

Norbert AMSONEIT

Behandlung und Ablagerung von metallhaltigen
Schlämmen

1. Einleitung

Im folgenden werden die derzeit gebräuchlichsten Techniken zur Ablagerung metallhaltiger Schlämme beschrieben, die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Techniken miteinander verglichen und gegeneinander abgewogen. Darüberhinaus wird auf ein Behandlungsverfahren für metallhaltige Schlämme eingegangen, das eine Verfestigung dieser Abfallstoffe zum Ziel hat. Es handelt sich dabei um Verfahren, die derzeit noch überwiegend in England und den USA eingesetzt werden. Inzwischen werden diese Verfahren auch in anderen europäischen Ländern diskutiert und - wie im Fall der zentralen Sonderabfall- und Schlammabeseitigungsanlage in Wien - auch großtechnisch eingesetzt (1).

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes und des Umweltbundesamtes fielen in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1975 ca. 10 Mio Tonnen schlammige Abfälle an (2). In dieser enormen Menge sind neben Oxiden, Hydroxiden, Schlämmen aus der Wasseraufbereitung und Abluftreinigung auch die Schlämme aus der Abwasserreinigung enthalten.

Bei einer Untersuchung der Herkunft dieser Abfälle kristallisierten sich als die dabei am stärksten vertretenen Wirtschaftszweige heraus:

- die chemische Industrie,
- die eisenschaffende Industrie,
- die Energie- und Wasserversorgung sowie,
- die mineralölverarbeitende Industrie.

Auf der Zentraldeponie Emscherbruch (ZDE) des Kommunalverbandes Ruhrgebiet, deren Einzugsgebiet über das Verbandsgebiet hinaus praktisch ganz Nordrhein-Westfalen umfaßt, werden jährlich ca. 20.000 bis 30.000 t metallhaltiger Schlämme abgelagert.

Das sind ca. 20 % des durch Umfragen und Hochrechnungen ermittelten Aufkommens an metallhaltigen Schlämmen. Der weitaus größte Teil, also rund 80 %, wird auf werkseigenen Anlagen der Abfallerzeuger beseitigt.

Bei den genannten 10 Mio t jährlich in der Bundesrepublik anfallender Schlämme handelt es sich im übrigen zum größten Teil um Abfälle, die bei ordnungsgemäßer Behandlung in der Beseitigung kaum Schwierigkeiten bereiten dürften.

In den meisten der anfallenden Schlämme liegen die Schwermetalle in schwerlöslicher Form als Hydroxide, Oxidhydrate, basische Salze oder Sulfide vor. Sofern bei Eluatuntersuchungen nach dem Richtlinienentwurf des Landes Nordrhein-Westfalen über Untersuchung und Beurteilung von Abfällen (3) die Konzentration der Schwermetallionen bestimmte Grenzwerte überschreitet, ist die Ablagerung auf einer Übertagedeponie im allgemeinen untersagt. Dies gilt insbesondere für die besonders toxischen Metalle wie Quecksilber, Arsen, Cadmium und Blei. Die zulässigen Grenzwerte für jede Anlage werden in der Regel in einem Positiv- oder Negativkatalog festgelegt, der Bestandteil des vom Regierungspräsidenten ausgestellten Planfeststellungsbescheides ist. Beim Überschreiten bestimmter Grenzwerte verbleibt, soweit eine Nachbehandlung nicht möglich ist, nur eine Ablagerung in einer Untertagedeponie (z.B. in Herfa-Neurode bei Kassel).

Bei Ablagerung über Tage kommt entweder die Deponierung auf einer speziellen Sonderabfalldeponie oder die gemeinsame Ablagerung mit Hausmüll auf einer Hausmülldeponie in Frage. Für beide Deponieformen gilt, daß nur stichfeste Materialien abgelagert werden können. Bei welchem Wassergehalt ein Schlamm als stichfest zu bezeichnen ist, ist von Material zu Material unterschiedlich.

In einigen Industriezweigen, z.B. in der Galvanikindustrie fallen bei der Neutralisation der Abwässer Dünnschlämme als wässrige Feststoffsuspensionen an. Diese Dünnschlämme können aufgrund ihrer Konsistenz nicht direkt abgelagert werden. Eine mechanisch-chemische Vorbehandlung ist erforderlich. Die Schlämme werden zunächst durch Filtration (Filterpresse, Dekantierzentrifuge oder Vakuumtrommelfilter) entwässert und damit stichfest gemacht. Das anfallende Filtrat kann entweder direkt ins Abwasser geleitet werden oder muß, sofern es noch toxische Inhaltsstoffe, wie z.B. Nitrit oder Cyanid enthält, noch einer Entgiftung zugeführt werden.

2. Deponierung metallhaltiger Schlämme

2.1 Ablagerung auf Sonderabfalldeponien

Bei Sonderabfalldeponien ist besondere Sorgfalt auf den Untergrund zu legen. Er muß so beschaffen sein, daß eine Beeinträchtigung des Grundwassers ausgeschlossen ist.

Am günstigsten zu beurteilen sind Sonderabfalldeponien mit naturdichter Basis (z.B. Ochtrup bei Münster oder Gallenbach in Bayern). Es besteht auch die Möglichkeit, den Untergrund künstlich abzudichten. Beispiele sind die Deponien Schwabach des Zweckverbandes Sondermüllplätze in Mittelfranken oder die Werksdeponie der Firma Bayer bei Dormagen (4).

Voraussetzung ist das Verlegen eines Dränagesystems, um das anfallende Sickerwasser schnellstmöglich aus dem Deponiebereich abzuführen. Ob die Sickerwässer aufgefangen und behandelt werden müssen, hängt von der Betriebsform der Deponie und vom Verunreinigungsgrad des Sickerwassers ab.

Nachfolgend sollen die gebräuchlichsten Ablagerungstechniken für Schlämme auf Sonderabfalldeponien beschrieben und miteinander verglichen werden.

2.1.1 Monoablagerung

Wenn der Annahmekatalog für eine Deponie auch solche Stoffe mit einschließt, die mit metallhaltigen Schlämmen reagieren können bzw. zu Lösungsvorgängen führen, ist eine Ablagerung der Schlämme in einen getrennten, nur dafür vorgesehenen Bereich, einer gemischten Ablagerung vorzuziehen (5). Bei dieser Ablagerungstechnik ist insbesondere dafür Sorge zu tragen, daß ein Kontakt der abgelagerten Schlämme mit möglicherweise aggressivem Sickerwasser und ein unkontrollierter Ablauf von Oberflächenwasser aus dem Ablagerungsbereich der Schlämme vermieden wird. Gegebenenfalls sind zusätzliche chemische Behandlungen und Fixierungsprozesse (s. Abschn. 3) angebracht.

2.1.2 Monoablagerung in Kassetten

Eine "extreme" Form der getrennten Ablagerung von Abfällen ist die Monoablagerung in Kassetten. Darunter versteht man die Deponierung nur eines einzigen Abfallstoffes innerhalb eines gegen die übrige Deponie mit nach Möglichkeit wasserundurchlässigen Wällen (z.B. aus Ton) abgegrenzten Bereiches.

Über das Verhalten solcher Deponien liegt eine Untersuchung vor, die bei der Duisburger Kupferhütte (DK) im Auftrage des Bundesministers für Forschung und Technologie durchgeführt wurde (6).

In dieser Arbeit wurde das Ablagerungsverhalten metallhaltiger Schlämme aus der NE-metallindustrie untersucht. Dabei wurden u.a. Skorodit - $(\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, Anglesit - (PbSO_4) sowie Eisen-Gips-haltige Schlämme eingesetzt.

Die Versuchsfelder waren etwa 10 x 10 m lang. Die Ablagerung dieser produktionsspezifischen Schlämme erfolgte

innerhalb einer Kassette aus ca. 2 m hohen Sanddämmen. Die Einbringung der Schlämme erfolgte ohne Verdichtung; nach Abschluß der Ablagerung wurden die Materialien nicht abgedeckt.

Als Ergebnis dieses mehrjährigen Versuches stellte sich heraus, daß die anfallende Sickerwassermenge verhältnismäßig gering war (nur ca. 2 - 5 % des Niederschlages). Die Auslaugungsraten insbesondere der "kritischen" Metalle Arsen, Blei und Kupfer lagen verhältnismäßig niedrig. Höhere Konzentrationen ergaben sich lediglich für Zink sowie für leichtlösliche Alkalisalze, insbesondere Sulfate und Chloride.

Mit den ermittelten Auslaugungsraten wurde der Versuch gemacht, die Dauer der vollständigen Auslaugung einer Deponie theoretisch zu ermitteln, auf der ca. 100.000 t schlammiger Abfälle mit einer vorgegebenen Zusammensetzung in einer Höhe von 4 - 5 m abgelagert waren. Dabei ergaben sich durchaus als geologisch zu bezeichnende Zeiträume, z.B. für Kupfer (Ausgangsmenge 600 t) 86.000 Jahre, für Blei (Ausgangsmenge 3.000 t) 6 Mio Jahre und Arsen (Ausgangsmenge 3000 t) 30 Mio Jahre. Der Gutachter kommt daher zu dem Schluß, daß es berechtigt sei, diese Form der Deponie als eine Art sekundärer Lagerstätte zu bezeichnen.

Es ist jedoch zu überlegen, ob dieser Effekt, einer geringen Auslaugung über sehr lange Zeiträume, tatsächlich wünschenswert ist.

Bei einer im Vergleich untersuchten Großdeponie, auf der innerhalb von 3 Jahren ausschließlich ca. 40.000 Tonnen skorodithaltiger Schlämme in einer ausgetonten Tongrube abgelagert worden waren, war die Konzentration der im Sickerwasser gelösten Schwermetalle höher. Es ist zu vermuten, daß dieser Effekt auf den hohen Anteil an Oberflächenwasser (ca. 25 % des Niederschlages als Sickerwasser und Oberflächenwasser) zurückzuführen ist, das mit den Abfällen in Kontakt kommen konnte.

In einem getrennt von dem o.g. Forschungsvorhaben durchgeführten großtechnisch angelegten Versuch des Kommunalverbandes Ruhrgebiet gemeinsam mit Industriebetrieben aus dem Ruhrgebiet in den Jahren 1970 bis 1978 auf der Zentraldeponie Emscherbruch, wurde in zweien der 20 Versuchsfelder auch das Ablagerungsverhalten von skorodithaltigen Schlämmen gemeinsam mit Hausmüll und anderen industriellen Abfällen untersucht (7). Da diese Untersuchung erst in 1978 abgeschlossen werden konnte und die Auswertung der in diesem Langzeitversuch ermittelten Daten z.Zt. noch erfolgt, ist ein endgültiges Ergebnis noch nicht verfügbar. Aus den bisher vorliegenden Zwischenergebnissen kann jedoch abgeleitet werden, daß die gemeinsame Ablagerung der skorodithaltigen Schlämme mit Hausmüll und anderen Industrieabfällen in Bezug auf die Sickerwassermenge und die Konzentrationen an Schwermetallen im Sickerwasser zwar etwas ungünstiger abschneidet als die Versuchsdeponie der DK, jedoch günstigere Werte liefert als die erwähnte Monoablagerung auf einer Großdeponie. Auf die Vorgänge bei einer gemeinsamen Ablagerung mit Hausmüll wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

2.2 Gemeinsame Ablagerung mit Hausmüll

2.2.1 Deponietechniken

a) flächiger Einbau

Voraussetzung für die gemeinsame Ablagerung von metallhaltigen Schlämmen mit Hausmüll ist eine stichfeste Konsistenz der abzulagernden Materialien. Dadurch soll die Fixierung des Schlammes am Abladeplatz gewährleistet werden. Eine flächige Verteilung der angelieferten Schlämme über den gesamten Arbeitsbereich sollte nach

Möglichkeit vermieden werden. Durch die Bildung von Gleitebenen besteht die Gefahr von Böschungsabrutschen. Darüberhinaus führt die flächige Verteilung der Schlämme möglicherweise zu Stauhohizonten von Sickerwasser und Gas. Dies kann zu unkontrollierten seitlichen Austritten an den Deponeböschungen führen. Da das Sickerwasser gezwungen ist, die einzelnen Schichten aus metallhaltigen Schlämmen großflächig zu passieren, ist mit einer Erhöhung der Auslaugungsrate zu rechnen.

b) Flombeneinbau

Bei einer gemeinsamen Ablagerung von Schlämmen und Hausmüll ist ein Einbau in Form von Flomben anzustreben. Der Hausmüll dient dabei als Stützkörper. Sofern ein Mischungsverhältnis Schlamm : Hausmüll von 25 zu 75 % nicht überschritten wird (insbesondere bei Deponien, die als Aufhaltung betrieben werden) ist die Standfestigkeit des Deponiekörpers gewährleistet. Die höhere Durchlässigkeit des Hausmülls verhindert weitgehend das Durchströmen und die Auslaugung des Sonderabfalls durch das Sickerwasser. Das im allgemeinen basische Milieu innerhalb des Hausmüllgerüsts stellt sicher, daß bei den meist als schwerlösliche Hydroxide vorliegenden Schlämmen keine unkontrollierbaren Reaktionen und Lösungsvorgänge auftreten. Das Hausmüllgerüst bietet vielmehr die Möglichkeit, durch koordinative Bindungen an vorhandene OH-, NH- und SH-Gruppen Schwermetalle festzulegen.

Der in Abschn. 2.1.2 bereits erwähnte Versuch zur gemeinsamen Ablagerung von Hausmüll und Industrieabfällen hat u.a. gezeigt, daß keine signifikanten Unterschiede in Sickerwässern aus einer reiner

Hausmüllablagerung und der gemeinsamen Ablagerung von Hausmüll und Industrieabfällen auftreten (7).

In der Betriebspraxis auf der ZDE hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Schlämme auf einer Fläche unterhalb der Kippkante abzukippen und anschließend die Zwischenräume mit Hausmüll zu verfüllen (8). Diese Technik erfordert keinen zusätzlichen Aufwand für die Ablagerung der Sonderabfälle; Voraussetzung ist das Vorhandensein einer 1.50 - 2 m hohen Kippkante.

c) Lagunen- oder Beckeneinbau

Der Einbau flüssiger Schlämme in Form von Lagunen oder Becken innerhalb von Hausmülldeponien wird bisher überwiegend in England und den USA praktiziert. Dabei werden zunächst im Hausmüllkörper Becken ausgeformt in die die flüssigen Abfälle eingelassen werden. Nach Versickerung bzw. Verdunstung der flüssigen Phase empfiehlt es sich die "Lagunen" mit Hausmüll abzudecken bzw. zusätzlich eine Schicht aus bindigem Boden aufzubringen, um das Eindringen von Sickerwasser weitgehend auszuschließen. Die Becken sollten möglichst flach angelegt werden, da sich andernfalls Schwierigkeiten hinsichtlich Standfestigkeit und Befahrbarkeit ergeben könnten.

2.2.2 Vor- und Nachteile der gemeinsamen Ablagerung

Als Vorteile einer gemeinsamen Ablagerung metallhaltiger Schlämme mit Hausmüll sind zu nennen:

- hohe Standfestigkeit infolge des Stützgerüsts aus Hausmüll
- Reduzierung der Auslaugungsrate der schlammigen Abfälle wegen vorzugsweiser Durchsickerung des durchlässigen Hausmüllgerüsts
- Pufferwirkung des Hausmüllgerüsts: Fixierung der Schwermetalle aus den Schlämmen infolge des basischen Milieus und Anlagerung durch koordinative Bindungen

Den o.g. Vorteilen sind als Nachteile gegenüberzustellen:

- keine Wiedergewinnung der abgelagerten industriellen Abfälle für etwaige Recyclingvorhaben möglich
- Unterhaltung der Deponie auch nach Abschluß erforderlich (Sickerwasser- und Gasproblem). Dagegen können reine Sonderabfalldeponien im allgemeinen nach Abschluß wasserdicht abgedeckt werden. Da in der Regel keine abbaubaren organischen Stoffe vorhanden sind, ist mit einer langfristigen Gasentwicklung nicht zu rechnen.

2.2.3 Sonderproblem "Remobilisierung" von Schwermetallen

Das Huminsäuren unter bestimmten Bedingungen in der Lage sind, insbesondere zweiwertige Schwermetalle, wie z.B. Blei, Zink, Nickel u.a. durch Komplex- und Chelatbildung aus unlöslichen Bodenkörpern zu remobilisieren, ist nachgewiesen (9). Noch nicht untersucht ist dagegen, ob solche Remobilisierungsprozesse auch im Hausmüll ablaufen können, wo bekanntlich als End-

produkte des mikrobiellen Abbaues der organischen Bestandteile des Hausmülls u.a. huminsäurehaltige Substanzen entstehen.

Darüberhinaus können Remobilisierungen von Schwermetallen auch durch Redoxvorgänge ausgelöst werden. Das bekannteste Beispiel bildet das Eisen. In der reduzierenden Atmosphäre des anaeroben Müllkörpers werden aus schwerlöslichem Fe (III)-hydroxid lösliche Fe (II) - Verbindungen gebildet, die dann wiederum bei Eintritt in das Dränagesystem durch den Einfluß des Luftsauerstoffes reoxidiert werden und dort als Eisenhydroxid ausfallen und möglicherweise zu einer Verockerung der Dränrohre führen können.

3. Verfestigung metallhaltiger Schlämme

3.1 Verfahren zur Verfestigung metallhaltiger Schlämme

Die nachfolgend diskutierten Verfahren zur Verfestigung metallhaltiger Schlämme werden derzeit großtechnisch ausschließlich in England und den USA eingesetzt. Es sind Verfahren auf dem Markt, die nach Angaben der Hersteller geeignet sein sollen, Schlämme mit Inhaltsstoffen wie Arsen, Cadmium, Zink, Blei, Kupfer, Zinn u.a. zu verfestigen (10).

Bei den Verfestigungsverfahren werden die flüssigen oder schlammigen Abfälle mit anorganischen und teils auch organischen Verbindungen so umgesetzt, daß ein Produkt von fester Konsistenz entsteht. Bei den Verfestigungsmitteln handelt es sich z.T. um einen einzigen Stoff (z.B. CaO), und z.T. um Systeme aus mehreren Komponenten, z.B. Natriumsilikat (Wasserglas), in Verbindung mit einem "Silikat-härter", wie CaCl (11). Über den genauen Chemismus der einzelnen Verfahren ist noch relativ wenig bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, daß im allgemeinen keine

chemischen Bindungen zwischen Verfestigungsmitteln und den Inhaltsstoffen des Abfalls entstehen, sondern daß in dem verfestigten Produkt überwiegend physikalisch-adsorbitive Bindungen vorliegen. Das "Fixieren" beruht im wesentlichen auf einen Einschluß der Schwermetallatome in eine "inerte" Matrix. Eine weitere wichtige Rolle bei der Festsetzung der Schwermetallatome scheint der PH-Wert zu spielen, der bei den bekannten Verfestigungsverfahren im allgemeinen im alkalischen Bereich liegt.

Bevor eine Behandlung der Sonderabfälle durchgeführt werden kann, ist zunächst eine Laboruntersuchung jedes einzelnen Abfalls erforderlich, um die spezielle Rezeptur für diesen Abfallstoff zu ermitteln. Die anschließende Behandlung wird teils mit mobilen (11), teils in ortsfesten Behandlungsanlagen (10) durchgeführt. Je nach Verfahren und Abfall erfolgt die Verfestigung der behandelten Schlämme entweder sofort oder innerhalb einiger Stunden oder z.T. erst nach mehreren Tagen.

3.2 Auslaugungsverhalten verfestigter Schlämme

Von den Befürwortern der Verfestigungsverfahren wird häufig als wesentlicher Vorteil dieser Methode die geringe Auslaugbarkeit der verfestigten Abfälle genannt.

In den Niederlanden ist kürzlich eine Untersuchung der Stichting Verwijdering Afvalstoffen (SVA) über die Wirksamkeit von vier nicht näher beschriebenen Immobilisierungsmitteln bei einem synthetisch, im Labor hergestellten Schlamm und einem metallhaltigen Schlamm aus einem Produktionsverfahren veröffentlicht worden (12). Die untersuchten Schlämme enthielten u.a. Hg, As, Cd und Cu als Inhaltsstoffe. Die Studie kommt zu folgendem Ergebnis:

Die Materialien wurden getrocknet und pulverisiert. Die Auslaugungsversuche (Rührtests und Soxhletextraktionen) wurden sowohl mit verfestigten als auch mit den unbehandelten Materialien durchgeführt. Es zeigten sich kaum oder keine Unterschiede im Auslaugungsverhalten bei den verfestigten Schlämmen. Bei einigen der Verfestigungsmittel war die Auslaugung bestimmter Metallionen beim verfestigten Produkt sogar höher als beim unbehandelten Schlamm. Dieser Effekt wurde insbesondere beobachtet, wenn die Auslaugungstests bei konstantem, z.B. neutralen pH-Wert durchgeführt wurden, wie es auch den tatsächlichen Verhältnissen etwa in einer Hausmülldeponie entspricht.

Bei elektronenmikroskopischen Strukturuntersuchungen, die ebenfalls im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden, fanden sich nur geringe Hinweise auf chemische Wechselwirkungen zwischen den Metallen des Schlammes und den Atomen des Verfestigungsmittels.

3.3 Kriterien für den Einsatz von Verfestigungstechniken

Abschließend seien noch einige Kriterien angegeben, die erfüllt sein müssen, um den Einsatz einer Verfestigungstechnik zu rechtfertigen (13).

Der große Unsicherheitsfaktor bei allen bisher bekannten Verfestigungstechniken ist das Langzeitverhalten der Verfestigungsprodukte. Ihr Vorteil dürfte jedoch vor allem in den günstigeren physikalischen Eigenschaften und der dadurch verbesserten Handhabbarkeit des verfestigten Materials gegenüber den unbehandelten Schlämmen liegen. Als generelle Kriterien, die den Einsatz von Verfestigungstechniken auch auf Sonderabfalldeponien rechtfertigen können, sind zu nennen:

- Verringerung der Auslaugung durch geringere Wasserdurchlässigkeit
- hohe Standfestigkeit des Materials nach der Behandlung
- möglicherweise Langzeitstabilität des Produktes
- keine wesentliche Volumenvergrößerung durch die Behandlung
- Kosten und behördliche Zustimmung zu dem Verfahren.

4. Literaturverzeichnis

- (1) F. Hübl, Die zentrale Sonderabfall- und Schlamm-
beseitigungsanlage in Wien, Müll und
Abfall, 9, 1979 (246)
- (2) K.-P. Fehlau, Umweltgutachten 78 - Abfallwirtschaft
macht Fortschritte, Umwelt-Sonderausga-
be, 1978 (29)
- (3) E. Merkel, Richtlinienentwurf von Nordrhein-Westfa-
len über Untersuchung und Beurteilung
von Abfällen, Müll und Abfall, 6, 1979
(149)
- (4) Weitzel, Abfallbeseitigung auf einer modernen
Industriedeponie am Beispiel der Bayer-
Deponie Dormagen in Sonderabfallbesei-
tigung/Abfallwirtschaftsseminar an der
Techn. Univ. Berlin, Hrsg. von K. J.
Thomé-Kozmiensky, Bielefeld, 1977
(183 ff.)
- (5) NATO-CCMS Studie, Disposal of Hazardous Wastes-Landfill,
1977 (30 ff.)
- (6) R. Voigt, Deponierung von Sondermüll - Auslauge-
verhalten von metallhaltigen Fällschlam-
men, Abschlußbericht, Geschäftszeichen
307-7291, Forschungskennzeichen BCT 0118
Duisburg 1978

- (7) W. Niemitz,
H. Pierau, Untersuchung auf der Versuchsdeponie
Emscherbruch über die gemeinsame Ablage-
rung von Industriellen Abfallstoffen
und Schlämmen zusammen mit Hausmüll,
unveröffentl. Bericht, 1978
- (8) K. Hilger, Behandlung von Stäuben und Schlämmen aus
der Eisen- und Stahlindustrie unter dem
Gesichtspunkt der Abfallwirtschaft und
des Immissionsschutzes, Vortrag, Essen,
1977
- (9) R. Götz, Die Mobilisierung von Schwermetallen
(Pb, Zu, Cu und Ni) im Wasser durch
Huminsäuren aus schwerlöslichen Boden-
körpern, Forum Städte-Hygiene, 2, 1978
(33)
- (10) C. B. Cope, Das Sealosafe-Verfahren und Erfahrungen
mit seiner Anwendung in Verfestigung und
Einkapselung von Sonderabfällen zum
Zwecke der Ablagerung, Materialien 3/77
Hrsg. Umweltbundesamt 1977 (68 ff.)
- (11) A. W. Werde, "Chemfix Solidification Process" - Ver-
festigung von Sonderabfällen in Verfes-
tigung... (s. 10) (39 ff.)
- (12) SVA (Hrsg), Comparative Investigations on Four
Immobilisation Techniques, Amerfort, 1979
- (13) K. Waßmann, Kriterien der Verfestigung und Einkapse-
lung von Sonderabfällen unter den Aspek-
ten des Deponiebetriebes und der Lang-
zeitsicherung und Abschirmung bei Über-
tage-Deponien in Verfestigung... (s.10)
(110 ff.)