

BZL Kommunikation und
Projektsteuerung GmbH
Lindenstr. 33
D – 28876 Oyten



Deutsche Projekt Union GmbH
(DPU)
Graeffstraße 5
D – 50823 Köln

BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH
DPU – Deutsche Projekt Union GmbH

Abschlußbericht

Anforderungen an Ersatzbrennstoffe aus Abfällen für die Zementindustrie



Auftraggeber:

**Ministerium für Umwelt
und Verkehr des Landes
Baden - Württemberg**

Oyten, den 22. September 2000

Gliederung

1	AUFGABENSTELLUNG	1
2	METHODE	3
3	DATENGRUNDLAGEN	5
3.1	TRANSFERFAKTOREN	5
3.2	REGELEINSATZSTOFFE	6
4	ERGEBNISSE	7
4.1	LUFTPFAD	7
4.2	ERZEUGNIS	8
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	10
5.1	VERGLEICH DER VORHANDENEN RICHT- UND GRENZWERTVORSCHLÄGE	10
5.2	EMPFEHLUNGEN	13
5.3	ÜBERPRÜFUNG DER EMPFEHLUNGEN AN AUSGEWÄHLTEN BEISPIELEN	14
5.4	ZUSAMMENFASSUNG	15
6	SENSITIVITÄTSANALYSE	16
6.1	PROBENAHMEFEHLER	16
6.2	EINSATZ VON ABFÄLLEN	17
6.3	STREUBREITE VON ROHMATERIALIEN UND REGELBRENNSTOFFEN	17
6.4	ANDERE REGELBRENNSTOFFE	18
6.5	FAZIT SENSITIVITÄTSBETRACHTUNG	19
7	GESAMTFAZIT	20
8	LITERATUR	21

Anforderungen an Ersatzbrennstoffe aus Abfällen für die Zementindustrie

1 Aufgabenstellung

Aufgabe der **Abfallbeseitigung** ist es, Schadstoffe, die ansonsten im Kreislauf geführt und damit in der Umwelt verteilt werden würden, aus den Stoffkreisläufen auszuschleusen, indem sie zerstört oder in definierten Senken konzentriert werden.

Im Unterschied zur Abfallbeseitigung steuert die **Abfallverwertung** Schadstoffsinken nur in untergeordnetem Umfang an; sie verteilt die Schadstoffe stärker auf die Umweltmedien (und in Erzeugnisse).

Verwertung und Beseitigung sind für die Abfallwirtschaft zwei sich gegenseitig stützende und bedingende Aufgabenbereiche. Nur wenn die Beseitigung in dem ökologisch erforderlichen Umfang die in den Abfällen enthaltenen Schadstoffe den Kreisläufen entzieht, kann die Verwertung für die restlichen Abfallarten ihren ökologischen Nutzen voll entfalten.

Das bisherige umweltpolitische Primat in der Abfallwirtschaft (Zerstörung oder Ausschleusen/Konzentrieren und Verlagerung der Schadstoffe in Umweltsenken) war dem Ziel verpflichtet, die Umwelt zu entlasten und dadurch die Belastung des Menschen mit akut oder chronisch toxisch wirkenden Schadstoffen zu minimieren.

Mit einem Wechsel des Paradigmas zur gleichmäßigen Verteilung dieser Stoffe in der Umwelt ist eine Erhöhung der Belastung von Luft, Boden und Wasser und infolgedessen auch eine erhöhte Belastung des Menschen verbunden. Ein derartiger Paradigmawechsel ist daher ökologisch nicht zu verantworten (1).

Um die Stoffflüsse entsprechend ihrer Schadstoffbelastung zu steuern (Stoffstrommanagement), ist die Ableitung und Festlegung von eindeutigen naturwissenschaftlich-technischen Regelungen von zentraler Bedeutung. Diese Regeln sollen sicherstellen, dass sowohl ein Optimum an Schadstoffentfrachtung und Ansteuern von Senken als auch an hochwertiger Verwertung erfolgen kann.

Mit dieser Studie soll überprüft werden, ob die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) im Jahre 1997 erarbeiteten Richtwertvorschläge für die Abfallverwertung in Zementwerken (2) einer heutigen ökologischen Prüfung standhalten. Die in 1997 erarbeiteten Richtwertvorschläge der LAGA beziehen sich auf die energetische Verwertung in Zementwerken. Die hierfür einsetzbaren Abfälle werden, ggf. nach entsprechender Aufbereitung, zur Substitution von Regelbrennstoffen eingesetzt. Für diese Abfälle sind in

Deutschland gegenwärtig unterschiedliche Begrifflichkeiten in der Diskussion (3). Wir haben uns für diese Untersuchung entschlossen, für diese Abfälle den übergreifenden Begriff des KrW-/AbfG (§ 4 Abs. 4) zu verwenden: nämlich "Ersatzbrennstoffe".

Ausgangspunkte der Überprüfung sind die folgenden Randbedingungen bzw. Umweltqualitätsziele:

- **Es darf zu keiner Überschreitung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV im Abgasteilstrom des jeweils eingesetzten Abfalls kommen.**
- **Es darf zu keiner Schadstoffanreicherung im Erzeugnis (Klinker) kommen.**

Die rechtliche Begründung für die Betrachtung des Abgasstroms aus der Verbrennung des Abfalls folgt aus den Anforderungen des § 5 Abs. 3 Satz 1 der 17. BImSchV. In diesem Abgasteilstrom sind die Grenzwerte des § 5 Abs. 1 einzuhalten.

Die rechtliche Begründung für die zweite Randbedingung folgt aus Artikel 4 EG-Abfallrahmenrichtlinie in Verbindung mit dem europarechtlichen Vorsorgegrundsatz sowie den Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft. So darf es nach § 5 Abs. 3 Satz 3 KrW-/AbfG insbesondere zu keinen Schadstoffanreicherungen im Wertstoffkreislauf kommen.

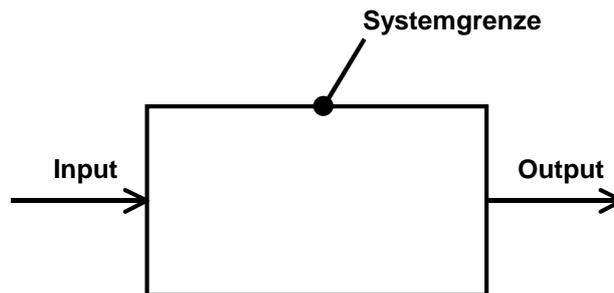
Einen der volkswirtschaftlich wichtigsten Wertstoffkreisläufe stellt sicherlich der Baustoffkreislauf dar. In ihm werden Bauprodukte wie Zement/Beton/Mörtel erzeugt, die sich in Gebäuden, Flächenbefestigungen etc. wiederfinden. Nach Ablauf der „Lebenszeit“ dieser Einrichtungen erfolgt der Abbruch und die Verwertung. Teilmengen der ehemaligen Bauprodukte werden wieder bei der Erzeugung neuer Bauprodukte eingesetzt. Deshalb ist es ökologisch wichtig, dass in diesen Kreislauf keine Schadstoffe in erhöhtem Maße eingetragen werden.

Eine Schadstoffanreicherung in diesem Kreislauf ist dann gegeben, wenn sich die Schadstoffmengen innerhalb des Kreislaufes erhöhen. Dies wird offensichtlich, wenn sich durch die Abfallverwertung die Belastungen der Bauprodukte mit Schadstoffen signifikant erhöhen.

2 Methode

Als Methode für diese Untersuchung wird die Stoffflussanalyse eingesetzt (4). Die Stoffflussanalyse beschreibt die Massenflüsse, die in ein System ein- und austreten. Die folgende Abbildung zeigt diesen Zusammenhang schematisch für ein einfaches Beispiel.

Abb. 1: Grundmodell einer Stoffflussanalyse



Für die Stoffflussanalyse werden die Einträge in ein zu betrachtendes System und deren Austräge quantitativ erfasst, beispielsweise als Fracht eines Stoffes „X“ in der Einheit „Menge je Zeiteinheit“. In der obigen Abbildung finden sowohl Eintrag als auch Austrag nur über *einen* Pfad statt. In der Praxis sind die Fälle in der Regel komplexer.

Im vorliegenden Fall wird die Stoffflussanalyse für abfallwirtschaftliche Fragestellungen eingesetzt. Dies wurde wissenschaftlich bereits an anderer Stelle erfolgreich durchgeführt. Hierfür sei verwiesen auf die Arbeiten von Baccini (4), Brunner (5) und die neueren Arbeiten von Rechberger (zur Stoffkonzentrierungseffizienz (6)). Die dort verwendete Nomenklatur wird auch hier verwendet (nach Rechberger):

Unter einem **Prozess** wird an dieser Stelle eine **konkrete verfahrenstechnische Anlage** verstanden. Das kann eine **Abfallbehandlungsanlage** sein, aber auch eine **technische Produktionsanlage**, in der Abfälle verwertet werden sollen, wie z.B. ein Zementwerk.

Ein **System** besteht aus einer Kombination solcher technischen Verfahrensprozesse einschließlich der räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen.

Die in dieser Untersuchung relevanten **Inputgüter** dieser Prozesse sind Abfälle, mineralische Rohstoffe (wie z.B. Kalkstein bzw. Rohmehl) und Regelbrennstoffe.

Die **Outputgüter** von Prozessen sind Produkte/Erzeugnisse, Emissionen und ggf. Abfälle.

Der **Transferfaktor** (syn. **Transferkoeffizient**) eines Stoffes in ein Umweltmedium (Luft, Wasser, Boden) oder in ein Produkt ist der Quotient aus dem Stofffluss im betreffenden Output und im Inputgut.

In dieser Untersuchung werden Berechnungen für den Reingaspfad von Zementwerken durchgeführt. Zusätzlich wird die Verlagerung von Schadstoffen für den Pfad Erzeugnis berechnet.

Die Betrachtungen werden für die folgenden humantoxikologisch relevanten Stoffe (Schwermetalle) durchgeführt:

- Quecksilber (Hg)
- Antimon (Sb)
- Arsen (As)
- Blei (Pb)
- Cadmium (Cd)
- Chrom (Cr)
- Kobalt (Co)
- Kupfer (Cu)
- Mangan (Mn)
- Nickel (Ni)
- Thallium (Tl)
- Vanadium (V)
- Zink (Zn)
- Zinn (Sn).

3 Datengrundlagen

Die für die Berechnungen herangezogenen Daten entstammen öffentlich zugänglichen Untersuchungen der Zementwirtschaft und wissenschaftlicher Institutionen.

3.1 Transferfaktoren

Tab. 1 zeigt eine aggregierte Übersicht wichtiger Untersuchungen der letzten Jahre im Bereich der Ableitung von Transferfaktoren für den Zementerzeugungsprozess, hier die ermittelten Transferfaktoren für Schwermetallemissionen ins Reingas ($\Upsilon_{\text{Reingas}}$).

Tab. 1: Vergleichende Darstellung verschiedener Transferfaktoren ins Reingas (Υ) aus unterschiedlichen Quellen und die für diese Untersuchung verwendeten Transferfaktoren (hier: Υ Min und Υ Max)

Elemente	VDZ (D) ①	VDZ (D) ②	Gallenk./ Braungart (D) ③	BZL (D) ④	GCI (USA) ⑤	Graf (CH) ⑥	PRIZMA- Studie (A) ⑦	Mittelwert	Υ Min	Υ Max
Verfahren	trocken	trocken	trocken	trocken	nass/ trocken	trocken	trocken	alle	alle	alle
Quecksilber	0,40	0,30	0,93	0,75		0,16	0,40	0,52	0,16	0,93
Antimon	0,0003	0,000005	0,0002	0,0003	0,0016	0,0001		0,0004	0,000005	0,0016
Arsen	0,0002	0,000005	0,0002	0,0001	0,0006	0,0001		0,0002	0,000005	0,0006
Blei	0,0005	0,00002	0,0002	0,0036	0,0064	0,0001	0,0004	0,0014	0,000020	0,0064
Cadmium	0,0017	0,00003	0,0005	0,0028	0,0044	0,0002	0,0002	0,0013	0,000030	0,0044
Chrom	0,00012	0,000005	0,00004	0,0001	0,0005	0,000023		0,00014	0,000005	0,0005
Kobalt	0,0002	0,000005	0,0003	0,0002		0,00001		0,0002	0,000005	0,0003
Kupfer	0,00009	0,000005	0,0002	0,0001		0,00001		0,00009	0,000005	0,0002
Mangan	0,0002	0,000005		0,0001				0,0001	0,000005	0,0002
Nickel	0,0003	0,000005	0,0001	0,0002		0,000010		0,00013	0,000005	0,0003
Thallium	0,0130	0,0002	0,0110	0,0270	0,0005	0,0008		0,0086	0,000200	0,0270
Vanadium	0,0005	0,000005		0,001				0,0005	0,000005	0,001
Zink	0,0003	0,000005	0,00007	0,0001		0,000006	0,0001	0,0001	0,000005	0,0003
Zinn	0,0007	0,000005	0,00003	0,001				0,0004	0,000005	0,001

① Mittelwerte für Deutschland nach Verein Deutscher Zementwerke aus (7) nach $\Upsilon = F_{\text{Reingas}}/F_{\text{Input}}$ (F = Fracht)

② Mittelwerte für Deutschland nach Verein Deutscher Zementwerke aus (7) nach „Einbinde- mal Abscheidegrad“

③ Transferfaktoren nach (8)

④ Mittelwert für Zementwerke in NRW, berechnet nach $\Upsilon = F_{\text{Reingas}}/F_{\text{Input}}$, Datenbasis nach Winkler (9)

⑤ Mittelwert aus Bilanzmessungen an 34 Zementöfen (= *kiln*) (10)

⑥ Theoretische Υ ermittelt aus den im Stoff-Modell von Graf (11) verwandten Υ ohne Koksfilter (90 % Verbundbetrieb, 10 % Direktbetrieb), siehe dort: (A40 bis L63)

⑦ Transferfaktoren nach $\Upsilon = F_{\text{Reingas}}/F_{\text{Input}}$ (12)

Tab. 1 zeigt, dass die Transferfaktoren je nach Literaturquelle und Element um den Faktor 10 bis 100 schwanken. Hiermit wird die Bandbreite der vorhandenen Verfahren (trocken,

nass) abgedeckt. Weiter werden die wissenschaftlichen Unsicherheiten bei der Methodik der Modellbildung einbezogen (Black box, Einbinde- mal Abscheidegrad). Für die Berechnungen wird daher mit der Streubreite der Daten gerechnet (γ Min und γ Max).

3.2 Regeleinsatzstoffe

Die folgende Tabelle zeigt Werte für Rohmehl und Regelbrennstoffe, wie sie von Sprung (13) zusammengestellt bzw. berechnet wurden.

Die prozessspezifischen Daten sind ebenfalls der Publikation von Sprung (13) und weiteren aktuellen Ausarbeitungen der Zementindustrie entnommen worden. So wird mit einem energiespezifischen Abgasvolumen von 0,55–0,67 m³/MJ und einem Energiebedarf von 3,0–3,8 MJ/kg Klinker gerechnet

Tab. 2: Belastung von Rohmehl und Regelbrennstoffen der Zementwirtschaft (13) in mg/kg; * = keine Daten bei Sprung (13), daher eigene Literaturrecherche, insbesondere Daten aus (8, 14, 15)

Parameter	Rohmehl (Ton/Kalk 1:3)		Steinkohle (Hu 26.000 – 28.000 MJ/Mg)	
	Min in mg/kg	Max in mg/kg	Min mg/kg	Max mg/kg
Antimon	0,1*	0,3*	0,05*	5*
Arsen	3	15	9	50
Blei	4	15	11	270
Cadmium	0,04	0,15	0,1	10
Chrom	23	39	5	80
Kobalt	2*	9*	0,52*	26*
Kupfer	5*	19*	0,52*	44,2*
Mangan	50*	500*	5,2*	262*
Nickel	18	23	20	80
Quecksilber	0,01*	0,05*	0,03*	0,78*
Thallium	0,21	0,78	0,2	4
Vanadium	32	102	30	50
Zink	31	47	16	220
Zinn	2*	5*	1,3*	7,8*

4 Ergebnisse

Bei der Zementherstellung werden bei den in Mitteleuropa vorherrschenden technischen Verfahren die mit den Einsatzstoffen eingetragenen Schwermetalle über die luftseitigen Anlagenemissionen und/oder das Erzeugnis (Klinker) ausgetragen. Daher werden im Folgenden auch nur diese beiden Pfade betrachtet.

Für den **Luftpfad** ist **Quecksilber** von großer Bedeutung, die restlichen hier betrachteten Schwermetalle weisen für diesen Pfad eine vergleichsweise geringere Relevanz auf.

Für den Pfad **Erzeugnis** sind die Schwermetalle Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zink und Zinn von Bedeutung.

Es werden im Folgenden mit der beschriebenen Methode und der dokumentierten Datenlage emissions- und produktspezifische Obergrenzen für Ersatzbrennstoffe errechnet.

4.1 Luftpfad

Betrachtet wird im Folgenden das Schwermetall Quecksilber.

Ausgehend von den Grenzwerten der 17. BImSchV für Quecksilber (Tagesmittelwert) wird errechnet, welche Obergrenze der als Ersatzbrennstoff eingesetzte Abfall einhalten muss, damit im Abgasteilstrom keine Emissionsüberschreitungen eintreten.

Diese emissionsseitige Obergrenze ξ ist auf die Energieeinheit MJ normiert, wodurch die unterschiedliche Höhe des Heizwertes eines Ersatzbrennstoffes als Einflussgröße auf das Ergebnis einbezogen wird. Die emissionsseitige Obergrenze ξ errechnet sich wie folgt:

$$\xi = EG \cdot \rho / \Upsilon$$

ξ = emissionsseitige Obergrenze

EG = Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV

ρ = spezifische Abgasmenge in m³/MJ (N, tr., 11 % O₂)

Υ = Transferfaktor ins Reingas

Die folgende Tabelle zeigt die erhaltenen Berechnungsergebnisse, wobei die höchste spezifische Abgasmenge mit der höchsten Durchbruchrate (niedrigster Transferfaktor) gerechnet wurde (und umgekehrt), um die ganze Bandbreite der Datenstreuung zu erfassen.

Tab. 3: Vom Ersatzbrennstoff für Quecksilber einzuhaltende emissionsbezogene Obergrenze, damit im Abgasteilstrom keine Grenzwertüberschreitungen eintreten

Emissionsgrenzwert (EG) der 17. BImSchV in mg/m ³	Tagesmittelwert	
	für Quecksilber (N, tr., 11 % O ₂)	
Y Transferfaktor Reingas	0,16 (11)	0,93 (8)
ρ spezifische Abgasmenge in m ³ /MJ (N, tr., 11 % O ₂)	0,55	0,67
ξ emissionsseitige Obergrenze in mg/MJ	0,15	0,021

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse sehr stark von den jeweils gegebenen Abscheideleistungen der Zementwerke (Transferfaktor Reingas) geprägt sind.

Weiter zeigt sich, dass bei Einhalten des LAGA-Richtwertes für Quecksilber (0,02 mg/MJ) auch bei einem Transferfaktor von 0,93 der Grenzwert der 17. BImSchV nicht überschritten wird.

4.2 Erzeugnis

Betrachtet werden die Schwermetalle Quecksilber, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Thallium, Vanadium, Zink und Zinn.

Eine Anreicherung im Erzeugnis findet dann statt, wenn die Grundbelastung des erzeugten Klinkers durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen erhöht wird (s.o.). Unter Grundbelastung werden die Schadstoffbelastungen verstanden, die bei der Zementerzeugung gegeben sind, wenn der Klinker insgesamt ohne Abfallstoffe, d. h. im Wesentlichen aus Ton und Kalkstein als Rohmaterial und Steinkohle als Brennstoff, erzeugt wird.

Da die Grundbelastung des Klinkers auch beim ausschließlichen Einsatz von Primärroh- und -brennstoffen einen definierten Schwankungsbereich aufweist (im Folgenden Δ), tritt die Anreicherung im Erzeugnis erst dann ein, wenn dieser Schwankungsbereich überschritten wird. Delta wird wie folgt berechnet:

$$\Delta = [\varphi_{\text{Max}} \cdot (1 - \Upsilon_{\text{Min}}) + \theta_{\text{Max}} \cdot (1 - \Upsilon_{\text{Min}})] - [\varphi_{\text{Min}} \cdot (1 - \Upsilon_{\text{Max}}) + \theta_{\text{Min}} \cdot (1 - \Upsilon_{\text{Max}})]$$

wobei

Δ = Streubreite der Grundbelastung des Klinkers in mg/MJ Brennstoffeinsatz („Schwankungsbereich“)

φ = Schwermetallfracht Rohmehl in mg/MJ Brennstoffeinsatz

θ = Schwermetallfracht Steinkohle in mg/MJ Brennstoffeinsatz

Υ = Transferfaktor ins Reingas, $1 - \Upsilon$ = Transferfaktor ins Erzeugnis

Die Anreicherung im Erzeugnis ist dann ausgeschlossen, wenn der Ersatzbrennstoff eine definierte produktseitige Obergrenze Ψ dauerhaft unterschreitet. Diese Obergrenze ergibt sich wie folgt:

$$\Psi = 0,5 \cdot \Delta + \theta_{\text{Mittel}}$$

θ_{Mittel} = mittlere Schwermetallfracht Steinkohle in mg/MJ Brennstoffeinsatz (Mittelwert aus Tab. 2)

Diese Annahmen stellen konservative Randbedingungen dar, weil sie die rechnerische Grenzsituation der Schwermetallbelastung des Zementklinkers erfassen. Daher stellt Ψ **keinen Richtwert, sondern eine Obergrenze dar**. Die folgende Tabelle zeigt die erhaltenen Ergebnisse.

Tab.4: Produktbezogene Obergrenzen (Ψ) für Ersatzbrennstoffe, die eine Anreicherung im Erzeugnis ausschließen (in mg/MJ)

Parameter	Δ	θ_{Mittel}	Produktbezogene Obergrenze Ψ
Quecksilber	0,04	0,01	0,03
Antimon	0,23	0,09	0,2
Arsen	5,88	1,05	4,0
Blei	11,95	5,02	11
Cadmium	0,33	0,18	0,3
Chrom	8,53	1,52	5,8
Kobalt	3,53	0,47	2,2
Kupfer	6,85	0,80	4,2
Mangan	186	4,77	98
Nickel	3,55	1,79	3,6
Thallium	0,34	0,08	0,2
Vanadium	28,05	1,43	15
Zink	12,25	4,21	10
Zinn	1,37	0,16	0,8

Die Analyse der Rechenergebnisse zeigt, dass die Streubreite der Transferfaktoren (Tab. 1) sich nur für Quecksilber auf die Obergrenzen der obigen Tabelle auswirken. Eine größere Bedeutung ist den natürlichen Belastungen der Rohstoffe und des Regelbrennstoffes zuzuschreiben.

5 Diskussion der Ergebnisse

Wie die obigen Ergebnisse sich in die vorhandenen Richt- und Grenzwertvorschläge für die Abfallverwertung in der Zementindustrie einordnen und welche Empfehlungen zur Grenzwertregulierung zu geben sind, wird nachfolgend diskutiert.

5.1 Vergleich der vorhandenen Richt- und Grenzwertvorschläge

Die folgende Tab. 4 zeigt einen Vergleich der obigen mittels Stoffflussanalyse erzielten luftbezogenen (ξ) bzw. produktbezogenen Obergrenzen (Ψ) mit verschiedenen in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschlägen.

Tab. 4: Vergleich der in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschläge mit den in dieser Untersuchung abgeleiteten Obergrenzen (emissionsseitig = ξ , produktseitig = Ψ) für Ersatzbrennstoffe (in mg/MJ), k.R. = keine Relevanz
A = heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall (Hu 16.000 MJ/Mg)
B = produktionsspezifische Abfälle (Hu 20.000 MJ/Mg)

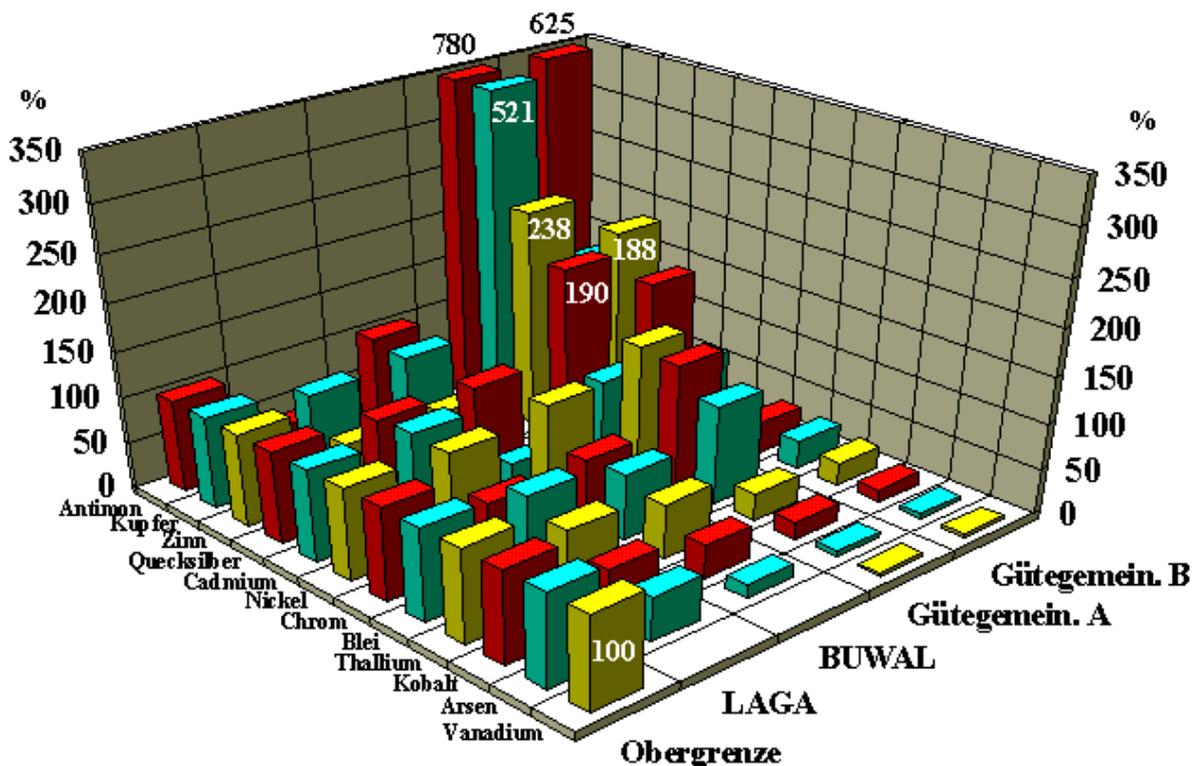
Parameter	emissionsseitige	Produktseitige	LAGA- Richtwert Entwurf 1997 (2) mg/MJ	BUWAL- Richtwert (16) mg/MJ	Medianwert Bundesgüte- gemeinschaft Sekundärbrenn- stoffe (17) mg/MJ	
	Obergrenzen für Ersatz- brennstoffe ξ mg/MJ	Obergrenzen für Ersatz- brennstoffe Ψ mg/MJ			A	B
Quecksilber	0,021	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03
Antimon	k.R.	0,2	0,07	0,2	1,56	1,25
Arsen	k.R.	4,0	1,9	0,6	0,3	0,25
Blei	k.R.	11	10,0	8,0	11,9	3,5
Cadmium	k.R.	0,3	0,3	0,08	0,25	0,2
Chrom	k.R.	5,8	3,7	4,0	7,8	2,0
Kobalt	k.R.	2,2	1,2	0,8	0,4	0,3
Kupfer	k.R.	4,2	3,7	4,0	21,9	6,0
Mangan	k.R.	98	k.A.	k.A.	15,6	2,5
Nickel	k.R.	3,6	3,5	4,0	5,0	1,3
Thallium	k.R.	0,2	0,15	0,12	0,06	0,05
Vanadium	k.R.	15	k.A.	k.A.	0,6	0,5
Zink	k.R.	10	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Zinn	k.R.	0,8	0,4	0,4	1,9	1,5

Es wird deutlich, dass die Regelungsvorschläge und die hier berechneten Obergrenzen (emissionsseitig = ξ , produktseitig = Ψ) für Ersatzbrennstoffe für viele Elemente zahlenmäßig gut übereinstimmen. Im Falle von Arsen, Mangan und Vanadium fallen alle Regelungsvorschläge niedriger aus, als dies nach der hier jeweils abgeleiteten Obergrenze möglich wäre. Hier ergäben sich ggf. Spielräume (wenn in der Praxis erforderlich), die Grenzwerte anzupassen (siehe auch Tab. 6).

Im Falle von Quecksilber, Antimon, Chrom, Kupfer und Zinn liegen die Medianwerte der Gütegemeinschaft (für Brennstoffe aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen) **über** der hier berechneten Obergrenze und den LAGA- sowie BUWAL-Richtwerten.

Die folgende Abbildung illustriert das Ergebnis für zwölf der genannten Schwermetalle.

Abb. 2: Vergleich der in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschläge mit den in dieser Untersuchung abgeleiteten Obergrenzen (emissionsseitig ξ ; Hg; produktseitig Ψ : übrige) für Ersatzbrennstoffe (in mg/MJ); Obergrenze = 100 %
 Gütegem. A = heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall (Hu 16.000 MJ/Mg)
 Gütegem. B = produktionsspezifische Abfälle (Hu 20.000 MJ/Mg)



Tab. 4 zeigt, dass die Grenzwertvorschläge zahlenmäßig oftmals übereinstimmen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Werte unterschiedlich definiert sind. Entscheidend für die Regelung auf diesem Feld ist erfahrungsgemäß, wie die Spitzenwertproblematik abgedeckt ist.

Die folgende Tabelle zeigt die Spitzenwertregelung der Gütegemeinschaft.

Tab. 5: Spitzenwertregelung der Gütegemeinschaft

Parameter	80 Perzentil-Wert Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe (17), mg/MJ	
	aus heizwertreicher Fraktion aus Siedlungsabfall (Hu 16.000 MJ/Mg)	aus produktionsspezifischen Abfällen (Hu 20.000 MJ/Mg)
Quecksilber	0,075	0,06
Antimon	3,75	3,0
Arsen	0,81	0,65
Blei	k.A.	10
Cadmium	0,56	0,45
Chrom	15,6	6,0
Kobalt	0,75	0,6
Kupfer	k.A.	k.A.
Mangan	31	5
Nickel	10	2,5
Thallium	0,125	0,1
Vanadium	1,56	1,25
Zink	k.A.	k.A.
Zinn	4,38	3,5

Der Wert der Gütegemeinschaft stellt einen sog. 80 Perzentil-Wert dar. Dieser gibt den Wert an, den 80 % aller Proben unter- bzw. den 20 % aller Proben überschreiten.

Die Analyse der Grenzwerte zeigt (vergl. Tab. 4 und Tab. 5), dass die Gütegemeinschaft ihre Werte nicht allein von Umweltqualitätszielen her definiert hat, sondern möglicherweise auch wirtschaftliche Aspekte mit im Auge hatte. Für aufgearbeitete Siedlungsabfälle, insbesondere wenn die NE-Metallabscheidung nicht optimal durchgeführt wird, treten die Schwermetalle Blei, Nickel, Chrom und Kupfer häufig mit Belastungsspitzen auf. Antimon stellt als Kunststoffadditiv ein weiteres Spitzenwertthema dar.

5.2 Empfehlungen

Eine weitere Grenzwertliste ist nach unserer Auffassung insbesondere für den Abfalleinsatz in Zementwerken entbehrlich. Die LAGA-Werte werden bundesweit diskutiert. Sie sind ggf. für einzelne Parameter geringfügig anzupassen (siehe hierzu Ziffer 5.1). Die Anpassungen ergeben sich vor dem Hintergrund des hier für den Zementherstellungsprozess gewählten neuen Berechnungs- und Bewertungsansatzes. Die LAGA-Werte haben nach unseren Untersuchungen weiterhin grundsätzlich Bestand.

Eine Schwäche der LAGA-Werte war ihre Festlegung als **Richtwerte**. Dies lässt offen, ob Richtwerte einzuhalten (zu unterschreiten) sind, oder ob sie mehr einen orientierenden Charakter haben. Wir empfehlen, die Definition der LAGA-Werte präziser zu fassen und als Obergrenze festzulegen. Diese Obergrenze sollte durch eine Spitzenwertregelung ergänzt werden. Wir empfehlen eine „4 von 5-Regelung“. Hiernach hat der von der Regelung Betroffene die Möglichkeit, maximal jeden fünften Messwert, sofern dieser einen Ausreißer darstellt, zu verwerfen. Ausreißer können auch durch Probenahmeprobleme oder Laborfehler zustande kommen (s.u.). Daher ist die „4 von 5“-Regelung auch inhaltlich gerechtfertigt. Alle verbliebenen Werte müssen die definierte Obergrenze unterschreiten.

Die Obergrenze (inkl. Ausreißerregelung) ist ausschließlich als Inputgrenzwert in die Verwertungsanlage (z. B. Zementwerk) zu definieren. Eine Aufbereitungsstrategie, die das Ziel hat, die genannten Obergrenzen durch Vermischen von belasteten mit unbelasteten Abfällen zu unterschreiten, ist abfallwirtschaftlich unerwünscht und zu untersagen.

5.3 Überprüfung der Empfehlungen an ausgewählten Beispielen

Im Folgenden wird untersucht, wie sich die Belastungswerte von Abfällen darstellen, um zu prüfen, ob die Abfälle für die Verwertung geeignet sind bzw. welche Anforderungen an eine Aufbereitung zu stellen wären.

Tab. 6: Anteil Überschreitungen des LAGA-Wertes bei heizwertreichen Fraktionen aus Siedlungsabfällen und ausgewählten Gewerbeabfällen, unter Anwendung der „4 von 5-Regelung“, Anwendung auf unterschiedliche Datenkollektive; k.D. = keine Daten für diesen Parameter;
„Sonderabfälle“ = besonders überwachungsbedürftige Abfälle

Parameter	„Sonder- abfälle“ Lack- und Farbschlamm (1)	Heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungsabfällen		Gewerbliche Abfälle		
		aus MBA, keine optimierte Aufbereitung (18)	MBA- Siebschnitt (50–150 mm), keine Aufbereitung (19)	Sonstige ausgehärtete Kunststoff- abfälle (LAGA AS 571) (20)	Holzabfälle ohne schädliche Verunrein. (AS 170201) (21)	Textil- abfälle (22)
Quecksilber	57 %	24 %	0 %	0 %	0 %	k.D.
Antimon	k.D.	41 %	70 %	38 %	k.D.	> 50 %
Arsen	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Blei	63 %	1 %	30 %	18 %	0 %	0 %
Cadmium	43 %	0 %	0 %	0 %	k.D.	0 %
Chrom	86 %	63 %	80 %	0 %	0 %	< 50 %
Kobalt	k.D.	0 %	0 %	0 %	k.D.	0 %
Kupfer	50 %	55 %	75 %	12 %	0 %	0 %
Nickel	13 %	20 %	45 %	0 %	k.D.	0 %
Thallium	k.D.	0 %	k.D.	0 %	k.D.	0 %
Zinn	k.D.	68 %	80 %	38 %	k.D.	< 50 %

Der hier exemplarisch betrachtete Sonderabfall (Farb- und Lackschlamm) ist für eine Verwertung in Zementwerken nicht geeignet; seine Schadstofffracht dürfte auch nicht durch weitere Aufbereitung so weit gemindert werden können, dass er danach geeignet wäre. Weiter zeigt sich, dass die hier betrachteten hochkalorischen MBA-Fraktionen ohne weitergehende Aufbereitung die von uns empfohlene Regelung nicht werden einhalten können. Bezüglich einzelner unbelasteter Gewerbeabfälle erscheint eine Einhaltung für Einzelfraktionen möglich, wobei natürlich auch hier stark auf Herkunft und Qualität zu achten ist.

Die obige Datenanalyse an ausgewählten Beispielen kann keine vollständige Marktanalyse ersetzen. Diese muss weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

5.4 Zusammenfassung

Ein Vergleich mit Daten aus dem Bereich der belasteten Sonderabfälle, die als Ersatzbrennstoffe in ausländischen Zementwerken eingesetzt werden (1), zeigt, dass die empfohlenen Anforderungen beim Einsatz dieser Abfälle nicht eingehalten werden können.

Bei Ersatzbrennstoffen aus sortenreinen Gewerbeabfällen erscheinen die empfohlenen Anforderungen einhaltbar.

Für Ersatzbrennstoffe aus Siedlungsabfällen müssen hohe Anforderungen an die Aufbereitung gestellt werden.

Bezieht man die oben dargestellte Datenstreuung mit ein, kann insgesamt festgestellt werden, dass die LAGA-Werte unter ökologischen Gesichtspunkten weiterhin Bestand haben und zu belastbaren Ergebnissen führen. Um die eingangs formulierten Umweltqualitätsziele sicher zu stellen, wird empfohlen, die LAGA-Werte in den Vollzug einzuführen. Sie sollten als Obergrenze definiert und mit einer „4 von 5“-Regelung zur Berücksichtigung von echten Ausreißerwerten verknüpft werden. Auf europäischer Ebene sind die BUWAL-Werte in der Diskussion. Die Unterschiede zwischen BUWAL-Werten und LAGA-Werten sind unter den hier untersuchten Randbedingungen und Datenschwankungen gering, ggf. sind für einzelne Parameter Anpassungen erforderlich.

6 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient der kritischen Diskussion der oben erhaltenen Ergebnisse. Sie soll die Robustheit der hier getroffenen Empfehlungen insbesondere vor dem Hintergrund geänderter Randbedingungen und Datengrundlagen untersuchen.

6.1 Probenahmefehler

Das Thema Probenahmefehler ist nach wie vor aktuell. In der Literatur hat es Thomanetz (23) kürzlich mit der Überschrift „Das Märchen von der repräsentativen Abfallprobe“ auf den Punkt gebracht. Das Entnehmen einer repräsentativen Probe aus einem „ruhenden Haufwerk“ sehr heterogener grobstückiger Abfälle ist hiernach mit hohem Aufwand verbunden.

Dieser Aufwand verringert sich, wenn die Abfälle eine Aufbereitung durchlaufen haben, wie es für Ersatzbrennstoffe aus Siedlungsabfällen regelmäßig der Fall sein dürfte. Dennoch sollten auch in diesem Fall die Schwierigkeiten nicht unterschätzt werden.

Für die Durchführung repräsentativer Probenahmen sind einschlägige Vorschriften zu beachten (24). In der Praxis sind an dieser Stelle erhebliche Defizite zu beklagen.

Die obigen Empfehlungen (LAGA-Werte, Obergrenze, Überschreitsregelung) sind nur dann sinnvoll umsetzbar, wenn auf der Ebene der Probenahme ein höherer Aufwand getrieben wird.

Insgesamt stellt es ein fachliches Defizit dar, dass die bisherigen Regelungsvorschläge nicht ausreichend mit Anforderungen an die Repräsentativität der Probenahme verzahnt sind.

Die erforderlichen Anstrengungen bei der Durchführung repräsentativer Probenahmen stoßen grundsätzlich auf methodische und praktische Grenzen bei der Analytik von heterogenen Abfällen. **Daher ist zusätzlich für probenahmebedingte Ausreißer in unseren obigen Empfehlungen eine Ausreißerregelung einbezogen.**

6.2 Einsatz von Abfällen

Eine wichtige „Größe“ in den durchgeführten Berechnungen stellt die Streubreite ($\Delta = \text{delta}$) der Schadstoffgrundbelastung der Roh- und Brennstoffe für das Gesamtergebnis dar.

So ergeben sich höhere Δ -Werte, wenn die heute bereits eingeführte Praxis der Mitverbrennung von Abfällen und der Verarbeitung von anorganischen Abfallstoffen einbezogen wird. Hiervon wurde Abstand genommen und nur die Streubreite von gebräuchlichen natürlichen Primäreinsatzstoffen und Regelbrennstoffen einbezogen.

Diese Randbedingung ist ergebnisrelevant, wobei anzumerken ist, dass in Deutschland gegenwärtig stärker von der Einbeziehung einzelner anorganischer Abfallstoffe (wie beispielsweise Flugaschen) als sog. Sekundärrohstoffe auszugehen ist. Auf europäischer Ebene ist an dieser Stelle auch die intensive Nutzung von Sonderabfällen als „Ersatzbrennstoff“ in Zementwerken zu nennen.

Das Ausblenden der heute bereits praktizierten Abfallnutzung kann sicherlich kritisiert werden. Für den hier gewählten Ansatz spricht, dass hierdurch auf einen ökologisch begründeten Standard normiert wird, der insbesondere auch dem Anspruch der Bau(roh)stoffbranche, ein Naturprodukt zu erzeugen („clean production“), gerecht wird.

6.3 Streubreite von Rohmaterialien und Regelbrennstoffen

Auch die natürlichen Rohmaterialien und Regelbrennstoffe unterliegen einer Streuung, die in Form des Δ erfasst und der Studie zugrunde gelegt wurde. Nun wird sicherlich ein Kritiker mit Werten argumentieren können, die eine größere Streuung nahelegen als die von uns verwendeten Daten. Hierzu ist zunächst anzumerken, dass die vorhandenen Daten weitgehend aus Quellen der Zementwirtschaft stammen.

Weiter ist anzumerken, dass für die oben genannten Qualitätsziele die Regelsituation („clean production“, Regelbrennstoff, Regelrohstoff) zu erfassen ist.

Dennoch ist im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung interessant, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn Modifikationen im Bereich der Streubreite der Grundbelastung vorgenommen werden. Unsere Sensitivitätsberechnungen zeigen, dass sich in diesem Fall der jeweilige Zahlenwert zwar verändert, aber in der Bandbreite der Richtwertempfehlungen von LAGA und BUWAL bleibt.

Dies ändert sich allerdings, wenn keine gebräuchlichen, sondern hoch belastete Brennstoffe bzw. Rohmaterialien in die Rechnung eingesetzt werden. So wird in Diskussionen immer exemplarisch über Kohlen berichtet, die Quecksilberwerte von über 10 mg/kg aufweisen. Im

Extremfall könnte ggf. mit natürlichen Rohstoffen (Erze) argumentiert werden, die Schwermetallegehalte im Prozentbereich aufweisen.

Das Vorhandensein derartiger Materialien wird an dieser Stelle nicht in Frage gestellt. Nur wer setzt derartig belastete Materialien im Rahmen einer „clean production“-Philosophie ein? Und wenn doch, so ist dieses Faktum eher als Defizit bei der Kontrolle und Reglementierung von Ausgangsstoffen für die Zementerzeugung zu werten.

Dennoch bleibt festzustellen, dass die Ergebnisse in Frage gestellt werden können, wenn derartig hoch belastete Rohmaterialien und Brennstoffe einbezogen werden.

6.4 Andere Regelbrennstoffe

In dieser Studie wurde als Regelbrennstoff handelsübliche Steinkohle eingerechnet. Es sind in gewissem Umfang Regelbrennstoffe am Markt, die höher belastet sind als Steinkohle (Vollwert).

Zement wird in Deutschland auch häufig mit Regelbrennstoffen hergestellt, die geringer belastet sind als Steinkohle. Tab. 7 zeigt dies am Beispiel von aktuellen Braunkohleproben aus Osteuropa.

Daher kann u.E. nicht der Vorwurf erhoben werden, dass mit der Auswahl des Regelbrennstoffes Steinkohle eine zu „saubere“ Regelenergie zugrunde gelegt worden sei.

Tab. 7: Schadstoffbelastung von Braunkohle (25)

Parameter	Braunkohle Osteuropa (braun) mg/kg	Braunkohle Osteuropa (schwarz) mg/kg	Braunkohle Osteuropa (braun) mg/MJ	Braunkohle Osteuropa (schwarz) mg/MJ
Quecksilber	0,2	0,7	0,01	0,03
Antimon	0,04	0,5	0,002	0,02
Arsen	57,8	153	2,5	7,5
Blei	0,4	2,9	0,02	0,1
Cadmium	0,2	0,2	0,01	0,01
Chrom	0,4	0,5	0,02	0,02
Kobalt	0,4	0,5	0,02	0,02
Kupfer	0,4	3,0	0,02	0,1
Mangan	50,9	59,5	2,2	2,9
Nickel	0,4	0,5	0,02	0,02
Thallium	0,2	0,2	0,01	0,01
Vanadium	18,2	29,0	0,8	1,4
Zink	4,0	5,5	0,2	0,3
Zinn	0,4	0,5	0,02	0,02

6.5 Fazit Sensitivitätsbetrachtung

Die obige Betrachtung zeigt, dass realistische Randbedingungen gewählt wurden. Wobei die Randbedingungen so gewählt wurden, dass sie dem Ziel „clean production“, also Produktion aus sauberen Rohstoffen, verpflichtet sind.

7 Gesamtfazit

Die obigen ökologischen Ableitungen zeigen, dass mit Unterschreitung der LAGA-Werte für „Abfallmitverbrennung im Zementwerk“ für die toxikologisch relevanten Schwermetalle

- Quecksilber
- Antimon
- Arsen
- Blei
- Cadmium
- Chrom
- Kobalt
- Kupfer
- Mangan
- Nickel
- Thallium
- Vanadium
- Zink
- Zinn

die Einhaltung der Umweltqualitätsziele

- keine Überschreitung der Grenzwerte der 17. BImSchV im Abgasteilstrom des jeweils eingesetzten Abfalls,
- keine Schadstoffanreicherung im Erzeugnis bzw. Wertstoffkreislauf, sichergestellt ist.

Die LAGA-Werte sind in Deutschland bekannt. Sie halten, wie hiermit gezeigt werden konnte, einer ökologischen Prüfung stand. Sie sollten daher nicht durch neue Vorschläge ersetzt werden.

Dies gilt auch für die BUWAL-Werte, die eng mit den LAGA-Werten kommunizieren.

Die LAGA-Werte sollten aus ökologischen Gründen und der besseren Vollziehbarkeit wegen als einzuhaltende Obergrenzen für Ersatzbrennstoffe verstanden werden. Die hiermit verbundene Verschärfung gegenüber einer Definition als orientierender Richtwert sollte über eine verbesserte Probenahmepraxis (Repräsentativität) und eine angemessene „Ausreißerregelung“ aufgefangen werden. Hierzu wird vorgeschlagen, die in Deutschland in anderen Regelungsbereichen eingeführte und bewährte „4 von 5“-Regelung zu übernehmen.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass die hier vorgeschlagene Grenzwertregelung für die Abfallmitverbrennung von Ersatzbrennstoffen nicht bedeutet, dass auf eine emissionsseitige Überwachung der Verbrennungsanlagen verzichtet werden kann.

8 Literatur

- 1 Deutsche Projekt Union (DPU), BZL GmbH: Studie zu den abfallwirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der im Arbeitsentwurf einer Abfallverwaltungsvorschrift (AbfallVwV) vertretenen Rechtspositionen. Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg. Stuttgart, August 2000
- 2 LAGA – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 1997: Maßstäbe und Kriterien für die energetische Verwertung von Abfällen in Zementwerken. Entwurf 31. 10. 1997
- 3 Siehe hierzu u.a. Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe
- 4 Baccini P., Brunner P.H.: Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag, Heidelberg, 1991
- 5 Fehringer R., Rechberger H., Pesonen H.-L., Brunner P.H.: Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (ASTRA), Endbericht im Auftrag der ARGE Thermik, Wien, November 1997
- 6 Rechberger H.: Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft. Wiener Mitteilungen Wasser * Abwasser * Gewässer Band 158, Wien 1999
- 7 BZL GmbH, Oytten/DPU GmbH, Essen: Beurteilung der Umweltverträglichkeit von thermischen Entsorgungsmaßnahmen. Studie im Auftrag des MURL NRW, 1999; und darauf aufbauend: Ministerium für Umwelt, und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Arbeitshilfe "Stoffflussanalyse bei abfallrechtlichen Beurteilungsfragen"
- 8 Gallenkemper, B., Braungart, M. et al.: Untersuchung zur Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit von Substitut-Brennstoffen. Rethmann Entsorgung, Dieselstr. 3, 44805 Bochum, 1999
- 9 Winkler, Landesumweltamt NRW, diverse Publikationen u.a. WINKLER H.-D.: Praxis der energetischen Verwertung von Abfällen in Nordrhein-Westfalen. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Zementwerke – NOx-Minderung – Abfallverwertung. Fachtagung am 2.7.1998 in Wackersdorf, Dokumentation, S. 65–98, 1998
- 10 Goosman, D., Constans, D., Woodford, J. et. al.: Metal Equilibration and Process Capture Efficiencies in Cement Kilns. AWMA International Specialty Conference on Waste Combustion in Boilers an Industrial Furnaces March, 1993
- 11 Modell Dr. Graf AG, Gerlafingen (CH)/BUWAL (CH): Beschreibung zum Stoffflussmodell des Zementwerks DR. GRAF AG (BESCHREI.DOC), und Stoffmodell in EXCEL (STOFLMOD.XLS), 20.1.2000
- 12 Fehringer R., Rechberger H., Brunner H.P.: Positivlisten für Reststoffe in der Zementindustrie: Methoden und Ansätze (PRIZMA). Endbericht, im Auftrag der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. Wien, im Dezember 1999
- 13 Sprung S.: Technologische Probleme beim Brennen des Zementklinkers, Ursachen und Lösungen. Schriftenreihe der Zementindustrie (VDZ), Heft 43.
- 14 Merian. E.: Metals and their Compounds in the Environment. Verlag Chemie, Weinheim, 1991

- 15 VEBA: Knobloch W., Uckermann B.: Energetische Verwertung in Kraftwerken. VDI - 29.1.1997
- 16 BUWAL: Richtlinie Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Bern 1998
- 17 Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V.: Informationen zum RAL-Gütezeichen Sekundärbrennstoffe. Entwurfsfassung Juni 2000
- 18 INFA GmbH, Ahlen: pers. Mitt.
- 19 IBA GmbH, Hannover: Daten aus der wissenschaftlichen Begleitforschung an den drei niedersächsischen Demonstrationsanlagen; Veröffentlichung in Vorbereitung
- 20 Daten von Entsorgern, pers. Mitt.
- 21 Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.): Untersuchungsbericht zum Gemeinschaftsprojekt Altholzverwertung in Baden-Württemberg. Reihe Abfall, Heft 59, 1999
- 22 INFA GmbH, Ahlen/BZL GmbH, Oyten: Wissenschaftliche Beratung bei der Genehmigung der ConTherm-Anlage im Auftrag des MURL NRW und der VEW Energie AG/Edelhoff Umweltservice GmbH Co. KG, März 2000
- 23 Thomanetz E.: Das Märchen von der repräsentativen Abfallprobe. Universität Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft. Manuskript
- 24 So u.a. LAGA: Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Beseitigung von Abfällen, PN 2/78 K „Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen“, 1983
- 25 Scheidl Umweltanalytik, Wien: aktuelle Untersuchungen