Internationaler Umweltkongreß
"Der Hafen - eine ökologische Herausforderung"
Hamburg im September 1989

Bodenmechanische Erkenntnisse aus Großversuchen zur maschinellen Klassierung und Verfestigung von Hafenschlick

von

G. von Bloh

Internationaler Umweltkongreß
"Der Hafen - eine ökologische Herausforderung"
Hamburg, 11. bis 15.9.1989

Bodenmechanische Erkenntnisse aus Großversuchen zur maschinellen Klassierung und Verfestigung von Hafenschlick

G. von Bloh
Universität Hannover, FRG

Abstract:
In the Port of Hamburg some two million cubic meters of sludge have to be dredged every year. To reduce the volume of the material, which has to be deposited, the contaminated fraction of fines is separated from the coarse grain. The separation is done in hydraulic fill fields or with industrial processing engineering using sieves, hydrocyclones and so on. To reduce the storage volume fraction of fines is dewatered in special fields by gravity and air drying or with centrifuge, continuous pressure filter and high intensity press. Soil mechanical parameters are determined and used to compare the different separation and dewatering procedures. Test data are presented in diagrams and discussed.

Kurzfassung:
Im Hamburger Hafen werden jährlich rund zwei Millionen Kubikmeter Schlick gebaggert. Zur Reduzierung der abzulagernden Menge wird die kontaminierte Feinfraktion vom Grobkornanteil getrennt. Die Klassierung erfolgt in Spülfeldern oder mit entsprechender Verfahrenstechnik unter Verwendung von Sieben, Hydrozyklonen und Aufstromklassierern. Die weitere Reduzierung des Feinfraktion-volumens wird durch Entwässerung in Trockenfeldern oder mit Zentrifugen, Siebbandpressen und Nachpreßeinrichtungen erreicht. Es wurden Laboruntersuchungen an Bodenproben durchgeführt, deren Ergebnisse zum Vergleich der unterschiedlichen Verfahren herangezogen werden. Die Daten wurden in Diagrammen zusammengestellt und diskutiert.

Einleitung

Durch die Unterhaltungsarbeiten im Hamburger Hafen fallen jährlich rund 2 Millionen m³ Hafenschlick an, die wegen der größtenteils

vorhandenen Kontaminierung abgelagert werden müssen. Die Ablagerung erfolgt in besonderen Lagerstätten. Bei schichtweisem Einbau in hügelförmige Lagerstätten sind besondere Anforderungen an die bodenmechanischen Parameter des einzulagernden Erdstoffs zu stellen. Zur Verringerung der abzulagernden Menge wird das gebaggerte Material bisher in Entmischungsfeldern nach dem Längsstromverfahren klassiert, das heißt, die Grobkornanteile werden von der kontaminierten Feinfraktion getrennt. Anschließend wird die Feinfraktion - im weiteren als längsstromklassiertes Baggergut bezeichnet - in Spülfeldern entwässert und getrocknet (Bild 1). Im stichfesten Zustand bei entsprechend geringem Wassergehalt wird das Material - etwa nach einem Jahr - ausgebaut und abgelagert.

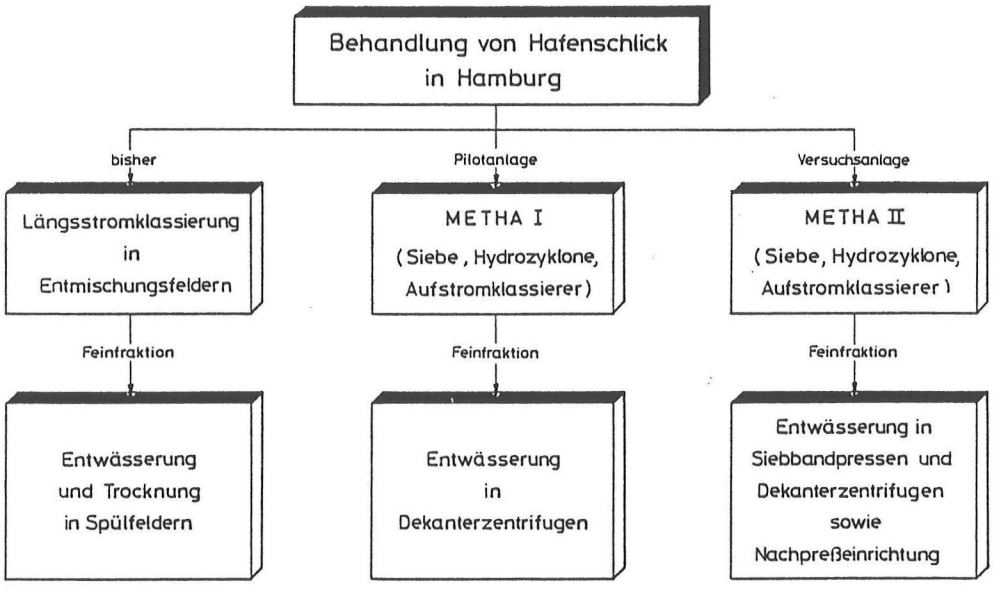

Bild 1 Organigramm zur Behandlung von Hafenschlick in Hamburg

Das Verfahren der Längsstromklassierung ist sehr zeitaufwendig und erfordert große Flächen. Daher wurde in einem Pilotprojekt des Amts für Strom- und Hafenbau die Anlage METHA I (MEchanische Trennung von HAfenschlick) entwickelt. Mit dieser Anlage wurde die Möglichkeit einer maschinellen Trennung der Kornfraktionen mit den Methoden der Verfahrenstechnik untersucht. Dazu werden Siebe, Hydrozyklone und Aufstromklassierer verwendet. Die in den Versuchen mit der Pilotanlage METHA I gewonnenen Erkenntnisse führten zur Errichtung der Großversuchsanlage METHA II (KRÖNING & ROSENSTOCK, 1989).

Bei der Entwicklung maschineller Entwässerungsmethoden für die klassierte Feinfraktion wurde auf Erfahrungen der kommunalen und industriellen Schlammentwässerung zurückgegriffen, um einen Ersatz für die bisherige Entwässerung in Spülfeldern zu erhalten. Die Entwässerung der Feinfraktion aus der Klassierung wurde mit Dekanterzentrifuge und Siebbandpresse vorgenommen und teilweise in einer Nachpreßeinrichtung weitergeführt.

Mit der Technik der Trennung und Entwässerung bei gezieltem Einsatz von Konditionierungsmitteln in der METHA-Anlage besteht die Möglichkeit, maschinell einen Erdstoff mit bestimmten bodenmechanischen Eigenschaften zu erzeugen. Im Versuchsbetrieb der METHA-Anlage wurden Bodenproben der Feinfraktion entnommen und mit den Methoden der Bodenmechanik im Labor untersucht (s. z.B. SCHULTZE & MUHS, 1967). Die aus den Versuchsergebnissen bisher gewonnenen Erkenntnisse über die bodenmechanischen Parameter des METHA-Materials werden dargestellt und mit Daten von längsstromklassiertem Baggergut verglichen.

Korngrößenverteilungen

Die Qualität der Entmischung wird an der Kornverteilung der Feinfraktion deutlich. Bild 2 zeigt die festgestellten Korngrößen-

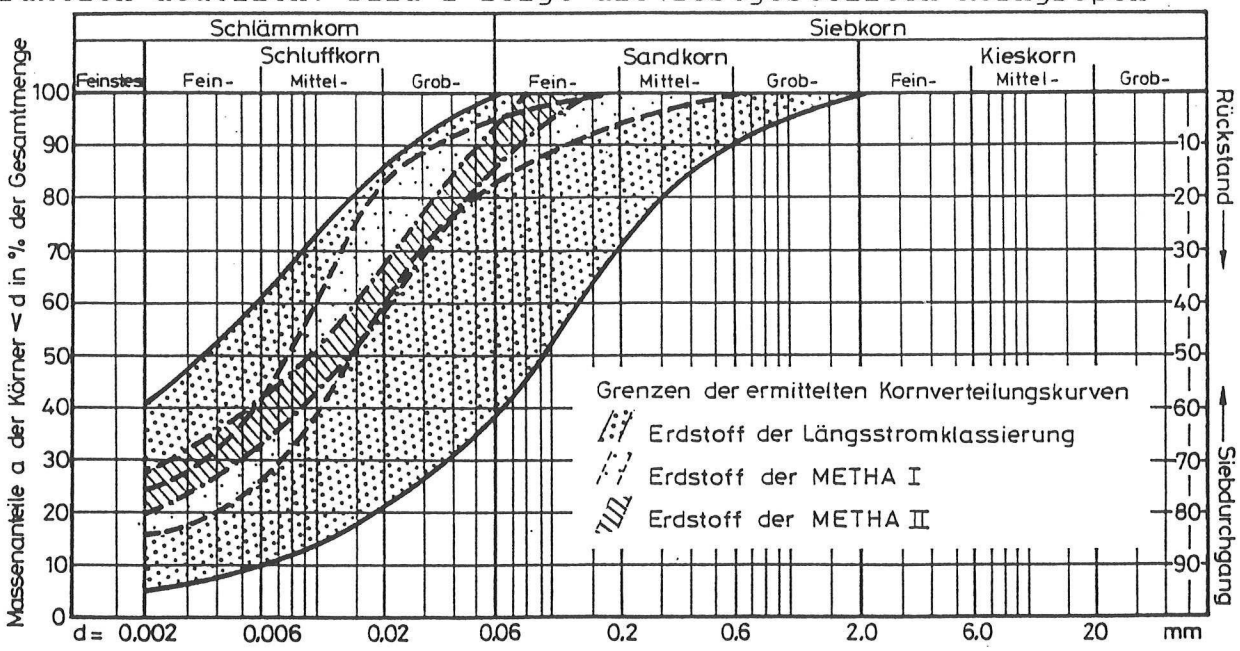

Bild 2 Kornverteilungskurven

verteilungen für Erdstoffe aus dem Längsstromklassierverfahren sowie aus den Anlagen METHA I und II. Der Schlick stammt aus verschiedenen Hafenbecken und ist sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Die Versuchsergebnisse erfassen daher in etwa die mögliche Bandbreite der aus dem Hafenschlick klassierten Feinfraktion.

Der Erdstoff aus der Längsstromklassierung hat Sandanteile bis zu 60 Massenprozent. Das Verfahren wird somit der Vorgabe einer optimalen Sandabtrennung zur Volumenverringerung kaum gerecht. Mit der Pilotanlage METHA I sowie der Versuchsanlage METHA II wird sowohl eine Einengung des möglichen Körnungsbandes der Feinfraktion als auch die Verminderung des Sandanteils auf 17 Massenprozent oder weniger bewirkt. Bodenmechanisch ist das Material somit als toniger Schluff einzustufen.

Wassergehalt und Zustandsform

Zur Zustandsbeschreibung des klassierten Baggerguts und zur Beurteilung des Entwässerungsgrades dient der Wassergehalt in Verbindung mit den Wassergehalten an der Fließ- und Ausrollgrenze (w_L und w_P) des Erdstoffs. Letztere werden als "Atterbergsche Grenzen" bezeichnet und begrenzen den Plastizitätsbereich des Erdstoffs. Beide werden in der Form ermittelt, daß bestimmte Erscheinungsformen des Erdstoffs erzeugt und die zugehörigen Wassergehalte bestimmt werden. Die Konsistenzzahl $I_c = (w_L - w)/(w_L - w_P)$ beschreibt dann die Zustandsform des Erdstoffs.

Im Bild 3 sind Mittelwerte für die verschiedenen Verfahren angegeben. Für die einzelnen Erdstoffe ergeben sich zum Teil sehr unterschiedliche Werte. Jedoch wird die mit den verschiedenen Verfahrenswegen erreichte Zustandsform durch die Mittelwerte zutreffend wiedergegeben.

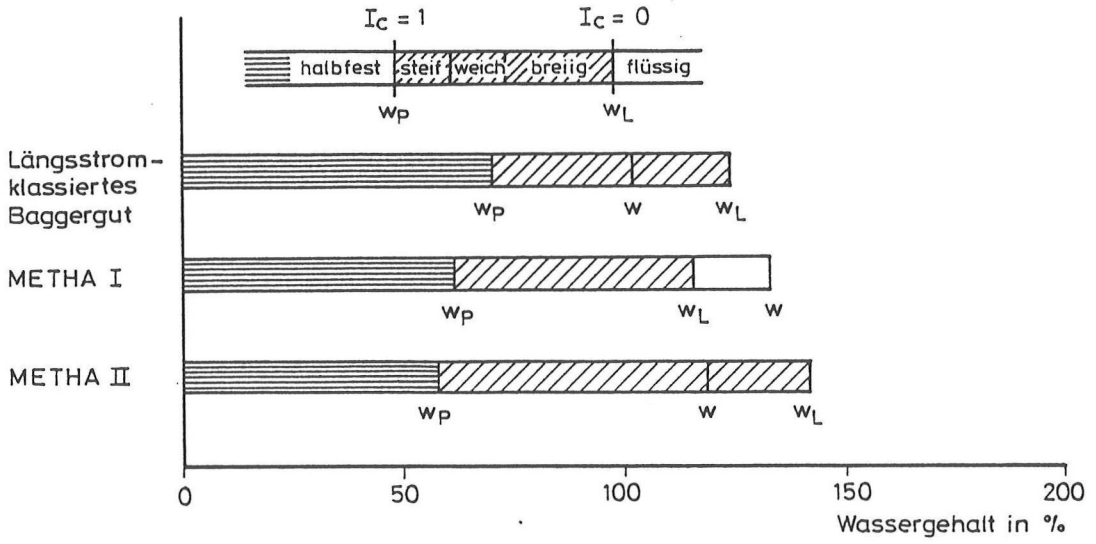

Bild 3 Wassergehalte und Zustandsgrenzen

Das längsstromklassierte Baggergut wird nach entsprechend langer Trocknung im Spülfeld in einer breiigen bis weichen Zustandsform ausgebaut und abgelagert. Das Probenmaterial aus der Pilotanlage METHA I erreichte nach der Entwässerung in einer Dekanterzentrifuge nur eine flüssige Zustandsform, was vor der Ablagerung eine weitergehende Trocknung erfordert. METHA II ermöglicht jetzt mit Dekanterzentrifuge oder Siebbandpresse eine Entwässerung bis zur breiigen Zustandsform. Im Fall einer weitergehenden Entwässerung mit der Nachpreßeinrichtung wird eine weiche Zustandsform erreicht, die für eine schichtweise Einlagerung in hügelförmige Lagerstätten anzustreben ist.

Die Plastizitätszahl $I_P = (w_L - w_P)$ kennzeichnet die Plastizität eines Erdstoffs wieder, wobei ein großer Wert auf einen sehr bildsamen Erdstoff hinweist. Die Plastizitätszahl gilt als Maß für die Veränderung der Zustandsform bei etwaigem Wasserzutritt. Die Ergebnisse zeigen bei den drei Verfahren jeweils eine ausgeprägte Plastizität der Feinfraktion, wobei die Proben aus der Anlage METHA II die größten Werte aufweisen.

Ein weiterer Einflußfaktor auf die Bodenparameter ist der Anteil organischer Substanz. Die organischen Bestandteile binden ähnlich wie Tonteilchen relativ viel Wasser. Somit hat die organische Substanz einen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften, der jedoch

nicht beständig ist, da es durch biochemische Prozesse zu Veränderungen kommen kann. Bei den untersuchten Proben aller drei Verfahrenswege wurden Glühverluste bis zu 25 Massenprozent und Gehalte an organischen Bestandteilen bis zu 19 Massenprozent ermittelt.

Wasserdurchlässigkeit

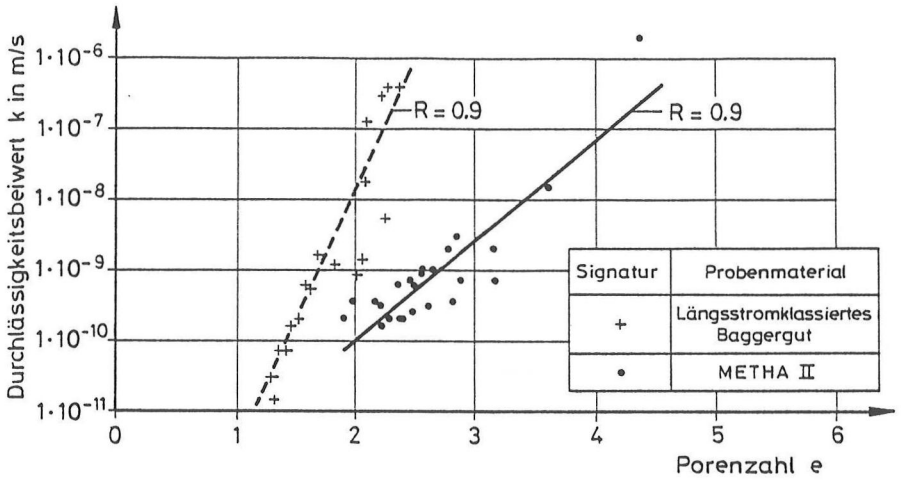

Bild 4 Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von der Porenzahl

Die Feinfraktion eignet sich zur Herstellung mineralischer Dichtungen. Daher wurden zur Beurteilung der Durchströmung Laborversuche zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts durchgeführt. Bild 4 gibt den Zusammenhang zwischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, bestimmt in einem Kompressionsdurchlässigkeitsgerät mit 14 cm Durchmesser, und der Porenzahl für ein hydraulisches Gefälle i = 10 wieder. Größere hydraulische Gradienten sind für Hafenschlicklagerstätten kaum relevant. Nach LAMBE & WHITMAN (1969) sowie BLÜMEL & TAMMINGA (1987) besteht ein linearer Zusammenhang zwischen e und log k für die untersuchten Proben. Der Korrelationskoeffizient R liegt bei rd. 0,9. Bei dem längsstromklassierten Baggergut verringert sich der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert um eine Zehnerpotenz bei Abnahme der Porenzahl um 0,3. Bei METHA II - Material ist hierfür eine Abnahme der Porenzahl um 0,7 erforderlich. Andererseits bedeuted dies für METHA II-Material eine geringe Durchlässigkeit bei relativ offener Struktur. Die Ursache hierfür dürfte im Feinkornanteil und den damit verbundenen unterschiedlich dicken Adsorptioswasserhüllen liegen, wodurch der Querschnitt des durchströmbaren Porenraums

verändert wird. Bei einer statischen Auflast von 20 kN/m² werden bereits Durchlässigkeiten von $1*10^{-9}$ m/s und kleiner festgestellt.

Scherfestigkeiten

Zur Bestimmung der Scherparameter im konsolidierten Zustand wurden vorwiegend direkte Scherversuche durchgeführt. Bild 5 zeigt Ergebnisse dieser Scherversuche mit längsstromklassiertem Baggergut und METHA II-Material. Die Unterschiede in den Scherparametern resultieren aus den Unterschieden in den Korngrößenverteilungen der Erdstoffe. Die Homogenisierung der Erdstoffe bezüglich ihrer Korngrößenverteilung durch die Anlage METHA II führt zur Reduktion der Streubreite der Scherparameter. Aus theoretischen Überlegungen ist für den normalkonsolidierten Boden keine wirksame Kohäsion für die Belastung σ = 0 kN/m² zu erwarten. Der innere Reibungswinkel von 32° bis 34° für METHA II-Material entspricht den Daten, die für aufbereiteten Klei gleicher Korngrößenverteilung festgestellt wurde (QUAST, 1977).

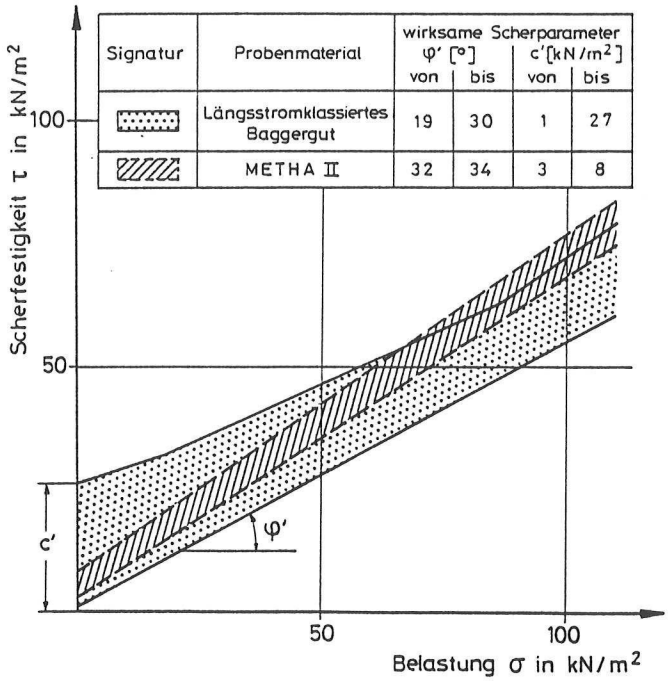

Bild 5 Ergebnisse der direkten Scherversuche

Die wirksamen Scherparameter dienen der Beurteilung der Standsicherheit der Lagerstätte im Endzustand, sind also für den Bau der Lagerstätte erst in zweiter Linie relevant. Für die Anfangsstandsicherheit ist die undränierte Scherfestigkeit maßgebend.

Zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit breiiger und weicher bindiger Erdstoffe wird vorzugsweise die Flügelsonde eingesetzt. Die beim Flügelscherversuch im Labor oder im Feld gemessenen Flügelscherwiderstände sind ein Maß für die undränierte Scherfestigkeit. Die Ergebnisse sind im Bild 6a in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen. Näherungsweise ergibt sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen den Flügelscherwiderständen und den zugehörigen Wassergehalten (vgl. GUDEHUS, 1981).

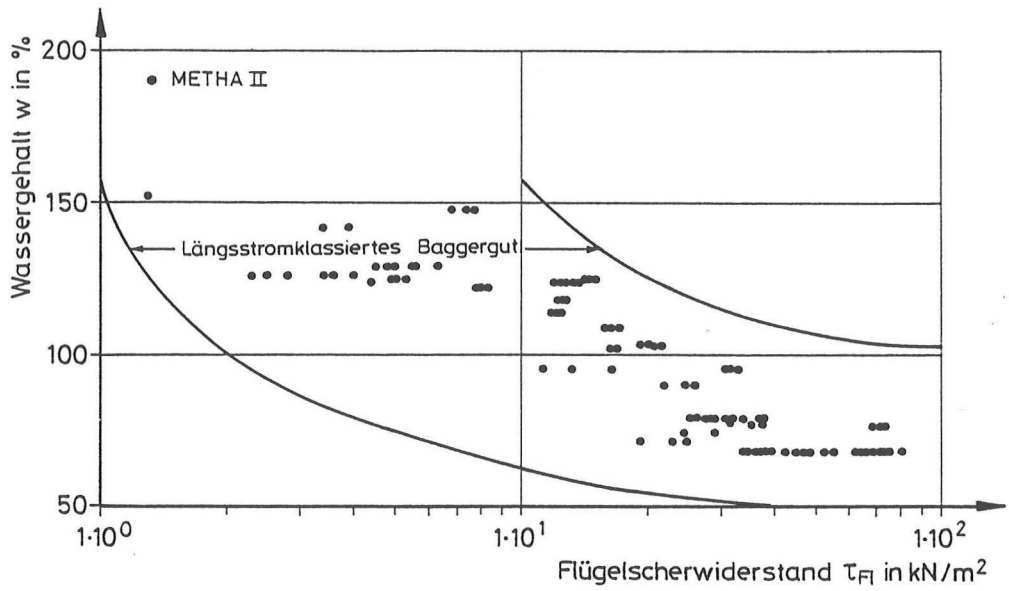

Bild 6a Ergebnisse der Flügelversuche in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Für das Material der Längsstromklassierung ist wegen der großen Streuung der Einzelwerte nur der Bereich der ermittelten Flügelscherwiderstände dargestellt. Die Ursache für die großen Unterschiede bei den Flügelscherwiderständen bei gleichen Wassergehalten liegt in der großen Breite der Kornzusammensetzung (Bild 2) und in den demzufolge entsprechend variierenden Wassergehalten an der Fließ- und Ausrollgrenze. Bei den Ergebnissen für das Material der METHA II ist die Bandbreite etwas kleiner, jedoch ist eine eindeutige Zuordnung von Wassergehalt und Scherfestigkeit nicht möglich.

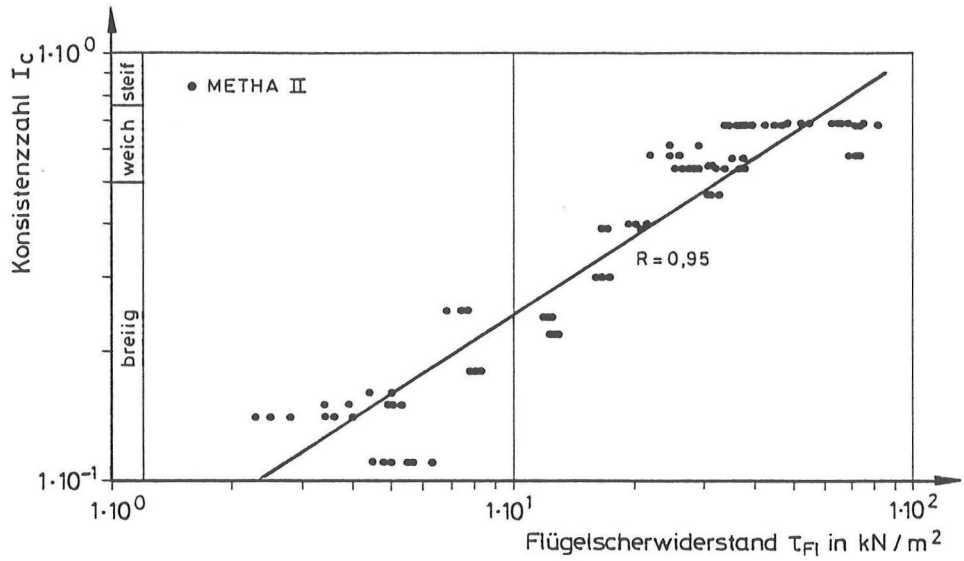

Bild 6b Ergebnisse der Flügelversuche in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl

Bild 6b zeigt die Werte für METHA II-Material in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl. Die beste Korrelation (Korrelationskoeffizient R = 0,95) wurde für eine doppeltlogarithmische Darstellung ermittelt. Wenn die Feinfraktion bis zum Erreichen der weichen Zustandsform entwässert wird, ergeben sich Flügelscherwiderstände von mindestens 20 kN/m². Für baupraktische Zwecke sind allerdings reduzierte Werte unter Verwendung von Abminderungsfaktoren für die Viskosität anzusetzen (GUDEHUS, 1981).

Ergebnisse

Aus den bisher gewonnenen bodenmechanischen Erkenntnissen aus Großversuchen zur maschinellen Klassierung und Verfestigung von Hafenschlick in der Anlage METHA II kann folgendes festgestellt werden:

- Die Klassierung des Hafenschlicks hat sich gegenüber dem Verfahren der Längsstromklassierung deutlich verbessert.
- Durch den Einsatz von Nachpreßeinrichtungen ist eine Entwässerung der Feinfraktion bis zur weichen Zustandsform möglich.
- Die geringen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der Feinfraktion bei kleinen Auflasten ermöglichen den Einsatz als mineralischen Dichtungsstoff.

- Es werden für die Feinfraktion undränierte Scherfestigkeiten erreicht, die einen direkten Einbau in hügelförmige Lagerstätten erwarten lassen.

Schrifttum

BLÜMEL, W. & TAMMINGA, P.-G. (1987) Water permeability of dredged mud, Proc. of the 9.ECSMFE, Dublin

GUDEHUS, G. (1981) Bodenmechanik; F. Enke Verlag, Stuttgart.

KRÖNING, H. & ROSENSTOCK, F. (1989) Trennen und Entwässern von kontaminiertem Baggergut mit der Betriebsanlage METHA II - Betriebserfahrungen und Verfahrensoptimierungen -; Int. Umweltkongreß "Der Hafen - eine ökologische Herausforderung", Hamburg.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. (1969) Soil Mechanics; J.Wiley&Sons Inc., New York.

QUAST, P. (1977) Ein Beitrag zum Kriechverhalten eines norddeutschen Kleis; Mitteilungen des Lehrstuhls für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 13.

SCHULTZE, E. & MUHS, H. (1967) Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten; Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.