

## Abteilung II — Seeschifffahrt

### Thema 2

#### Neue Fortschritte beim Entwurf und Betrieb der Baggergeräte, insbesondere für das Saugbaggern bei großer Tiefe

von

o. Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Hensen, Technische Universität Hannover, Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau; Dr. Helmut Kobus, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin, Dr.-Ing. Helmut Salzmänn, Technische Universität Hannover, Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau

#### Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschäftigt sich mit Fragen der Saugbarkeit von Sandböden.

Im ersten Teil (Untersuchungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin) werden Untersuchungen mit Schleppsaugköpfen beschrieben, bei denen zusätzlich zur Einlaufströmung auch noch die Schleppkraft als mechanische Lösehilfe wirksam ist. Es werden California-Schleppsaugköpfe bei dichtgelagerten Feinsandböden untersucht; es wird festgestellt, daß zwar der Einfluß der Saugfläche überwiegt, daß aber bei gleicher Saugfläche Formen mit kleinen Seitenverhältnissen günstiger sind. Weiterhin werden Angaben über die Druckhöhenverluste bei verschiedenen Gemischen gemacht; alle Ergebnisse sind durch ein umfangreiches Versuchsmaterial belegt.

Der zweite Teil (Untersuchungen des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover) enthält Untersuchungen über Druckverluste und die zugehörigen Gemischleistungen bei verschiedenen Saugköpfen von Grundsaugern, bei denen allein die Einlaufströmung das Lösen des Bodens vornimmt. Es wird gezeigt, daß die Saugbarkeit eines Bodens stark abnimmt, wenn dessen spezifische Oberfläche zunimmt; die Bodenförderung nimmt weiterhin zu, wenn die Furchentiefe zunimmt; nur bei Furchentiefen, die größer als der etwa 10fache Saugrohrdurchmesser werden, tritt keine nennenswerte Zunahme mehr ein. Der Einfluß der Saugkopfform zeigt sich darin, daß Saugköpfe, die einen geringen Einlaufverlust bei der Reinwasserförderung haben, auch für die Gemischförderung günstig sind. Es wird ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Einlaufverlustes bei Gemischförderung angegeben.

#### Inhalt:

Seite

#### Hydraulische und bodentechnische Fragen beim Grundsaugern

1. Untersuchungen an California-Schleppsaugköpfen auf festgepacktem Feinsandböden .....	201
1.1 Dimensionsanalyse .....	201
1.2 Modellversuche .....	203
1.3 Schlußfolgerungen .....	207

2. Untersuchung über die Einlaufverluste von Grundsaugerköpfen .....	208
2.1 Allgemeines .....	208
2.2 Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration .....	209
2.3 Abhängigkeit von den Bodenkennwerten (Faktor $\beta_1$ ) .....	209
2.4 Abhängigkeit von der Furchentiefe (Faktor $\beta_2$ ) .....	210
2.5 Abhängigkeit von der Einlauform (Faktor $\beta_3$ ) .....	211
2.6 Berechnungsverfahren .....	212

### 1. Untersuchungen an California-Schleppsaugköpfen auf festgepacktem Feinsandboden

Im Zuge der Entwicklung des Seeschiffverkehrs zu immer größeren Einheiten und Tiefgängen gewinnen Hopperbagger wegen ihrer Seefähigkeit, Beweglichkeit und Wirtschaftlichkeit auch beim Einsatz weit vor der Küste in zunehmendem Maß Bedeutung. Eine der gebräuchlichsten Kopftypen auf Hopperbaggern ist der sogenannte California-Schleppsaugkopf, der im Gegensatz zum ausschließlich von hinten saugenden „Berliner Kopf“ [1] hauptsächlich von der Seite saugt. California-Köpfe arbeiten zwar auf Sandböden im allgemeinen gut, zeigen jedoch auf festgepackten Feinsandböden nur einen unbefriedigenden Wirkungsgrad. Die Frage liegt daher nahe, ob die heutzutage eingesetzten California-Köpfe in baggertechnischer Hinsicht eine optimale Form und Größe besitzen oder ob sich noch Verbesserungen erzielen lassen. Zu diesem Problem wurden in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin systematische Modellversuche unternommen.

Die Feststoffförderung eines Schleppsaugkopfes ist einerseits durch die von Pumpengröße und Fördersystem abhängige maximale hydraulische Leistung, andererseits durch das größte am Kopf nutzbare Druckgefälle begrenzt, das von Pumpe, Saugrohr und Baggertiefe abhängt. Während jedoch die Beschränkung der Leistung durch entsprechende Auslegung von Pumpe und Fördersystem verändert werden kann, stößt das umsetzbare Druckgefälle mit dem Vakuum an eine absolute Grenze, die bei größeren Baggertiefen den verfügbaren Spielraum zunehmend einengt. Entsprechend bildet das verfügbare Druckgefälle häufig ein wichtigeres Kriterium für die Auslegung von Saugköpfen als die Leistung.

In der vorliegenden Untersuchung werden die hydraulischen Eigenschaften von Saugköpfen als Funktionen des verfügbaren Druckgefälles betrachtet, um dann die verschiedenen Köpfe bei jeweils gleichem Druckunterschied einander gegenüberstellen zu können. Das Hauptaugenmerk ist dabei auf die Bedeutung von Größe und Form der Saugfläche für die Feststoffförderung, die Gemischförderung und den Zugkraftbedarf bei gegebener Druckdifferenz gerichtet.

#### 1.1 Dimensionsanalyse

Betrachtet man einen Schleppsaugkopf unter Ausschluß des restlichen Baggersystems (Bild 1), dann läßt sich sein Verhalten beurteilen aus den abhängigen Größen Feststoffmenge pro Zeiteinheit  $G_F$ , Gemischmenge pro Zeit  $G_G$ , Zugkraftbedarf  $Z$  und, bei unabhängiger Druckdifferenz, Leistung  $N$  (oder bei vorgegebener Leistung wirksames Druckgefälle  $\Delta p$ ). Diese Größen sind Funktionen der unabhängigen Variablen:

Kopf: gekennzeichnet durch Breite  $B$  und Länge  $L$  der Saugfläche, Sohlenbreite  $SB$ , Kopfgewicht  $G$ , (Kopfform, Anzahl und Form von Sohlkerben).

Baggersystem: Saugrohrdurchmesser  $d$ , Druckdifferenz  $\Delta p$  am Kopf, Baggertiefe  $H$ , Fahrtgeschwindigkeit  $V_F$ , (Strömungsgeschwindigkeit).

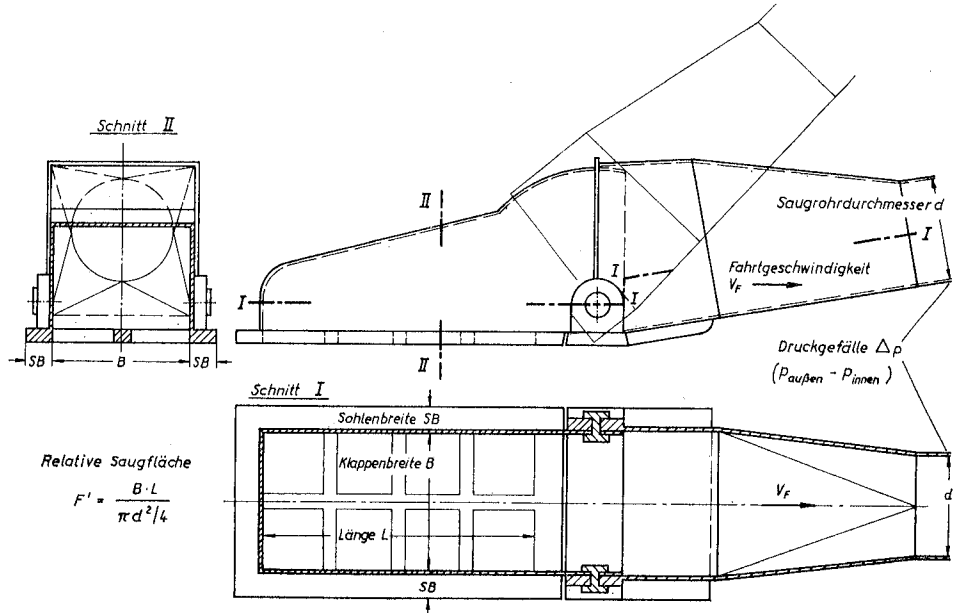


Bild 1  
Modell eines California-Schleppsaugkopfes mit einer Saugklappe

Boden: spezifisches Gewicht  $\gamma_s$ , mittlerer Korndurchmesser  $d_k$ , Verdichtung  $\sigma$ , (Kornverteilung und -form, Kohäsion, Bodenform).

Wasser: spezifisches Gewicht  $\gamma_w$ , Zähigkeit  $\nu$ , Erdanziehung  $g$ .

Bildet man hieraus (unter Beschränkung auf geometrisch ähnliche Kopfformen ohne Sohlkerben auf ebenen Sandböden in ruhendem Wasser) nach dem  $\pi$ -Theorem dimensionslose Parameter mit  $d$ ,  $\gamma_w$  und  $V_F$  als Bezugsgrößen, dann ergibt sich nach einigen Umgruppierungen

$$\begin{pmatrix} G'_F \\ G'_G \\ Z' \end{pmatrix} = f \left[ \left( \frac{B \cdot L}{\pi d^2/4} ; \frac{B}{L} ; \frac{SB}{d} ; \frac{G}{\gamma_w d^3} \right) ; \frac{\Delta p}{\gamma_w d} ; \frac{H}{d} ; \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} ; \frac{d_k}{d} ; \sigma \right) ; \frac{d \sqrt{gd}}{\nu} ; \frac{V_F}{\sqrt{gd}} \right] \quad (1)$$

mit

$$G'_F = \frac{G_F}{(\pi d^2/4) \cdot \gamma_w \cdot \sqrt{2g \Delta p / \gamma_w}}$$

(Verhältnis von tatsächlicher Feststoffmenge zur Wassermenge bei verlustfreier Strömung)

$$G'_G = \frac{G_G}{(\pi d^2/4) \cdot \gamma_G \cdot \sqrt{2g \Delta p / \gamma_G}}$$

(Verhältnis von tatsächlicher Gemischmenge zur Gemischmenge bei verlustfreier Strömung)

$$Z' = \frac{Z}{\gamma_w d^3}$$

Hält man die Wassertiefe immer so groß, daß die freie Oberfläche die Zuströmung zum Kopf nicht beeinflussen kann, dann bleibt der Parameter  $H/d$  ohne Bedeutung.

Beschränkt man sich ferner auf eine bestimmte Sandart (mit Korndurchmessern sehr viel kleiner als die Kopfabmessungen) stets gleicher Verdichtung und berücksichtigt, daß der Kopfgewicht-Parameter, wie sich in einer Überschlagrechnung nachweisen läßt, praktisch keinen Einfluß auf die Strömungsvorgänge hat, dann reduziert sich die Beziehung (1) mit  $F' = B \cdot L / (\pi d^2/4)$  auf

$$\begin{pmatrix} G'_F \\ G'_G \\ Z' \end{pmatrix} = f \left[ (F'; B/L; SB/d); \Delta p / (\gamma_w d); d^{3/2} \sqrt{g/\nu}; V_F / \sqrt{gd} \right] \quad (2)$$

Auf vorgegebenem Boden hängt das Verhalten eines Saugkopfes demnach außer von der Kopfgeometrie vom wirksamen Druckgefälle, den Abmessungen des Saugrohres und der Fahrtgeschwindigkeit ab.

1.2 Modellversuche

In einer 1 m breiten und 14 m langen Versuchsrinne wurden Modellköpfe von einem Schleppwagen mit Pumpe (Saugrohrdurchmesser  $d = 6$  cm, bei den Maßstabsversuchen auch 4.2 und 2.8 cm) mit Fahrtgeschwindigkeiten von 20 bis 40 cm/s über einen durch Rütteln maximal verdichteten Feinsandboden (mittlerer Korndurchmesser 0,1 mm) geschleppt, wobei das Baggergemisch während der Meßfahrt in einen Auffangbehälter gefördert wurde. An jedem Saugkopf wurde bei verschiedenen Pumpenleistungen der Unterdruck im Saugrohr, die Feststoffmenge und die Gemischmenge pro Zeiteinheit und der Zugkraftbedarf gemessen. In Bild 2 sind für ein Beispiel sowohl die absoluten Meßwerte über der Saughöhe aufgetragen als auch die dimensionslosen Beiwerte  $G'_F$ ,  $G'_G$  und  $Z'$  als Funktion der relativen Saughöhe  $\Delta p / (\gamma_w d)$ .

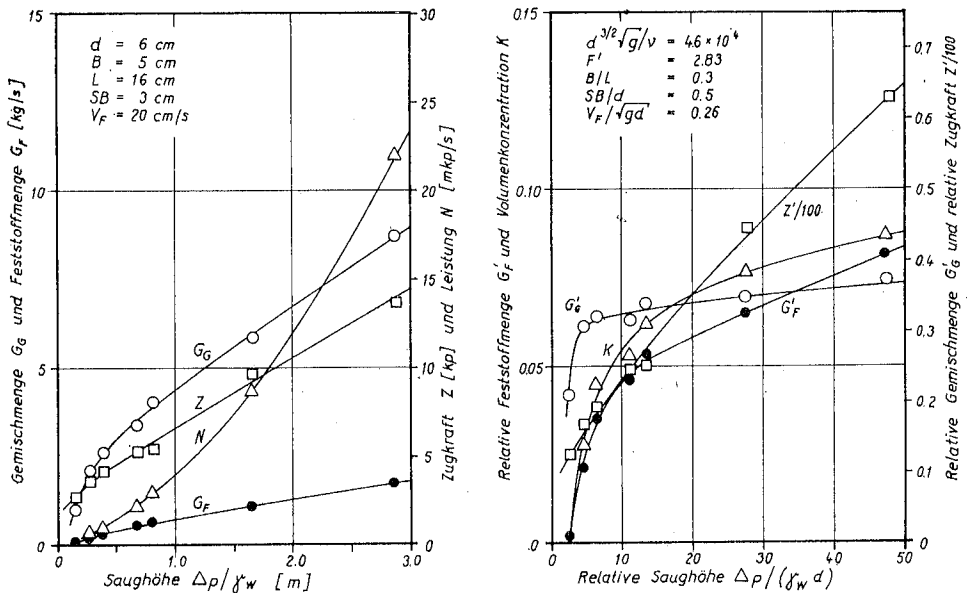


Bild 2  
Absolute Meßgrößen und dimensionslose Beiwerte eines Saugkopfes

Um die Untersuchung darauf zu konzentrieren, die Bedeutung von Saugfläche  $F'$  und Seitenverhältnis  $B/L$  für das Verhalten des Kopfes zu klären, wurden die Versuche zunächst auf einen konstanten Saugrohrdurchmesser ( $d = 6$  cm), eine Sohlenbreite ( $SB = 3$  cm) und eine Fahrtgeschwindigkeit ( $V_F = 20$  cm/s) beschränkt, womit sich die Beziehung (2) vereinfacht zu

$$\begin{pmatrix} G'_F \\ G'_G \\ Z' \end{pmatrix} = f \left[ F'; B/L; \Delta p / (\gamma_w d) \right] \text{ bei } \begin{cases} SB/d = 0.5 \\ d^{3/2} \sqrt{g/\nu} = 4.6 \times 10^4 \\ V_F / \sqrt{gd} = 0.26 \end{cases} \quad (3)$$

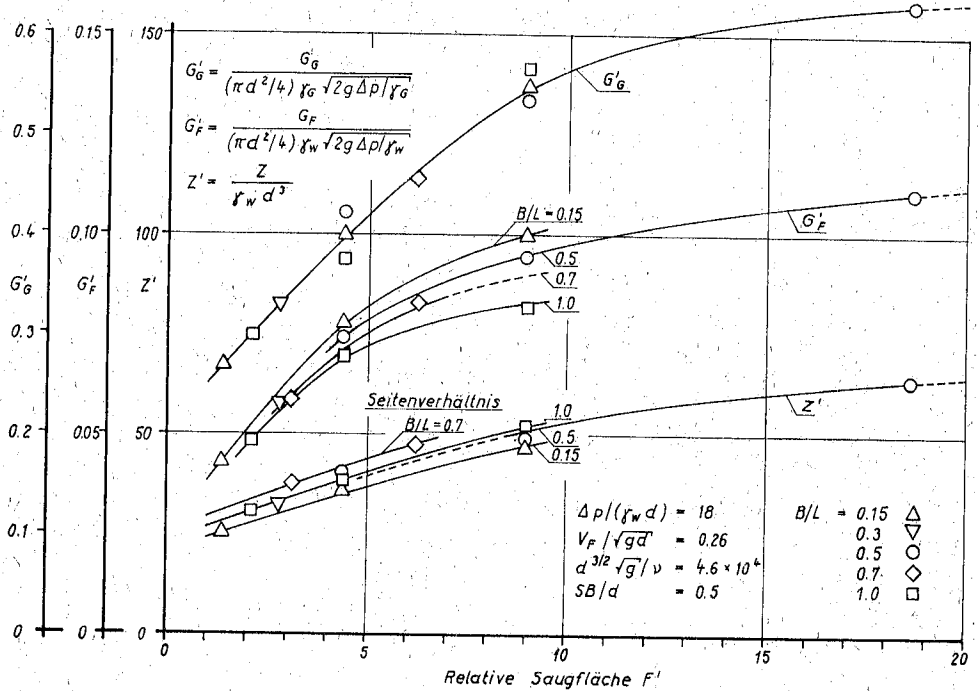


Bild 3  
 Beiwerte für Gemischmenge, Feststoffmenge und Zugkraft bei  $\Delta p / (\gamma_w d) = 18$

Für Saugköpfe verschiedener Kombinationen von  $F'$  und  $B/L$  wurden nun wie in Bild 2 die Parameter  $G'_F$ ,  $G'_G$  und  $Z'$  über  $\Delta p / (\gamma_w d)$  aufgetragen. Die bei jeweils einem konstanten Wert von  $\Delta p / (\gamma_w d)$  abgelesenen Größen sind in den Bildern 3 und 4 als Funktionen der Saugfläche  $F'$  dargestellt. Aus beiden Diagrammen wird übereinstimmend deutlich, daß bei vorgegebener relativer Saughöhe die Parameter  $G'_F$ ,  $G'_G$  und  $Z'$  in erster Linie von der Saugfläche  $F'$  abhängen und der Einfluß des Seitenverhältnisses  $B/L$  vergleichsweise geringfügig ist. Die relative Gemischmenge  $G'_G$  erscheint von  $B/L$  fast unabhängig, hingegen zeigt die Feststoffmenge  $G'_F$  einen leichten Anstieg mit abnehmendem  $B/L$ . Auch im Zugkraftbedarf  $Z'$  ist eine Änderung mit dem Seitenverhältnis zu erkennen.

Die aus den Diagrammen 3 und 4 ermittelten Feststoffmengen pro Zeiteinheit sind in Bild 5 über der entsprechenden hydraulischen Leistung aufgetragen. Die ebenfalls eingetragenen Linien gleicher Saugfläche  $F'$  ergeben sich aus der Definition der hydrau-

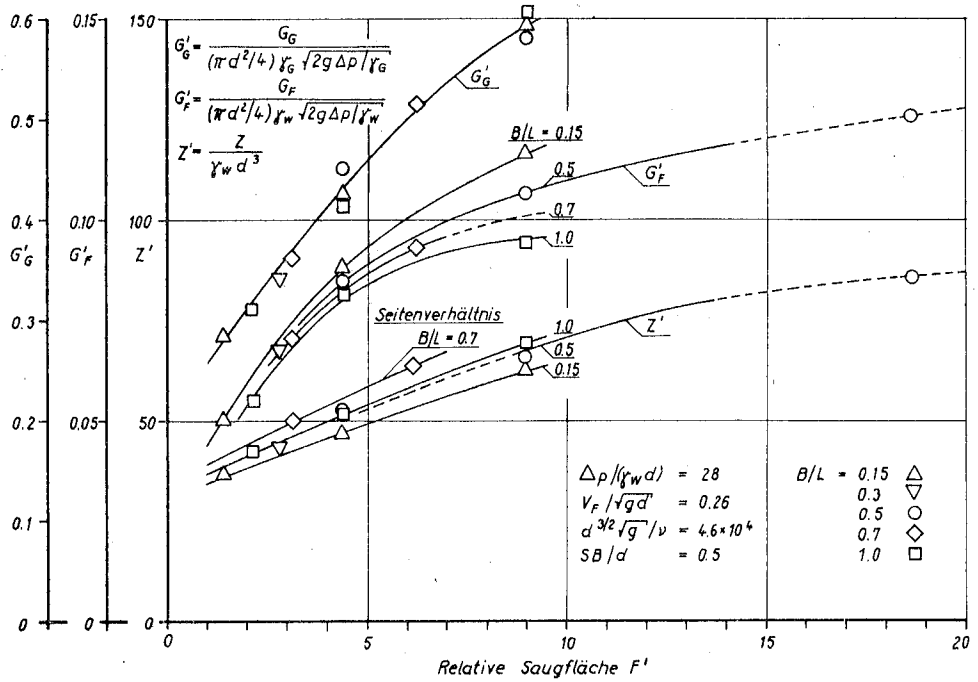


Bild 4  
 Beiwerte für Gemischmenge, Feststoffmenge und Zugkraft bei  $\Delta p / (\gamma_w d) = 28$

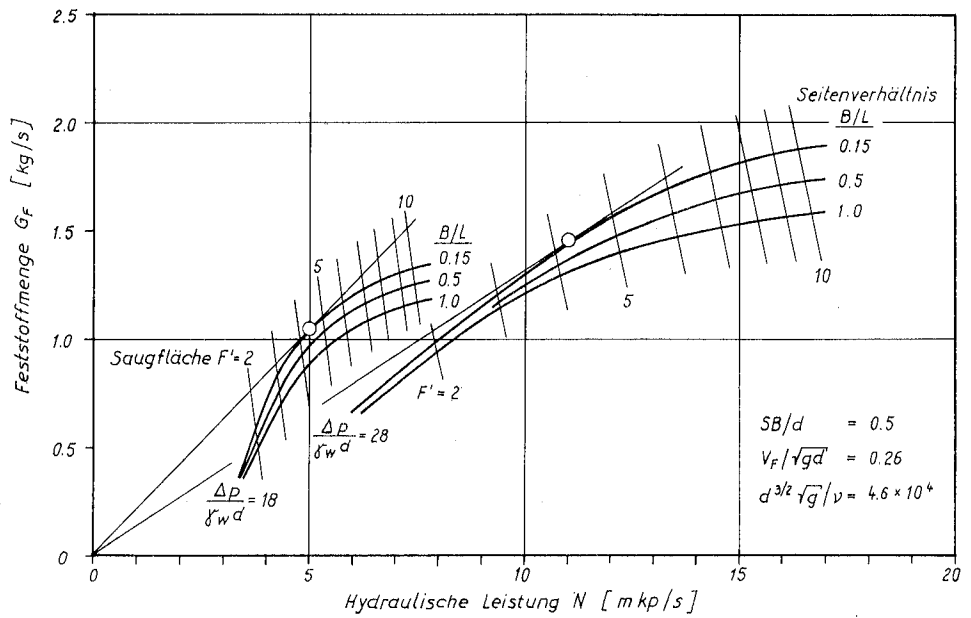


Bild 5  
 Feststoffmenge und Leistung bei konstanter relativer Saughöhe

lichen Leistung als Produkt der (bei gegebenem Unterdruck nur von  $F'$  abhängigen) Gemischmenge  $G_G$  und der Gemischförderhöhe  $\Delta p/\gamma_G$ . Aus dieser Auftragung ist ersichtlich, daß bei gleichem Unterdruck und gleicher Leistung kleine Seitenverhältnisse mehr Feststoff liefern als große. Mit der Saugfläche steigen sowohl Leistungsbedarf als auch Feststoffmenge. Der beste Wirkungsgrad, nämlich die größte Feststoffmenge pro Leistungseinheit, wird bei beiden Druckunterschieden mit einer relativen Saugfläche von 4 bis 5 erreicht.

Die Aussagen der Diagramme 3, 4 und 5 haben nur für die konstant gehaltenen Werte der Parameter  $SB/d$ ,  $d^{3/2}\sqrt{g}/\nu$  und  $V_F/\sqrt{gd}$  unbeschränkte Gültigkeit. Streng genommen müßte nun eine entsprechende Behandlung für andere Werte dieser Parameter folgen, was jedoch mit großem Versuchsaufwand verbunden wäre. Deshalb wurde zunächst lediglich die Bedeutung der bisher konstant gehaltenen Parameter in einigen Versuchsreihen abgeschätzt, bei denen jeweils eine dieser Größen unter Konstanthaltung aller anderen variiert wurde. Die dabei erhaltenen Meßwerte relativ zu den Ausgangsgrößen der Beziehung (3) bei konstanter relativer Saughöhe zeigt Bild 6.

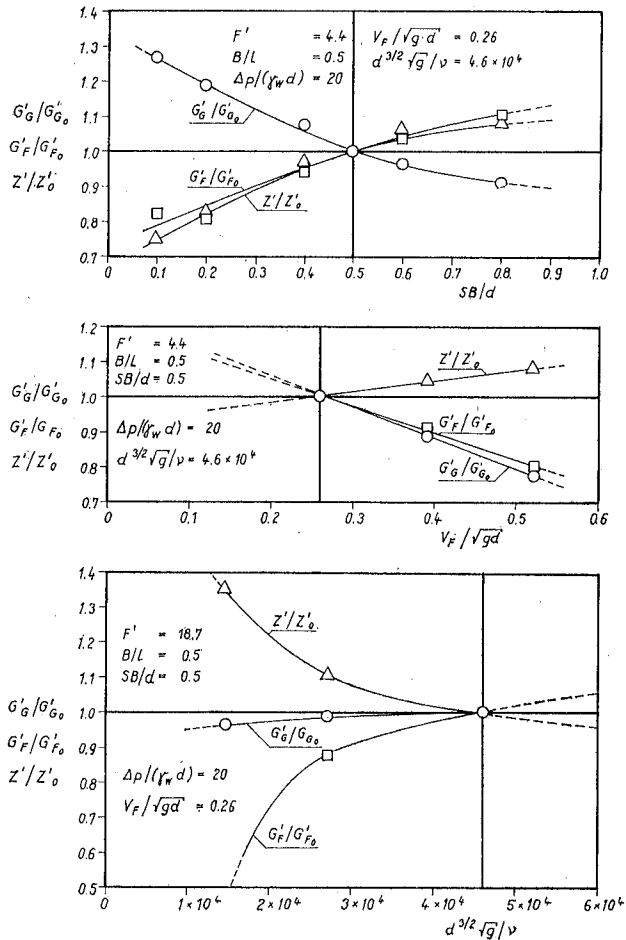


Bild 6  
Relativer Einfluß von Sohlenbreite, Fahrtgeschwindigkeit und Saugrohrdurchmesser

Erwartungsgemäß nimmt für kleinere Sohlenbreiten ( $SB/d$ ) die Gemischmenge pro Zeiteinheit zu und Feststoffmenge und Zugkraftbedarf ab. Steigende Fahrtgeschwindigkeit ( $V_F/\sqrt{gd}$ ) führt zu niedrigeren Feststoff- und Gemischmengen und zu etwas höherem Zugkraftbedarf. Der Parameter  $d\sqrt{gd}/\nu$ , eine Art Reynolds'scher Zahl, muß ähnlich wie diese mit wachsendem Rohrdurchmesser  $d$  einem Grenzwert zustreben, oberhalb dessen er keinen Einfluß mehr auf die Strömungsvorgänge hat. Tatsächlich zeigen sich für den Gemischbeiwert  $G'_G$  im untersuchten Bereich nur noch geringfügige Änderungen, wohingegen der Zugkraftbeiwert  $Z'$  und die dimensionslose Feststoffmenge  $G'_F$  besonders für den kleinsten Rohrdurchmesser drastische Abweichungen zeigen. Dies erklärt sich vermutlich aus der Tatsache, daß die verglichene absolute Druckdifferenz proportional zu  $d$  kleiner wird und daher bei dem kleinsten Durchmesser nur noch so geringe Strömungsgeschwindigkeiten produziert, daß sich der Feststofftransport noch nicht voll ausbilden kann und daher anderen Gesetzmäßigkeiten unterliegt. Immerhin lassen die Versuchsergebnisse vermuten, daß für höhere Werte von  $d\sqrt{gd}/\nu$  — also beim Übergang zur Großausführung — keine krassen Veränderungen der Beiwerte mehr zu erwarten sind.

### 1.3 Schlußfolgerungen

Beim Saugbaggern in großen Tiefen bleibt, bedingt durch das Erreichen des Vakuums an der Saugseite der Baggerpumpe, meist nur ein kleiner Spielraum für das am Saugkopf selbst zur Verfügung stehende Druckgefälle. Deshalb bildet häufig nicht die verfügbare Förderleistung, sondern das nutzbare Druckgefälle am Kopf das Kriterium für die Dimensionierung von Saugköpfen.

Modellversuche an California-Schleppsaugköpfen auf einem stark verdichteten Feinsandboden, die in erster Linie die Bedeutung von Saugflächen und Seitenverhältnis für das Verhalten des Kopfes klären sollten, zeigten für jeden Saugkopf mit steigender Druckdifferenz eine Zunahme von Feststoffmenge und Gemischmenge pro Zeiteinheit und damit auch Leistung und Zugkraftbedarf (Bild 2). Die Feststoffförderung setzt erst bei einer gewissen Mindestdruckdifferenz ein.

Der anhand der Versuchsergebnisse vorgenommene Vergleich der verschiedenen Saugköpfe bei vorgegebenem Druckgefälle zeigt:

Mit der Saugfläche nehmen sowohl Feststoffmenge als auch Gemischmenge pro Zeit und Zugkraftbedarf stark zu. Für den betrachteten Fall liefern relative Saugflächen zwischen 4 und 5 die größte Feststoffmenge pro Leistungseinheit und damit den besten Wirkungsgrad.

Mit kleinen Seitenverhältnissen wird bei gegebener Leistung mehr Feststoff gefördert als mit großen. Die Zugkraft steigt mit wachsendem Seitenverhältnis bis zu  $B/L = 0.7$ ; quadratische Köpfe liegen wieder etwas niedriger. Der Einfluß von  $B/L$  auf das Verhalten des Kopfes ist zwar im Vergleich zur Bedeutung der Saugfläche gering, doch liegen bei gegebener Saugfläche Köpfe mit kleinem Seitenverhältnis eindeutig günstiger.

Eine Änderung der Sohlenbreite kann das Verhalten des Saugkopfes beträchtlich beeinflussen. Breite Sohlen fördern mehr Feststoff bei kleinerer Gemischmenge, aber erhöhtem Zugkraftbedarf.

Mit steigender Fahrtgeschwindigkeit nehmen Feststoff- und Gemischmenge ab, dagegen steigt der Zugkraftbedarf.

Die Maßstabsversuche deuten darauf hin, daß für größere Saugrohrdurchmesser — also beim Übergang vom Modell zur Großausführung — keine wesentlichen Änderungen der Beiwerte  $G'_F$ ,  $G'_G$  und  $Z'$  mehr zu erwarten sind.



Trotz vieler noch offener Fragen scheinen nach den Versuchsergebnissen für das Baggern bei vorgegebenem Druckgefälle lange, schmale Köpfe mit Saugflächen von 4- bis 5fachem Saugrohrquerschnitt am günstigsten zu sein und die größte Feststoffförderung mit möglichst großen (nach Leistungs- und Zugkraftbedarf noch tragbaren) Saugflächen und breiten Sohlen erreicht zu werden. Hieraus geht hervor, daß an gebräuchlichen California-Schleppsaugköpfen [3, 4, 5] sowohl in der Saugfläche als auch im Seitenverhältnis der Klappen Verbesserungen möglich sind.

## 2. Untersuchung über die Einlaufverluste von Grundsaugerköpfen

### 2.1 Allgemeines

Beim Grundsaugen (ohne Schneidkopf und ohne Schleppbewegung) wird der Boden allein durch die Einlaufströmung gelöst und aufgenommen. Die Arbeit für das Lösen und Aufnehmen des Bodens bewirkt einen Druckhöhenverlust am Einlauf, dessen Größe entscheidend das Vakuum an der Förderpumpe beeinflusst. Da dieses durch die Kavitationsgrenze beschränkt ist, muß angestrebt werden, bei einer möglichst hohen Feststoffkonzentration  $k_T$  im Förderstrom  $Q$  einen möglichst kleinen Einlaufverlust zu erhalten.

Bild 7 zeigt schematisch den Druckverlauf am Saugrohrenlauf. Bei der Reinwasserförderung besteht unmittelbar hinter dem Saugrohrenlauf das Vakuum  $V_w$ :

$$V_w = \frac{v_m^2}{2g} \cdot (1 + \varepsilon) \quad (4)$$

$V_w$  = Reinwasservakuum in m WS

$V_m$  =  $Q/F$  = mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Saugrohr der Lichtweite  $D$  in m/s

$g$  =  $9,81 \text{ m/s}^2$  = Erdbeschleunigung

$\varepsilon$  = Dimensionsloser Einlaufverlustbeiwert beim Saugen aus einem unbegrenzten Wasserraum

### Drucklinienverlauf im Saugrohr

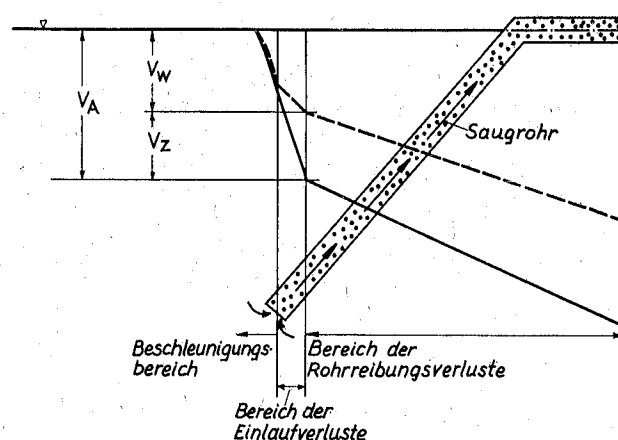


Bild 7

Wird das Saugrohr dem Boden genähert und wird durch die Einlaufströmung ein Gemisch aus Wasser- und Feststoffen angesaugt, so erhöht sich der Einlaufverlust; nach Bild 7 beträgt dann das Arbeitsvakuum  $V_A$  unmittelbar hinter dem Saugrohreinlauf

$$V_A = V_w + V_z \quad (5)$$

$V_A$  = Arbeitsvakuum in m WS

$V_w$  = Reinwasservakuum in m WS

$V_z$  = Zusatzvakuum für die Gemischförderung in m WS

Die Abhängigkeit dieses Zusatzvakuums  $V_z$  von der Feststoffkonzentration, den Bodenkennwerten, der Saugtiefe und der Einlaufform wurde im FRANZIUS-INSTITUT FÜR GRUND- UND WASSERBAU der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HANNOVER untersucht [SALZMANN (6), dort weitere Schrifttumsangaben].

### 2.2 Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration $k_T$

Die Auswertung der Versuche ergab, daß das Zusatzvakuum  $V_z$  aus Gleichung 5 durch folgende Gleichungen mit der Konzentration  $k_T$  verbunden werden kann:

$$k_T = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot V_z^{0.78} \quad (6)$$

$k_T$  = Transportkonzentration = Verhältnis des (porenfreien) Volumstromes an Feststoffen  $Q_F$  zum Gesamtstrom des Gemisches  $Q$ ; vgl. (7).

$\beta_1$  = dimensionsloser Beiwert, nur von dem Boden abhängig

$\beta_2$  = dimensionsloser Beiwert, nur von der Furchentiefe abhängig

$\beta_3$  = dimensionsloser Beiwert, nur von der Einlaufform abhängig

$V_z$  = Zusatzvakuum in m WS nach Gleichung (5)

Diese Gleichung ist empirisch; die Strömungsgeschwindigkeit  $v_m$  tritt in ihr nicht auf, ist aber implizit in  $V_z$  enthalten.

### 2.3 Abhängigkeit von den Bodenkennwerten (Faktor $\beta_1$ )

Es ist bekannt, daß ein Boden aus rolligem Material um so schwerer ansaugbar ist, je mehr feine Bestandteile er enthält. Es ist dabei nicht möglich, den Boden allein durch einen maßgebenden Korndurchmesser aus der Kornverteilungskurve zu kennzeichnen.

Dagegen erwies sich die spezifische Oberfläche nach ZUNKER als geeignet, um die Saugbarkeit eines Bodens auszudrücken.

Sie ist

$$U = \sum g_i \cdot V_i \quad (7a)$$

$$\text{mit } U_i = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{2}{d_1 + d_2} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (7b)$$

$U$  = spezifische Oberfläche für ein Korngemisch in  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$  oder  $\text{cm}^{-1}$

$U_i$  = spezifische Oberfläche einer Korngruppe in  $\text{cm}^{-1}$

$g_i$  = Gewichtsanteil einer Korngruppe in  $\text{‰}/100$

$d_1$  = kleinster Korndurchmesser der Korngruppe in cm

$d_2$  = größter Korndurchmesser der Korngruppe in cm

Bild 8 gibt die starke Abhängigkeit des Faktors  $\beta_1$  von der spezifischen Oberfläche  $U$  an; mit zunehmenden  $U$  nimmt der Faktor  $\beta$  und damit die erreichbare Konzentration bei gleichem Zusatzvakuum stark ab. Außerdem ist noch das Porenvolumen  $n$  von Einfluß; bei dichter Lagerung ( $n = 30 \text{ ‰}$ ) wird weniger angesaugt als bei lockerer Lagerung ( $n = 50 \text{ ‰}$ ). Entscheidend ist aber der Anteil von Feinstkorn im Boden.

### Abhängigkeit der Kennzahl $\beta_1$ von der spezifischen Oberfläche $U$

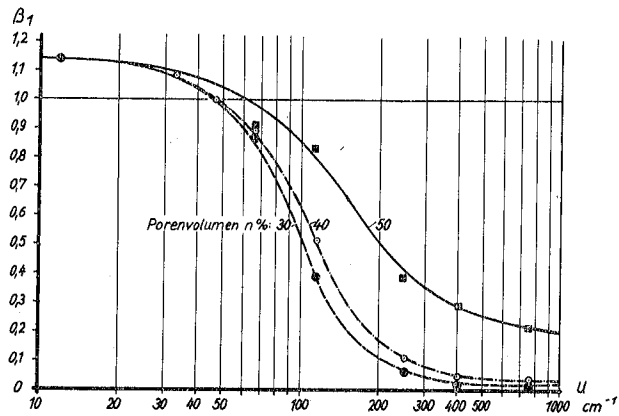


Bild 8

#### 2.4 Abhängigkeit von der Furchentiefe (Faktor $\beta_2$ )

Wird ein Saugbagger mit der Winde verholt, so bildet sich im Boden eine Furche mit annähernd dreieckigem Querschnitt, deren Tiefe etwa gleich der Tiefe der Saugrohröffnung ist. Es ist aus der Naßbaggerpraxis bekannt, daß mehr Material gefördert wird,

### Abhängigkeit der Kennzahl $\beta_2$ von dem Verhältnis Furchentiefe $T$ : Saugrohrlichtweite $D$

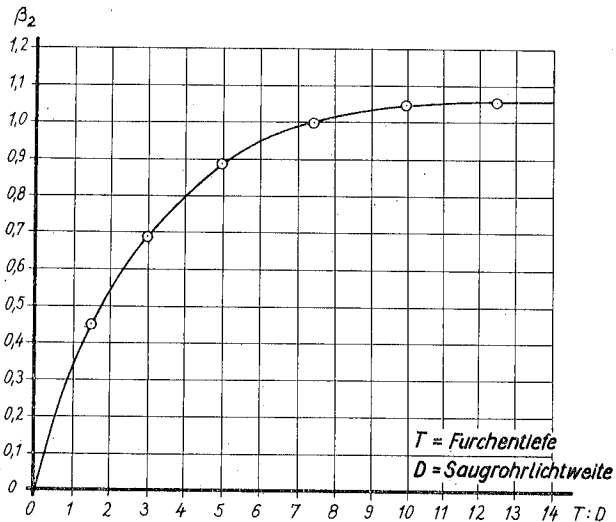


Bild 9

wenn tiefe Furchen gebildet werden, weil dann das Material auf den langen Böschungen stetiger zum Saugrohrreinlauf nachlaufen kann.

Es ist naheliegend, die Furchentiefe  $T$  (unter der normalen Sohle) dimensionslos auf die Saugrohrlichtweite  $D$  zu beziehen.

Bild 9 zeigt — für sonst gleichbleibende Verhältnisse —, wie sich der Faktor  $\beta_2$  mit dem dimensionslosen Verhältnis Furchentiefe  $T$  : Saugrohrlichtweite  $D$  ändert. Von einer Furchentiefe an, die größer als das etwa 10fache der Saugrohrlichtweite ist, ändert sich der Faktor  $\beta_2$  nicht mehr, die erreichbare Konzentration nimmt also bei größeren Furchentiefen nicht mehr zu. Bei kleinen Furchentiefen dagegen nimmt die erreichbare Konzentration sofort ab.

2.5 Abhängigkeit von der Einlauform (Faktor  $\beta_3$ )

Die Einlauform beeinflusst nicht allein das Reinwasservakuum nach Gleichung (1) durch den Einlaufverlustbeiwert  $\epsilon$ , sondern durch den Faktor  $\beta_3$  auch das Zusatzvakuum  $V_z$  nach Gleichung (2).

Bild 10 zeigt die im FRANZIUS-INSTITUT untersuchten Einlauformen nach ihren Einlaufverlustbeiwerten  $\epsilon$  geordnet. Den größten Einlaufverlust hat die Düsenform mit  $\epsilon = 5,5$ , den kleinsten der nach potentialtheoretischen Überlegungen entworfene Birnensaugkopf mit  $\epsilon = 0,022$ , der in der Sowjetunion verwendet wird. Die Untersuchungen ergaben, daß die Einlauformen, die auch bei der Reinwasserförderung geringe Einlaufverluste aufweisen, auch bei der Feststoffförderung weniger Druckabfall verursachen. Bild 11 zeigt

**Einlaufverlustbeiwert  $\epsilon$   
der im hydraulischen Modell untersuchten Saugköpfe**

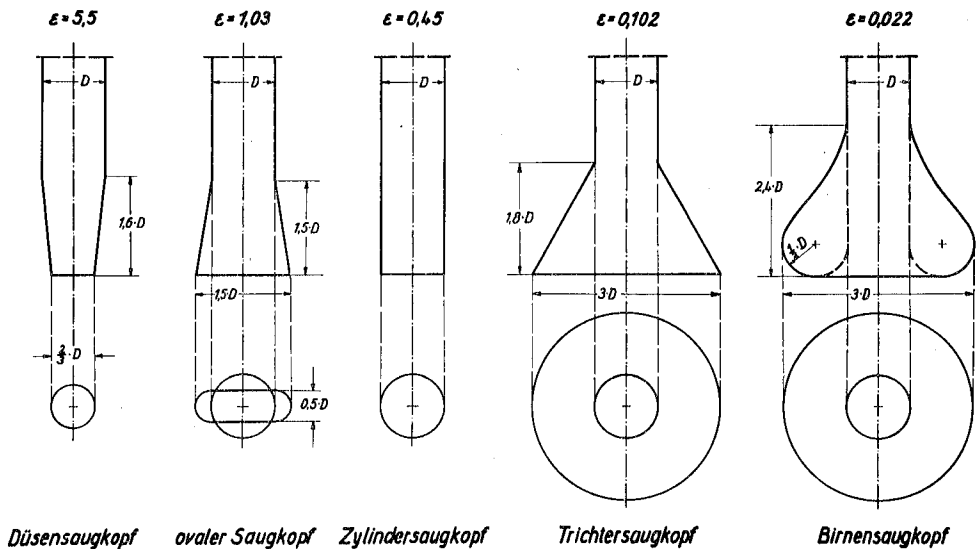


Bild 10

dies in der Abhängigkeit des Faktors  $\beta_3$  von dem Einlaufverlustbeiwert  $\varepsilon$  (vgl. Bild 10); der Birnensaugkopf mit  $\beta_3 = 0,25$  liefert auch hierbei die höchste Konzentration bei gleichem Zusatzvakuum.

## 2.6 Berechnungsverfahren

Ist die Bodenart gegeben, so läßt sich aus Gleichung (7a) und (7b) die spezifische Oberfläche  $U$  ermitteln und aus Bild 8 der Faktor  $\beta_1$  entnehmen.

Mit der Furchentiefe  $T$  und der Saugrohrweite  $D$  läßt sich aus Bild 9 der Faktor  $\beta_2$  bestimmen.

Wird einer der Saugrohrenläufe nach Bild 10 verwendet, so können die Werte  $\varepsilon$  und  $\beta_3$  unmittelbar aus Bild 10 und 11 entnommen werden. Bei der Verwendung eines anderen Einlaufes muß in einem Reinwasserversuch der Beiwert  $\varepsilon$  bestimmt werden; der Wert  $\beta_3$  kann dann mit der Ausgleichsgeraden auf Bild 11 ermittelt werden.

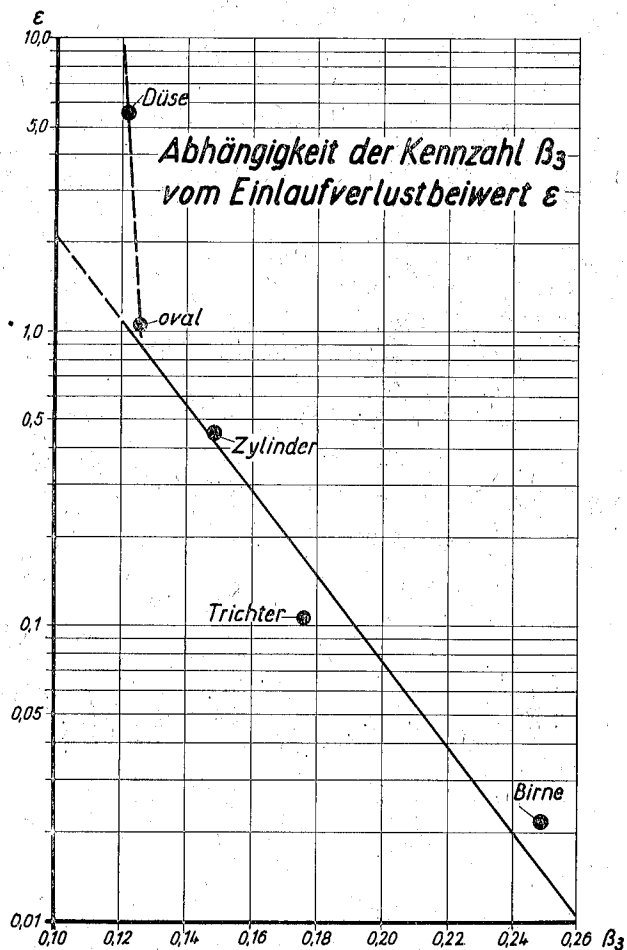


Bild 11

Dann kann mit Gleichung (6)

$$k_T = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot V_z^{0,78}$$

die Beziehung zwischen der Transportkonzentration  $k_T$  und dem Zusatzvakuum  $V_z$  aufgetragen werden; der gesamte Druckabfall  $V_A$  am Einlauf ergibt sich dann aus Gleichung (1) und (2) zu

$$V_A = (1 + \varepsilon) \frac{v_m^2}{2} + V_z$$

Hinzu kommen noch die Druckhöhenverluste in der übrigen Saugleitung bis zur Pumpe, die von der Ausbildung und der Länge der Saugleitung des jeweiligen Baggers abhängen, ebenso von der Saugtiefe und der Konzentration.

#### Schrifttumsverzeichnis

- [1] Waibel, Walter und Witt: Entwicklungslinien neuzeitlicher großer Schleppkopfsaugbagger, Arbeitsmethoden solcher Bagger und systematische Untersuchungen an Schleppsaugköpfen, dargestellt an 3 Baggerneubauten für die Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen, Deutsche Berichte zum XXI. Internationalen Schiffahrtskongress, Stockholm 1965, S. 185
- [2] W. Witt: Untersuchungen an Schleppsaugköpfen für Naßbagger. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffahrt Berlin, Heft 46. Berlin 63
- [3] F. C. Scheffauer, Editor: The Hopper Dredge. U. S. Government Printing Office, Washington, 1954
- [4] Blaum/v. Marnitz: Die Schwimmbagger. Erster Band: Bodentechnische Grundlagen, Saugbagger. Springer-Verlag Berlin, 1963
- [5] v. Marnitz: Naßbaggerwesen in USA. Heft 68, RKW Auslandsdienst. Carl Hauser Verlag, München 1958
- [6] H. Salzmann: Hydraulische und Bodentechnische Vorgänge beim Grundsaugen. Heft 31 (1968) der Mitteilungen des FRANZIUS-INSTITUTS für GRUND- und WASSERBAU der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HANNOVER
- [7] A. Führböter: Über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen in Rohrleitungen. Heft 19 (1961) der Mitteilungen des FRANZIUS-INSTITUTS der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HANNOVER.