

Deponierfähigkeit von Klärschlämmen

Erfordernisse an die Vor- und Nachbehandlung der Schlämme

Dipl.-Ing Neuschäfer, Kassel,
Dipl.-Ing. Peschen, Köln,
Dipl.-Ing. Schmidt, Kassel

Sonderdruck aus

awt **abwassertechnik**
Abfalltechnik + Recycling

Heft 2 · April 1991, S. 33–36

Heft 3 · Juni 1991, S. 52–58

Überreicht durch

BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE e. V.

Annastraße 67–71 · 5000 Köln 51
Tel.: 02 21 / 3 76 92-0 · FS: 8882674
Fax: 02 21 / 3 76 92 14

Deponierfähigkeit von Klärschlämmen

Erfordernisse an die Vor- und Nachbehandlung der Schlämme

Dipl.-Ing. Neuschäfer, Kassel, Dipl.-Ing. Peschen, Köln, Dipl.-Ing. Schmidt, Kassel

1 Einleitung und Problemstellung

Rund 50% der anfallenden Klärschlämme werden auf Misch- oder Mono-deponien abgelagert, da durch landwirtschaftliche bzw. thermische Verwertung aus Akzeptanz- und Kapazitätsgründen derzeit nicht mehr als etwa die Hälfte des gesamten Klärschlammanfalles verwertet/entsorgt werden kann.

Maßgebend für den Betrieb (Einbau und Befahrbarkeit) und für die Standsicherheit des Deponiekörpers sind die bodenmechanischen Eigenschaften (Scherfestigkeit bzw. Tragfähigkeit) des Klärschlammes [1], [2]. Bei gemeinsamer Ablagerung in einer Zweikomponentendeponie aus Hausmüll und Klärschlamm werden in Zukunft Anfangsscherfestigkeiten $> 20 \text{ kN/m}^2$ bei einem Klärschlammereinbau in Mieten gefordert [3].

Bei der Ablagerung unbehandelter kommunaler Abfälle (Müll und Klärschlamm) müssen die wichtigsten Aufgaben der Abfallentsorgung, wie der Gewässerschutz und die optimale Nutzung des beschränkt vorhandenen Deponieraumes, beachtet werden. Probleme können entstehen durch den unkontrollierten anaeroben Abbau organischer Inhaltsstoffe und die Rücklösung sowohl von organischen als auch von anorganischen Stoffen.

Durch weitergehende Abwasserreinigungsmaßnahmen (Nitrifikation, Denitrifikation, Phosphorelimination) erhöht sich der spezifische Klärschlammanfall. Das Müll/Klärschlamm-Verhältnis in Zweikomponentendeponien nimmt gleichzeitig, verstärkt durch zunehmende Abfallvermeidung, Abfallrecycling (Glas, Altpapier) und die Verbrennung von Hausmüll, ab.

Die bodenmechanischen Parameter ergänzen bzw. ersetzen die bisher zur Beurteilung herangezogenen Kriterien, wie z. B. Wassergehalt und Stichtfestigkeit. Parallel dazu existieren verschiedene Methoden, um die Einbaufähigkeit und Befahrbarkeit von Klärschlämmen zu überwachen, ohne den Betriebsablauf zu stören [4]. Die gemeinsame Ablagerung von Klärschlamm und Hausmüll ist detailliert in [5], [6], [7], [8] und [9] beschrieben. Dafür sind nach dem Stand der Technik folgende Grundvoraussetzungen zu erfüllen:

- Behandlung der Schlämme bis zu einer für den Einbau und Befahrbarkeit notwendigen Festigkeit und die
- Organisation des Müll- und Klärschlammreinbaues in Abhängigkeit der abzulagernden Mengen der Einzelkomponenten.

Die Organisation der Klärschlammlieferungen und der von ATV/VKS [9] empfohlenen punktförmige Einbau in Mieten und Kassetten sowie der gemischte Einbau werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Der Klärschlamm muß bei allen Einbaumethoden ausreichende Festigkeiten aufweisen, damit er mit den vorhandenen Verdichtungsgeräten bei einer Mindestüberdeckung mit Hausmüll befahren werden kann.

Anzustrebendes Ziel wäre u. E. eine vollkommene Durchmischung der beiden Komponenten Hausmüll und Klärschlamm vor bzw. während des Einbaues auf der Deponie, evtl. in Kombination mit einer vor der Deponierung durchgeführten Rotte. Dadurch wird die Mineralisierung des Deponiegutes beschleunigt. Die notwendigen Festigkeiten für Einbau und Befahrbarkeit der Einzelkomponenten wäre bei vollkommener Durchmischung von untergeordneter Bedeutung bzw. könnten vernachlässigt werden.

Die bodenmechanischen Eigenschaften des herzustellenden Gemisches sind jedoch mit den bisher aus der Bodenmechanik bekannten Gesetzmäßigkeiten nicht auf den Müll/Schlamm-Körper zu übertragen. Unabhängig von der beschriebenen Problematik ist verfahrenstechnisch die vollständige Vermischung schon bei einwohneräquivalenter Ablagerung nicht mit dem auf einer Deponie üblichen Maschinenpark (Kompaktor oder Moorraupe) zu bewältigen.

Es sind große Mischtrommeln vorzuhalten, in denen der Klärschlamm fein verteilt vor dem Einbau unter den Müll gegeben wird.

Die Sicherheit des gesamten Deponiekörpers setzt eine ausreichende und dauerhafte Festigkeit voraus. Zur Beurteilung dieser Festigkeitseigenschaften können entsprechende Verfahren aus der Bodenmechanik herangezogen werden. Die dem jeweiligen Verfahren zugrundeliegenden bodenmechanisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten sind jedoch für na-

türliche Böden aufgestellt worden. Die mechanischen Eigenschaften von Abfallprodukten, also auch Schlämmen, stellen jedoch aufgrund von Interaktionen veränderliche Größen dar [7].

Der Begriff der Festigkeit ist dabei nicht eindeutig definiert. Nach Gay et al. [1] werden UU-Versuche (undrainiert, unkonsolidiert) für Standsicherheitsberechnungen eingesetzt, wenn keine Konsolidation nach dem Einbau stattfindet, während CU-Versuche benötigt werden, wenn Schlamm unter einer Auflast konsolidieren kann.

Betreiber von Kläranlagen, die den anfallenden Klärschlamm zumindest teilweise auf Deponien ablagern, müssen ihre Konditionierungs-, Entwässerungs- und Nachbehandlungsverfahren in Zukunft den bodenmechanischen Anforderungen der Deponiebetreiber anpassen (zusätzlich bzw. anstelle des Wassergehaltes).

Maßgebend hierfür sind die Scherfestigkeit und Tragfähigkeit. Diese Kennwerte werden nach standardisierten Meßverfahren ermittelt, die in Zukunft zur Beurteilung der Deponierfähigkeit als sog. Schnellverfahren für die Eingangskontrolle auf Deponien und die Eigenüberwachung auf der Kläranlage eingesetzt werden. Mit diesen Verfahren lassen sich nur Aussagen zur Anfangsstandsicherheit (Einbaufähigkeit und Befahrbarkeit) des Klärschlammes treffen; die Beurteilung der Endstandsicherheit des Gesamtsystems Deponie ist nicht möglich. Bei allen zum Einsatz kommenden Schnellverfahren soll das Meßergebnis über statistisch nachgewiesene Regressionsfunktionen in den Parameter Flügelscherfestigkeit $\tau_{FS} [\text{kN/m}^2]$ umgerechnet werden, um einheitliche, vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

2 Messung der Flügelscherfestigkeit

Im folgenden werden aus der Vielzahl der Schnellverfahren die Messung mit der Laborflügelsonde und mit dem Taschenpenetrometer beschrieben.

2.1 Probenahme

Bei der Bestimmung der Deponierfähigkeit ist es wichtig, eine repräsentative Probe zu erhalten. Es ist darauf zu achten, daß die Schlammprobe z. B. nicht von der abgetrockneten Oberfläche eines mit Klärschlamm gefüllten Containers genommen wird. Ebenfalls wichtig ist der zeitliche Abstand der Probenahme zum Entwässerungsvorgang. Bei einer Konditionierung mit reaktiven Produkten (z. B. CaO) ist die Nachverfestigung bzw. die Zeitspanne zwischen Entwässerung und Abtransport zur Deponie zu berücksichtigen.

2.2 Probenvorbereitung

Wichtig für alle zum Einsatz kommenden Verfahren ist eine einheitliche definierte Probenvorbereitung, um unterschiedliche Meßergebnisse miteinander vergleichen zu können.

Dazu dient die am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität-Gesamthochschule Kassel entwickelte Methode. Der Klärschlamm wird auf eine Teilchengröße von $\leq 10 \text{ mm}$ zerkleinert (homogenisiert) und in 3 gleichen Lagen (ca. 10 cm je Lage vor Verdichtung) in den Versuchszylinder eingebaut. Die Zerkleinerung des Filterkuchens führt bei Kammerfilterpressenschlämmen zu einer Verringerung der Festigkeiten, entspricht jedoch der tatsächlichen Beanspruchung durch einen Trogkettenförderer und den Kompaktor auf der Deponie. Jede Lage wird mit einem Verdichtungsgerät (kleiner Proctorhammer, $\varnothing 50 \text{ mm}$, Fallhöhe 300 mm, Fallgewicht 2,5 kg) mit 10 Schlägen über die aufgelegte Ausgleichplatte ($d = 99,5 \text{ mm}$) verdichtet. Anschließend wird der Aufsatzring entfernt und der überstehende Klärschlamm glatt abgeschnitten. Es ist sinnvoll, gleichzeitig die Dichte der Klärschlammprobe zu bestimmen. Diese Probenvorbereitung wurde in den Arbeitsbericht von ATV/VKS, 1989 [3] aufgenommen (Bild 1).

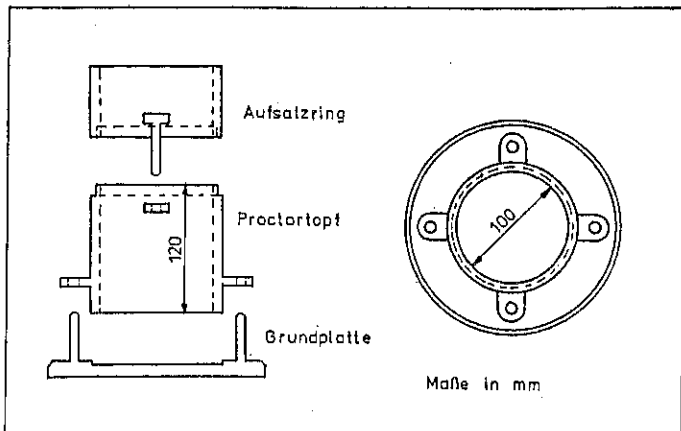


Bild 1. Proctortopf und Zubehör

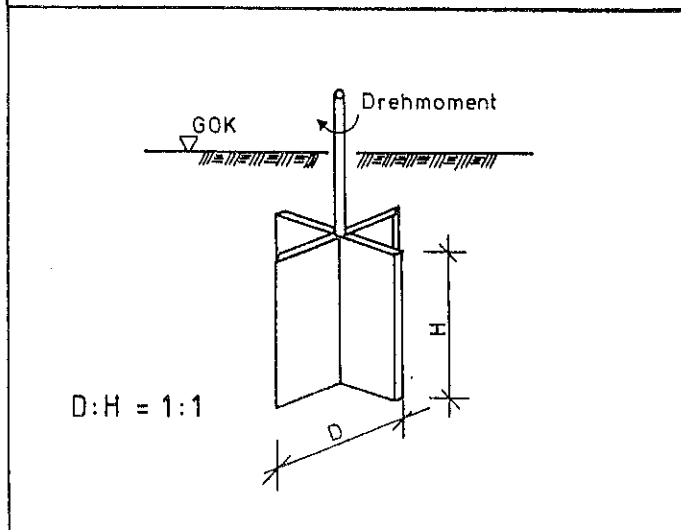
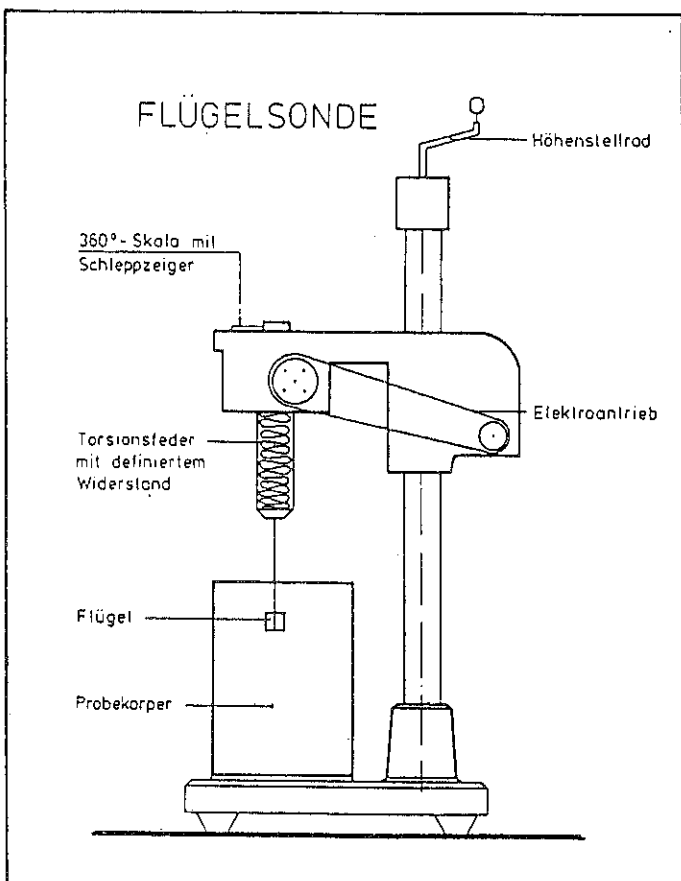


Bild 2. Laborflügelsonde zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit τ_{FS} in KN/m^2

2.3 Messung

2.3.1 Bestimmung der Flügelscherfestigkeit τ_{FS} mit der Laborflügelsonde
 Bei der Laborflügelsonde wird ein Drehflügel in die Schlammprobe versenkt und mittels eines Elektromotors anschließend über eine Drehfeder abgeschert. Der erreichte Drehwinkel bis zum Abscheren der Probe wird über die Federkonstante in ein Drehmoment und anschließend über die Scherfläche in die Scherspannung τ_{FS} umgerechnet. Der Meßvorgang bei einer Dreifachbestimmung dauert etwa 30 Minuten. Der Vorteil des Gerätes ist der gleichmäßige elektrische Antrieb, die leichte Handhabung und das Abscheren im Inneren der Probe, so daß Oberflächeneinflüsse ausscheiden. Nachteile sind die relativ lange Untersuchungszeit und die geringe Akzeptanz beim Bedienungspersonal vor Ort, da der Meßvorgang für sie schwer verständlich ist (Bild 2).

2.3.2 Bestimmung der Tragfähigkeit p_p mit dem Taschenpenetrometer CT-421

Das Taschenpenetrometer besteht aus 2 ineinander gesteckten zylindrischen Teilen (gesamte Baulänge rd. 18 cm), die beim Eindringen in den Klärschlamm über eine Wegfeder gegeneinander verschoben werden. Um das Penetrometer bei unterschiedlicher Konsistenz der entwässerten Klärschlämme einsetzen zu können, wurden am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität-Gesamthochschule Kassel kegelförmige Adapter unterschiedlicher Größe entwickelt. Man mißt den beim Eindringen in den Schlamm aktivierten Eindringwiderstand, also eine Tragfähigkeit, die sich aufgrund der kegelförmigen Adapter aus Normal- und Schubspannungen zusammensetzt. Voraussetzung ist natürlich auch hier die definierte Probenvorbereitung. Der Probenzylinder wird gedreht und das Taschenpenetrometer mit aufgesetztem Prüfkegel langsam an 3 Stellen der glatten Unterseite eingedrückt, bis die Kegelgrundfläche jeweils mit der Schlammoberfläche abschließt (Achtung: Penetrometer nicht an den Führungsboizen der Feder anfassen). Wird der Meßbereich mit dem gewählten Prüfkegel überschritten, so ist ein kleinerer Prüfkegel zu wählen. Ist kein Widerstand meßbar, so ist ein größerer Kegel zu benutzen. Anschließend wird die Penetrometertragfähigkeit p_p und die Flügelscherfestigkeit τ_{FS} tabellarisch bestimmt. Dabei dienen die abgelesenen Skalenteile (Mittel der 3 Messungen) und die jeweilige Prüfkegelnummer als Eingangswerte. Die Ablesung am Penetrometer erfolgt an der Unterseite des verschiebbaren roten Ringes (Achtung: Die tabellarische Auswertung der Flügelscherfestigkeit ist bei Anwendung der unter 2.2 beschriebenen Probenvorbereitung gültig!). Die Bestimmung selbst dauert wenige Sekunden. Bei dem Betriebspersonal wird das Taschenpenetrometer aufgrund der erwähnten Schnelligkeit, der einfachen Handhabung und der Robustheit bevorzugt. Das Eindringen des Kegels als Maß für die Einbaufähigkeit und Befahrbarkeit des Klärschlammes ist für das Betriebspersonal verständlich (Bild 3).

Da, wie bereits eingangs erwähnt, alle Ergebnisse zur besseren Vergleichbarkeit als Flügelscherfestigkeit dargestellt werden sollen, wird die gemessene Tragfähigkeit (Eindringwiderstand) über eine Eichgerade umgerechnet (Tab. 1).

3 Wirkung von Konditionierungsmitteln in der Vor- und Nachbehandlung von Klärschlämmen

Durch die Konditionierung werden Abwasserschlämme so verändert, daß ihre Eindickung und Entwässerung erleichtert und verbessert wird. Die Schlammeindickung und Entwässerung werden durch das starke Wasserbindungsvermögen der Feststoffe stark eingeschränkt. Eine Lockerung dieser Bindungskräfte ermöglicht eine wesentliche Beschleunigung der Entwässerungsvorgänge, so daß die Konditionierung die Vorstufe für weitergehende Entwässerungsvorgänge ist. Die Konditionierung hat folgende Aufgaben [10]:

- Einstellung optimaler Feststoffgehalte des entwässerten Schlammes unter Berücksichtigung nachfolgender Verfahrensstufen und der Weiterverwendung des Schlammes,
- hohe Durchsatzleistungen der Entwässerungsmaschine,
- hoher Abscheidegrad,
- Stabilisierung der organischen faulfähigen Schlammfeststoffe.

3.1 Chemische Schlammkonditionierung

Die bei der chemischen Konditionierung stattfindenden Vorgänge beinhalten physikalisch-chemische Reaktionen zur Umwandlung kleiner ungelöster Feststoffe und Partikel in größere abscheidbare. Die dabei ablaufenden Reaktionsstufen sind:

- Entstabilisierung der Oberflächenladung
- Transport, Kollision und Aggregation.

SKALENTEILE PENETROMETER CT-421	PENETROMETERTRAGFÄHIGKEIT p_p [kN/m ²] FLÜGELSCHERFESTIGKEIT τ_{fs} [kN/m ²]							
	PRÖFKEGEL-NR.							
	10		15		20		30	
	p_p	τ_{fs}	p_p	τ_{fs}	p_p	τ_{fs}	p_p	τ_{fs}
700	481	74	321	49	240	37	160	24
690	474	73	316	49	237	36	158	24
680	467	72	311	48	234	36	156	24
670	460	71	307	47	230	35	153	23
660	453	70	302	47	227	35	151	23
650	447	69	298	46	223	34	149	23
640	440	68	293	45	220	34	147	22
630	433	67	289	44	216	33	144	22
620	426	66	284	44	213	33	142	22
610	419	65	279	43	210	32	140	21
600	412	64	275	42	206	32	137	21
590	405	63	270	42	203	31	135	21
580	398	62	266	41	199	31	133	20
570	392	61	261	40	196	30	131	20
560	385	59	256	39	192	29	128	19
550	378	58	252	39	189	29	126	19
540	371	57	247	38	185	28	124	19
530	364	56	243	37	182	28	121	18
520	357	55	238	37	179	27	119	18
510	350	54	234	36	175	27	117	18
500	343	53	229	35	172	26	114	17
490	337	52	224	34	168	26	112	17
480	330	51	220	34	165	25	110	17
470	323	50	215	33	161	25	108	16
460	316	49	211	32	158	24	105	16
450	309	48	206	32	155	24	103	16
440	302	47	202	31	151	23	101	15
430	295	46	197	30	148	22	98	15
420	289	44	192	29	144	22	96	14
410	282	43	188	29	141	21	94	14
400	275	42	183	28	137	21	92	14
390	268	41	179	27	134	20	89	13
380	261	40	174	27	131	20	87	13
370	254	39	169	26	127	19	85	13
360	247	38	165	25	124	19	82	12
350	240	37	160	24	120	18	80	12
340	234	36	156	24	117	18	78	12
330	227	35	151	23	113	17	76	11
320	220	34	147	22	110	17	73	11
310	213	33	142	22	106	16	71	11
300	206	32	137	21	103	16	69	10
290	199	31	133	20	100	15	66	10
280	192	29	128	19	96	14	64	9
270	185	28	124	19	93	14	62	9
260	179	27	119	18	89	13	60	9
250	172	26	114	17	86	13	57	8
240	165	25	110	17	82	12	55	8
230	158	24	105	16	79	12	53	8
220	151	23	101	15	76	11	50	7
210	144	22	96	14	72	11	48	7
200	137	21	92	14	69	10	46	7

Tabelle 1. Umrechnung von der Penetrometerablesung in die Penetrometertragfähigkeit und Flügelscherfestigkeit

Die Entstabilisation bedeutet die Umwandlung einer quasi stabilen Suspension in eine agglomerierende durch Chemiekalienzugabe. Die im Schlamm vorhandenen organischen und anorganischen ungelösten Partikel sind in der Regel nach außen negativ geladen und behindern eine Entwässerung. Durch die chemische Konditionierung wird dieser Zustand aufgehoben.

3.2 Organische Flockungsmittel

Hierbei handelt es sich um organische, lineare oder verzweigte, hochmolekulare, wasserlösliche synthetische Polymere mit Molmassen zwischen 10^5 – 10^7 g/mol, die man auch als Polymere bezeichnet.

Die im Handel befindlichen gebräuchlichen Polyelektrolyte sind Festprodukte, 30–50 Gew.-% Wirkstoff enthaltende Emulsionen oder Dispersionen oder ca. 5 Gew.-% wirkstoffhaltige wäßrige Lösungen. Die bestehen aus den folgenden chemischen Verbindungen:

- Polyamid
- Poly (2hydroxy)propyl 1.1-N-dimethylammoniumchlorid)
- Poly N (dimethylaminomethyl) acrylamid
- Copolymer aus Acrylamid und N-N Dimethylamionopropylmethylacrylat
- Polyäthylenoxid, – (kationische)
- Polyacrylamid, – (nichtionogen)

Zur chemischen Schlammkonditionierung für Abwasserschlämme aus kommunalen und industriellen Kläranlagen kommen vornehmlich kationische Polyelektrolyte (PE) auf Basis von Acrylamid zur Anwendung. Bei der praktischen Anwendung werden aus 1%igen Stammlösungen ca. 0,1%ige wäßrige Gebrauchslösungen hergestellt und zur PE-Konditionie-

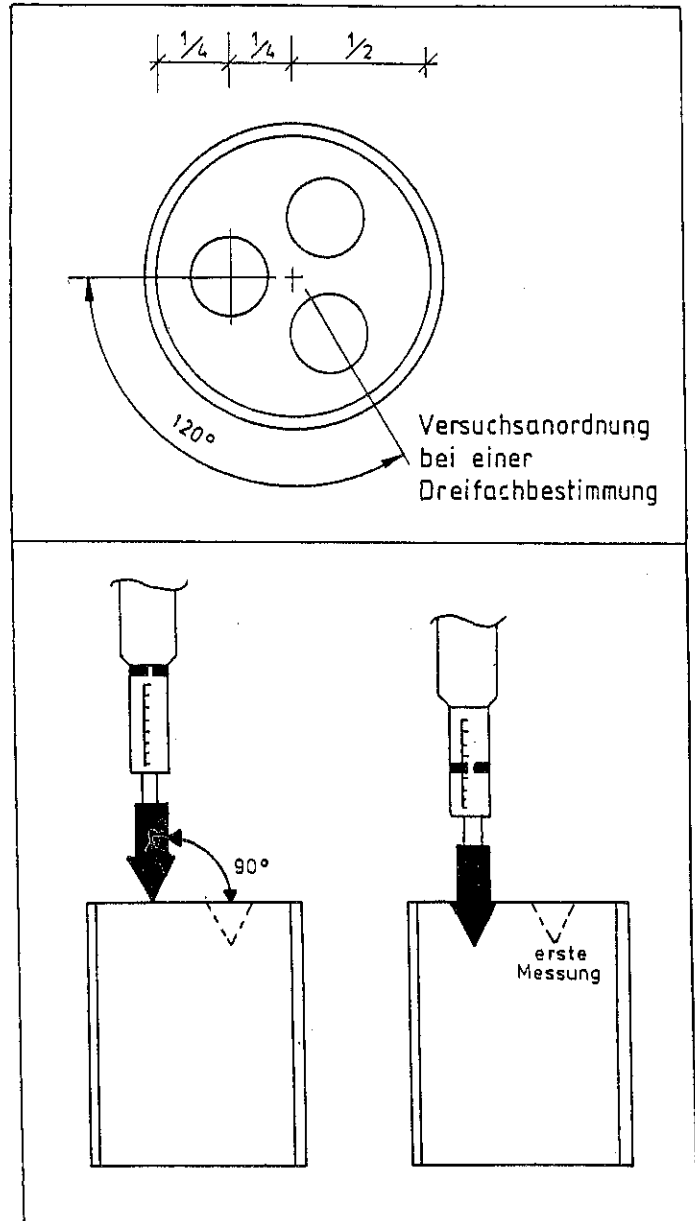


Bild 3. Taschenpenetrometer CT-421

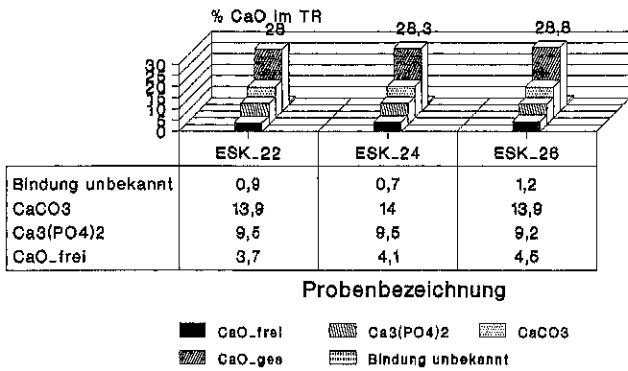
rung verwendet. Die Anwendung der PE-Konditionierung bei Industrie- und Kommunalschlämmen war früher auf Trockenbeete, Filtersacksystemen und Vakuumfiltern beschränkt. Heute werden mit gutem Erfolg die Schlämme nach PE-Konditionierung in Zentrifugen, Bandfilterpressen und Kammerfilterpressen entwässert. Bei der Kammerfilterpressenentwässerung kommt der Produktwahl aber auch der Verfahrenstechnik der Konditionierung große Bedeutung zu.

3.3 Anorganische Konditionierungsmittel

Hier werden in der Regel Eisen- und Aluminiumsalze sowie Kalk für die Konditionierung vor Kammerfilterpresse eingesetzt. Die Salze der Metalllösungen werden hydratisiert. Wirksam ist das im Schlamm verbleibende Kation, während das Anion im Schlammwasser verbleibt.

Bei pH-Werten von 5,5 bis 7,5 bilden sich aus den Kationen positive Ladungen, tragende monomere, digomere und polymere Hydroxokomplexe sowie auch partikuläre Oxihydrate, die negativ geladene Schlammpartikel ausflocken. Durch das hohe Wasserhaltevermögen der gebildeten Metallhydroxokomplexe ist man in der Praxis zur Erzielung hoher Entwässerungsleistungen gezwungen, Kalkhydrat in Form einer Suspension zur Konditionierung zuzumischen. Dabei hat die Kalkzugabe bei näherer Betrachtung mehrere Funktionen, die sich nicht nur als gerüstbildende Substanz darstellen. Mit den üblichen Konditionierungsmittelmengen von 10–20 kg Kalkhydrat/m³ Klärschlamm müßten erhebliche Kalkhydratmengen analytisch im Klärschlamm wiederfindbar sein. Eine Reihe von Analyseergebnissen zeigt deutlich die Umsetzungsreaktionen des Kalkhydrates auf, wobei der Freikalkanteil mit etwa 4 Gew.-% sehr niedrig ist.

Kalkbilanz im entwässerten Schlamm Kalk-Eisen-Konditionierung

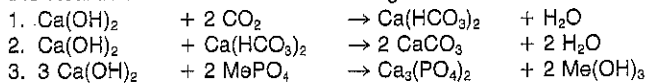


dargestellt ist der CaO-Anteil, jeweils in der gekennzeichneten Verbindung gebunden

Bild 4. Kalkbilanz im entwässerten Schlamm nach anorganischer Konditionierung

Bei den Untersuchungen auf der Kläranlage Koblenz zeigten Wolf und Mitarbeiter [11] dies deutlich auf (Bild 4).

Die Reaktionen sind nach den Gleichungen 1–3 erklärbar:



Die für die Reaktionen erforderlichen hohen pH-Werte haben natürlich Auswirkungen auf Flockungs- und Entwässerungsverhalten der im Klärschlamm vorhandenen organischen Substanz. Viele organische Säuren lassen sich mit Kalk nicht nur neutralisieren, sondern das dazugehörige Anion wird als gut filtrierbare Ca-Verbindung ausgefällt und -geflockt. Der hohe pH-Wert und der noch verbleibende Freikalküberschuß führt zu weiteren mineralogischen Neubildungen, die auf die bodenmechanischen Eigenschaften der Schlämme Auswirkungen haben [12]. Auf diese Mechanismen wird im Kapitel 4.1 eingegangen. Während bei der Konditionierung vor Kammerfilterpressen Kalk in Form einer wäßrigen Suspension zugesetzt wird, erfolgt die Vor- und/oder Nachkonditionierung bei Schlämmen aus Zentrifugen und Siebbandpressen mit trockenen Kalkprodukten in der Regel mit Branntkalk (CaO), weil damit noch ein Teil des Schlammwassers chemisch gebunden werden kann.

3.3.1 Feinkalk

Schlämme aus Zentrifugen, Siebbandpressen und polymerkonditionierten Kammerfilterpressenschlämme erreichen die erforderliche Flügelscherfestigkeit für die einwohneräquivalente Ablagerung mit Hausmüll üblicherweise nicht. Stand der Technik ist die Nachbehandlung der Schlämme mit Branntkalk (CaO). Dabei laufen folgende Reaktionen ab:

- $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 1777 \text{ kJ/kg CaO}$
- $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Die hierzu erforderliche Technik der Vermischung beschreiben Wolf u. a. [13]. Neben einer dem rheologischen Eigenschaften des Klärschlammes angepaßten Mischtechnik müssen die durch Temperaturerhöhung und pH-Wert-Verschiebung entstehenden Ammoniakbrüden aus dem System abgeführt werden. Mit der Zugabe von Branntkalk lassen sich die erforderlichen Flügelscherfestigkeiten einstellen. Die benötigten Kalkmengen sind schlammspezifisch und hängen vom Grad der Vorentwässerung, den Schlamm-inhaltsstoffen aber auch von der gewählten Mischtechnik ab, sie sollten in Vorversuchen ermittelt werden.

Eine andere Verfahrenstechnik ist die Vorkonditionierung von Schlämmen bei Entwässerung durch Zentrifugen. Feinkalk (CaO) wird trocken in eine Pumpenvorlage dosiert. Der mit Feinkalk konditionierte Schlamm, wird innerhalb kurzer Zeit nach Zugabe organischer Flockungsmittel über eine Zentrifuge maschinell entwässert. Die eigentliche Lösreaktion des Feinkalkes läuft erst nach der Entwässerung ab, damit kann auf eine aufwendige Mischtechnik zur Nachbehandlung verzichtet werden, da in der Zentrifuge bereits eine optimale Vermischung erfolgt. Diese Verfahrenstechnik hat noch eine Reihe weiterer Vorteile:

- Verbesserung der Entwässerungsleistung bzw. des Entwässerungsgrades
 - Einbindung von Phosphaten in den Schlamm
 - Besser beherrschbare Ammoniakbrüdenbehandlung.
- Beeinflusst wird diese Art der Konditionierung durch die Reaktivität des eingesetzten Feinkalkes (CaO). Damit die pH-Wert-Erhöhung wegen der Beeinflussung des organischen Flockungsmittels nicht zu schnell abläuft, sind mittel- und hartgebrannte Feinkalke vorteilhaft.

4 Verfestigung

4.1 Kalk

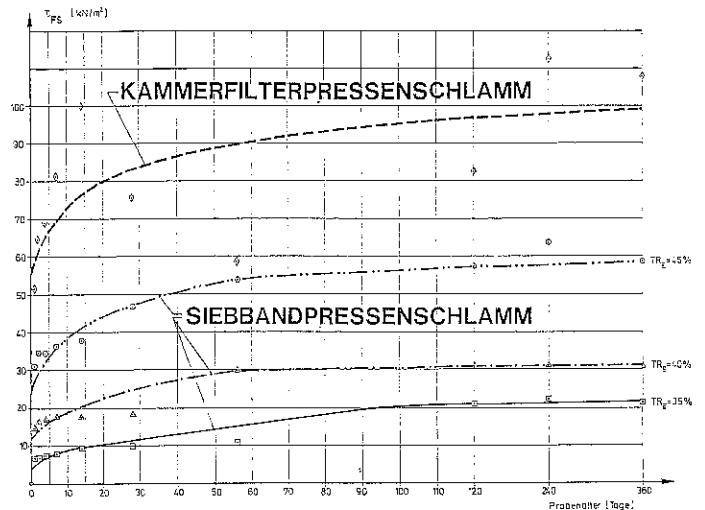
Die verfestigende Wirkung des Kalkes ist durch verschiedene chemische Reaktionen, die häufig nebeneinander ablaufen, erklärbar. Eine der wesentlichen Reaktionen ist die Karbonatisierung [12]. Es stellte sich bei Modeldeponien nach 1,5 Jahren eine Erhöhung des Calciumcarbonatanteils in der Trockensubstanz eines Siebbandpressenschlammes von 13 auf 24 Gew.-% ein. Im Trockenrückstand eines Kammerfilterpressenschlammes stieg der Calciumcarbonatanteil ebenfalls von 18,7 bis auf 29 Gew.-% an. Weitere Reaktionen sind mit Tonmineralien sowie reaktiven Eisen-, Aluminiumverbindungen möglich [12].

Ausgefaulte Klärschlämme von zwei kommunalen Kläranlagen, die zuvor über eine Bandfilterpresse bzw. Zentrifuge entwässert worden waren, wurden im Labormaßstab jeweils mit Branntkalk und Mischungen aus Branntkalk und Ton vermischt. Bereits wenige Tage nach der Vermischung waren in allen Klärschlamm-Kalk-Ton-Mischungen röntgenographisch, neben Portlandit und Calcit die Neubildungen Monosulfat, Sulfatettringit, CAH₁₃ und eine CSH-Phase nachweisbar.

Im Kuchen aus einer Kammerfilterpresse, in der Klärschlamm nach Konditionierung mit Kalkhydrat und Eisenchlorid entwässert worden war, konnte röntgenographisch u. a. Sulfatettringit und C₄AH₁₃ beobachtet werden. Wie lange derartige Verbindungen und Phasen stabil bleiben bzw. ob und zu welchen Neubildungen es im Deponiekörper kommen kann, muß weiter untersucht werden. Die Verbindungen, mit denen Kalk im Schlamm reagieren kann, sind in Art und Menge in den einzelnen Schlämmen verschieden. Sind nicht genügend reaktive Verbindungen vorhanden, so wäre die Zumischung anderer durch Kalk anregbare Substanzen in Betracht zu ziehen.

Die günstigen Einflüsse auf die Flügelscherfestigkeit zeigt Bild 5 [14].

Die Anfangs- und Endfestigkeiten haben über einen Zeitraum von 1 Jahr stetig zugenommen. Innerhalb der ersten 2 Wochen lag die Zuwachsrate bei durchschnittlich 25%. Die absoluten Größen werden stark beeinflusst von den Kalkzugabemengen und dem daraus resultierenden Trockenrückstand.



SIEBANDPRESSENSCHLAMM			
Kalkzugabe K [g/kg Naßschlamm]	111	174	244
Trockenrückstand TR _E [%]	35	40	45
Flügelscherfestigkeit τ _{FS} [kN/m ²]	1. Tag	7	15
	360. Tag	20	30
Festigkeitszuwachs Δτ [kN/m ²]	13	15	28
relativer Festigkeitszuwachs [%]	186	100	86

Bild 5. Flügelscherfestigkeit τ_{FS} in Abhängigkeit von der Zeit

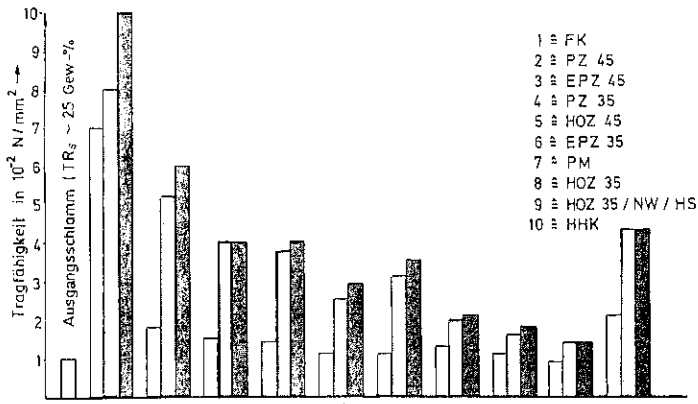


Bild 6. Veränderung der Tragfähigkeit nach 20%iger Zugabe verschiedener Zuschlagstoffe

4.2 Zement

Eine andere Möglichkeit Klärschlämme zu verfestigen, ist die Nachbehandlung mit Zement. Hierbei kommt der Wahl der richtigen Zementsorte größte Bedeutung zu. Die Mechanismen der Zementverfestigung im Vergleich zur Kalkverfestigung sind völlig anderer Art. Während Kalk den Klärschlamm durch Karbonatisierung und durch indirekte puzzolane Reaktionen verfestigt, wird bei der Behandlung der Schlämme mit Zement der Klärschlamm in die Zementmatrix eingebunden. Zur Ausbildung einer Zementmatrix werden optimale Wassergehalte benötigt. Die Reaktionen können aber durch Wasserinhaltsstoffe, wie Phosphate, aber auch organische Verbindungen empfindlich gestört werden. Laboruntersuchungen [15] zeigen bei Zugabemengen von 20 Gew.-% bezogen auf den entwässerten Klärschlamm, deutlich günstigere sich einstellende Endfestigkeiten bei der Verwendung von Kalk im Vergleich zu Zement (Bild 6).

Da die hohen Wassergehalte im Klärschlamm und die Wasserinhaltsstoffe die Zementreaktionen empfindlich stören, ist die Zugabe einer Kalk/Zementmischung günstig. Laboruntersuchungen zeigen hier schlamm-spezifisch teilweise besseres Verfestigungsverhalten als die Zugabe von Kalk bzw. Zement alleine. Der Vorteil dieser Kombination liegt in der schnellen Reaktion des Feinkalkes, hierbei wird Wasser chemisch gebunden und Wasserinhaltsstoffe ausgefällt und geflockt, damit werden die Bedingungen für die Zementreaktionen wesentlich verbessert.

4.3 Flugasche/Kalk

Bei der Suche nach preiswerten Verfestigungsmitteln wird häufig an Flugasche gedacht. Flugaschen sind nur dann für die Aufgaben einsetzbar, wenn sie über eine geeignete mineralogische und chemische Zusammensetzung verfügen. Flugaschen enthalten viele für Kalk „anregbare“ Bestandteile, so daß die Kombination einer geeigneten Flugasche und Kalk eine u. U. preisgünstige Alternative zur alleinigen Kalkzugabe sein kann.

Bedingt durch die Abgasreinigung in Kraftwerken wird zur Entschwefelung Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oder Kalkstein (CaCO_3) eingesetzt. Das Kalkadditiv setzt sich bei der Reaktion zu Gips (CaSO_4) und Branntkalk (CaO) um. Damit fällt eine Flugasche an, die bereits den für die Verfestigung erforderlichen Kalkanteil enthält. Leider enthalten derartige kalkhaltige Flugaschen ein nicht erwünschtes Nebenprodukt, Gips (CaSO_4). In Verbindung mit organischen Substanzen und anaeroben Bedingungen wird der Gipsanteil bakteriell zu Schwefelwasserstoff (H_2S), einem überaus toxischen Gas abgebaut. Eine Deponiegasverwertung führt zu großen Problemen, während die Bildung von Schwefelsäure bei der Verbrennung des Gases noch verfahrenstechnisch beherrschbar ist, z. B. durch Gasreinigung, ist der teilweise nicht kontrollierbare Austritt von H_2S -haltigem Deponiegas weitaus problematischer. Aus diesem Grund sollte die Verwendung gipshaltiger Flugaschen zur Verfestigung organischer Schlämme vermieden werden.

5 Praktische Erfahrungen

5.1 Nachbehandlung von Zentrifugen- und Siebandpressenschlämmen

Bei der maschinellen Schlamm entwässerung mit Zentrifugen und Siebandpressen werden die Anforderungen an die Deponierfähigkeit des abzulagernden Klärschlammes (20 kN/m^2) i. d. R. nicht erfüllt. Um die Mindestfestigkeit zu erreichen ist eine Nachbehandlung der entwässerten Schlämme notwendig. Dabei kommen unterschiedliche Produkte zum Einsatz. Man unterscheidet:

- reaktive Zuschlagstoffe (Branntkalk, Kalkhydrat, Zement, etc.),
- inaktive bzw. innerte Zuschläge (Steinmehl, Tonmehl, Asche, etc.),

- Gemische aus z. T. kostengünstigen Reststoffen (REA-Gips, Flugasche mit reaktiven Bestandteilen, etc.).

Betrachtet man die Nachbehandlung wie bisher unter dem Aspekt einer geforderten Feststoffhöhung, so läßt sich die für einen angestrebten Feststoffgehalt notwendige Zugabemenge unabhängig von der Schlammart/-herkunft relativ leicht bestimmen. Maßgebend ist einzig und allein der Ausgangsfeststoffgehalt. Eine Unterscheidung in reaktive und innerte Zuschlagstoffe ist für eine reine Feststoffhöhung unerheblich. Sollen mit der Nachbehandlung gezielt Festigkeiten erreicht werden, so sind verschiedene Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Grundsätzlich sollte jeder Betreiber eigene Verfestigungsversuche mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen und unterschiedlichen Dosierungen durchführen, denn die Ergebnisse lassen sich nicht auf Schlämme anderer Herkunft übertragen.
- Der Verfestigungsvorgang kann je nach Schlammart, Zuschlagstoff und Dosierung mehrere Tage dauern. Um die notwendigen Festigkeiten für den Einbau des Schlammes auf der Deponie mit dem wirtschaftlichsten Aufwand zu erreichen, sollen notwendige Verfestigungszeiten, Kosten für den Zuschlagstoff, Zugabemenge und Zwischenlagerkapazitäten auf der Kläranlage optimal aufeinander abgestimmt sein. Auch Wiederverfestigungsvorgänge nach mechanischer Beanspruchung durch Transport und Einbau sollten Berücksichtigung finden.
- Feststoffgehalt und Festigkeit eines nachbehandelten Schlammes korrelieren miteinander. Die gefundene Korrelation ist jedoch nicht auf einen Schlamm anderer Herkunft mit gleichem Feststoffgehalt übertragbar.

Beispielhaft werden nachfolgend Versuchsergebnisse von in Zentrifugen entwässerten Faulschlämmen der Kläranlage Kassel aufgezeigt, die mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen nachbehandelt wurden. Die ausgewählten Stoffe sind:

Branntkalk

Steinmehl

Flugasche mit Zement- bzw. Kalkzusatz und ein Zuschlagstoff auf Zementbasis.

Die fünf Zuschlagstoffe wurden dem entwässerten Schlamm in unterschiedlichen Mengen, beginnend mit 50 g je kg entwässerten Schlammes, in einem Zwangsmischer unter definierten Bedingungen zugemischt. Die maximale Zugabe betrug 500 g/kg entwässerten Faulschlammes. In der graphischen Darstellung der Ergebnisse sind die Zugabemengen auf die Trockenmasse des Ausgangsproduktes (entwässertes Schlamm) bezogen. Die Flügelscherfestigkeit wurde jeweils nach 24 h bestimmt, da der zu deponierende Klärschlamm i. d. R. einen Tag in Containern auf dem Zentralklärwerk lagert, bevor er zur Deponie transportiert wird. Der Austrag der Zentrifuge hatte einen Feststoffgehalt von 25% TR.

Die Ergebnisse sind in Bild 7 dargestellt. Um eine Flügelscherfestigkeit von 20 kN/m^2 zu erreichen und damit den Klärschlamm zum Zeitpunkt der Ablagerung einbaufähig und befahrbar zu machen, sind abhängig vom Zuschlagstoff unterschiedliche Zugabemengen notwendig.

Bei einer Nachbehandlung mit Branntkalk reichen in o. g. Versuchen 30% der Ausgangstrockenmasse als Zugabemenge aus. Dies entspricht ca. 75 kg CaO bei einem Ausgangsfeststoffgehalt von rd. 250 kg TR/t entwässerten Schlammes (25% TR).

Die Flugasche mit Branntkalkanteil liegt etwas ungünstiger. Kontinuierlich überschritten wird die Mindestfestigkeit ab einer Zugabe von rd. 200 kg (80% bezogen auf die Ausgangstrockenmasse). Von dem hydraulischen Binder sind 250 kg/250 kg TR notwendig.

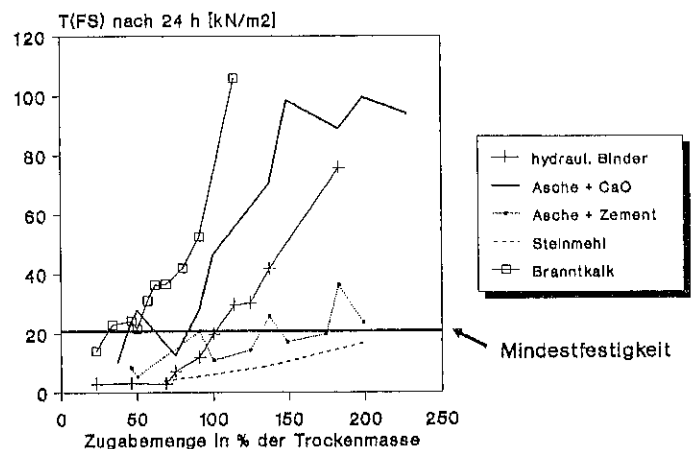


Bild 7. Flügelscherfestigkeit bei Zugabe unterschiedlicher Zuschlagstoffe

Bei dem Zuschlagstoff Flugasche + Zement wird die Mindestfestigkeit nur durch eine hohe Zugabemenge erreicht ($\approx 200\%$). Mit Steinmehl konnten die Festigkeiten nicht erreicht werden.

Die Verfestigungen nachbehandelter Schlämme in Abhängigkeit von der Lagerzeit sind von Otte-Witte [2] untersucht worden. Die Siebbandpressenschlämme (Ausgangsfeststoffgehalt 18% TR) wurden nach unterschiedlichen Zwischenlagerzeiten auf ihre Festigkeit hin untersucht, dabei sind die Schlämme direkt nach der Nachbehandlung in die unter 2.2 beschriebenen Probebehälter eingebaut und jede Probe nach dem ihr zugeordneten Zeitintervall untersucht worden.

Die mit Flugasche + CaO, hydraulischen Binder und Branntkalk nachbehandelten Schlämme überschreiten bereits am Anfang die geforderte Festigkeit. Bei Flugasche + Zement ist die Nachverfestigung gering; die Mindestfestigkeit wird gerade erreicht. Bei Steinmehl ist keine Nachverfestigung feststellbar.

Die mit Branntkalk vermischte Flugasche (228 kg/t Dickstoff) zeigt hohe Festigkeiten und eine hohe Nachverfestigung. Die mit 180 kg CaO/t Dickstoff nachkonditionierte Charge erreicht nicht die hohen Festigkeiten, überschreitet aber deutlich die 20 kN/m². Aus Bild 7 lassen sich bedeutend höhere Werte ableiten, wenn die Branntkalkmenge weiter erhöht würde.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß für die Nachbehandlung von Zentrifugen- und Siebbandpressenschlämmen reaktive Zuschlagstoffe eingesetzt werden sollten, da beim Einsatz von inaktiven Zuschlagstoffen die notwendigen Mengen so hoch sind, daß Transport- und Deponievolumen und -kosten über das notwendige Maß hinaus beansprucht werden. Eine Sonderstellung nehmen die Zuschlagstoffe ein, die auch ohne Einsatz in der Klärschlammnachbehandlung zur Ablagerung vorgesehen sind.

5.2 Vergleichende Untersuchungen zur anorganischen/organischen Konditionierung vor maschineller Entwässerung mittels Kammerfilterpressen

Auf der Kläranlage der Stadt Koblenz wurde 1988 und 1989 das von der Arbeitsgemeinschaft Industrielle Forschung geförderte Forschungsvorhaben „Vergleichende Untersuchungen zur anorganischen bzw. organischen Konditionierung vor maschineller Schlammentwässerung mittels Kammerfilterpressen unter Berücksichtigung der Deponierfähigkeit des Schlammes“ durchgeführt [11]. An den Untersuchungen waren die Stadt Koblenz, die Firma Netzsch G.m.b.H., die BASF als Vertreter der organischen Konditionierung, der Bundesverband der deutschen Kalkindustrie e. V. als Vertreter der anorganischen Konditionierung und das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität-Gesamthochschule Kassel zur Durchführung der vergleichenden Untersuchungen beteiligt. Die Versuchsanlage zur Herstellung hochreaktiver Kalkmilch wurde von der Firma Schaefer, Diez, zur Verfügung gestellt.

Für den direkten Vergleich der Konditionierung wurde die Kläranlage der Stadt Koblenz (ca. 175 000 EW) aufgrund zwei parallel betriebener Kammerfilterpressen ausgewählt. Nach der Umrüstung einer Presse auf organische Konditionierung war eine Anlage vorhanden, bei der das gleiche Ausgangsprodukt Faulschlamm organisch und anorganisch konditioniert und anschließend auf Pressen gleicher Bauart und Größe entwässert wurde.

Bevor die eigentlichen Vergleichsversuche begannen, wurde jede der beiden Entwässerungsstraßen von dem jeweiligen Partner in Vorversuchen optimiert.

Die organische Konditionierung wurde mit dem staubfreien Festprodukt Sedipur CF 502, die anorganische Konditionierung mit Weißfeinkalk, der

in einer Löschanlage der Firma Schaefer, Diez, zur Kalkmilch abgelöscht wurde, durchgeführt.

5.2.1 Ermittelte Daten und durchgeführte Untersuchungen

Für den Vergleich wurden folgende Daten bestimmt:

Schlammengen

Konditionierungsmittelbedarf

Preßzeiten

Wartung, Betriebssicherheit und Störanfälligkeit

Inhaltsstoffe im Filtrat

Trockenrückstände, Scherfestigkeit und Tragfähigkeit des entwässerten Schlammes

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt in der Beurteilung der bodenmechanischen Eigenschaften der aus den unterschiedlichen Konditionierungsverfahren anfallenden Schlämme. Maßgebend hierfür ist Scherfestigkeit und die Tragfähigkeit des Schlammes als Kenngröße für den hier betrachteten Entsorgungspfad Deponierung.

5.2.2 Faulschlammbeschaffenheit

Für die Übertragbarkeit und die Bewertung der Ergebnisse ist die Beschreibung der Beschaffenheit und Eigenschaften des Faulschlammes unerlässlich. Der für die vergleichenden Untersuchungen konditionierte, anaerob stabilisierte Schlamm weist einen Glühverlust im Mittel von 49% auf, der Gehalt an organischen Säuren liegt bei 66 mg/l. Diese Parameter zeigen, daß es sich um einen sehr gut ausgefaulten Schlamm handelt. Auch der über den Untersuchungszeitraum konstante pH-Wert um 7,25 deutet auf einen stabilen Faulprozeß.

Der Trockenrückstand ist mit 2,1% sehr gering, er unterliegt nur kleinen Schwankungen. Die Stickstoffwerte liegen bei einem arithmetischen Mittelwert von 2,7% der Phosphorgehalt bei 5,1%. Die Analysenwerte der Schwermetallbestimmung zeigen keine Besonderheiten, die Konzentrationen liegen weit unter den in der Klärschlammverordnung zulässigen Werten.

Der spezifische Filtrationswiderstand liegt im Mittel bei 233×10^{13} m/kg, die kapillare Saugzeit (CST) liegt bei einem Mittelwert von 315 sec.

5.2.3 Trockenrückstand und Festigkeit im entwässerten Schlamm

Die bei der Entwässerung eingesetzten Kammerfilterpressen sind mit 120 Platten mit einer Kantenlänge von 120 cm bestückt. Für den Vergleich der Entwässerungsleistung der organischen und anorganischen Konditionierung muß eine repräsentative Stelle für die Probeentnahme sowohl im Plattenquerschnitt, als auch über die Baulänge der Presse, festgelegt werden. Zu diesem Zweck wurden 4 Platten (Nr. 15, 45, 75, 105) aus den 120 vorhandenen Platten ausgewählt. In jeder Platte wurden fünf Untersuchungsstellen (im Eckpunkt, in der Diagonalen vom Eckpunkt zum Kern, im Kernbereich, am Plattenrand zwischen den Eckpunkten und senkrecht dazu zwischen Plattenrand und Kern) festgelegt. Die Auswertung der Bestimmung des Trockenrückstandes und der Festigkeitsuntersuchungen zeigen, daß die Probeentnahme nicht im Bereich der Kernbohrung erfolgen darf. Die Ergebnisse der anderen Probeentnahmestellen unterscheiden sich unwesentlich. Bild 8 verdeutlicht ein Beispiel zum Verlauf der Trockenrückstände über die Baulänge der Kammerfilterpresse und den Probeentnahmestellen bei anorganischer Konditionierung.

5.2.4 Trockenrückstand im entwässerten Schlamm nach organischer und anorganischer Konditionierung

Fast alle bestimmten Trockenrückstände der organisch konditionierten und entwässerten Schlämme liegen unter 35% TR. Das arithmetische

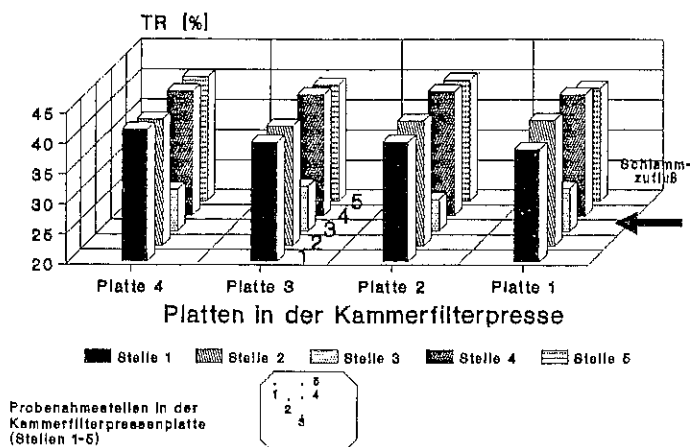


Bild 8. TR-Verlauf über die Kammerfilterpresse (Eisen-Kalk-Konditionierung)

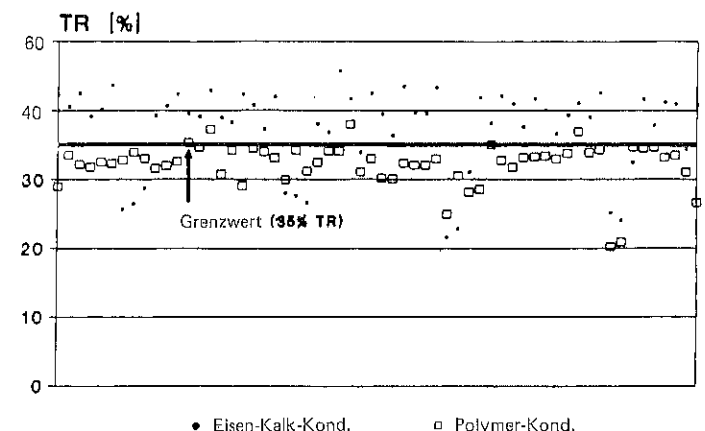


Bild 9. Trockenrückstand (TR) aller Versuche

Mittel aller Messungen beträgt 32,7% TR bei Schwankungen von 29,1% bis 41,2%. Der entwässerte Schlamm ist i. d. R. nach bestehenden Anforderungen der Deponiebetreiber (TR \geq 35%) nicht deponierfähig. Die Schwankungen im TR-Gehalt bei den anorganisch konditionierten Schlämmen sind mit 21,3% bis 44,0% höher als bei der organischen Konditionierung. Der Mittelwert der Trockenrückstände liegt jedoch bei 36%.

5.2.5 Scherfestigkeiten im entwässerten Schlamm nach organischer und anorganischer Konditionierung

Die Festigkeiten des entwässerten, organisch konditionierten Schlammes sind an allen Probestellen relativ gering. Der von den Fachauschüssen 3.2 und 3.6 der ATV/VKS [3] empfohlene Grenzwert von 20 kN/m² wird mit der organischen Konditionierung nicht erreicht. Der arithmetische Mittelwert liegt bei $\tau_{FS} = 13,5 \text{ kN/m}^2$ bei Schwankungen zwischen 8 kN/m² und 26 kN/m². Der Schwankungsbereich der Scherfestigkeiten der anorganisch konditionierten Schlämme sind mit Werten von 28 kN/m² bis 74 kN/m² enorm. Doch alle gemessenen Festigkeiten (Ausnahme einige Messungen im weichen Kernbereich der Platte) liegen über dem empfohlenen Grenzwert von 20 kN/m².

Die unterschiedlichen Scherfestigkeiten nach organischer bzw. anorganischer Konditionierung sind in Bild 10 gegenübergestellt.

5.3 Kostenvergleich

Die Kosten der Schlammbehandlung sind in der Regel anlagenspezifisch und werden bestimmt durch die sich nach maschineller Schlammentwässerung anschließenden Entsorgungsmöglichkeiten. Dabei sind u. a. Chemikalienkosten für die Vor- und Nachkonditionierung von untergeordneter Bedeutung. Die wesentlichen Kosten werden häufig durch die Entsorgungskosten und Möglichkeiten, die sogar letztlich die Wahl der Entwässerungsmaschine bestimmen, verursacht.

5.3.1 Grundlagen

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich der beiden Konditionierungsverfahren mit anschließender Entwässerung in Kammerfilterpressen und Ablagerung auf Deponie beschränkt sich auf den Untersuchungszeitraum 9/88 bis 9/89. In diesem Zeitraum wurden das Flockungsmittel Sedipur CF 502 und der Weißfeinkalk eingesetzt.

Für den Kostenvergleich werden nur laufende Kosten gegenübergestellt. Der Personaleinsatz (ohne Reinigungszeiten) ist für beide Entwässerungsstraßen ähnlich und bleibt daher unberücksichtigt.

Der Zeitaufwand für Reinigung und Wartung wird überschlägig abgeschätzt. Für die Ermittlung der Personalkosten nennt der Betreiber einen Mittellohn von 33,50 DM/Mh, bezogen auf das Jahr 1986. Bei einer geschätzten Kostensteigerung der Personalkosten von 3% wird für den Untersuchungszeitraum mit einem Stundenlohn von 35,54 DM/Mh gerechnet.

Die elektrische Energie für die Entwässerungsstraßen wird auf der Kläranlage Koblenz nicht getrennt erfaßt. Der Anteil der Energiekosten an den Betriebskosten geht somit nicht in den Vergleich ein.

Die Investitionskosten für die einzelnen Anlagenteile der beiden Entwässerungsstraßen lassen sich nicht in Einzelpositionen für nur eine Straße zuordnen. Ein Vergleich der Investitionskosten wird daher nicht durchgeführt.

Flügelscherfestigkeit aller Versuche

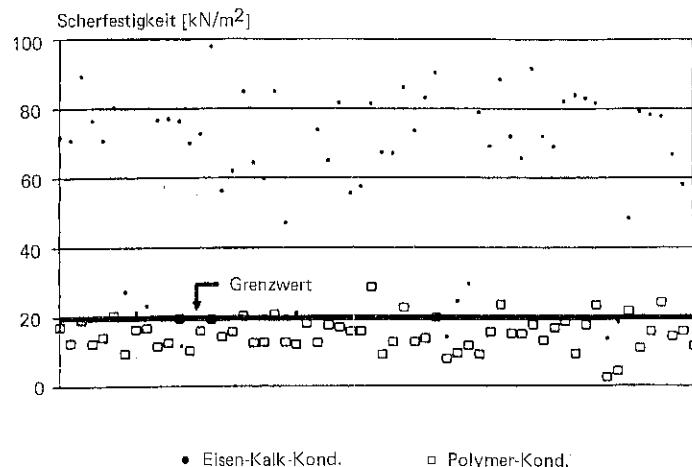


Bild 10. Scherfestigkeiten (τ_{FS}) im entwässerten Schlamm bei anorganischer Konditionierung

Die Konditionierungsmittel werden als Handelsware – und nicht als Gebrauchslösung – der konditionierten Faulschlammmenge gegenübergestellt, um einen eindeutigen Vergleich zu bekommen.

5.3.2 Organische Konditionierung

Für die organische Konditionierung wurden während des Untersuchungszeitraumes 1618 m³ Flockungsmittel einer 0,25%igen Sedipur CF 502-Lösung eingesetzt. Diese Menge entspricht einer gelieferten Handelsware von 4,05 t. Bei einem Bruttopreis von 10 006,35 DM/t Handelsware sind für die organische Konditionierung Betriebsmittelkosten von rd. 40 480 DM entstanden. Im gleichen Zeitraum wurden 30 560 m³ Faulschlamm konditioniert. Daraus resultieren spezifische Flockungsmittelkosten für die organische Konditionierung von 1,32 DM/m³ zu entwässernden Faulschlammes.

5.3.3 Anorganische Konditionierung

Zur anorganischen Konditionierung werden Weißfeinkalk und eine 40%ige FeClSO₄-Lösung eingesetzt. Die Bruttopreise betragen für den Kalk 177,08 DM/t und für das Eisensalz 148,20 DM/t. In dem betrachteten Untersuchungszeitraum wurden 270 t Branntkalk und 169 t Eisen-III-Chloritsulfat verbraucht. Während dieser Zeit wurden in 469 h rd. 24 900 m³ Faulschlamm konditioniert. Daraus resultieren spezifische Flockungsmittelkosten für die anorganische Konditionierung von 2,93 DM. Dabei sind rechnerisch je m³ Faulschlamm 10,8 kg CaO bzw. 14,3 kg Ca(OH)₂ verbraucht worden.

5.3.4 Personalkosten für Wartung und Reinigung

Die organische Konditionierung und anschließende Entwässerung war während des Untersuchungszeitraumes wartungsfrei. Die Entleerung jeder gepreßten Charge muß jedoch überwacht werden, da die Preßkuchen i. d. R. von den Filtertüchern manuell gelöst werden müssen.

Die „anorganische Straße“ wurde während der Untersuchungen rd. alle 8 Wochen gesäuert und gewaschen. Dafür sind ca. 3 Mh/Vorgang und 8 h Pressenstillstand einzukalkulieren. Die Rohrleitungen zwischen Konditionierung und Vorlagebehälter werden 1/2jährlich demontiert und gereinigt. Der Zeitaufwand beträgt dafür 6 MD = 48 Mh. Für die Reinigung der Reaktionsbehälter (Zwangsmischer) für die anorganische Konditionierung werden 2 Mh/4 Wochen benötigt. Daraus resultieren folgender Zeitaufwand und Kosten (bezogen auf den Untersuchungszeitraum):

Waschen und Säuern:	3 × 3 Mh = 9 Mh
Rohrreinigung:	6 Md = 48 Mh
Reaktionsbehälterreinigung:	6 × 2 Mh = 12 Mh
Summe Zeitaufwand:	69 Mh
Personalkosten für Reinigung:	
69 Mh × 35,54 DM/Mh =	2452 DM
Kosten für Hochdruckspülwagen:	
ca. 100 DM/H =	800 DM
Gesamtkosten:	3252 DM

5.3.5 Kosten für die Entsorgung

Die Kosten für die Entsorgung der entwässerten Schlämme unterteilen sich in Transport mit 6,60 DM/m³ und Ablagerung mit 22,88 DM/m³. Die Stadt Koblenz berechnet jeden transportierten Container unabhängig vom Inhalt mit 353,76 DM (12 m³).

In jeden Container werden 2 Kammerfilterpressenchargen gefüllt, so daß pro entwässertes Charge 176,88 DM an Entsorgungskosten anfallen. Während des Untersuchungszeitraumes wurden 488 Chargen organisch (entspricht 86 320 DM) und 507 Chargen anorganisch konditioniert und entwässert (entspricht 89 680 DM).

5.3.6 Kostenvergleich

Alle für den Kostenvergleich herangezogenen Kosten sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Der Kostenvergleich enthält keine Investitionskosten, da diese, aufgeteilt für die einzelnen „Entwässerungsstraßen“, vom Betreiber nicht ermittelt werden konnten. Die Investitionen für die Kalk-Eisen-Konditionierung dürfte aufgrund der Lösstation und größerer Vorrats- und Mischreaktoren über den Investitionskosten der organischen Konditionierung liegen. Bei der Kostenbetrachtung ist jedoch darauf zu achten, daß die Deponieanforderungen bei organischer Konditionierung in bezug auf den geforderten TR-Gehalt = 35% nicht immer und in bezug auf künftige Scherfestigkeiten $\tau_{FS} \geq 20 \text{ kN/m}^2$ i. d. R. nicht eingehalten werden.

Eine andere Darstellung zeigen die reinen Chemikalienkosten, die deutlich zu Gunsten der organischen Konditionierung ausfallen (siehe Tab. 3). Weiter wird deutlich, daß der spezifische Feststoffanfall aufgrund der geringen Polymerzugabemengen und der guten Entwässerbarkeit bei der Polymerdosierung nur 3,1 t Filterkuchen/t Schlammrockensubstanz

Tabelle 2. Zusammenstellung der Kosten für organische und anorganische Konditionierung, Entwässerung in Kammerfilterpressen und anschließende Ablagerung auf Deponie

Untersuchungszeitraum	26.09.88 - 31.03.89	
Kostenart	Kosten [DM]	
	Konditionierung organisch	anorganisch
Polymere	40.480,-	-
FeClSO ₄	-	25.050,-
Brantkalk	-	47.810,-
Wartung/Reinigung	-	3.252,-
Transport/Ablagerung	86.320,-	89.680,-
Summe	126.800,-	165.792,-

Faulschlamm [m ³]	30.560	24.900
spezifische Kosten [DM/m ³ Faulschlamm]	4,15	6,66

zu 4,8 t FK/t STS nach anorganischer Konditionierung beträgt. Hier liegen im Hinblick auf Deponievolumen aber auch bei der Verbrennung die Vorteile der Polymerkonditionierung. Bei der Deponierung mußte aber zur Einstellung ausreichender Flügelscherfestigkeit der organisch konditionierte Kammerfilterpressenschlamm mit Feinkalk (CaO) nachbehandelt werden.

Eine Optimierung der Kosten für die anorganische Konditionierung ist aufgrund der Konditionierungsmechanismen möglich. Während die Zugabe der organischen Flockungsmittel in Abhängigkeit von dem Feststoffgehalt des Klärschlammes erfolgt, ist die Menge der anorganischen Konditionierungsmittel in weitem Bereich nur abhängig von den Schlammengen und unabhängig von der Klärschlamm Trockensubstanz.

Aus Bild 11 wird deutlich, daß durch Voreindickung des Klärschlammes die Kosten bei der anorganischen Konditionierung deutlich gesenkt werden können. Während der Versuche in Koblenz wurde ein Faulschlamm von 2,17 Gew.-% Trockensubstanz konditioniert und entwässert.

Die spezifischen Konditionierungskosten betragen bei der anorganischen Konditionierung 125 DM/t STS. Eine Voreindickung bzw. Nacheindickung und Erhöhung des TS-Gehaltes auf 4,0 Gew.-% hätte die spezifischen Konditionierungsmittelkosten bei der anorganischen Konditionierung auf 73,10 DM gesenkt. Der spezifische Filterkuchenanfall fällt dadurch von 4,8 auf 3,8 t FK/t STS. Bei der organischen Konditionierung bleiben die spezifischen Konditionierungsmittelkosten und des spezifischen Filterkuchenanfalls konstant.

6 Zusammenfassung

Die Klärschlammengen werden in Zukunft weiter steigen, wobei eine landwirtschaftlich bzw. thermische Verwertung aus Akzeptanz- und Kapazitätsgründen derzeit nur in der Lage ist 30–40% des Klärschlamm anfalls zu verwerten.

Kurz- und mittelfristig wird der größte Anteil des maschinell entwässerten Klärschlammes deponiert werden müssen. Hierbei sind Anfangsscherfestigkeiten > 20 kN/m² beim Einbau des Schlammes erforderlich.

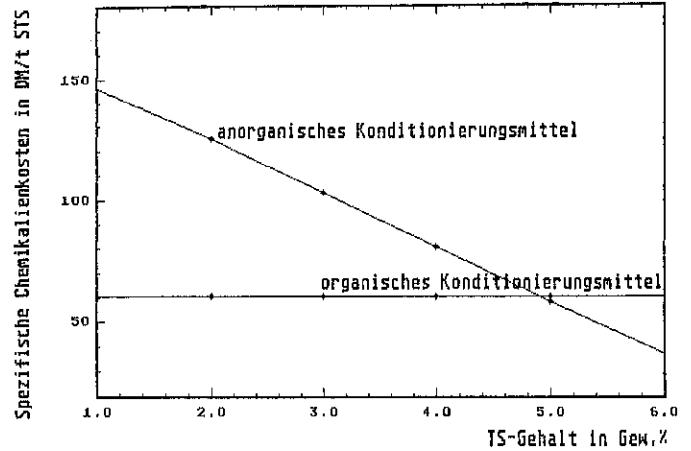


Bild 11. Kostendarstellung der organischen und anorganischen Konditionierung bei versch. TS-Gehalten im Ausgangsschlamm

Betreiber, Planer und die Maschinenbauindustrie müssen ihre Konditionierungs-, Entwässerungs- und Nachbehandlungssysteme den Erfordernissen der Deponie anpassen. Eine genaue Kenntnis über die Wahl der Konditionierungsmittel in der Vor- und Nachbehandlung sowie Grenzen der Entwässerungssysteme gewinnen in Zukunft große Bedeutung.

Literaturnachweis

- [1] Gay, G. C. W. et al.: Standsicherheit für Deponien für Hausmüll und Klärschlamm; Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Bd. 14 des Instituts für Siedlungswasserbau und Wassergütwirtschaft der Universität Stuttgart, 1981
- [2] Otte-Witte, R.: Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften entwässerter Klärschlämme, Dissertation am Lehrstuhl für Wasserwirtschaft und Umwelttechnik II der Ruhr Universität Bochum, 1990
- [3] Die Bestimmung der Deponierfähigkeit von Schlämmen mit der Referenzmethode „Laborflügelscherfestigkeit“, Arbeitsbericht der ATV/VKS Fachausschüsse 3.2 und 3.6 unter Mitwirkung von Gästen, Korrespondenz Abwasser, 36. Jahrgang, Heft 8/89, S. 903 ff.
- [4] Neuschäfer, U.; Döhler, C.: Einbaufähigkeit und Befahrbarkeit von Abwasserschlämmen – Das Taschenpenetrometer zur Eigenüberwachung auf Abwasserreinigungsanlagen und zur Eingangskontrolle auf Deponien, Abwassertechnik (awt), Heft 2/88, S. 12–16
- [5] Collins: Gemeinsame Ablagerung von rohem, entwässertem Klärschlamm mit Müll im Gewichtsverhältnis 1 : 1, Müll und Abfall, Heft 1/1976, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [6] Henke, K. F.: Standsicherheit von Deponien aus Müll und Abfallstoffen, Handbuch Müll und Abfallbeseitigung, 1981
- [7] Komodroms: Beitrag zur Festigkeitsbeurteilung von Abfällen und Schlämmen, Müll und Abfall, Heft 2/1987, S. 46–52, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [8] Rettenberger et al.: Gemeinsame Ablagerung von Hausmüll und Klärschlamm, Handbuch Müll und Abfall, 62 Lfg., IX/B1
- [9] Klärschlamm einbau in Deponien, Arbeitsblatt A 301 (Entwurf vom Mai 1987), erarbeitet vom ATV/VKS-Fachausschuß 3.6 „Deponie fester und flüssiger Abfälle“, GFA, 1987
- [10] Karczewski, K.: Organische und anorganische Flockungsmittel. Beiheft zu Müll und Abfall, Nr. 28, Klärschlamm entsorgung, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1989, S. 27 ff.
- [11] Wolf, P.; Neuschäfer; Schmidt, C. M.: Vergleichende Untersuchungen zur anorganischen bzw. organischen Konditionierung vor maschineller Schlamm-entwässerung mittels Kammerfilterpresse unter Berücksichtigung der Deponierfähigkeit des Schlammes. Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., Forschungsbericht Nr. 1/89, Köln

Tabelle 3. Kostenrechnung Vergleich Konditioniermittelbedarf organische/anorganische Konditionierung

	Konditioniermittel	Preis (DM/kg WS)	spezif. Kond.-Mittel-Bedarf (kg WS/t STS)		spezif. Chemikalienkosten (DM/t STS)		spezif. FK-Anfall (t FK/t ST) - rechnerisch -
			(kg WS/m ³)		(DM/m ³)		
org. Kond.	Sedipur CF 502	10,00635	6,1	0,132	60,83	1,32	3,1
anorg. Kond.	CaO (TS-Gehalt Faulschlamm 2 Gew.-%)	0,17708	498	10,8	88,19	1,92	
	FeClSO ₄	0,37050	124	2,71	37,05	1,00	
				Summe:	125,24	2,92	4,8

WS = Wirksubstanz
 STS = Schlamm Trockensubstanz
 FK = Filterkuchen

- [12] Bever, J.; Peschen, N.; Retzlaff, C.: Mineralogische und chemische Untersuchungen an Klärschlamm-Kalk- und Klärschlamm-Ton-Mischungen. awt – Abwassertechnik, Heft 3, Juni 1989, S. 31–35
- [13] Peschen, N.; Mathes, B.; Schuster, G.; Wolf, P.: Hinweis zur Technik der Nachbehandlung von Klärschlamm mit Feinkalk. Korrespondenz Abwasser, 32. Jahrgang, Heft 12, 1985, S. 1076–1079
- [14] Demberg, W.; Schödlbauer, S.: Untersuchungen zur Verbesserung der Depoliereligenschaften bodenmechanisch mit Kalk stabilisierter Schlämme. Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München, Heft 9, München 1989

- [15] Peschen, N.: Zur Abwasser- und Schlammbehandlung mit Kalk, Abwassertechnik, 36. Jahrgang, Heft 1/2, 1985

Dipl.-Ing. Neuschäfer, Stadt Kassel, Tiefbauamt, Obere Königstr. 8, 3500 Kassel
Dipl.-Ing. N. Peschen, Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V., Postfach 51 05 50, 5000 Köln 51
Dipl.-Ing. C. M. Schmidt, Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, FB 14, Postfach 10 13 80, 3500 Kassel