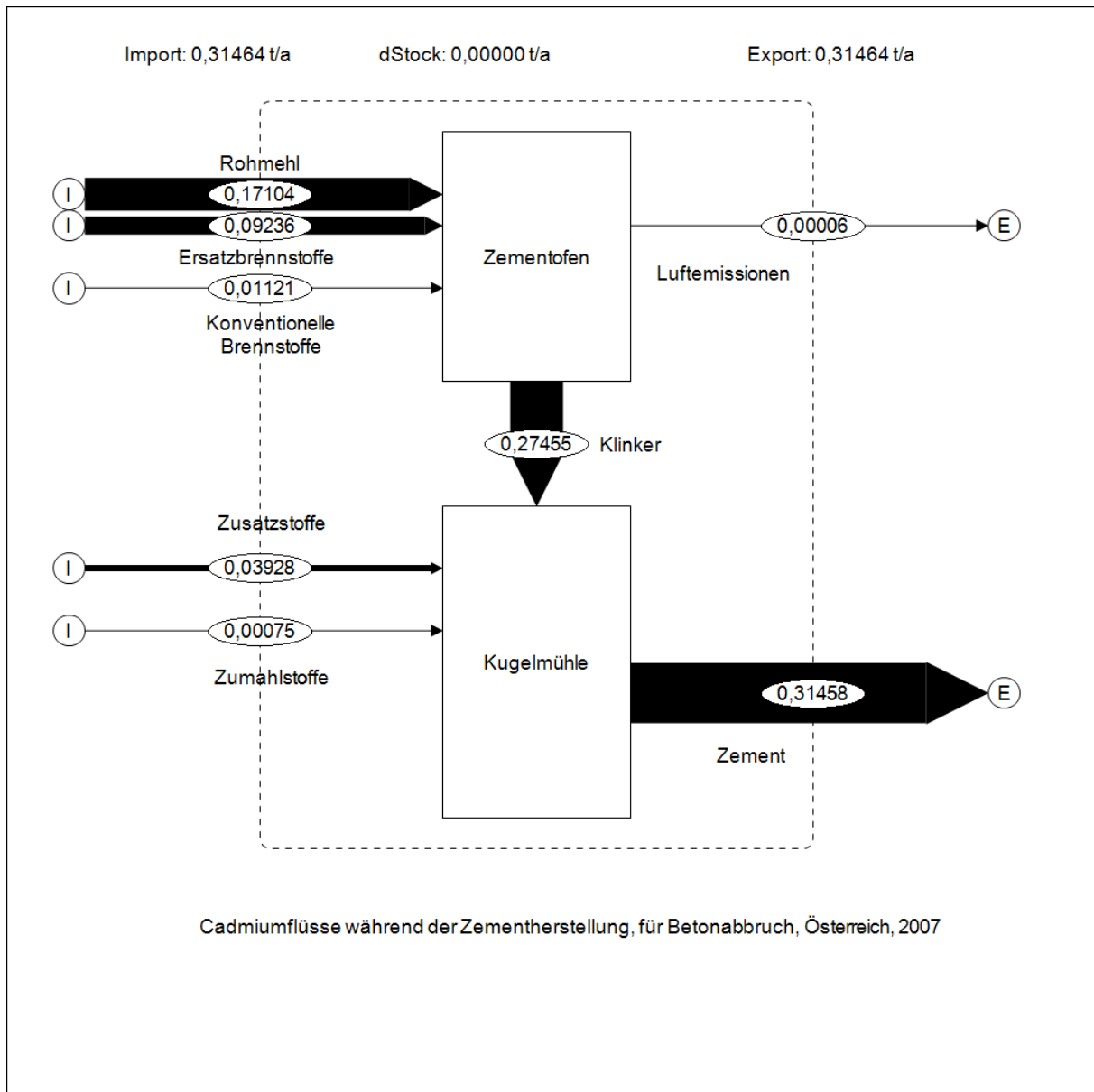


Abbildung 5: Cadmium-Flüsse bei der Zementherstellung für Betonabbruch in Österreich, 2007.

Wie oben beschrieben, fließen 95% des Betonabbruches in die Verwertung, und somit auch das darin enthaltene Cadmium. Bei der Verwendung von Recyclingbeton als Schotterersatz im Tiefbau, wird dieser nur einmal verwendet. Falls man jedoch Betonabbruch als Zuschlag für neuen Beton verwendet, ist ein mehrmaliges Recycling möglich. Da zukünftig von einer Zunahme an Baurestmassen und somit an Betonabbruch auszugehen ist, sollte der Einsatz von Betonabbruch als Zuschlag in Recyclingbeton gefördert werden. Durch den Ersatz von Kies und Schotter durch „höher belasteten“ Betonabbruch liegt die Annahme nahe, dass eine Akkumulation von Schadstoffen stattfindet. Im Folgenden wird dieser Frage nachgegangen, indem das mehrmalige Recycling von Beton durch die SFA modelliert wird.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Ergebnisse

6.1.1 Vergleich der Eingangswerte

Die Eingangswerte für die Modellierung des Recyclings werden hier nochmals überprüft. Die durch die SFAs bzw. dem Programm STAN generierten Werte für Schwermetallkonzentrationen im Zement werden mit von der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) zur Verfügung gestellten Werten verglichen (siehe Tabelle 15)

Tabelle 15: Vergleich von Cd, Hg, Pb und Zn – Konzentrationen im Zement zwischen eigens gerechneten und von der VÖZ zur Verfügung gestellten Werte.

	STAN		VÖZ	
	t/a	mg/kg	t/a	mg/kg
Cd	0,31	1,11	0,11	0,4
Hg	0,12	0,41	0	0,01
Pb	9,14	0,36	5,37	19
Zn	57,46	203,32	56,8	201

Die in dieser Studie berechneten Werte sind im Vergleich zu jenen des VÖZ leicht erhöht, sie befinden sich aber in derselben Größenordnung. Deshalb können sie ohne weiteres für fortführende Berechnungen verwendet werden.

6.1.2 Schwermetallanreicherung im Recyclingbeton

Die Anreicherung eines bestimmten Elementes ist der Quotient der Konzentration des Elementes X in einer bestimmten Fraktion und der Konzentration desselben Elementes im Ausgangsmaterial dieser Fraktion (Brunner und Stämpfli 1993a).

Abbildung 6 stellt Schwermetallkonzentrationen im Beton jenen im Naturstein gegenüber. Da die Konzentrationen sich nicht wesentlich unterscheiden, ist davon auszugehen, dass eine einmalige Vermischung zu keiner relevanten Anreicherung der Schwermetalle im Beton führt. Im Anhang sind die Konzentrationen für alle vier Schwermetalle nochmals detaillierter angeführt.

Abbildung 7 zeigt die Differenz zwischen Schwermetallkonzentrationen im Naturstein und im Beton in Prozent. Die höchste Anreicherung während der Betonherstellung findet beim Cadmium statt (+120%). Etwas weniger stark reichern sich Quecksilber (+38%) und Zink (+19%) an; die geringste Zunahme erfährt das Blei mit +9%.

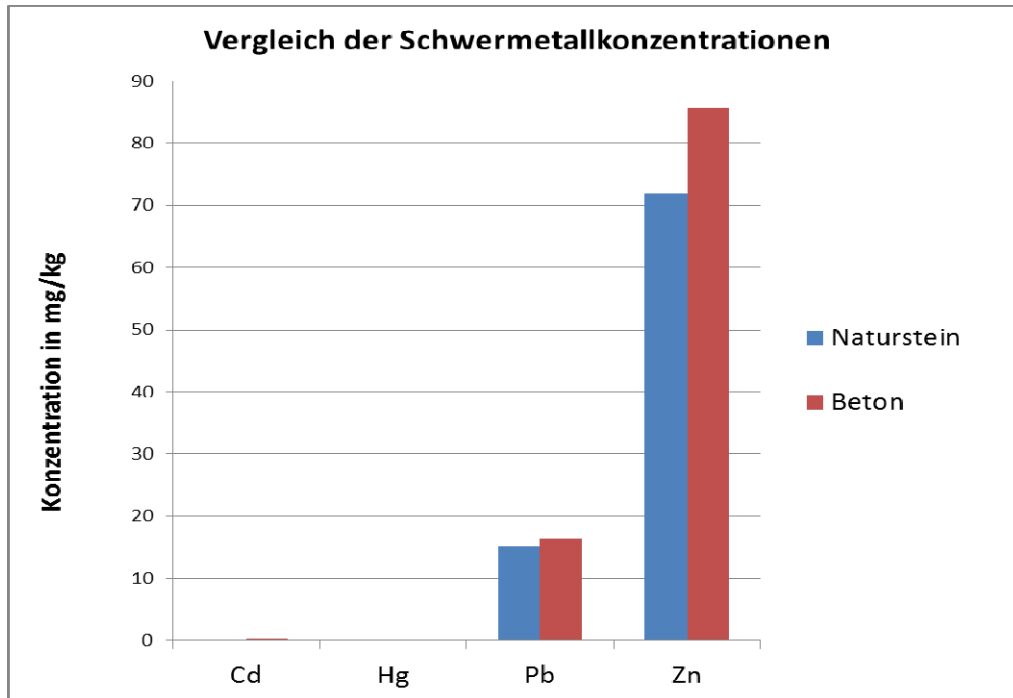


Abbildung 6: Vergleich von Schwermetallkonzentrationen in Beton und Naturstein

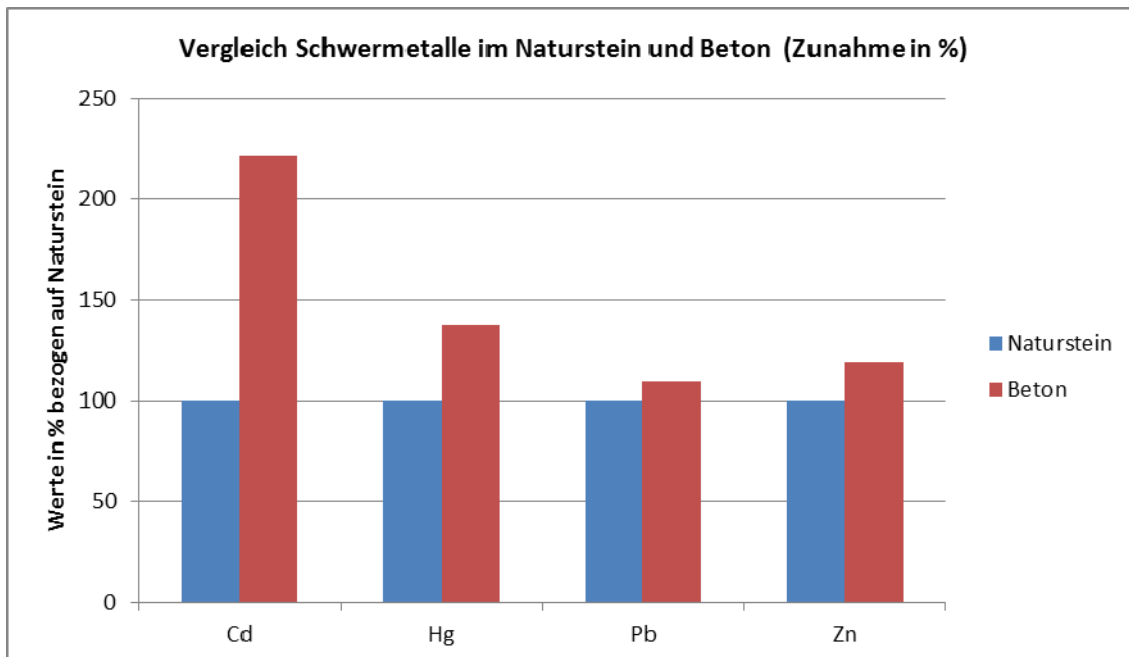


Abbildung 7: Vergleich der Schwermetallkonzentrationen in % zwischen Naturstein und Beton, bezogen auf Naturstein.

6.1.3 Mehrfaches Recycling

Es wird nun die Entwicklung der Schwermetallkonzentrationen als Funktion der Anzahl der Lebenszyklen des Baustoffes Beton berechnet. So soll deutlich werden, ob es durch ein

mehrfaches Recycling von Beton zu einer Anreicherung der Schwermetalle kommt. In einem ersten Schritt wird davon ausgegangen, dass von den 2 Mio. Tonnen abgebrochenem Beton 95% recycelt werden, und von diesen wiederum 5% als Zuschlagstoff für Recyclingbeton eingesetzt werden. Die Menge an neu produziertem Beton, in den der Recyclingzuschlag eingesetzt wird, beträgt wiederum 2 Mio. t. Der Recyclingzuschlag macht in diesem Fall 6% des gesamten Zuschlages für den Recyclingbeton aus (Abbildung 8). Der Rest (94%) wird durch konventionelle Zuschlagstoffe abgedeckt. Es wird außerdem angenommen, dass der Zementanteil in jedem Lebenszyklus gleich bleibt und wegen der Zugabe an Recyclingzuschlag nicht zunimmt (was angesichts des geringen Anteils an Recyclingzuschlag nicht notwendig ist).

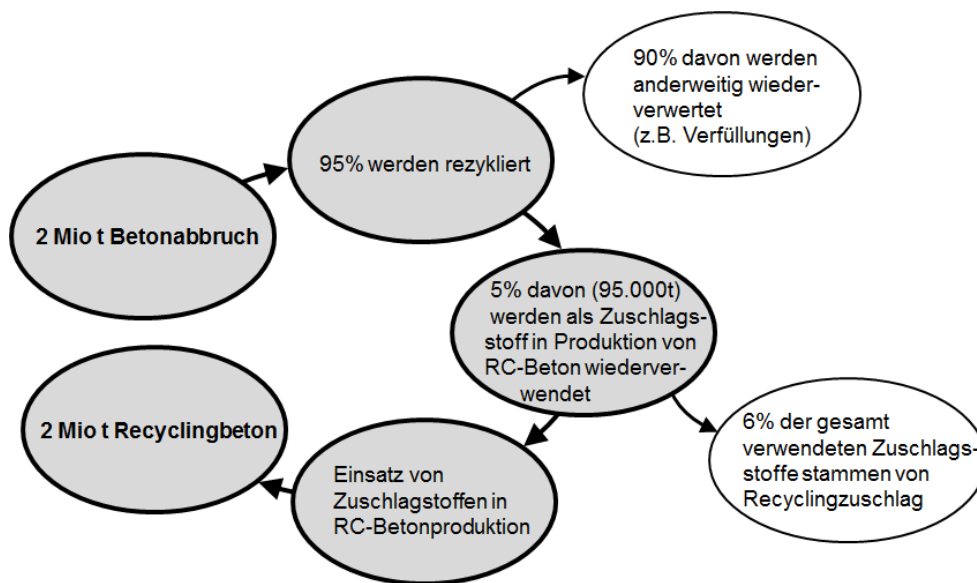


Abbildung 8: Kreislauf des Betonabbruchmaterials

In den darauffolgenden Lebenszyklen wird dieser Schritt mit denselben Recyclingraten und Zuschlaganteilen (mit Recyclingzuschlag aus dem jeweils vorhergehenden Lebenszyklus) wiederholt. Dabei wird die Änderung der Schwermetallkonzentration im jeweils neuen Recyclingbaustoff berechnet.

Abbildung 9 bis Abbildung 12 zeigen, dass es beim Einsatz von Recyclingzuschlag sehr wohl zu einer Erhöhung der Schwermetallkonzentrationen kommt, dass diese jedoch relativ gering ist und sich nach dem zweiten Lebenszyklus stabilisiert und nicht weiter zunimmt. Bei der Annahme eines konstanten Zementanteiles in jedem Lebenszyklus zeigt sich, dass sich die Schwermetallkonzentrationen bis zu einer gewissen Konzentration anreichern um sich dann auf einem konstanten Wert einzupendeln. Im Folgenden wird deshalb eine mathematische Funktion gesucht, um dieses Verhalten darzustellen.

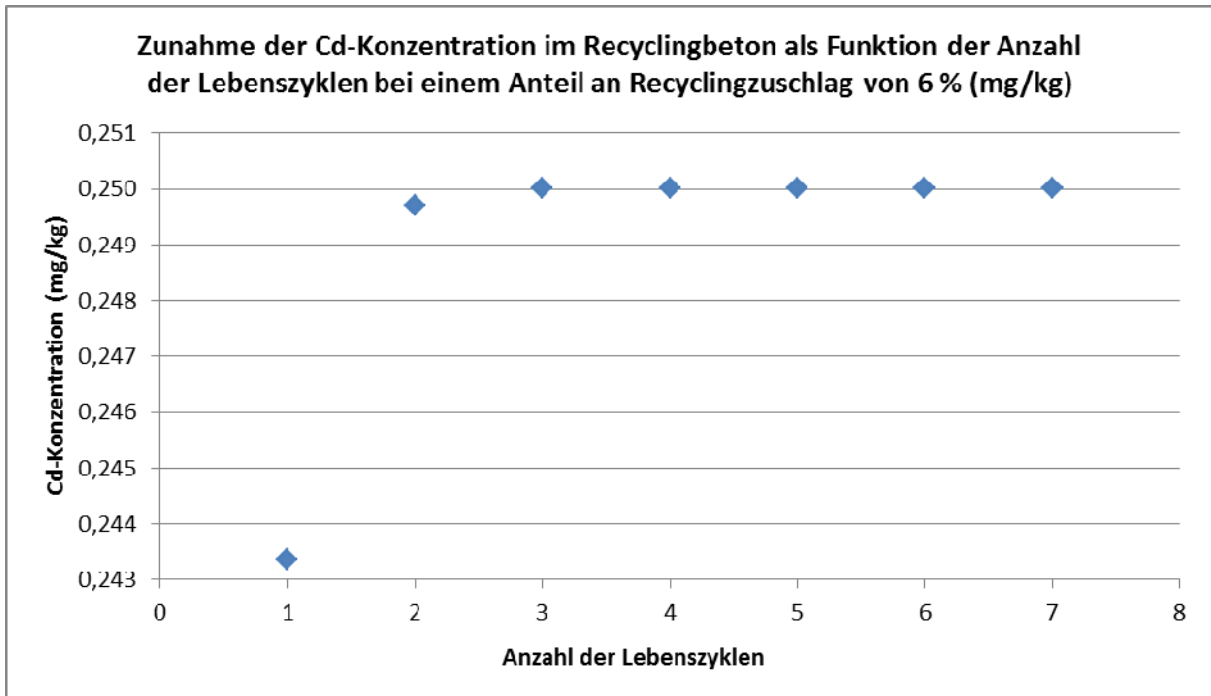


Abbildung 9. Zunahme der Cd-Konzentration im Recyclingbeton als Funktion der Anzahl der Lebenszyklen bei einem Anteil an 6% Recyclingzuschlag

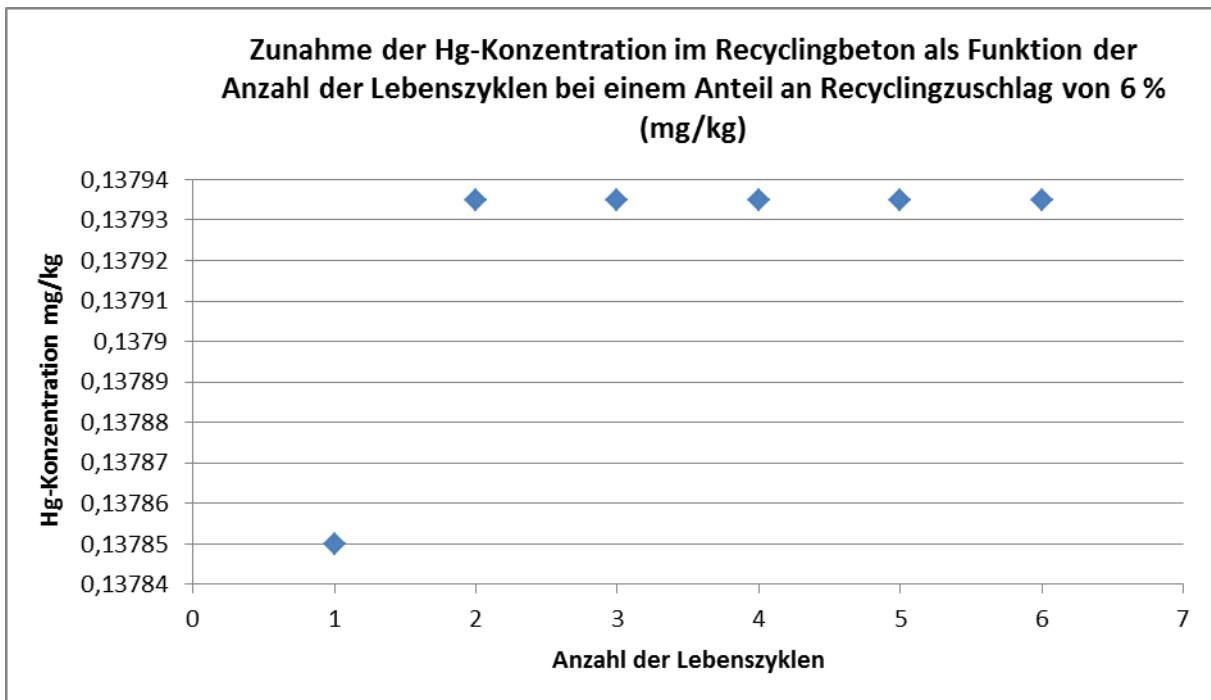


Abbildung 10: Zunahme der Hg-Konzentration im Recyclingbeton in Funktion der Anzahl der Lebenszyklen bei einem Anteil an 6% Recyclingzuschlag

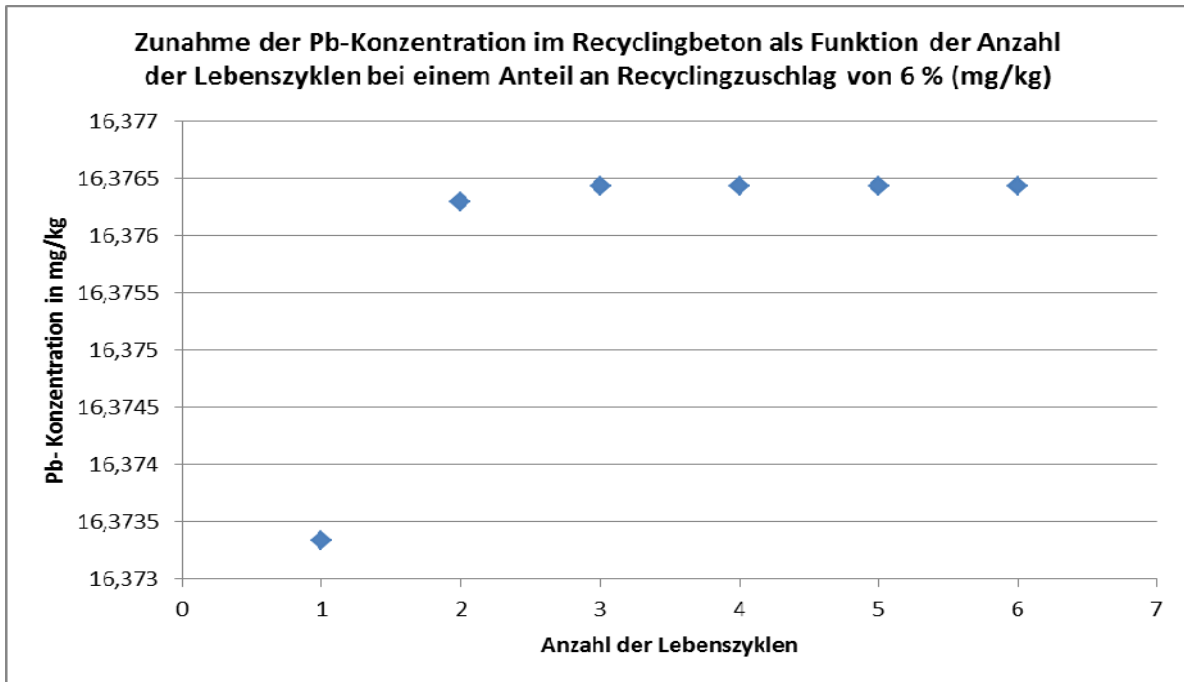


Abbildung 11: Zunahme der Pb-Konzentration im Recyclingbeton in Funktion der Anzahl der Lebenszyklen bei einem Anteil an 6% Recyclingzuschlag

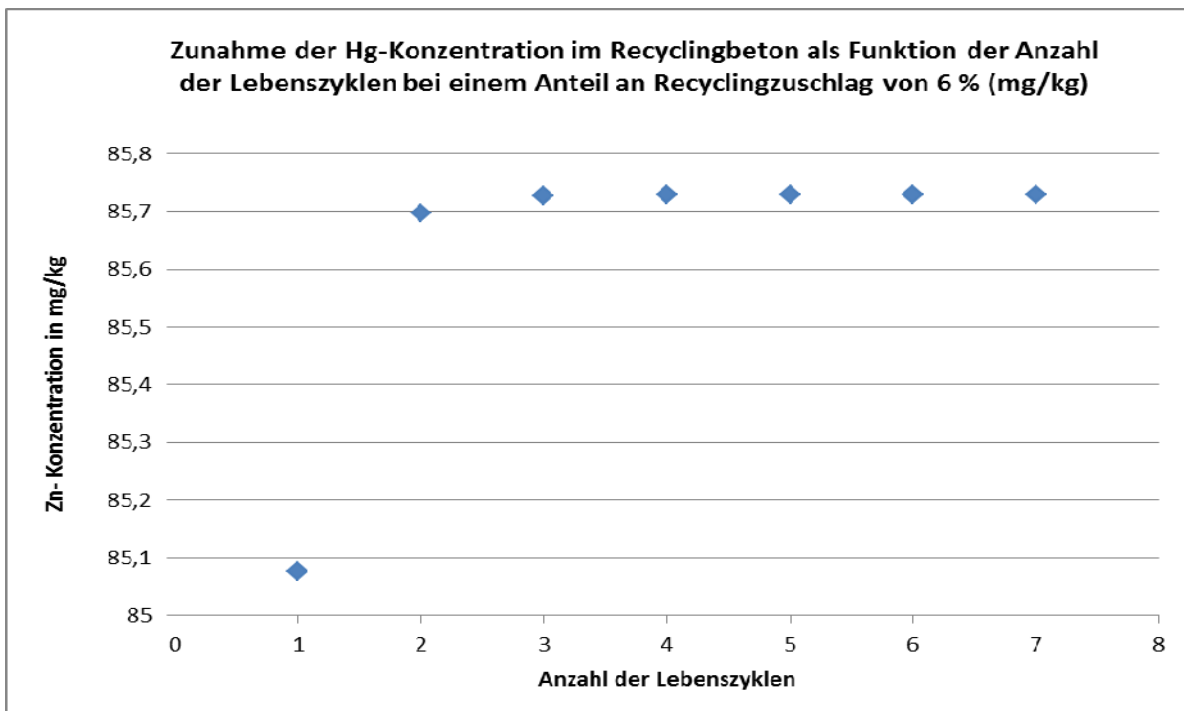


Abbildung 12: Zunahme der Zn-Konzentration im Recyclingbeton in Funktion der Anzahl der Lebenszyklen bei einem Anteil an 6% Recyclingzuschlag

6.1.4 Funktion für die Schwermetallanreicherung

$U(n)$ sei eine Funktion, die die Menge eines Schwermetalls in Recyclingbeton als Funktion der Anzahl der Lebenszyklen bei Zugabe von Recyclingzuschlag, angibt. U_0 sei die Menge des Schwermetalls in Beton, der ohne Recyclingzuschlag hergestellt wurde. Wie bereits durch die SFA gezeigt wurde, hängt der Schwermetallgehalt im Beton vom Schwermetallgehalt der Ausgangsprodukte (Input) abzüglich des Schwermetallgehaltes der Emissionen ab.

Man erhält folgende Gleichungen (Anger 2010):

$$U(1) = GN+C+\frac{S}{B} \times U_0 \quad (\text{Formel 3})$$

also

$$U(n+1) = GN+C+\frac{S}{B} \times U(n) \quad (\text{Formel 4})$$

Mit:

n : Anzahl der Lebenszyklen

GN : Menge an Schwermetall im Primärzuschlag, [t]

C : Menge an Schwermetall im Zement, [t]

S : Menge an Recyclingzuschlag, [t] mit $S < B$

B : Menge Abbruchbeton, [t]

U_0 : Menge an Schwermetall im Beton ohne Recyclingzuschlag, [t]

Die Funktion $U(n)$ ist also eine Gleichung der Form

$$U(n+1) = a \times U(n) + b, \quad (\text{Formel 5})$$

mit

$$\text{Avec } a = \frac{S}{B} \text{ et } b = GN+C, \quad (\text{Formel 6})$$

Zusammengefasst:

$$\forall n \geq n_0, \quad U_n = \frac{S^n}{B} \times \left(U_0 - \frac{GN + C}{1 - \frac{S}{B}} \right) + \frac{GN + C}{1 - \frac{S}{B}}$$

(Formel 7)

$U(n)$ nähert sich dem Wert $\frac{GN+C}{1-\frac{S}{B}}$, wenn n gegen unendlich geht. Diese Gleichung ermöglicht es nun, die Entwicklung der Konzentration eines Schwermetalles in Abhängigkeit von der Anzahl der durchlaufenen Lebenszyklen (n) zu ermitteln.

Grenzwertanalyse

Für ein bestimmtes Schwermetall, mit konstanten C und B , und S und GN variabel sind:

x : Menge an Recyclingzuschlag [t]

B : Menge an Abbruchbeton, mit $B = 2$ Mio. t

Gt : Gesamtmenge Zuschlag, mit $Gt = 78,26\% \times B$

Cm : Menge Zement, mit $Cm = 14,13\% \times B$

$[ML]_{\text{Zement}}$: Konzentration des Schwermetalles im Zement

$[ML]_{\text{Naturstein}}$: Konzentration des Schwermetalls im Naturstein

Es sei $y(x)$ die Schwermetallkonzentration.

Bei

$$y(x) = \frac{[ML]_{\text{Naturstein}} \times (Gt - x) + [ML]_{\text{Zement}} \times Cm}{1 - \frac{x}{B}}$$

(Formel 8)

ist die Ableitung dieser Funktion:

$$y(x) = \frac{B \times ([ML]_{\text{Naturstein}} \times (Gt - x) + [ML]_{\text{Zement}} \times Cm)}{(B - x^2)}, > 0 \forall x \in [0; 2\,000\,000[$$

(Formel 9)

Die Funktion $y(x)$ wächst mit ansteigendem x , d.h. je größer die Menge an Recyclingzuschlag ist, umso höher ist die Konzentration der Schwermetalle im Endprodukt. Der Grenzwert der Gleichung $U(n)$ ist vom Anteil des Recyclingzuschlages abhängig. Bei Zunahme desselben steigt $U(n)$ ebenfalls.

Beispielhaft wird der Grenzwert für Cadmium berechnet:

$$[Cd]_{\text{Zement}} = 1,11 \text{ mg/kg}$$

$$[Cd]_{\text{Naturstein}} = 0,11 \text{ mg/kg}$$

Daher:

$$y(x) = \frac{973502.032 - 0.00022 \times x}{2000000 - x}, > 0 \forall x \in [0; 2\,000\,000[$$

Grenzbedingung:

$$y(0) = 0.48675 = U(0)$$

$$\text{Et } \lim_{x \rightarrow 2000000} y(x) = +\infty$$

Wie oben beschrieben, ist die Zunahme der Schwermetallkonzentration vom Anteil an Recyclingzuschlag und von der Anzahl der Lebenszyklen des Betons abhängig. Bei einer Recyclingrate des Betons gegen 100% nähert sich die Schwermetallkonzentration gegen unendlich. Dies geschieht jedoch so langsam (wie in den nächsten Absätzen dargestellt), dass diese Überlegung für die Praxis nicht relevant ist.

6.1.5 Variation der Recyclingrate

Nachstehende Abbildungen zeigen die Zunahme der Schwermetallkonzentrationen innerhalb mehrerer Lebenszyklen, in Abhängigkeit des Anteiles an Recyclingzuschlag für Recyclingbeton. Die durchgehenden waagrechten Linien stellen die Grenzwerte für Recyclingbaustoffe der Güteklassen A+ und B des Baustoffrecyclingverbandes (BRV) (Österreichischer Baustoff Recycling Verband 2009) dar. Baustoffe mit Konzentrationen, die höher als die Umweltklasse B sind, sind als Recyclingbaustoffe nicht zugelassen und dürfen entweder nur für konstruktive Zwecke in Deponien (Klasse C) verwendet oder müssen deponiert werden.

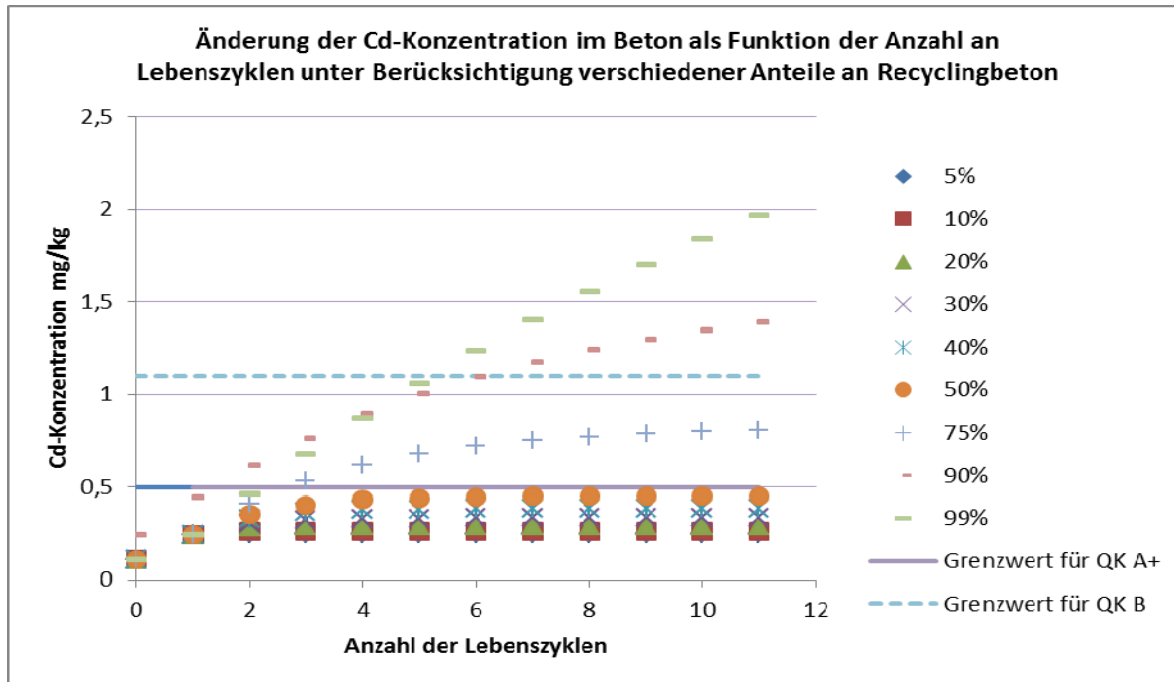


Abbildung 13: Änderung der Cd-Konzentration im Beton in Abhängigkeit der Anzahl an Lebenszyklen unter Berücksichtigung verschiedener Anteile an Recyclingzuschlag

In jedem Fall erhöht sich die Cadmium-Konzentration bis zu einem gewissen Punkt, stabilisiert sich ab einem gewissen Lebenszyklus. Wie hoch die Cadmium-Konzentration im Verlauf der Lebenszyklen ist, hängt vom Anteil an RC-Zuschlag ab. Je höher dieser Anteil ist, umso höher ist auch die Cadmium-Konzentration. Beim Einsatz von 50% Recyclingzuschlag überschreitet die Cd-Konzentration nicht den Grenzwert der Qualitätsklasse A+. Erst bei einem Anteil von 75% Recyclingzuschlag wird dieser Grenzwert nach dem 3. Lebenszyklus überschritten. Das Material kann jedoch immer noch als Recyclingbaustoff eingesetzt werden. Der Grenzwert der Qualitätsklasse B wird bei einem Recyclingzuschlaganteil von über 90% nach 5 Lebenszyklen überschritten. 5 Lebenszyklen bedeuten jedoch je nach Lebensdauer des Bauwerks zwischen 100 und 200 Jahre.

Folgende drei Abbildungen zeigen das Verhalten der Konzentration von Quecksilber, Blei und Zink in Abhängigkeit derselben Parameter wie beim Cadmium. Der Grenzwert der Qualitätsklasse A+ wird für Quecksilber ab einem 40%igen Gehalt an Recyclingzuschlag nach 3

Lebenszyklen überschritten. In Bezug auf Blei, wird dieser bei einem Recyclingzuschlaganteil von 50% nach dem 5. Lebenszyklus überschritten. Die Zinkkonzentration übersteigt den Grenzwert für A+ bereits im 3. Lebenszyklus ab einem Gehalt an 20% Recyclingzuschlag. Die Grenzwerte der Qualitätsklasse B werden erst bei einer hohen Anzahl an Lebenszyklen (ca. 7-8) und bei hohen Anteilen an Recyclingzuschlag überschritten (>75%).

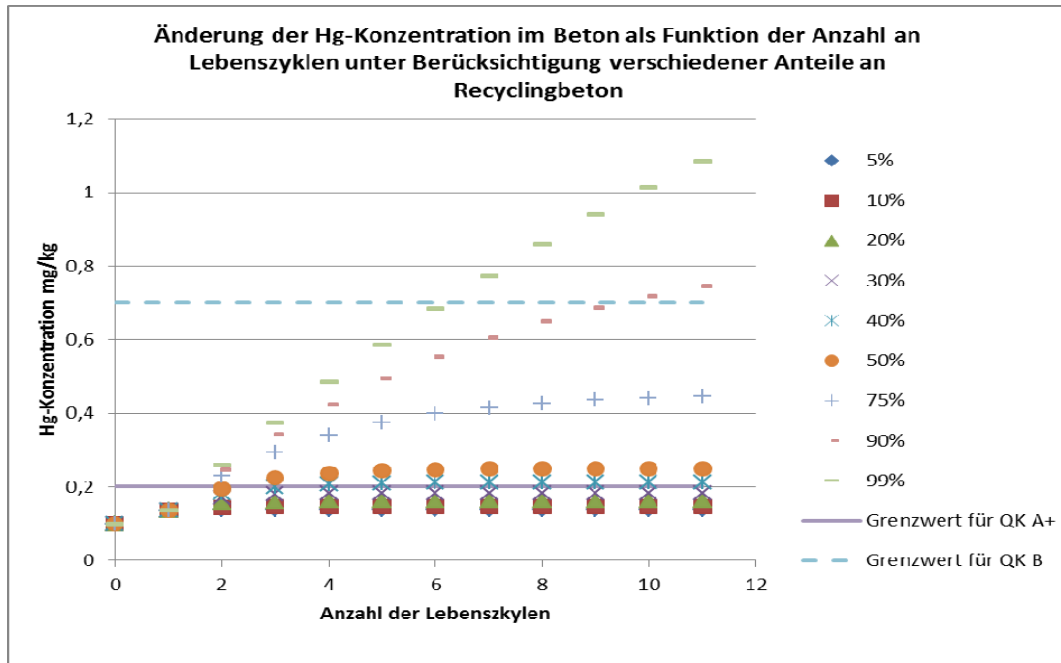


Abbildung 14: Änderung der Quecksilber-Konzentration im Beton in Abhängigkeit der Anzahl an Lebenszyklen unter Berücksichtigung verschiedener Anteile an Recyclingzuschlag

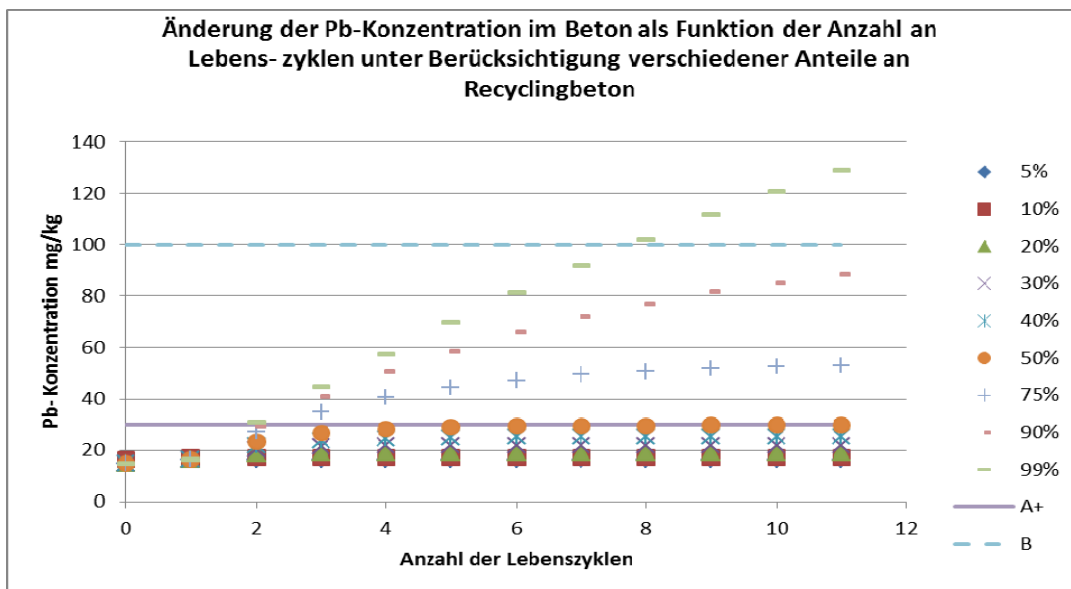


Abbildung 15: Änderung der Blei-Konzentration im Beton in Abhängigkeit der Anzahl an Lebenszyklen unter Berücksichtigung verschiedener Anteile an Recyclingzuschlag

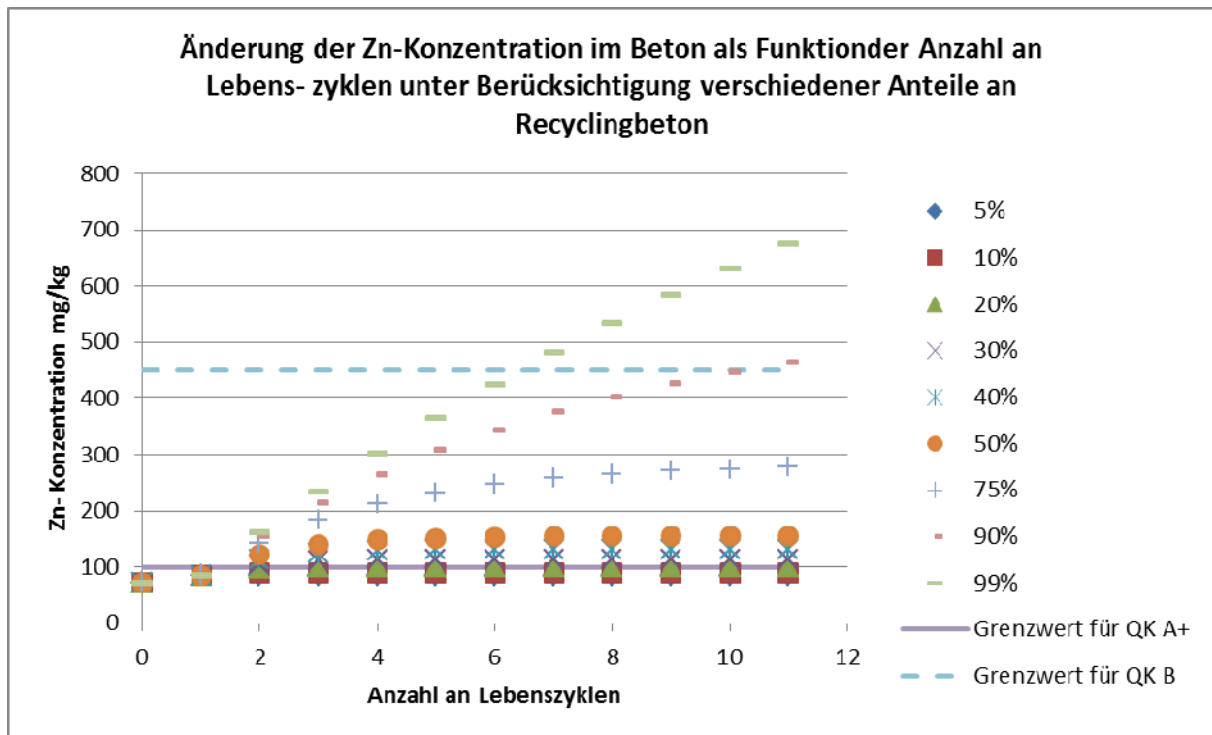


Abbildung 16: Änderung der Zink-Konzentration im Beton in Abhängigkeit der Anzahl an Lebenszyklen unter Berücksichtigung verschiedener Anteile an Recyclingzuschlag

6.1.6 Variation des Zementanteiles

Die Funktion $U(n)$ geht von einem konstanten Zementanteil im Beton aus, unabhängig vom Verhältnis Recyclingzuschlag zu Primärzuschlag. Der Einsatz von Recyclingzuschlag kann jedoch, abhängig von seiner Qualität, höhere Zementmengen erforderlich machen als die Verwendung von reinem Primärmaterial als Zuschlag. Dafür verantwortlich ist üblicherweise die Sieblinie des Recyclingzuschlages. Je höher der Feinkornanteil, desto mehr Zement muss für eine bestimmte Druckfestigkeit zugegeben werden. Die zusätzlich erforderliche Zementmenge kann 5 bis 20% der gesamten Zementmenge, die bei Primärbeton eingesetzt wird, betragen (Etxeberria Larranaga 2004), (Fleury 2010).

Über den Zementeinsatz bei mehrmaligem Recycling liegen jedoch keine Daten vor. Ob beim Brechen von Recyclingbeton nach jedem Zyklus der Feinkornanteil größer wird, und somit mehr Zement erforderlich ist (falls der Feinkornanteil nicht durch Sieben entfernt wird), ist derzeit nicht bekannt. Im Folgenden werden deshalb verschiedene Hypothesen untersucht. Um das Verhalten der Schwermetallkonzentrationen in Abhängigkeit des Zementanteiles darzustellen, wird zunächst davon ausgegangen, dass bei jedem Recyclingzyklus der Zementanteil um 10% höher ist als beim Vorhergegangenen. Diese Hypothese ist wahrschein-

lich nicht korrekt, sie dient jedoch dazu, die grundsätzliche Reaktion des Schwermetallgehaltes des Betons auf die Erhöhung des Zementanteiles festzustellen.

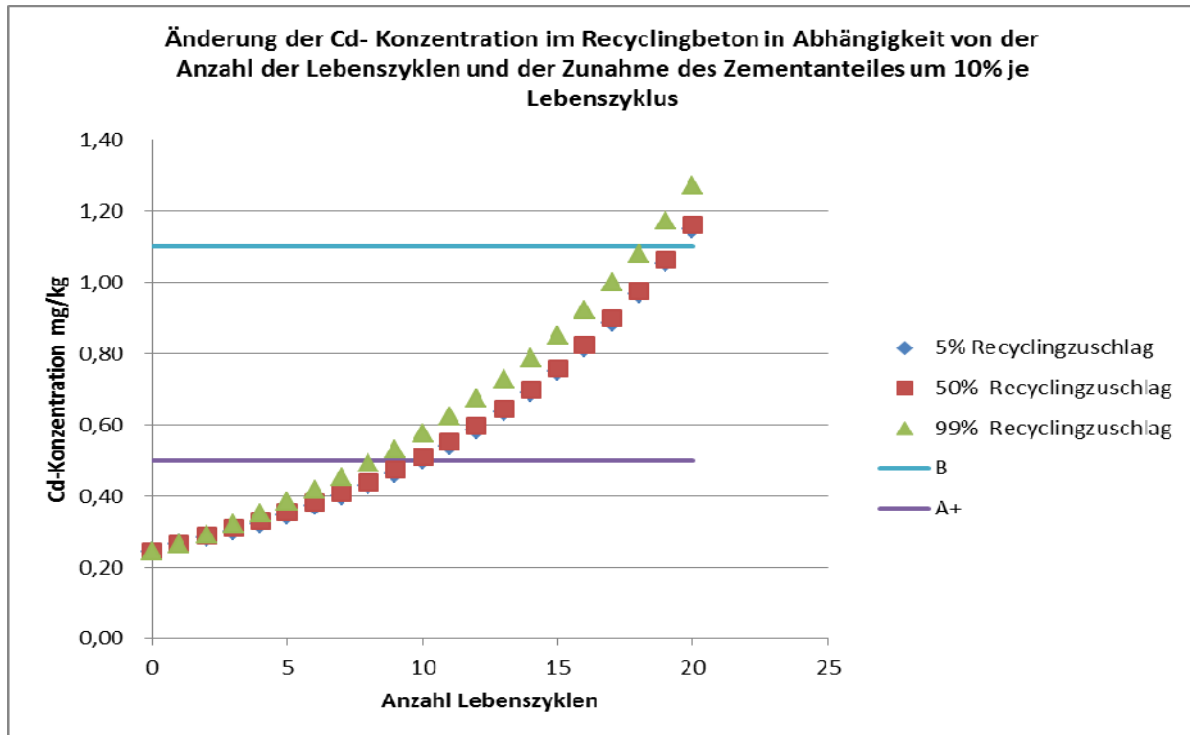


Abbildung 17: Änderung der Cadmium- Konzentration im Recyclingbeton in Abhängigkeit von der Anzahl der Lebenszyklen bei einer Zunahme des Zementanteiles um 10%.

Abbildung 17 zeigt die Zunahme der Cadmium- Konzentration bei einer Erhöhung des Zementanteiles um 10% mit jedem Zyklus und einem Anteil der Recyclingzuschläge von 5, 50 und 99%. Die Zunahme der Cd- Konzentration ist exponentiell. Da der Schwermetalleintrag über den Zement erfolgt, unterscheiden sich die Zunahmen in Abhängigkeit des Anteiles an Recyclingzuschlag nur wenig. Die Konzentrationen sind jedoch nicht kritisch. Erst nach dem 8 bzw. 10. Lebenszyklus werden die Grenzwerte der Güteklasse A+ überschritten. Dasselbe Verhalten weisen die Schwermetalle Blei, Quecksilber und Zink auf.

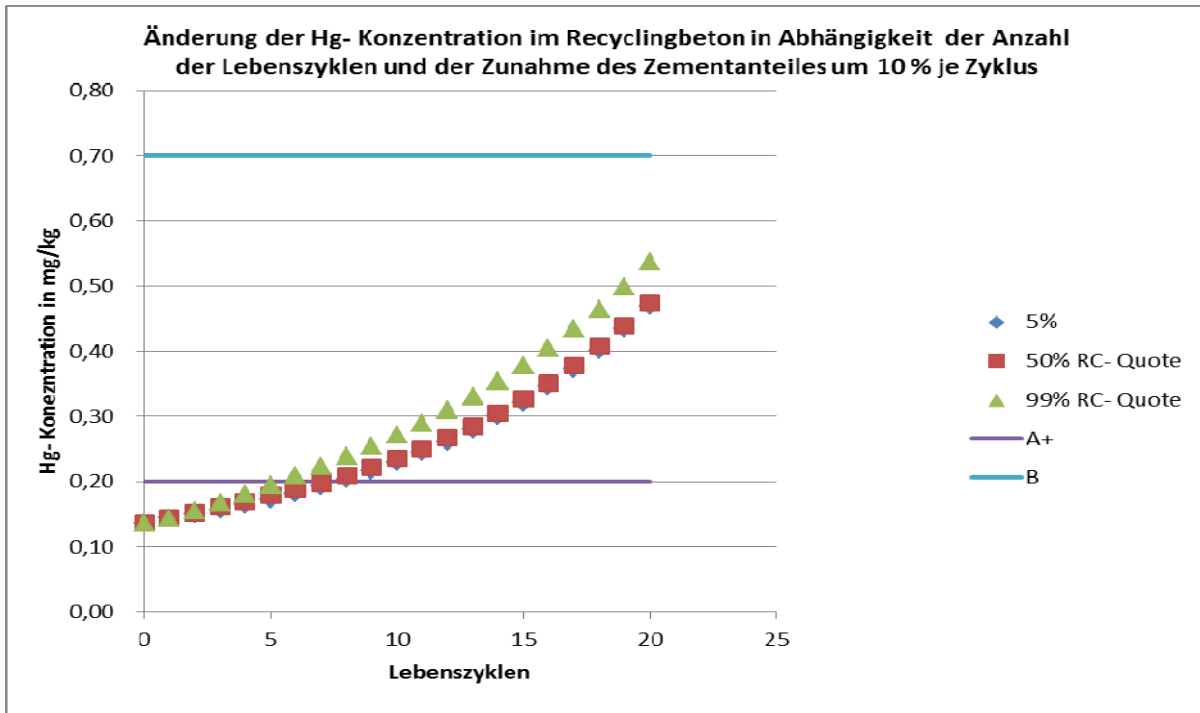


Abbildung 18: Änderung der Quecksilber- Konzentration im Recyclingbeton in Abhängigkeit von der Anzahl der Lebenszyklen und der Zunahme des Zementanteiles um 10% je Zyklus

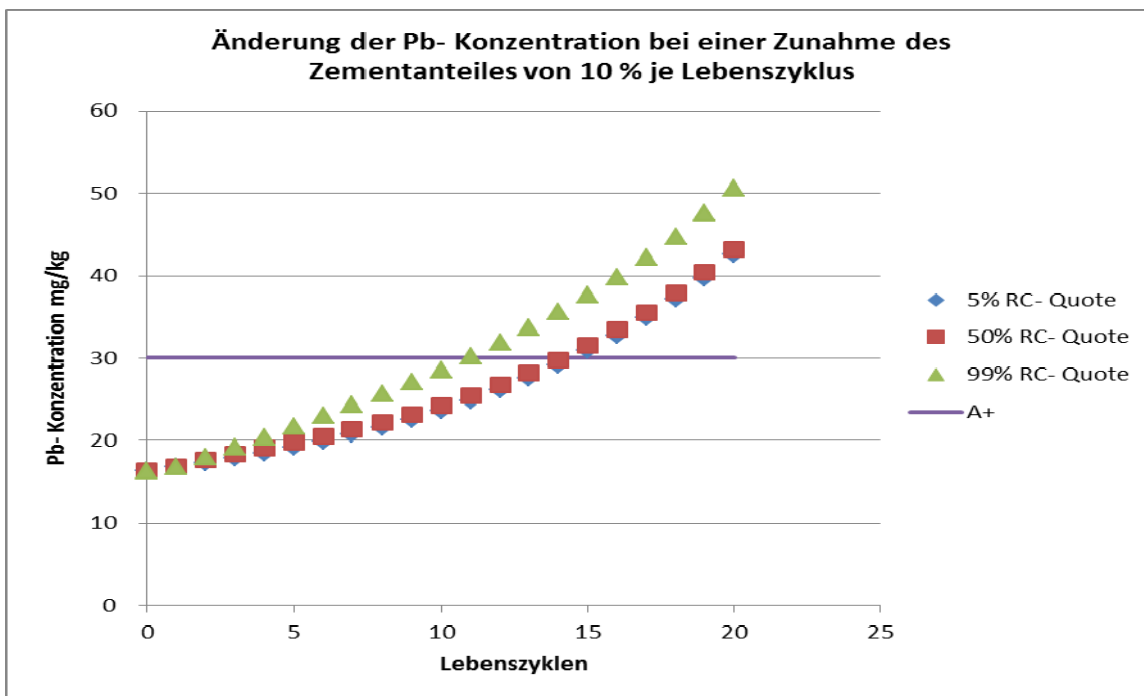


Abbildung 19: Änderung der Blei- Konzentration bei einer Zunahme des Zementanteiles von 10% je Lebenszyklus

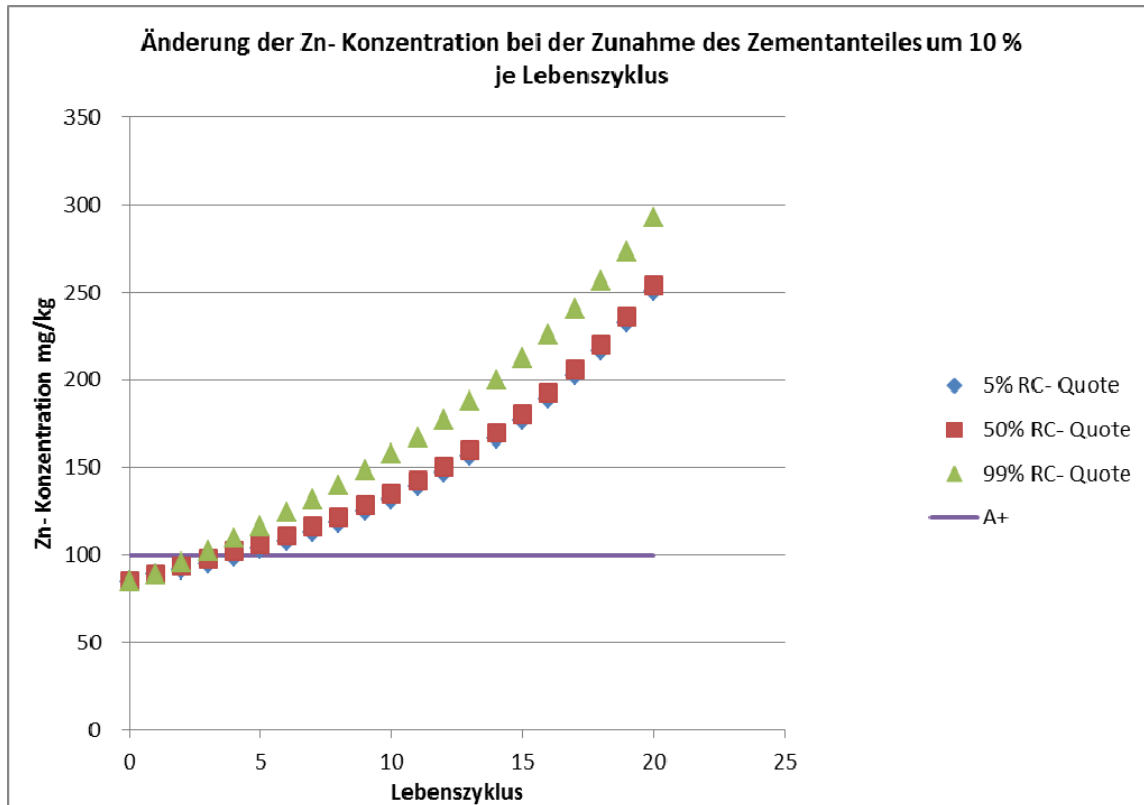


Abbildung 20: Änderung der Zink- Konzentration bei der Zunahme des Zementanteiles um 10% je Lebenszyklus

6.1.6.1 Schadstoffkonzentrationen in Abhängigkeit des Zementanteiles

Abbildung 21 stellt die Entwicklung der Cadmium- Konzentration in Abhängigkeit der Lebenszyklen von Beton und der Zunahme des Zementanteiles dar. Dabei wird ein konstanter Anteil an RC- Zuschläge von 50% angenommen. Die Konzentrationszunahme wird mit den Grenzwerten der Qualitätsklassen A+ und B des BRV verglichen (Österreichischer Baustoff Recycling Verband, 2009 #353). Es wird ersichtlich, dass bei einer Zunahme des Zementanteiles um 10%, der Grenzwert der QK A+ erst ab dem 10. Lebenszyklus überschritten wird. Bei einer Zunahme von 20% des Zements nimmt dagegen die CD-Konzentration je Lebenszyklus rascher zu. Dasselbe kann für die anderen untersuchten Schwermetalle Quecksilber, Blei und Zink behauptet werden.

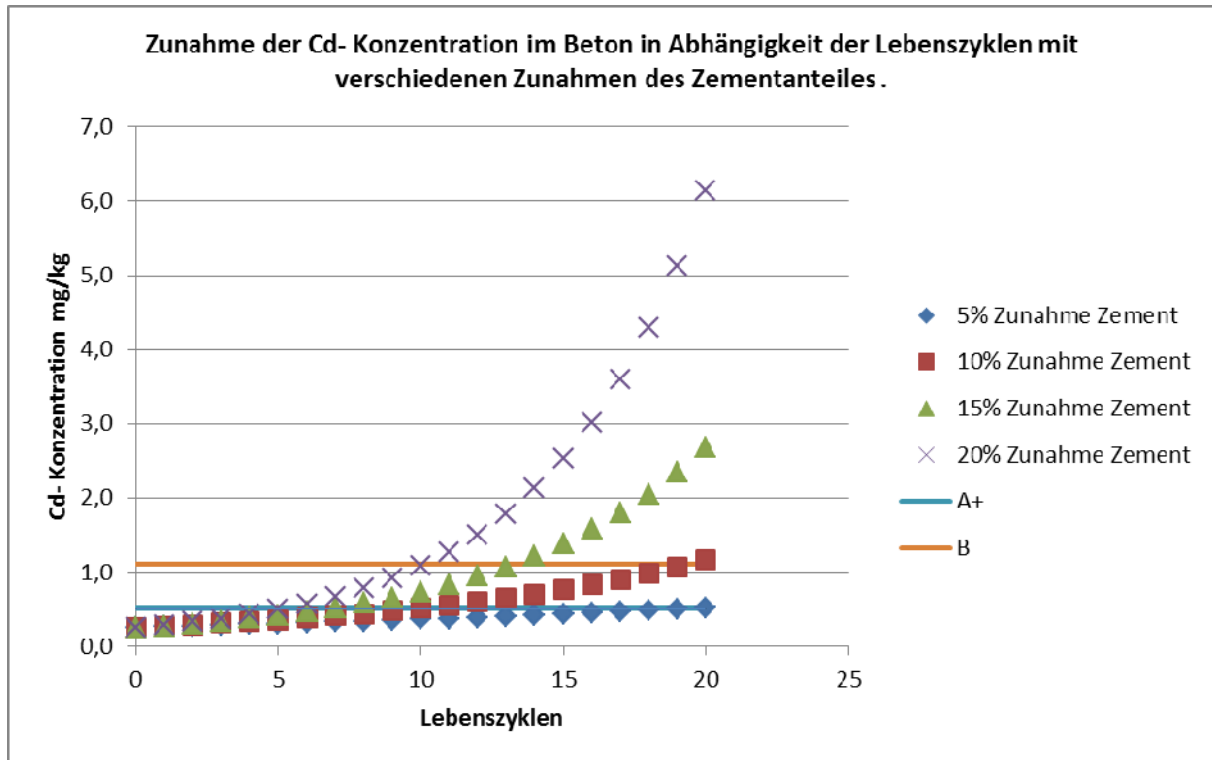


Abbildung 21: Zunahme der Cd- Konzentration im Beton in Abhängigkeit der Lebenszyklen mit unterschiedlichen Anteilen an Zement.

Abbildung 21 zeigt, dass bei einem höheren Zementanteil die Cd- Konzentration rascher zunimmt; die QK A+ jedoch wird auch im schlimmsten Fall erst nach dem 5. Lebenszyklus überschritten. Ähnlich verhalten sich die Quecksilber-, Blei- und Zink- Konzentrationen.

6.1.6.2 Einmalige Zunahme des Zementanteils

Der Einsatz von qualitativ hochwertigem Recyclingzuschlag für Beton muss nicht unbedingt mit einer Zunahme des Zementanteils verbunden sein. Abhängig ist der erforderliche Zementanteil in erster Linie vom Feinkornanteil und von der Porosität des Zuschlagstoffes. Diese Größen schwanken einerseits und können andererseits durch Absieben reguliert werden. Im Folgenden wird deshalb davon ausgegangen, dass der Zementanteil lediglich beim zweiten Lebenszyklus erhöht wird und in den darauf folgenden konstant bleibt. Das heißt, dass angenommen wird, dass die Qualität des Recyclingzuschlags beim ersten Recycling abnimmt und in den nächsten Zyklen konstant bleibt. Das Ergebnis zeigt eine relativ starke Zunahme der Schwermetallkonzentrationen nach dem ersten Lebenszyklus. Danach wird der Konzentrationsanstieg geringer und strebt gegen einen konstanten Wert (siehe Abbildung 22).

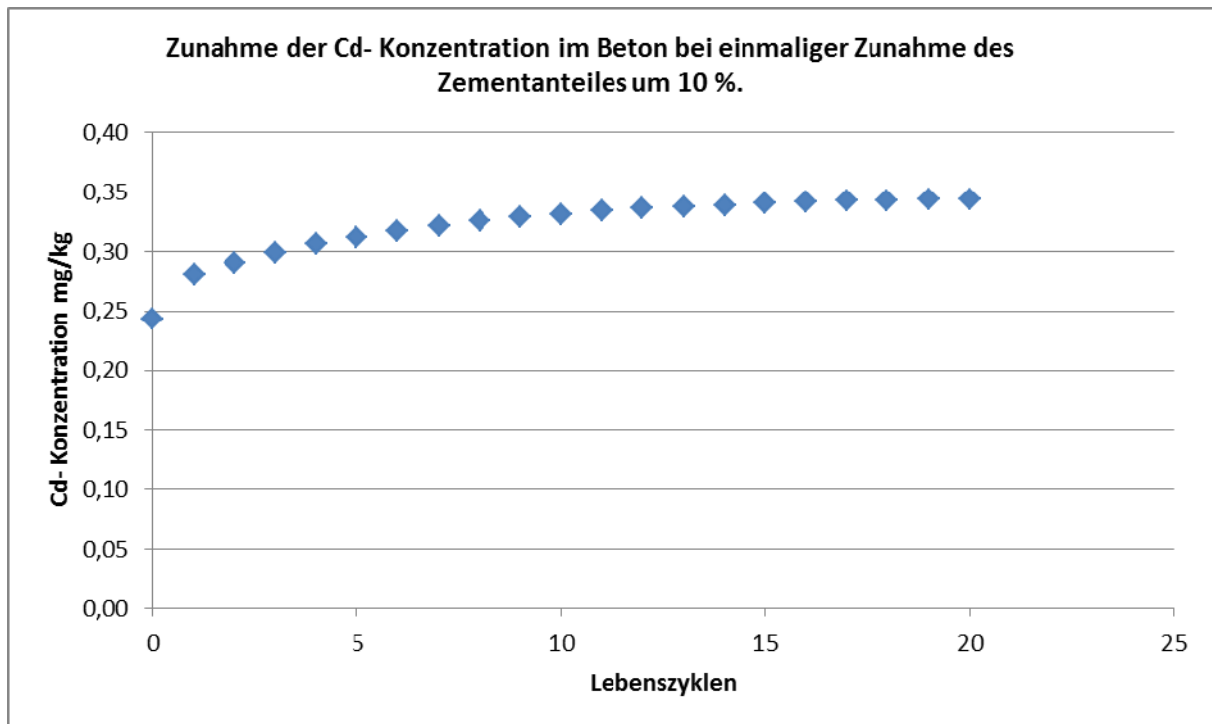


Abbildung 22: Zunahme der Cadmium- Konzentration im Beton bei einmaliger Zunahme des Zementanteiles um 10%.

6.1.6.3 Abschätzung des Schwermetalleintrages in Beton während der Bau- und Nutzungsphase von Gebäuden

Während der Bau- und Nutzungsphase von Gebäuden kann es in Baustoffen zu einer Zunahme an bestimmten Schwermetallen kommen. Diese kann durch Migration aus anderen Baustoffen (Anstriche, Putze, usw.), durch Einträge aus der Luft (z.B. Cadmium im Zigarettenrauch) oder durch Einzelereignisse (Zerbrechen eines Quecksilberhaltigen Thermometers) erfolgen. Aufgrund der langen Nutzungsdauer und der unbekanntenen Nutzungsformen von Gebäuden sind diese Einträge an Schadstoffen im Allgemeinen schwierig zu ermitteln. Aus diesem Grund werden im Folgenden verschiedene Werte für die Schwermetallaufnahme während der Nutzungsphase angenommen.

Abbildung 23 zeigt die Entwicklung des Zinkgehaltes über 6 Lebenszyklen bei niedrigen, mittleren und hohen Schwermetalleinträgen während der Nutzungsphase. Sogar beim Einsetzen der hohen Werte für die Konzentrationszunahme während der Nutzungsphase nimmt die Zink- Konzentration im Beton insgesamt nicht markant zu. Da man davon ausgehen kann, dass auch die Einträge der anderen Schwermetalle zu keiner relevanten Konzentrationszunahme führen, wurden keine weiteren Berechnungen durchgeführt.

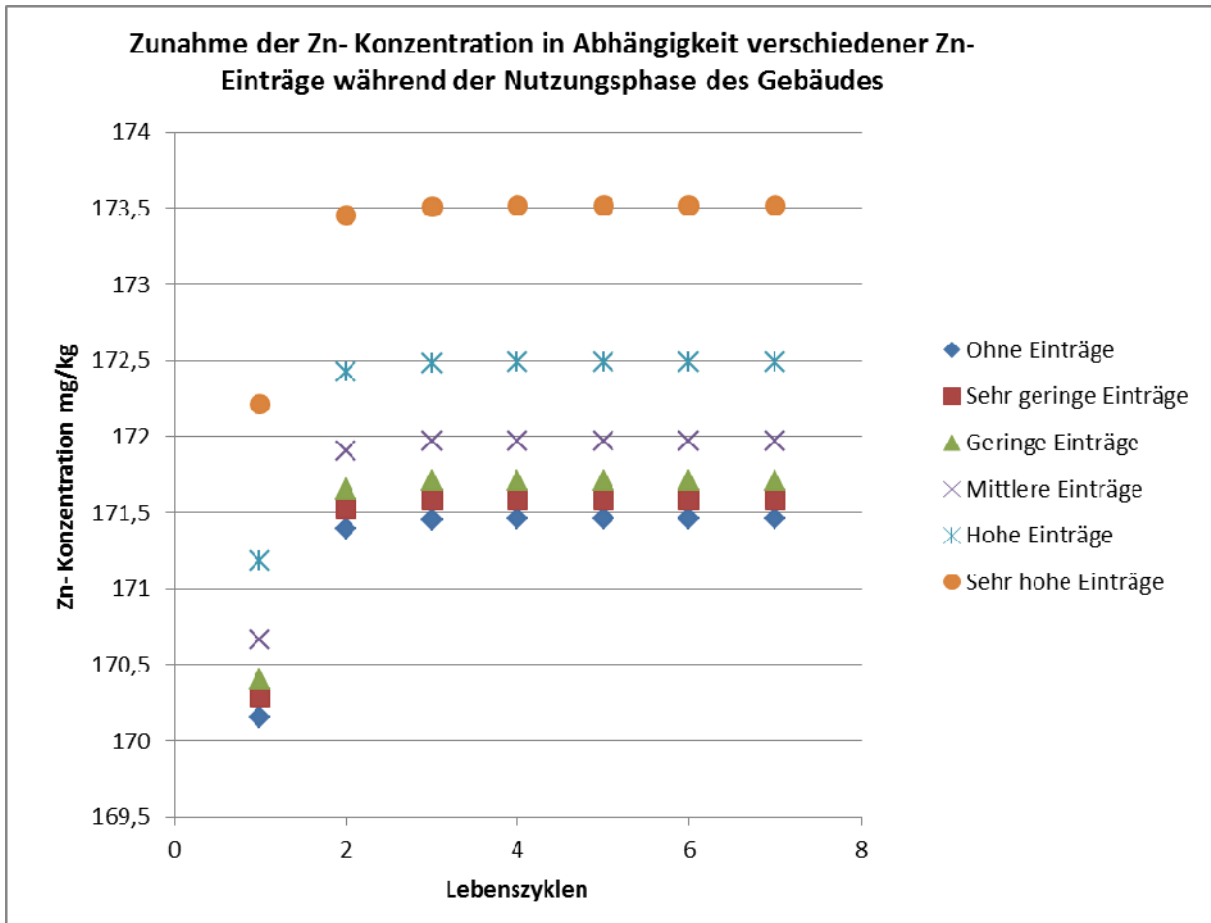


Abbildung 23: Zunahme der Zn- Konzentration in Abhängigkeit verschiedener Zn- Einträge während der Nutzungsphase.

7 Schlussfolgerungen

Neben vielen anderen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist die Bauwirtschaft vor allem für den Landschaftsverbrauch durch den Abbau mineralischer Rohstoffe verantwortlich. Dieser Effekt kann durch das Recycling von Baurestmassen reduziert werden. Problematisch dabei ist die ökologische Qualität der zurückgewonnenen RC-Baustoffe. Durch die Herstellung und die Nutzung der Baustoffe in Gebäuden findet eine Anreicherung an Schadstoffen statt. Herstellungsprozesse der Baustoffe auf RC-Baustoffen führen zu weiteren Anreicherungen an Schadstoffen. Somit besteht die Gefahr, den Schadstoffpool im Gebäudelager progressiv zu erhöhen.

Aktion 7.2 des EnBa Life+ Projektes untersucht diese Annahmen am Beispiel des Betons. Unter der Annahme verschiedener Variablen (RC- Quoten, Schadstoffeinträge durch diverse Quellen, z.B. Zement, RC- Zuschlagstoffe, usw.) wird die Entwicklung der Schwermetallbelastung im Baustoff Beton für mehrere Lebenszyklen ermittelt. Ziel ist es, die Gefahr einer Schwermetallanreicherung im Bauwesen zu prüfen.

Die Ergebnisse von Aktion 7.2 zeigen, dass die Zementherstellung der bedeutendste Faktor für den Schwermetalleintrag im Beton ist. Der Vergleich zwischen verschiedenen Zementgehalten belegt eindeutig, dass die Schwermetallkonzentration im Beton sehr stark von der Zunahme des Zementanteils abhängt.

Jedoch stellt beim Baustoff Beton der Schwermetallgehalt in keinem Fall ein wirkliches Problem dar. Sogar bei der (extremen) Annahme eines steigenden Zementgehaltes bei jedem Recyclingzyklus überschreiten die Werte nach mehrfachen Recyclingzyklen nicht die Grenzwerte für die Deponierung auf Baurestmassendeponien. In Bezug auf die Qualitätsklassen des BRV kann man feststellen, dass erst nach einigen Recyclingzyklen die Grenzwerte der QK A+ überschritten werden.

Zusammenfassend kann man aus Aktion 7.2 schlussfolgern, dass Betonabbruch vom ökologischen Standpunkt her ein optimaler RC- Baustoff ist. Die derzeitigen Aufbereitungstechnologien sind zwar nicht imstande, im Beton gebundene Schadstoffe aus dem Materialfluss zu entfernen, wodurch bei mehrmaligem Recycling von einer Schadstoffanreicherung im Beton auszugehen ist. Die Konzentrationen nehmen jedoch in den meisten Fällen sehr langsam zu. Aufgrund der relativ langen Lebensdauer von Bauwerken werden Grenzwerte der QK A+ bei den ungünstigsten Annahmen (Erhöhung des Zementanteiles, hoher Anteil an RC- Zuschlag im neuen Beton usw.) nach dem 2. – 3. Lebenszyklus überschritten, die der QK B nach dem 5. – 6. Lebenszyklus. Unter realistischen Annahmen verschiebt sich jedoch der Zeitpunkt der Überschreitung nach hinten. Somit kann man bei Beton von einem sehr hochwertigen RC-Baustoff sprechen.

Diese Tatsache wird auch durch die gegenwärtigen RC- Quoten für Betonabbruch belegt. Derzeit werden in Österreich 95 – 98% des abgebrochenen Betons recycelt. Der Großteil davon fließt aber als Schüttmaterial (Kiesersatz) in den Tiefbau. Für diesen hochwertigen Baustoff empfiehlt es sich jedoch ein hochwertiges Recycling zu forcieren, um dessen Quali-

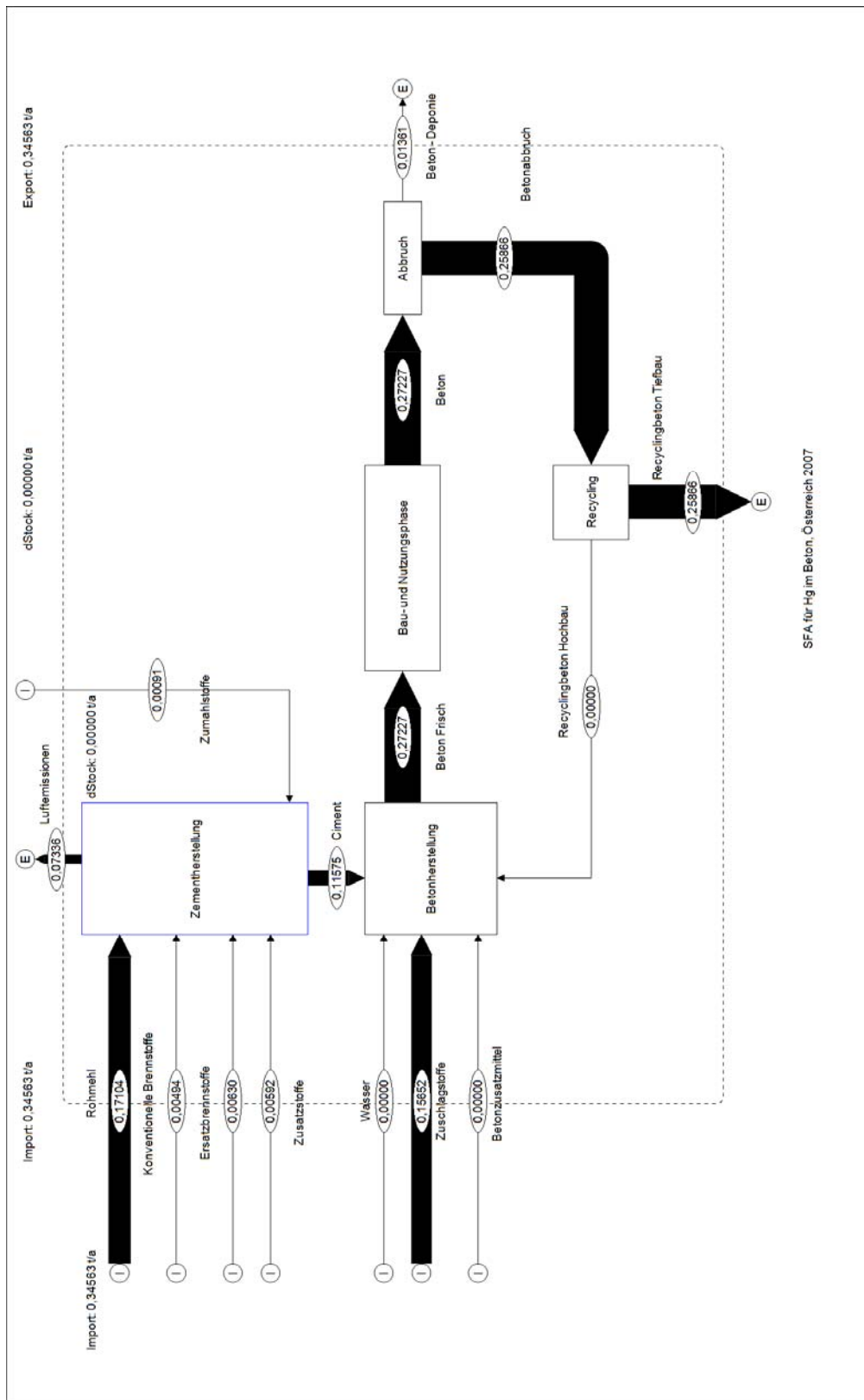
tät zu erhalten und hochwertige Primärrohstoffe einzusparen. Vom technischen Standpunkt her zeigen viele Studien, dass Betonrecycling mittlerweile ein dem Primärbetonzuschlag (Naturkies) gleichwertiges Produkt liefern kann {Mettke, 2010 #414}.

8 Literatur

- Anger, L. (2010). Etude de l'évolution de la concentration en Cadmium, Mercure, Plomb et Zinc dans le béton lors de recyclages multiples de celui-ci dans la construction de bâtiments. Département Génie Energétique et Environnement. Villeurbanne, insa Lyon. **Master**.
- Boeraeve, P. (2010). Cours de béton armé. Composition du béton.
- Brunner, P. H. und H. Rechberger (2004). Practical Handbook of Material Flow Analysis. Boca Raton, Lewis Publishers.
- Brunner, P. H. und D. M. Stämpfli (1993a). "Material Balance of a Construction Waste Sorting Plant." Waste Management & Research 11(1): 27-48.
- Brunner, P. H. und D. M. Stämpfli (1993b). "Material Balance of a Construction Waste Sorting Plant." Waste Management & Research 11(1): 27-48.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft (2008). Verordnung über die Ablagerung von Abfällen. BGBl. II Nr. 39/2008 Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, U. u. W. (2006). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006. U. u. W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- Ciments Calcia Italcementi Group La fabrication du ciment.
- Etxeberria Larranaga, M. (2004). Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete. Departament d'Enginyeria de la Construccio. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. **PhD**.
- Fehring, R., H. Rechberger, et al. (1999). Positivlisten für Reststoffe in der Zementindustrie: Methoden und Ansätze (PRIZMA). Endbericht. Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. Wien.
- Fleury, B. (2010). Vers un béton respectueux de l'environnement. Gravier pour des générations. H. S. SA. Zürich.
- Guo, Q. und J. O. Eckert (1996). "Heavy metal outputs from a cement kiln co-fired with hazardous waste fuels." Journal of Hazardous Materials **Jg 51**: S. 47–65.
- Lafarge (2007). "Quand les déchets deviennent ressources." Crescendo. La revue semestrielle du Groupe Lafarge 4.
- Lafarge. (2010). "Ciment Ecologie Industrielle." from http://www.lafarge.fr/wps/portal/4_3_6-Ecologie_industrielle.
- M. Achternbosch, Ch. Kupsch, et al. (2005). Systemanalyse zu zementären Bindemitteln: Aspekt Energie und CO₂-Emissionen. K. U. d. L. B.-W. u. n. F. i. d. Helmholtz-Gemeinschaft. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie.

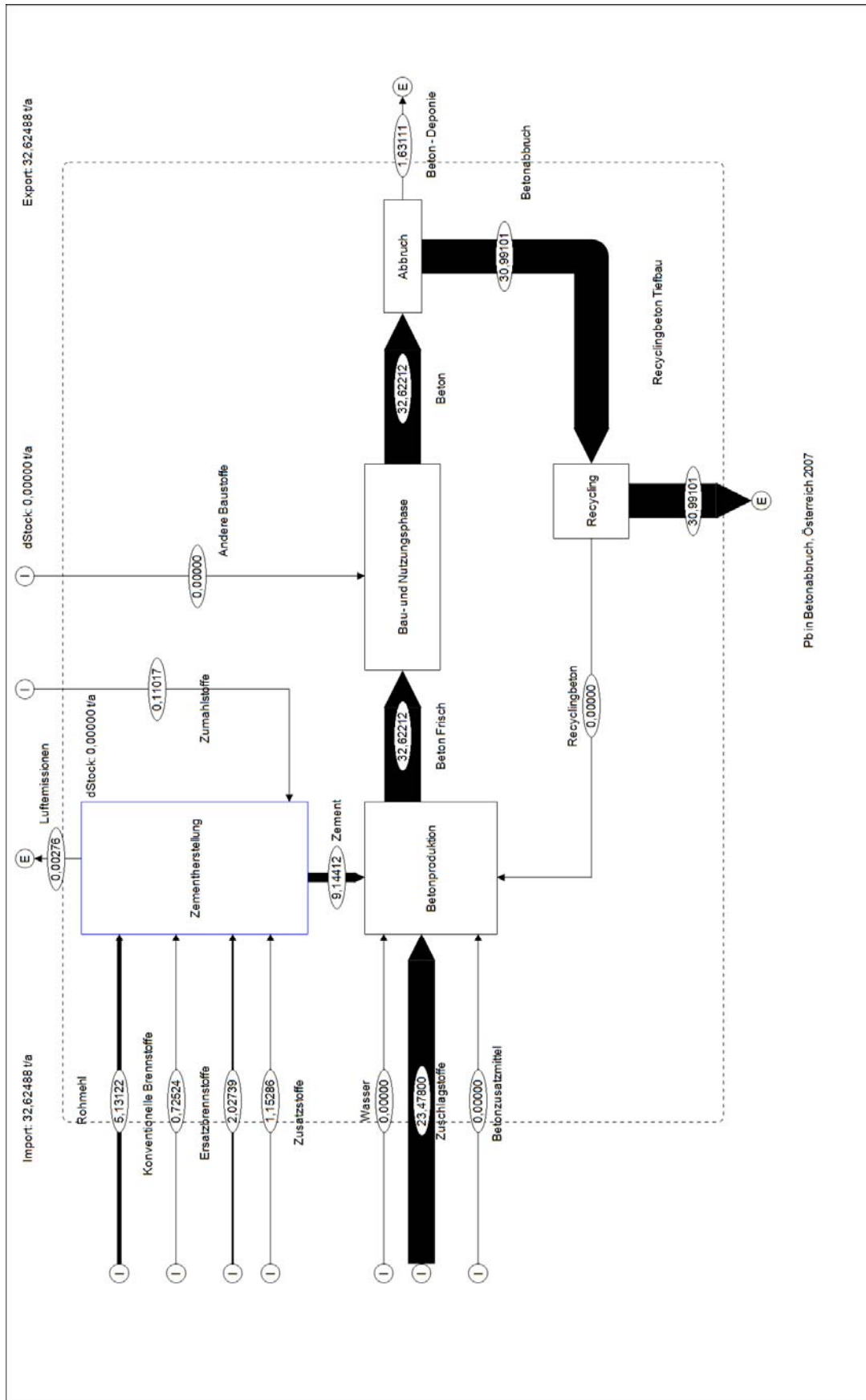
- Mauschitz, G. (2008). Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Berichtsjahr 2007. U. u. T. B. Institut für Verfahrenstechnik. Wien, TU Wien.
- Office fédéral de l'environnement des forêts et des paysages (1996). "Analyse des flux de matières au niveau suisse. Guide." Cahier de l'environnement **251**.
- Österreichischer Baustoff Recycling Verband (2009). Die Richtlinie für Recycling - Baustoffe. Österreichischer Baustoff Recycling Verband. Wien.
- Rosenberger, R. (1997). Technische und ökologische Eigenschaften von Recycling-Baustoffen unter besonderer Berücksichtigung einer Ökobilanzierung von Recycling-Beton. Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz. Wien, TU Wien.
- Sieber cassina + partner AG (1991). Stoffflussanalyse der Bauabfallsortieranlage BASORAG. A. f. U. u. E. K. Basel. Basel.
- Sindt, V., M. Ruch, et al. (1997). "Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit aufbereiteter Hochbaurestmassen." Müll und Abfall **4**.
- Stengel, T. (2007). Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ausgewählter Baustoffe für die ökologische Bewertung von Betonbauteilen. T. München.
- Townsend, T., T. Tolaymat, et al. (2004). "Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florida." Science of the Total Environment(332): 1-11.
- Trezza, M. A. und A. N. Scian (2004). "Waste fuels : their effect on Portland cement clinker." Cement and Concrete Research.
- Verein Deutscher Zementwerke (2001). Spurenelemente in deutschen Normzementen. Düsseldorf.
- Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. (2007). "Zement. Die Zementerzeugung in Österreich." from www.zement.at .
- Vereinigung des österreichischen Zementindustrie (2010). "Studie über die Schwermetallkonzentration in österreichischem Zement."
- Walker, I. und M. Dohmann (1994). Grundlagenuntersuchungen zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Bauschutt und Baustellenabfällen. Aachen.
- Weil, M. (2002). Life Cycle Assessment (LCA) – Investigation of Building Materials. Concrete incomparison to recycling-concrete.
- Zhanga, L. und M. H. Won (2007). "Environmental Mercury Contamination in China. Sources and Impacts. ." Environment International **33**(1): 108-121.

9 Anhang



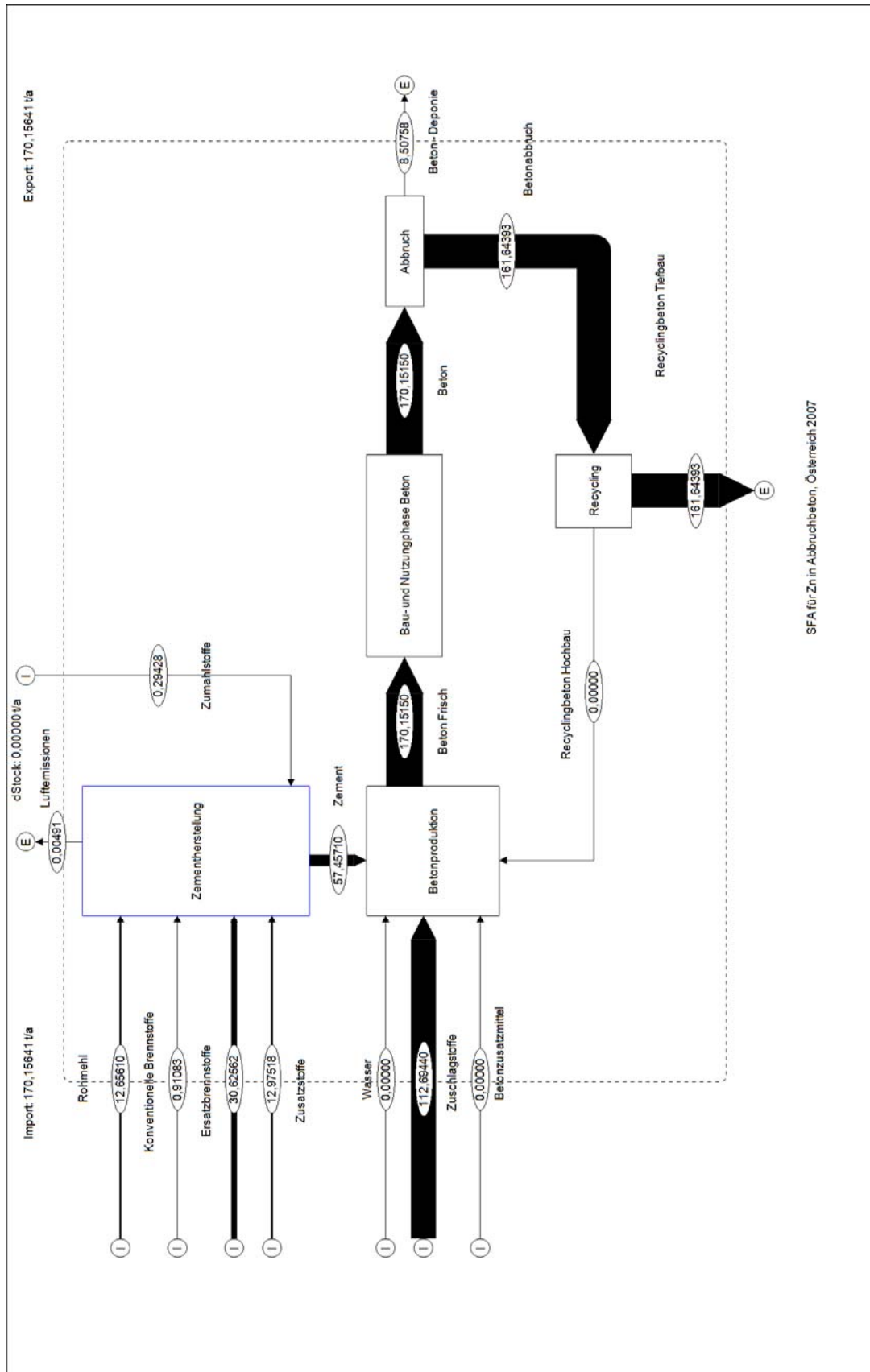
SFA für Hg im Beton, Österreich 2007

Abbildung 24: SFA für Hg im Abbruchbeton, Österreich 2007



Pb in Betonabbruch, Österreich 2007

Abbildung 25: Pb in Abbruchbeton, Österreich 2007



SFA für Zn in Abbruchbeton, Österreich 2007

Abbildung 26: Zn in Betonabbruch, Österreich, 2007

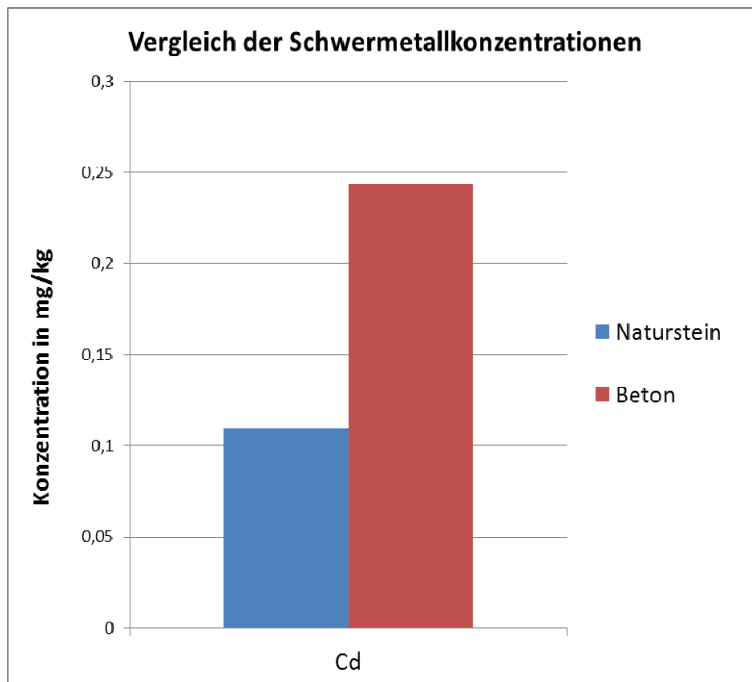


Abbildung 27: Vergleich der Cd-Konzentrationen in Naturstein und Beton

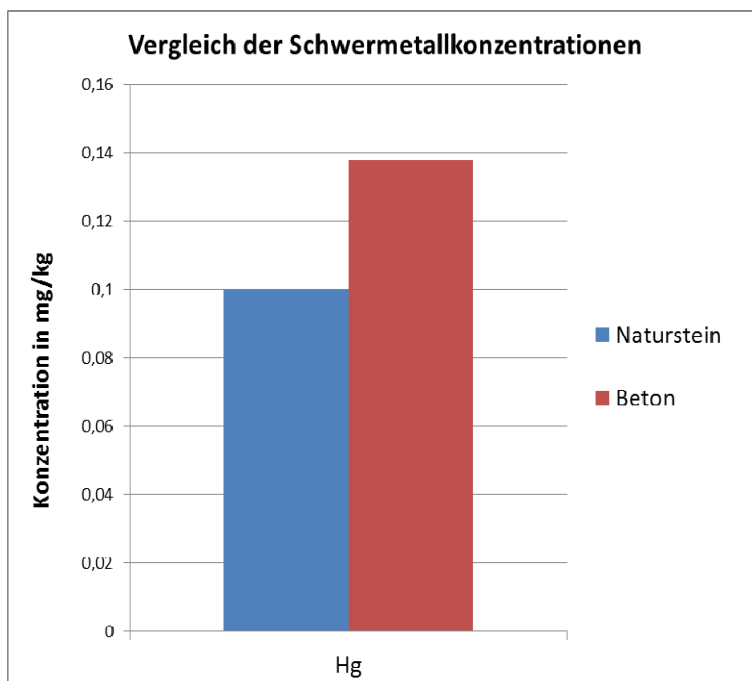


Abbildung 28: Beschreibung der Hg-Konzentrationen in Naturstein und Beton

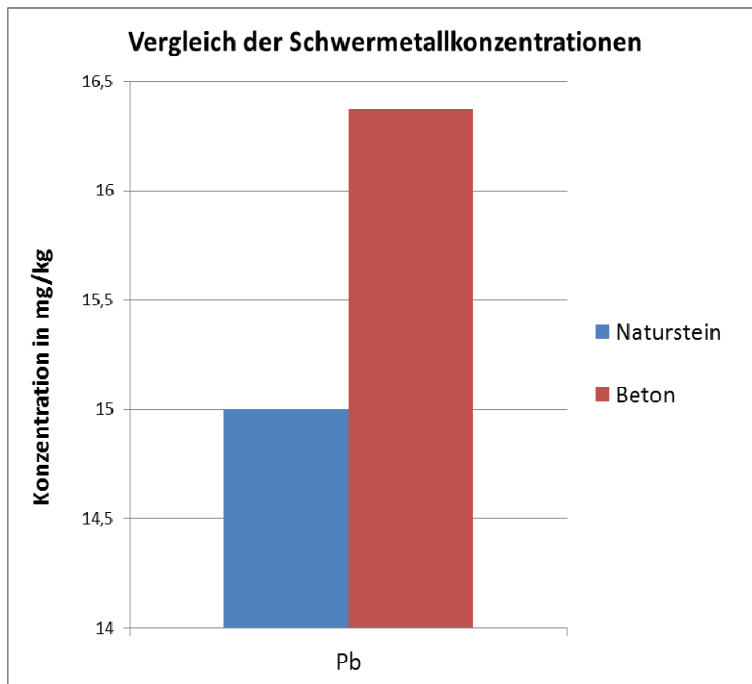


Abbildung 29: Vergleich der Pb-Konzentrationen zwischen Naturstein und Beton

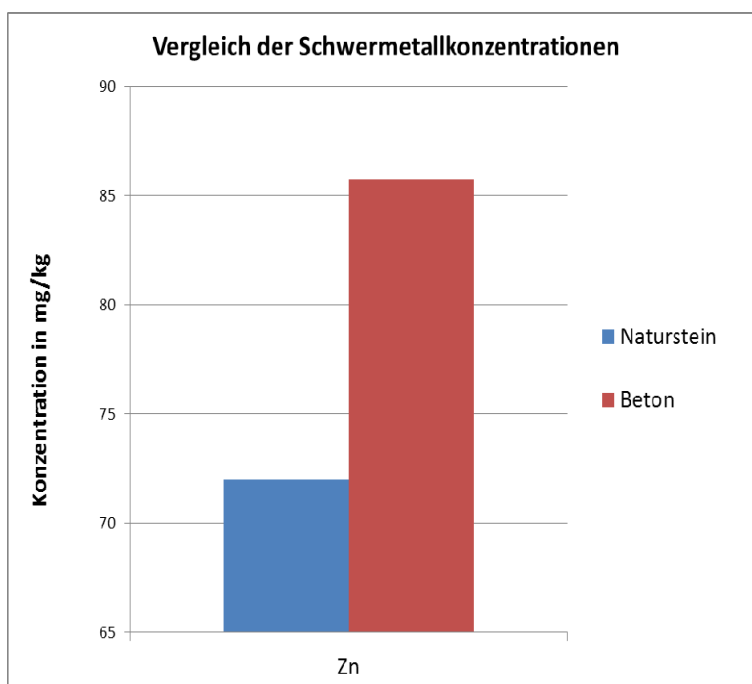


Abbildung 30: Vergleich der Zn-Konzentrationen zwischen Naturstein und Beton