
Verwertung von Kraftwerksrückständen als Deponie-Ersatzbaustoff und zur Abfallbehandlung

Michael Zingk

1 Zusammenfassung

Die Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Reststoffen mbH (GFR) beschäftigt sich im Rahmen ihrer Geschäftstätigkeit und in FuE-Vorhaben seit 1986 mit der Verwertung von speziellen Rückständen aus Steinkohlekraftwerken in einer Größenordnung von jährlich mehreren hunderttausend Tonnen. Bei diesen Rückständen handelt es sich um Gemische von Aschen und Rückständen aus der Rauchgasentschwefelung.

Die spezifischen Eigenschaften dieser Kraftwerksrückstände erlauben je nach Typ einen Einsatz als Baustoff für Verfüll-, Rekultivierungs- und Deponiebaumaßnahmen oder auch zur Konditionierung und Behandlung von Böden und Abfällen. Sie sind in ihrer Zusammensetzung sehr homogen, haben transparente Herkunftsnachweise, sind witterungsunabhängig einzubauen und ganzjährig in großen Mengen verfügbar.

Für einen Einsatz als Deponieersatzbaustoff sprechen insbesondere ihre bautechnischen Eigenschaften, vor allem die bei fachgerechtem Einbau sehr hohen Standfestigkeiten und die geringen Wasserdurchlässigkeiten.

Sie können aber ebenso gut auch zur Abfallbehandlung eingesetzt werden. So lassen sich damit beispielsweise schwermetallhaltige Kesselaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen nach einem von GFR speziell dafür entwickelten Behandlungsverfahren so weit verbessern, dass diese auch auf Deponien der Klasse I abgelagert werden dürfen. Und letztlich können mit den beschriebenen Kraftwerksrückständen auch Schlämme und nasse Böden sicher und kostengünstig in einen deponiefähigen Zustand versetzt werden.

2 Materialbeschreibung

Nach der Verbrennung von Kohle bei Temperaturen zwischen 850°C und 1.300°C bleiben in der Regel nur die unbrennbaren Kohlebestandteile als feinkörnige Flugasche oder grobkörnige Nassasche zurück. Die Hauptbestandteile von Flugasche sind im wesentlichen Silicium-, Aluminium- und Eisenoxide. Flüchtige Kohlebestandteile (z. B. Wasser und Schwefel) entweichen mit dem Rauchgas.

Neben Flug- und Nassasche werden auch die Rückstände aus der Rauchgasentschwefelung zu den Kraftwerksrückständen gezählt. Bei der Rauchgasentschwefelung (Abtrennung von SO₂/SO₃ aus dem Rauchgas) wird zwischen Verfahren unterschieden, bei denen die Entschwefelung im Feuerungsraum stattfindet und solchen, mit denen das Rauchgas in einem dem Verbrennungskessel nachgeschalteten Reaktor entschwefelt wird. Zu letzterem gehört auch das überwiegend eingesetzte Nassentschwefelungsverfahren, welches zu REA-Gips führt.

Zwei Kraftwerksrückstände (KWR), mit deren Verwertung sich die GFR seit ihrer Gründung schwerpunktmäßig beschäftigt, werden nachfolgend näher dargestellt.

2.1 Wirbelschichtfeuerungsaschen (WSFA)

Wirbelschichtfeuerungsaschen gehören zur Gruppe der Entschwefelungsprodukte, die bei der Verbrennung von gemahlener Kohle unter Zugabe von gemahlenem Kalkstein bei Temperaturen zwischen 850°C und 950°C in stationären oder zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen entstehen und nach der Rauchgasentstaubung in Elektro- oder Gewebefiltern gemeinsam mit der Flugasche als Filterasche sowie nach separater Ausschleusung aus dem Wirbelbett als Bettasche anfallen. Für bestimmte Anwendungsfälle können Filter- und Bettasche zusammengeführt werden. Wirbelschichtfeuerungsaschen enthalten daher neben den Aschekomponenten insbesondere noch freies CaO (Brantkalk) und CaSO₄ (Calciumsulfat-Anhydrit) als weitere für die Baustoffwirkung wichtige Komponenten.

WSFA besitzen eine noch weitgehend kristalline Kornstruktur mit großer spezifischer Oberfläche und sind daher sehr reaktiv.

2.2 SAV-Produkte und Stabilisate

Zur zweiten Gruppe der hier relevanten Entschwefelungsrückstände gehören die Produkte aus quasitrockenen Sprühabsorptions-Verfahren (SAV-Produkte). Überwiegend wird dabei die Kohle fein vermahlen in einer Staubfeuerung bei ca. 1200°C verbrannt. Die Entschwefelung findet bei diesen Verfahren nach vorhergehender Flugascheabscheidung in einem Feuerungskessel mit nachgeschaltetem Reaktor (Sprühabsorber) bei Temperaturen um ca. 150°C - 180°C unter Zugabe von Kalkmilch in das Rauchgas statt. Das gebildete Entschwefelungsprodukt enthält überwiegend Calciumsulfit-Halbhydrat (CaSO₃ · 0,5 H₂O) und Calciumsulfat-Halbhydrat (CaSO₄ · 0,5 H₂O) sowie freies Ca(OH)₂ (Portlandit), untergeordnet CaCl₂ und CaCO₃, und fällt, da überschüssiges Wasser verdunstet und mit dem entstaubten Rauchgas ausgetragen wird, staubförmig an.

Auch Stabilisate entstehen nach dem Einsprühen von Kalkmilch in das Rauchgas. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Verfahren wird hier aber auf die Abscheidung der Flugasche vor dem Eintritt in den Sprühabsorber verzichtet. SAV-Produkte mit dadurch höheren Aschegehalten werden als Stabilisate bezeichnet, weil sie wie WSFA ein hohes Eigenverfestigungspotenzial besitzen. Je nach Asche-Vorabscheidung und Kohletyp schwankt der Flugascheanteil solcher Gemische zwischen 30 und 70 Massen-%.

SAV-Produkte einschließlich der Stabilisate werden in der Regel mit Gewebefilter abgetrennt.

2.3 Verfestigungsreaktionen

Die beschriebenen Kraftwerksrückstände sind ähnlich zusammengesetzt wie Puzzolane und weisen daher latent-hydraulische Eigenschaften auf, sie verfestigen sich also bei der Vermischung mit Wasser. Dabei überlagern sich puzzolanische und latent-hydraulische Reaktionen zu folgendem Gesamtbild:

Puzzolanreaktion

Puzzolane bestehen bei Raumtemperatur zu einem hohen Anteil aus metastabilen Mineralphasen und/oder metastabilen amorphen Glasphasen, die sich bei Zugabe von Wasser und Anreger (Zement ohne Anreger) relativ schnell in stabile, d. h. wasserunlösliche hydratwas-

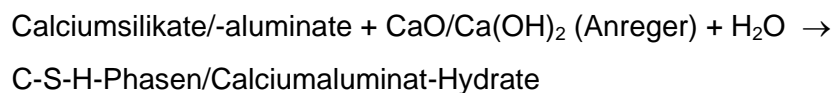
serhaltige Phasen umwandeln und dabei ein eng verzahntes, sehr festes Gefüge bilden. Zusammengefasst kann die zur Verfestigung führende Puzzolanreaktion mit folgender Gleichung beschrieben werden:



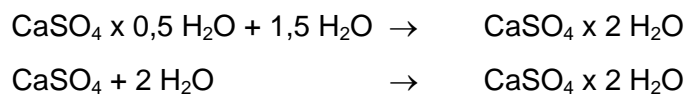
Die bei der Reaktion neugebildeten Mineralphasen werden aufgrund der Bestandteile CaO, SiO₂ und H₂O analog zur Zementchemie CSH (Calcium-Silikat-Hydrat) - Phasen genannt. Ein ähnliches natürliches Mineral ist der Tobermorit.

Die angeführte Puzzolanreaktion liegt allen natürlichen und künstlichen puzzolanischen Stoffen zugrunde. Darüber hinaus können auch noch folgende Reaktionen zur Materialverfestigung beitragen:

Hydraulische Abbindung (latent-hydraulische Komponenten)

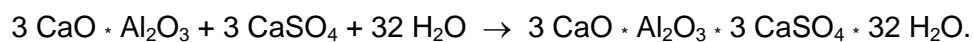


Hydratation



Ettringit-Bildung

Bei Anwesenheit von Aluminaten und Sulfaten kommt es zusätzlich zur Ettringit-Bildung:



Außerdem setzt sich nicht gebundenes Ca(OH)₂ unter Atmosphäreneinwirkung durch CO₂-Aufnahme langsam in CaCO₃ um (Carbonatisierung).

Sonstige Reaktionen

Neben diesen Reaktionen kann es auch noch zur Rekristallisation z. B. von stark gittergestörten Tonmineralen kommen, die jedoch nur einen geringen Beitrag zur Verfestigung leisten.

Anders als bei hydraulischen Bindemitteln, die auf ein schnelles und starkes Abbindeverhalten ausgelegt sind, setzen bei Puzzolanen die Verfestigungsreaktionen später ein und sind auch deutlich langsamer. Je nach Wasser- und Kalkanteil sind Reaktionszeiträume von bis zu zwei Jahren möglich. Durch die Kombination von herkömmlichen Bindemitteln (Zement) und den verschiedenen KWR lässt sich der Abbindeprozess steuern, wobei im Verlaufe von Monaten letztendlich vergleichbare Endfestigkeiten wie bei rein hydraulischen Bindemitteln erreicht werden.

2.4 Chemisch / physikalische Charakterisierung

Die von GFR verwerteten KWR (Auswahl) lassen sich durch folgende Werte charakterisieren:

Parameter Feststoff	Dim.	WSFA 1	WSFA 2	Stabilisat 1	Stabilisat 2	Stabilisat 3
Glühverlust	MA-%	26,2 ^{*)}	6,2 ^{*)}	28,6 ^{*)}	21,0 ^{*)}	17,9 ^{*)}
TOC	MA-%	14,9 ^{*)}	1,4 ^{*)}	2,4 ^{*)}	3,5 ^{*)}	8,6 ^{*)}
Arsen	mg/kg	20	11	39	26	15
Blei	mg/kg	77	15	197	65	23
Cadmium	mg/kg	< 1	< 0,75	2,6	1,25	< 1
Chrom ges.	mg/kg	52	25	68	44	27
Kupfer	mg/kg	79	23	105	96	50
Nickel	mg/kg	75	82	69	67	28
Quecksilber	mg/kg	< 0,6	0,28	1,4	0,6	0,5
Thallium	mg/kg	0,75	< 0,5	0,6	< 1	0,4
Zink	mg/kg	234	117	513	92	103
Cyanide ges.	mg/kg	< 0,1	< 0,5	< 0,05	< 0,01	< 1

Parameter Eluat	Dim.	WSFA 1	WSFA 2	Stabilisat 1	Stabilisat 2	Stabilisat 3
pH-Wert		12	12,1	12,5	12	12,5
Leitfähigkeit	µS/cm	10.430	10.033	12.310	9.650	8.580
DOC	mg/l	5,5 ^{*)}	n.b.	n.b.	6,4 ^{*)}	4,1 ^{*)}
Arsen	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Blei	mg/l	0,02	0,011	0,022	0,01	0,0095
Cadmium	mg/l	< 0,0005	< 0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0005
Kupfer	mg/l	0,01	0,005	0,017	0,005	0,012
Nickel	mg/l	< 0,005	0,004	0,023	< 0,005	0,011
Quecksilber	mg/l	< 0,0002	0,0005	0,0006	< 0,0002	0,0003
Zink	mg/l	0,046	0,015	0,01	0,012	0,02
Chrom ges.	mg/l	0,105	0,009	0,048	0,08	0,12
Thallium	mg/l	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,002	< 0,003
Chlorid	mg/l	67	232	320	950	459
Sulfat	mg/l	1.470	1.763	368	280	320

^{*)} Einzelwerte; n.b. = nicht bestimmt

3 Verwertung als Deponie-Ersatzbaustoff

Die hier beschriebenen Kraftwerksrückstände können auf den meisten DK II- und vielen DK-I- Deponien per se unmittelbar als Ersatzbaustoff eingesetzt werden. Laut Deponieverordnung ist ihr Einsatz grundsätzlich auch auf Standorten zulässig, die weder über eine geologische Barriere, noch über ein Basisabdichtungssystem verfügen, sofern nachgewiesen werden kann, dass der Einsatz keine Gefährdung für Boden oder Grundwasser darstellt. Sie eignen sich hervorragend für Baumaßnahmen im oder auf dem Deponiekörper, wenn es auf Tragfähigkeit, Standfestigkeit, Dichtigkeit und die ganzjährige Verfügbarkeit größerer Mengen ankommt.

GFR hat beispielsweise allein in den letzten 4 Jahren schon rund 400.000 t Kraftwerksrückstände auf einer einzigen Deponiebaustelle verwertet, und weitere 200.000 t werden dort wohl noch verbaut werden. Dort geht es darum, einen größeren Abfallkörper sicher gegenüber dem Grundwasseranstrom abzuschirmen, noch bevor der Deponiebereich nach Einstellung der derzeit betriebenen Wasserhaltung geflutet werden wird. Hierzu war vorab eine behördliche Einzelgenehmigung durch den Deponiebetreiber eingeholt werden. Der Einsatz war und ist nicht zuletzt aufgrund der überragenden bautechnischen und gleichzeitig dichtenden Eigenschaften sowohl aus Betreiber-, als auch aus Sicht der Aufsichtsbehörde ein Königsweg der Verwertung.

Die bei der Verwertung jeweils konkret einzuhaltenden Anforderungen sind in der Deponieverordnung (Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.09) festgelegt. Die von GFR verwerteten Kraftwerksrückstände unterschreiten mit Ausnahme der Parameter Glühverlust und TOC alle in Tabelle 2, Spalte 6 der Deponieverordnung genannten Zuordnungswerte. Gleiches ist für die Metalle Barium, Molybdän, Antimon und Selen anzunehmen, auch wenn hierzu aktuell nur Analysen einzelner Originalsubstanzen vorliegen. Im Vergleich mit Spalte 5 der Deponieverordnung gibt es materialspezifisch noch Überschreitungen bei den Parametern Chlorid und Leitfähigkeit:

Feststoff	Dim.	WSFA	WSFA	Stabilisat	Stabilisat	Stabilisat	DepV, Anh. 3, Tab. 2	
		1	2	1	2	3	Spalte 5	Spalte 6
Glühverl.	MA-%	26,2 ^{*)}	6,2 ^{*)}	28,6 ^{*)}	21,0 ^{*)}	17,9 ^{*)}	≤ 3	≤ 3
TOC	MA-%	14,9 ^{*)}	1,4 ^{*)}	2,4 ^{*)}	3,5 ^{*)}	8,6 ^{*)}	≤ 1	≤ 1

Eluat	Dim.	WSFA	WSFA	Stabilisat	Stabilisat	Stabilisat	DepV, Anh. 3, Tab. 2	
		1	2	1	2	3	Spalte 5	Spalte 6
Chlorid	mg/l	67	232	320	950	459	≤ 80	≤ 1.500
Sulfat	mg/l	1.470	1.763	368	280	320	≤ 100	≤ 2.000

Die Verwertung derartiger Kraftwerksrückstände als Deponie-Ersatzbaustoff ist dennoch rechtlich zulässig. Die Deponieverordnung gestattet grundsätzlich Überschreitungen bis zum dreifachen einzelner Zuordnungswerte, sofern nachgewiesen wird, dass dadurch das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Bei den Parametern TOC und Glühverlust sind explizit auch größere Überschreitungen zulässig, sofern diese nachweislich durch elementaren oder biologisch nicht abbaubaren Kohlenstoff verursacht werden. Hierzu ist aus fachtechnischer Sicht folgendes zu sagen:

Die üblicherweise bei einer Temperatur von 550° C durchzuführende Bestimmung des Glühverlustes dient der Bestimmung des organischen Anteils des Trockenrückstandes der Originalsubstanz. Dabei werden jedoch auch andere, bei der gewählten Temperatur flüchtige anorganische Bestandteile aus dem Abfall ausgetrieben. In den o. g. KWR liegen insbesondere folgende Stoffanteile vor:

- Calciumsulfat-Anhydrid, Calciumsulfat-Halbhydrat und Calciumsulfit-Halbhydrat und
- Calciumhydroxid und Calciumcarbonat.

Bei der Bestimmung des Glühverlustes sondern diese Komponenten (außer Calciumsulfat-Anhydrid) Wasser ab bzw. beginnen, sich thermisch zu zersetzen. Dies führt zu höheren gemessenen Werten, die jedoch nicht auf einen höheren Organik-Anteil zurückzuführen sind.

Die alternativ mögliche Messung des TOC dient der Bestimmung des organisch gebundenen Kohlenstoffs als Summenparameter. Hierbei wird der im Trockenrückstand der Originalsubstanz enthaltene Kohlenstoff durch Verbrennung zu Kohlenstoffdioxid oxidiert und dieses mengenmäßig erfasst. Nachteilig ist, dass bei dieser Bestimmungsmethode keine Unterscheidung zwischen organisch gebundenem und elementarem Kohlenstoff möglich ist, sofern CO₂ nicht separat erfasst und bestimmt wird.

Bei den hier in Betracht kommenden KWR ist dieses Problem evident, da die entsprechenden TOC-Werte i. d. R. über dem entsprechenden Grenzwert von 1 MA.-% liegen. Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen (WSFA: 850 bis 950°C, Stabilisate ca. 1.200 °C) ist die Anwesenheit größerer Mengenanteile an abbaubaren organischen Verbindungen jedoch ausgeschlossen. Die höheren TOC-Werte bei KWR sind ausschließlich auf die Anwesenheit elementaren Kohlenstoffs aus der Kohle (Unverbranntes) zurückzuführen, der definitiv nicht mehr biologisch abbaubar ist (nachweisbar über AT₄-Atmungstest). Eine Überschreitung des TOC führt hier somit nicht zu einer Gefährdung von Boden oder Grundwasser.

4 Verwertung zur Abfallbehandlung

GFR hat auf Basis der von ihr verwerteten Kraftwerksrückstände auch ein Behandlungsverfahren speziell für Kesselaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen entwickeln können. Bislang werden derartige Stoffe untertage oder auf vergleichbar teuren DK III-Deponien entsorgt. Mit dem GFR-Verfahren lassen sich nunmehr Materialqualitäten erreichen, die eine ordnungsgemäße und schadlose Ablagerung dieser Abfälle auch auf DK I-Deponien erlauben. Es versteht sich dabei von selbst, dass bei der Verfahrensentwicklung neben der Wirksamkeit, der technischen Umsetzbarkeit und der Wirtschaftlichkeit auch die rechtliche Zulässigkeit der Methode intensiv geprüft wurde.

In technischer Hinsicht müssen die Kesselaschen nur mit einem speziell hergestellten Additiv vermischt und mit Wasser in einen erdfeuchten Zustand versetzt werden. Infolge der dann selbstgänglich ablaufenden Reaktionen wird eine unumkehrbare Reduzierung der Auslaugwerte für die meist kritischen Parameter Blei und Chrom-VI (und anderer Schwermetalle) erreicht. Die Auslaugwerte anderer Schadstoffe erfüllen bei üblichen MVA-Kesselaschen bereits im Anfallzustand die Bedingungen für eine Ablagerung auf DK I-Deponien, so dass hierfür keine spezielle Vorbehandlung erforderlich ist.

GFR hat das Verfahren nach umfangreichen Laborversuchen 2007 zum Patent angemeldet. Die in Niedersachsen für Sonderabfälle (Gefährliche Abfälle im Sinne der Abfallverzeichnisverordnung) zuständige landeseigene ‚Niedersächsische Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfällen‘ (NGS) hat der GFR bereits sehr frühzeitig eine Bestätigung der Wirksamkeit und der rechtlichen Zulässigkeit ihres Verfahrens ausgestellt. Ein im Auftrag der GFR im Jahr 2010 erstelltes Rechtsgutachten hat das Verfahren dann nochmals im Lichte der 2009 in Kraft getretenen Deponieverordnung geprüft und kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass es sich bei der von GFR entwickelte Methode um eine abfallrechtlich zulässige Behandlung handelt und dass derart behandelte Abfälle auf Deponien der Klasse I abgelagert werden dürfen.

Dem Verfahren liegen primär folgende Reaktionsprinzipien zu Grunde:

- Der Gehalt an reduzierenden Bestandteilen im GFR-Additiv bewirkt innerhalb der hier betrachteten Abbindezeit eine Reduktion eines Großteils des in der Kesselasche enthaltenen Chromats (Chrom-VI) zu Chrom-III.

Das bei dieser Reduktionsreaktion erzeugte Chrom-III ist erheblich schwerer löslich als das über den gesamten pH-Bereich gut wasserlösliche Chrom-VI. Außerdem wird es auch noch in die sich bildende Puzzolan-Matrix (s.u.) eingebunden.

- Blei-II-Ionen (Pb^{2+}) werden anstelle von anderen zweiwertigen Ionen – überwiegend Calcium- und Magnesiumionen – ebenfalls in die sich neu bildenden Mineralphasen (Calcium-Silikat-Hydrate, Calcium-Aluminat-Hydrate) eingebaut, die über den betrachteten pH-Bereich eine wesentlich geringere Löslichkeit aufweisen als die vorher in der nicht behandelten Kesselasche vorliegenden Bleiverbindungen (insbesondere Bleichlorid und Bleisulfat).

Die Wirksamkeit und technische Umsetzbarkeit wurde dann 2010 im Auftrag eines europaweit agierenden Betreibers von Abfallverbrennungsanlagen anhand eines unter behördlicher Aufsicht durchgeführten Großversuchs erfolgreich verifiziert.

Für die großtechnische Umsetzung ist eine Anlage erforderlich, die sich mit einer Betonmischanlage vergleichen lässt. Die in Silos gelagerten Additive und Kesselaschen werden mittels Transportschnecken dosiert in einen Mischer gegeben und mit Wasser versetzt. Die so in einen erdfeuchten Zustand gebrachten Kesselaschen müssen bis zum Erreichen der für die vorgesehene Deponie geltenden Zuordnungswerte zwischengelagert werden, die Reaktionen im Abfallkörper laufen ansonsten aber selbstgänglich ab. Eine Reaktionszeit von zwei bis maximal vier Wochen wird bei einer für Hausmüllverbrennungsanlagen typischen Kesselaschequalität als ausreichend angesehen. Die Lagerung sollte aus Vorsorgegründen auf einer gegen den Untergrund abgeschirmten Fläche erfolgen. Aus technischer Sicht spricht aber auch nichts gegen eine Zwischenlagerung auf einem Deponiegelände. Nach Ablauf der Reaktionszeit kann der Einbau problemlos mit üblichen Erdbaugeräten (Radlader, Raupe, Kompaktor) erfolgen.

Im Vergleich zu der üblichen untertägigen Verwertung von MVA-Kesselaschen können die Entsorgungskosten mit dem diesem Verfahren um rund ein Drittel gesenkt werden. Eine solche Größenordnung ist geeignet, die Wertschöpfung der thermischen Abfallbehandlung signifikant zu verbessern.

5 Verwertung zur Bodenverbesserung

Unter dem Markennamen Kalkond[®] wird ein von GFR entwickelter Baustoff vertrieben, der sich durch ein sehr gutes Wasserbindevermögen und ein für viele Einsatzbedingungen interessantes Verfestigungspotential auszeichnet. Er stellt damit eine ökonomische und ökologische Alternative zu Weißfeinkalk, Kalkbinder und/oder Zementbinder für vielfältige Anwendungen dar. Eingesetzt werden kann Kalkond[®] beispielsweise als Bodenverbesserungsmittel im Straßen- und Landschaftsbau, zur Konditionierung von Schlämmen aller Art (auch von Klär-, Kalk- oder Aluminiumhydroxidschlämmen sowie Teerrückständen) sowie zur Behandlung von Böden mit geringer Standfestigkeit.

Insgesamt stehen eine Reihe unterschiedlicher Kalkond[®]-Typen zur Auswahl. Aus diesen können im Labor die jeweils erdbautechnisch optimalen Rezepturen entwickelt werden.

Kalkond[®] eignet sich für den Einsatz immer dort, wo es besonders auf hohe Standfestigkeit ankommt.

Die verschiedenen Kalkond[®]-Baustoffe lassen sich drei Grundtypen zuordnen:

- Typ 1: hoher Anteil reaktiven Kalks, geringer Anteil puzzolanischer Komponenten
- Typ 2: mittlere Anteile reaktiven Kalks, variable Anteile puzzolanischer Komponenten
- Typ 3: geringer Anteil reaktiven Kalks, höherer Anteil puzzolanischer Komponenten

Alle diese Typen sind gleichermaßen gut umweltverträglich. Die Schwermetallgehalte entsprechen den Gehalten in herkömmlichen Baustoffen. Unter Beachtung der standortspezifischen Anforderungen (aus Vorsorgegründen wird Kalkond vorzugsweise unter einer wasserundurchlässigen Deckschicht eingesetzt) weisen alle behandelten Stoffe ein unbedenkliches Auslagerverhalten auf. Nicht zuletzt können durch den Einsatz von Kalkond[®] auch erhebliche Kosten und natürliche Ressourcen eingespart werden.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Bundes-Bodenschutzverordnung) vom 12. Juli 1999, BGBl. I, S. 1554

Braunisch, F. (2008): Untersuchungen zum Aufbau einer funktional optimierten Rekultivierungsschicht auf einer hochbasischen Aschedeponie. Dissertation Universität Kassel, Ökologie und Umweltsicherung 30/2008, kassel university press

DepV (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) vom 24.07.2002, BGBl. I, S.2807, mit späterer Änderung.

Wirsching, F., Weißflog, E. (1998): Umweltfreundliche Entsorgung von Reststoffen steinkohlebefuerter Kraftwerke. VGB Kraftwerkstechnik 68, Heft 12

Zingk, M., Braunisch, F. (2007): Herstellung von Rekultivierungssubstraten unter Einsatz von Kraftwerksrückständen. Vortrag 3. Leipziger Deponiefachtagung

Zingk, M., Weißflog, E., Kempf, W.D., (2009): Verwertung von Rückständen aus Kohlekraftwerken. In: Recycling und Rohstoffe, Band 2 (Hrsg. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann), TK Verlag Neuruppin

Zingk, M., (2010): Einsatzmöglichkeiten von Kraftwerksrückständen bei Deponiebau und Rekultivierung. In: Tagungsband 4. Praxistagung Deponie 2010, Cuvillier Verlag Göttingen