

## Abteilung II

### Seeschifffahrt

#### Thema 4

#### **Errichtung großer Kaimauern bei weichem Untergrund unter Anwendung von Bodenersatz**

##### **Berichtersteller:**

o. Prof. Dr.-Ing. Erich Lackner, Bremen/Hannover

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Höft, Erster Baudirektor, Strom- und Hafenbau Hamburg

##### **Zusammenfassung**

Der vorliegende Beitrag behandelt vor allem den Entwurf und die Bauausführung hochbelasteter Kaimauern mit großem Geländesprung in Gebieten mit tief unter SKN reichenden weichen Bodenschichten. Bei diesen Verhältnissen können die Baukosten nur dann in erträglichen Grenzen gehalten werden, wenn der weiche Boden bis zum tiefliegenden tragfähigen Baugrund ausgehoben und durch Sand ersetzt wird.

Bei diesem Verfahren sind dann Maßnahmen zu berücksichtigen, die im einzelnen in den Empfehlungen E 109 und E 110 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. (HTG), Hamburg, und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (DGEG), Essen – publiziert in den Sammelveröffentlichungen EAU 1975 und EAU 1980 im Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München – behandelt sind. Die Titel dieser Empfehlungen lauten:

E 109: Ausführung von Bodenersatz für Ufereinfassungen

E 110: Ansatz von Erddruck und Wasserüberdruck und Ausbildungshinweise für Ufereinfassungen mit Bodenersatz und verunreinigter oder gestörter Baggergrubensohle.

Sie werden hier im vollen Wortlaut gebracht, um sie in letzter Fassung baldmöglichst der internationalen Fachwelt zur Verfügung zu stellen. An drei ausgeführten Beispielen von großen Kaimauern wird ihre Anwendung dargestellt.

#### **1. Allgemeines**

Die wichtigsten Seehäfen der Bundesrepublik Deutschland liegen in den Mündungsgebieten der großen deutschen Flüsse. Hier sind, wie auch bei vielen ausländischen Großhäfen, die guten Baugründe längst bebaut. Bei Hafenerweiterungen müssen daher Ge-

biete herangezogen werden, bei denen der tragfähige Baugrund häufig erst 12 bis 20 m unter Seekartennull ansteht. Darüber liegen weiche alluviale Schichten, die höchstens für ihr Eigengewicht konsolidiert und daher zur Aufnahme höherer Kaimauerlasten ungeeignet sind. Darüber hinaus führen sie bei den oft viele Meter betragenden Aufsandungen bis zum gewünschten Hafenplanum zu außerordentlich hohen waagerechten Kaimauerbelastungen, da bei ihnen zunächst mit dem Erddruckbeiwert  $K_a = 1$  gerechnet werden muß, der je nach Bodenart, Schichtung und Gesamtdicke der Weichzonen und Art der weiteren Behandlung oft erst nach Jahrzehnten auf den Wert von  $K_a = \text{ca. } 0,4$  absinkt. Hinzu kommt daß moderne Hafenanlagen – insbesondere für den Containerverkehr – aus Fahrzeiterparnis nicht hinter Schleusen errichtet werden sollen, so daß aus den Schwankungen der Außenwasserstände, bezogen auf die sich nur wenig ändernden Grundwasserstände, außerordentlich hohe Wasserüberdrücke auftreten können. Auch müssen verhältnismäßig große Kran- und Nutzlasten sowie Pollerzüge und Schiffstöße berücksichtigt werden.

Würde man nun die Kaimauer für die schlechten Bodenverhältnisse bemessen, erhielte man außerordentlich teure Bauwerke. Wirtschaftlich vertretbare und auch sonst betrieblich günstige Konstruktionen werden dabei nur erreicht, wenn der weiche Boden bis hinunter zum tragfähigen Baugrund großräumig ausgehoben und durch richtig eingebrachten, relativ dicht gelagerten Sand ersetzt wird. Einige Beispiele hierzu und die dabei gewählten Kaimauerkonstruktionen sind unter Ziff. 4., 5. und 6. kurz behandelt.

Bei der Planung, dem Entwurf und der Bauausführung dieser Kaimauerbauten mit Bodenersatz mußten aber besondere Überlegungen angestellt werden, um die teilweise vorhandenen Gefahrenquellen zu vermindern oder ganz auszuschließen und andererseits die günstigen Möglichkeiten optimal zu nutzen. Um die dabei gewonnenen Erkenntnisse der Fachwelt ganz allgemein nutzbar zu machen, entschloß sich der Arbeitsausschuß „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG), Hamburg, und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (DGEG), Essen, zwei richtungsweisende Empfehlungen herauszubringen. Sie lauten:

E 109: Ausführung von Bodenersatz für Ufereinfassungen

E 110: Ansatz von Erddruck und Wasserüberdruck und Ausbildungshinweise für Ufereinfassungen mit Bodenersatz und verunreinigter oder gestörter Baggergrubensohle.

Diese Empfehlungen sind bereits in der im Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München/Düsseldorf erschienenen 5. Auflage der Sammelveröffentlichung der Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, der EAU 1975, und in der 1978 im selben Verlag erschienenen englischen Übersetzung der EAU 1975 enthalten.

Den neuesten Stand dieser Empfehlungen bringt die EAU 1980, die insgesamt 150 aktualisierte Empfehlungen enthält und Ende 1980 im Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München erscheinen wird. Die ins Englische übersetzte EAU 1980 soll im selben Verlag Ende 1981 erscheinen.

Um die Empfehlungen E 109 und E 110 möglichst rasch der Fachwelt zur Kenntnis zu bringen, werden sie im folgenden in der Fassung und mit den Abschnittsbezeichnungen der EAU 1980 bereits hier im Wortlaut gebracht.

## 2. Wortlaut der E 109 mit den Abschnittsbezeichnungen der EAU 1980

### 7.9 Ausführung von Bodenersatz für Ufereinfassungen (E 109)

#### 7.9.1 Allgemeines

Bei Ufereinfassungen in Gebieten mit dicken, weichen bindigen Bodenschichten ist – vor allem abhängig von der Höhe des Geländesprunges, von der Größe der Geländeaufhöhung, der Geländenuhlast und den Wasserstandsschwankungen – ein Bodenaustausch für Kaianlagen, Böschungen usw. fallweise wirtschaftlich, wenn der zum Bodenersatz erforderliche Auffüllsand in genügender Qualität und Menge kostengünstig zur Verfügung steht. Die Tiefe der Baggergrube muß dabei so festgelegt werden, daß die Standsicherheit der Ufereinfassung gewährleistet ist. Dazu kann es nötig sein, alle weichen bindigen Schichten hinunter bis zum tragfähigen Baugrund abzutragen. In diesem Fall verlangt die zu erwartende Störschicht auf der Baggergrubensohle infolge der Bodenverluste beim Baggern, eventuelle Störungen der Oberfläche des tragfähigen Baugrundes und laufendem Schlickfall besondere Maßnahmen.

Wenn die Ufereinfassung nur geringe Setzungen vertragen kann, ist ebenfalls ein vollständiger Aushub der weichen bindigen Schichten erforderlich.

Schon für einen ausreichend zutreffenden Kostenvergleich im Vorentwurfsstadium für eine Lösung mit oder ohne Bodenersatz und nicht erst für den Entwurf sind zur Erfassung der Bagger- und der Einfüllkosten ausreichende Bodenaufschlüsse und bodenmechanische Untersuchungen erforderlich. Nur dann können für eine Lösung mit Bodenersatz genügend zutreffend festgestellt werden:

- die Abmessungen und die Sohlentiefe der Baggergrube,
- die Art der einzusetzenden Bagger,
- die zu fordernden und zu erwartenden Baggerleistungen und
- eine möglichst richtige Schätzung der Dicke der zu erwartenden Störschicht auf der Baggergrubensohle infolge des Bodenverlustes beim Baggern und eventueller Störungen der Oberfläche der Baggergrubensohle.

Darüber hinaus ist die Geschiebe- und Sinkstofführung so zutreffend wie irgend möglich zu erkunden, und dies sowohl hinsichtlich des Materials, seines Anteils und der Absetzmenge je nach den Fließgeschwindigkeiten im Verlauf der verschiedenen Tiden, als auch abhängig von den Jahreszeiten. Nur dann kann das Sandeinfüllen so systematisch geplant und ausgeführt werden, daß in der Einfüllung Schlickzwischenlagen auf ein Mindestmaß begrenzt bleiben.

Bei Großbauwerken sollte im Bauwerksgebiet rechtzeitig vor der Entscheidung eine ausreichend große Probegrube gebaggert und laufend beobachtet werden.

Hingewiesen sei auch auf die besondere Kolkgefahr im eingebrachten Auffüllsand: Darauf errichtete Baugerüste und dergleichen müssen tief einbinden, wenn nicht schützende Abdeckungen aufgebracht werden. Damit die Standsicherheit der Ufereinfassung nicht nachteilig beeinflußt wird, ist ein sachgemäßes Arbeiten erforderlich und dabei vor allem Nachstehendes zu beachten.

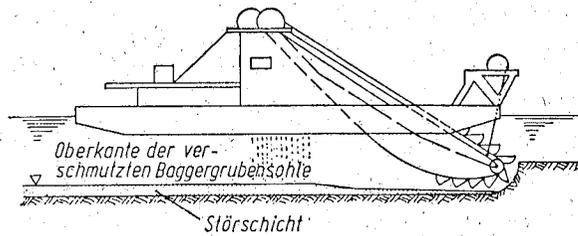


Bild 81: Störschichtbildung beim Aushub mittels Eimerkettenbagger

## 7.9.2 Bodenaushub

### 7.9.2.1 Wahl des einzusetzenden Baggers

Für den Abtrag von bindigem Boden werden im allgemeinen Eimerkettenbagger oder Schneidkopf-Saugbagger eingesetzt. Bei beiden Baggerarten sind gewisse Bodenverluste, die zur Bildung einer Störschicht auf der Baggergrubensohle führen, selbst unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen nicht zu vermeiden.

Die Verluste beim Eimerkettenbagger sind nach bisheriger Erfahrung im allgemeinen geringer als beim Schneidkopf-Saugbagger. Die mit dem Eimerkettenbagger hergestellte Baggergrubensohle läßt sich darüber hinaus ebener ausführen und dadurch leichter säubern. Beim Aushub mit Eimerkettenbaggern (Bild 81) bildet sich durch den Baggervorgang selbst, durch übervolle Eimer, unvollständiges Entleeren der Eimer in der Ausschütanlage und durch Überfließen der Baggerschuten auf der Baggergrubensohle im allgemeinen eine 20 bis 50 cm dicke Störschicht, unmittelbar nach dem Baggen gemessen.

Um diese Störschichtdicke zu verringern, muß bei Erreichen der Baggergrubensohle mit geringerer Schnitthöhe gearbeitet werden. Ferner sollte stets mindestens ein Sauberkeitsschnitt geführt werden, um sicherzustellen, daß verlorengegangenes Baggergut weitgehend entfernt wird. Dabei muß mit schlaffer Unterbucht sowie mit geringer Eimer- und Schergeschwindigkeit gefahren werden. Ferner sollten die Schuten nur teilweise beladen werden, um so ein Überfließen mit Bodenverlusten zu vermeiden. Hierdurch kann die Störschichtdicke auf etwa die Hälfte reduziert werden.

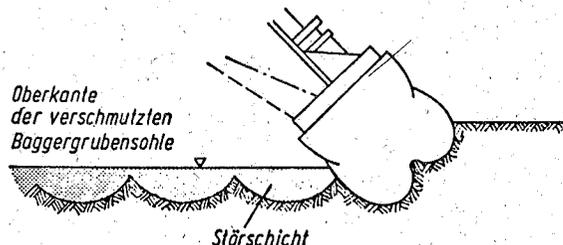


Bild 82: Störschichtbildung beim Aushub mittels Schneidkopf-Saugbagger

Beim Einsatz von Schneidkopf-Saugbaggern entsteht eine gewellte Baggergrubensohle nach Bild 82, deren Störschicht dicker ist als beim Eimerkettenbagger.

Durch eine besondere Schneidkopfform, eine niedrige Schneidkopfdrehzahl, kurze Vorschübe sowie eine langsame Schergeschwindigkeit kann die Störschichtdicke auf 20 bis 40 cm verringert werden.

Durch weitere Sauberkeitsschnitte ist auch hier ein noch besseres Ergebnis erreichbar.

#### 7.9.2.2 Ausführung und Kontrolle der Baggerarbeiten

Um ein zeichnungsgemäßes Baggern gewährleisten zu können, muß die Baggergrube – den Abmessungen des gewählten Baggers angepaßt – großzügig angelegt und entsprechend gekennzeichnet werden. Dabei müssen die Pegel und die Vermessungseinrichtungen vom Baggerpersonal sowohl am Tage als auch bei Nacht deutlich und unverwechselbar erkannt werden können.

Die Markierung der Baggerschnittbreite an den Seitendrähten des Baggers allein ist nicht ausreichend.

Der Aushub wird in Stufen durchgeführt, die am Baggergrubenrand der mittleren Profilneigung entsprechen. Die Höhe dieser Stufen ist von Art und Größe der Geräte und von der Bodenart abhängig. Auf ein strenges Einhalten der Schnittbreiten ist zu achten, da zu breit ausgeführte Schnitte örtlich zu übersteilen Böschungen und damit zu Böschungsrutschungen führen können.

Die ordnungsgemäße Ausführung der Baggerung kann durch die Aufnahme von Querprofilen verhältnismäßig gut überwacht werden. Um eventuelle Profiländerungen, die unter Umständen auf Rutschungen in der Unterwasserböschung zurückzuführen sind, rechtzeitig erkennen und die dann notwendigen Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, müssen die einzelnen Profile laufend durch Lotungen überprüft werden. Die letzte Lotung ist unmittelbar vor Beginn des Sandeinbringens durchzuführen.

Um Aussagen über die Beschaffenheit der Baggergrubensohle machen zu können, sind aus ihr Bodenproben zu entnehmen. Hierfür hat sich ein aufklappbares Sondierrohr mit einem Mindestdurchmesser von 100 mm und einer Fangvorrichtung (Federverschluß) bewährt. Dieses Rohr wird je nach den Erfordernissen 50 bis 100 cm oder auch tiefer in die Baggergrubensohle getrieben. Nach dem Ziehen und Öffnen des Rohres gibt der im Rohr enthaltene Kern einen guten Überblick über die in der Baggergrubensohle anstehenden Bodenschichten.

#### 7.9.3 Qualität und Gewinnung des Einfüllsandes

Der Einfüllsand soll nur geringe Schluff- und Tonanteile sowie keine größeren Steinansammlungen enthalten.

Ist der zur Verfügung stehende Einfüllsand stark verunreinigt und/oder steinig, aber noch brauchbar, darf er, um Anhäufungen von Feinmaterial und Steinen in bestimmten Bereichen zu vermeiden, nicht eingespült, sondern nur verklappt werden.

Damit kontinuierlich, rasch und wirtschaftlich verfüllt werden kann, müssen ausreichend große Vorkommen von geeignetem Sand in vertretbarer Entfernung vorhanden sein. Bei der Ermittlung der erforderlichen Einfüllmassen ist der Bodenabtrieb mit zu berücksichtigen. Er wird um so größer, je feiner der Sand, je größer die Fließgeschwindigkeit über sowie in der Baggergrube, je kleiner die Einbaumengen je Zeiteinheit sind und je tiefer die Baggergrubensohle liegt.

Für die Sandgewinnung sind leistungsfähige Saugbagger zu empfehlen, damit neben hohen Fördermengen gleichzeitig ein Reinigen des Sandes erreicht wird. Der Reinigungseffekt kann durch richtige Beschickung der Schuten und längere Überlaufzeiten verstärkt werden. Vom Einfüllsand sind laufend Proben aus den Schuten zu entnehmen und auf die im Entwurf technisch geforderte Beschaffenheit, insbesondere auf den maximal zugelassenen Schlickgehalt hin, zu untersuchen.

#### 7.9.4 Säubern der Baggergrubensohle vor dem Sandeinfüllen

Unmittelbar vor Beginn des Einfüllens muß – insbesondere bei Schlickfall – die Baggergrubensohle im betreffenden Bereich im erforderlichen Umfang gesäubert werden. Hierfür können – wenn die Ablagerungen nicht zu fest sind – eventuell Schlicksauger eingesetzt werden. Wenn jedoch eine längere Zeit zwischen dem Ende der Baggerarbeiten und dem Beginn des Schlicksaugens liegt, kann der Schlick bereits so verklebt sein, daß ein nochmaliger Sauberkeitsschnitt ausgeführt werden muß.

Die Sauberkeit der Baggergrubensohle ist laufend zu überprüfen. Hierfür kann das unter Abschn. 7.9.2.2 beschriebene Sondierrohr verwendet werden. Wenn nur mit weichen Ablagerungen zu rechnen ist, kann für die Entnahme der Proben auch ein entsprechend ausgebildeter Greifer – auch ein Handgreifer kommt in Frage – eingesetzt werden.

Wenn eine ausreichend saubere Sohle nicht gewährleistet werden kann, ist durch andere geeignete Maßnahmen die Verzahnung zwischen dem anstehenden tragfähigen Boden und dem Einfüllsand im erforderlichen Umfange herzustellen. Dies kann bei bindigem, tragfähigem Baugrund am besten durch eine ausreichend dicke, sehr rasch einzubauende Grobschotterschicht erreicht werden.

Auf der Erdwiderstandsseite kann eine solche Sicherung besonders wichtig werden. Da dort im allgemeinen nicht gerammt wird, kann an Stelle von Schotter noch besser Bruchsteinmaterial verwendet werden. Bei anstehenden rolligen Böden kann eine Verzahnung zwischen dem Einfüllboden und dem Untergrund auch durch Vernähen mit Mehrfach-Rüttelkernen (Tiefenrüttelung mit einer Einheit von 2 bis 4 Rüttlern) erreicht werden.

#### 7.9.5 Einfüllen des Sandes

Die Baggergrube kann durch Verklappen oder Verspülen des Sandes, bzw. durch beides gleichzeitig, verfüllt werden. Vor allem bei stark sinkstoffführendem Wasser ist hierfür von vornherein ein ununterbrochen Tag und Nacht laufender Einsatz von sorg-

fältig aufeinander abgestimmten Großgeräten bis in alle Einzelheiten zu planen und später auch durchzuführen. Winterarbeiten mit Ausfalltagen durch zu tiefe Temperaturen, Eisgang, Sturm und Nebel sollten vermieden werden.

Das Einfüllen des Sandes soll dem Ausbaggern des schlechten Bodens zeitlich und räumlich so schnell wie möglich folgen, damit zwischenzeitlich eintretende unvermeidbare Ablagerungen von Sinkstoffen (Schlick) auf ein Mindestmaß beschränkt werden. Andererseits darf aber auch kein Vermischen zwischen dem auszuhebenden und dem einzubringenden Boden infolge eines zu geringen Abstandes zwischen Bagger- und Verfüllbetrieb eintreten. Diese Gefahr ist vor allem in Gewässern mit stark wechselnder Strömung (Tidegebiet) vorhanden und dort besonders zu beachten.

Eine gewisse Verunreinigung des einzubringenden Sandes durch laufenden Schlickfall ist nicht zu vermeiden. Sie kann jedoch durch hohe Einfülleistungen auf ein Minimum begrenzt werden. Der Einfluß des zu erwartenden Verschmutzungsgrades auf die bodenmechanischen Kennzahlen des Einfüllsandest ist entsprechend zu berücksichtigen. Im übrigen muß der Sand so eingefüllt werden, daß möglichst keine durchgehenden Schlickschichten entstehen. Bei starkem Schlickfall kann dies nur durch einen kontinuierlichen, leistungsfähigen Betrieb, der auch an Wochenenden nicht unterbrochen wird, erreicht werden, wenn gleichzeitig eine Einbaufolge gewählt wird, bei der:

- die sich laufend verändernde Sandeinfüllfläche in der Baggergrube auf eine Mindestgröße begrenzt wird,
- der einzufüllende Sand weitgehend gleichmäßig auf die jeweils vorhandene Oberfläche verteilt wird, so daß keine Teilflächen über längere Zeit allein der Schlickablagerung ausgesetzt sind, und
- die Sandeinfüllfläche sich von der Baggergrubensohle bis zur Sollhöhe bzw. bis zum Tide-Hochwasserstand über die Zeit gleichmäßig aufhört.

Sollten trotz aller Anstrengungen Unterbrechungen und damit größere Schlickablagerungen eintreten, ist der Schlick vor dem weiteren Sandeinfüllen zu beseitigen oder später durch geeignete Maßnahmen unschädlich zu machen. Während etwaiger Unterbrechungen ist zu prüfen, ob und wo sich die Oberflächenhöhe der Einfüllung verändert hat. Um einen gegenüber den Entwurfgrundlagen erhöhten Erddruck auf die Uferfassung zu vermeiden, muß die Baggergrube so verfüllt werden, daß während des Einfüllens entstehende, verschlickte Böschungsflächen entgegengesetzt geneigt sind zu den später auftretenden Gleitflächen des auf die Uferfassung wirkenden Erddruckgleitkörpers. Gleiches gilt sinngemäß für die Erdwiderstandsseite.

#### 7.9.6 Kontrolle der Sandeinfüllung

Während des Sandeinfüllens sind ständig Lotungen durchzuführen und deren Ergebnisse aufzutragen. Hierdurch können die Veränderungen der Einfülloberfläche aus dem Einfüllvorgang selbst und infolge wechselnder Strömungseinwirkungen in einem gewissen Umfang festgestellt werden. Gleichzeitig lassen diese Aufzeichnungen erkennen, wie lang eine Oberfläche etwa unverändert vorhanden und daher der Sinkstoff-

ablagerung besonders wirksam ausgesetzt war, so daß rechtzeitig Maßnahmen zur Beseitigung gebildeter Störschichten eingeleitet werden können.

Nur bei zügigem, ununterbrochenem Verspülen und/oder Verklappen kann auf die Entnahme von Proben aus dem jeweiligen unmittelbaren Einfüllbereich verzichtet werden.

Nach Abschluß der Einfüllarbeiten — gegebenenfalls aber auch zwischenzeitlich — muß die Einfüllung durch Schlauchkernbohrungen oder gleichwertige andere Verfahren aufgeschlossen und überprüft werden. Diese Bohrungen sind bis in den unter der Baggergrubensohle anstehenden Boden abzuteufen.

Ein Abnahmeprotokoll bildet die verbindliche Grundlage für die endgültige Berechnung und Bemessung der Uferbefestigung und eventuell erforderlicher Anpassungsmaßnahmen.

### 3. Wortlaut der E 110 mit den Abschnittsbezeichnungen der EAU 1980

#### 2.7 Ansatz von Erddruck und Wasserüberdruck und Ausbildungshinweise für Uferbefestigungen mit Bodenersatz und verunreinigter oder gestörter Baggergrubensohle (E 110)

##### 2.7.1 Allgemeines

Wenn Uferbefestigungen mit Bodenersatz nach E 109, Abschn. 7.9 ausgeführt werden, müssen — insbesondere bei schlickhaltigem Wasser — die Auswirkungen von Verunreinigungen der Baggergrubensohle und nicht konsolidierte Zustände in dieser und in der hinteren Baggergrubenböschung im vorhandenen weichen Boden bei Entwurf, Berechnung und Bemessung der Uferbefestigung sorgfältig berücksichtigt werden, wobei im Hinblick auf die Konsolidierung der Störschicht auch der Zeitfaktor in die Überlegungen eingeht.

##### 2.7.2 Berechnungsansätze zur Ermittlung des Erddruckes

Neben der üblichen Berechnung des Bauwerkes für die verbesserten Bodenverhältnisse und den Geländebruchuntersuchungen nach DIN 4084 müssen die Rand- und Störeinflüsse aus der durch das Baggern vorgegebenen Gleitfuge nach Bild 14 zusätzlich berücksichtigt werden.

Für den auf das Bauwerk bis hinunter zur Baggergrubensohle wirkenden Erddruck  $E_a$  sind dabei vor allem maßgebend:

- (1) Länge und — sofern vorhanden — Neigung des rückhaltend wirkenden Abschnittes  $l_2$  der durch die Baggergrubensohle vorgegebenen Gleitfuge,
- (2) Dicke, Material, Konsolidierungsgrad und wirksame Bodenauflast der Störschicht auf  $l_2$ ,

- (3) eine eventuelle Vernähung des Abschnittes 1<sub>2</sub> durch Pfähle und dergleichen,
- (4) Dicke des hinten anschließenden, weichen bindigen Bodens, seine Bodeneigenschaften sowie Ausführung und Neigung der Baggergrubenböschung,
- (5) Sandauflast und Nutzlast, vor allem auf der Baggergrubenböschung,
- (6) Eigenschaften des Einfüllbodens.

Der Ansatz der auf die Bezugsebenen ① — ① und ② — ② und auf die Uferumfassung wirkenden Kräfte E geht in Erweiterung von E 10, Abschn. 8.4.9 aus Bild 14

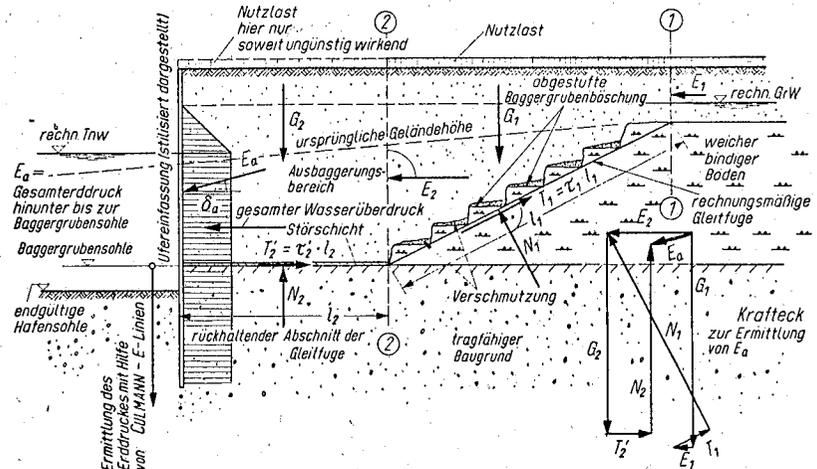


Bild 14: Ermittlung des Erddruckes  $E_a$  auf die Uferumfassung

hervor, auf welchem auch das Krafteck zur Ermittlung von  $E_a$  dargestellt ist. Verteilung und Angriff des Erddruckes  $E_a$  hinunter bis zur Baggergrubensohle richten sich nach dem statischen System und der Bauart der Uferumfassung. Der Erddruck und seine Verteilung unterhalb der Baggergrubensohle können z.B. mit Hilfe von CULMANN-E-Linien ermittelt werden. Hierbei sind die Scherkräfte im Abschnitt 1<sub>2</sub> einschließlich etwaiger Vernähungen mit zu berücksichtigen.

Die jeweils wirksame Scherspannung  $\tau'_2$  in der Störschicht des Abschnittes 1<sub>2</sub> kann für alle Bauzustände, den Zeitpunkt der Ausbaggerung der Hafensohle und auch für etwaige spätere Hafen-Sohlenvertiefungen für das in Frage kommende Störschichtmaterial in einer Bodenversuchsanstalt – abhängig von der Auflast auf und dem Porenwasserdruck in der Störschicht – ermittelt und eingesetzt werden. Bei Schlickablagerungen kann  $\tau'_2$  mit der Formel  $(\sigma - u) \cdot \tan \varphi \approx \sigma' \cdot \tan 20^\circ$   $\tau'_2 =$  errechnet werden.  $\sigma'$  bedeutet darin die an der Untersuchungsstelle zum Untersuchungszeitpunkt wirksame, also von Korn zu Korn – und nicht durch Porenwasserdruck – übertragene lotrechte Auflastspannung. Die Endscherfestigkeit nach voller Konsolidierung beträgt dann  $\tau_2 = \sigma'_A \cdot \tan 20^\circ$ , wobei  $\sigma'_A$  die wirksame Auflastspannung des untersuchten Bereiches des Abschnittes 1<sub>2</sub> bei voller Konsolidierung ( $u = 0$ ) darstellt.

Für die Erfassung einer Vernähung des Abschnittes  $1_2$  durch Pfähle sind besondere Berechnungen erforderlich [6].

Bei einer ordnungsgemäß ausgeführten Baggerung der Böschung im weichen Boden in größeren Stufen geht die vorgegebene Gleitfuge durch die hinteren Stufenkanten und läuft somit im ungestörten Boden (Bild 14). In diesem Fall muß wegen der Mächtigkeit des gewachsenen, weichen bindigen Bodens und der dabei auftretenden langen Konsolidierungsdauer  $\tau_1 = c_u$  gesetzt werden. Weist der weiche bindige Boden Schichten verschiedener Anfangsscherfestigkeit auf, müssen diese verschiedenen  $c_u$ -Werte berücksichtigt werden. Die  $c_u$ -Werte werden im Rahmen der Bodenuntersuchungen für das Bauwerk nach E 88, Abschn. 1.3 ermittelt.

Sollte die Baggergrubenböschung im weichen Boden sehr stark gestört, in kleinen Stufen ausgeführt oder ungewöhnlich verschmutzt sein, muß an Stelle der  $c_u$ -Werte des gewachsenen Bodens mit den schlechten  $c_u$ -Werten der gestörten Gleitschicht gerechnet werden, die dann in zusätzlichen Laborversuchen ermittelt werden müssen.

Wegen der nur langsamen Konsolidierung des weichen bindigen Bodens unterhalb der Baggergrubenböschung lohnt sich hier die Berücksichtigung der mit der Zeit besser werdenden  $c$ -Werte im allgemeinen nur, wenn der weiche Boden mit engstehenden Sanddräns entwässert wird. Hierbei kann dann auch die durch die Setzungen hervorgerufene günstig wirkende Abflachung der Baggergrubenböschung mit erfaßt werden.

### 2.7.3 Berechnungsansätze zur Ermittlung des Wasserüberdruckes

Der gesamte Niveauunterschied zwischen dem rechnermäßigen Grundwasserspiegel im Bereich der Bezugslinie ① – ① (Bild 14) bis zum gleichzeitig auftretenden tiefsten rechnermäßigen Außenwasserspiegel ist zu berücksichtigen. Dauernd wirkende Rückstauentwässerungen hinter der Ufereinfassung können zu einer Absenkung des rechnermäßigen Grundwasserspiegels im Einzugsbereich und damit zu einer Verminderung der gesamten Niveaudifferenz führen. Der gesamte Wasserüberdruck kann in der üblichen angenäherten Form als Trapez angesetzt werden (Bild 14). Er kann, unter Verwendung eines Potential-Strömungsnetzes, aber auch genauer berechnet werden, wobei in den Untersuchungsfugen mit dem jeweils vorhandenen, aus dem Strömungsnetz hergeleiteten Porenwasserdruck gearbeitet wird (E 113, Abschn. 4.8 und E 114, Abschn. 2.8).

### 2.7.4 Hinweise für den Entwurf der Ufereinfassung

2.7.4.1 Untersuchungen an Ausführungsbeispielen haben ergeben, daß im rückhaltenden Abschnitt  $1_2$  der Gleitfuge bis zu rd. 20 cm dicke Störschichten während der üblichen Bauzeit bis zum Ausbaggern der Hafensohle – auch bei nur einseitiger Entwässerung – für ihre Auflastspannung bereits voll konsolidiert sind. Bei größeren Störschichtdicken muß  $\tau_2$  in der Schicht für die verschiedenen Bauzustände in der jeweils ungünstig vorhandenen Größe angesetzt werden. Dies kann zu ganz bestimmten zeitlichen Abständen gewisser Baumaßnahmen, z.B. der Aus- oder Tieferbaggerung der Hafensohle und dergleichen, führen.

- 2.7.4.2 Verankerungskräfte werden am besten über Pfähle oder sonstige Tragglieder durch die Baggergrubensohle hindurch voll in den tragfähigen Baugrund abgeleitet. Oberhalb der Baggergrubensohle eingeleitete Stützkkräfte belasten den Gleitkörper zusätzlich.
- 2.7.4.3 Abgesehen von den statischen Aufgaben soll der Abschnitt 1<sub>2</sub>, wenn möglich, so lang gewählt werden, daß alle Bauwerkspfähle darin untergebracht werden können und so ihre Biegebeanspruchungen bei einwandfrei eingebrachtem Sand so klein wie möglich bleiben.
- 2.7.4.4 Sind bei starkem Schlickfall trotz aller Sorgfalt der Ausführung des Bodenersatzes nach E 109, Abschn. 7.9 dickere, weiche bindige Störschichten und/oder sehr locker gelagerte Sandzonen, die zu starken Pfahldurchbiegungen und damit zu Beanspruchungen bis in den Streckbereich führen können, nicht zu vermeiden, oder werden solche bei der Kontrolle der Sandeinfüllung nach E 109, Abschn. 7.9.6 nachträglich festgestellt, dürfen – zur Verhinderung von Spröddrücken – nur Pfähle aus doppelt beruhigtem Stahl, vorzugsweise aus St 37-3 bzw. aus St 52-3 verwendet werden (E 67, Abschn. 8.1.6.1 und E 99, Abschn. 8.1.20.2).
- 2.7.4.5 Werden im Standsicherheitsnachweis Gründungspfähle zum Vernähen der Gleitfuge im Abschnitt 1<sub>2</sub> mit herangezogen [6], darf beim Spannungsnachweis für diese Pfähle die maximale Hauptspannung aus Axialkraft-, Querkraft- und Biegebeanspruchung 85 % der Streckgrenze nirgends überschreiten.

In der Vernähungsrechnung dürfen nur Pfahldurchbiegungen berücksichtigt werden, die mit den sonstigen Bewegungen des Bauwerks und seiner Teile im Einklang stehen, also nur solche von wenigen Zentimetern. Daher kann im nachgiebigen, weichen bindigen Boden der Baggergrubenböschung (Bild 14) eine wirkungsvolle Vernähung nicht erreicht werden.

Pfähle, bei denen aus Setzungen des Untergrundes oder des Einfüllbodens von vornherein mit möglichen Beanspruchungen bis zur Streckgrenze gerechnet werden muß, dürfen zum Vernähen nicht herangezogen werden.

- 2.7.4.6 Will man vermeiden, daß die Störschicht im rückhaltenden Abschnitt 1<sub>2</sub> der Gleitfuge und die Baggergrubenböschung im weichen bindigen Boden zu vergrößerten Bauwerksabmessungen führen, müssen neben einer möglichst sauberen Baggergrubensohle vor allem ein ausreichend langer Abschnitt 1<sub>2</sub> und/oder eine entsprechend flache Neigung der Baggergrubenböschung angestrebt werden (vgl. hierzu die Auswirkungen im Krafteck in Bild 14).

Bei zu erwartender geringer Störschichtdicke kann eine auf den gesäuberten Abschnitt 1<sub>2</sub> aufgebrachte Schotterschüttung zu einer wesentlichen Verbesserung des Schwerwiderstandes in diesem Bereich der Gleitfuge führen.

Wenn ausreichend Zeit zur Verfügung steht, können auch enggestellte Sanddräns, die im weichen bindigen Boden bis hinter das Ende der Baggergrubenböschung ausgeführt werden, zu einer Entlastung des Bauwerkes führen.

Auch eine vorübergehende Verminderung der Nutzlast über der Baggergrubenböschung und/oder ein vorübergehendes Absenken des Grundwasserspiegels bis hinter die Bezugsebene ① – ① können zur Überwindung ungünstiger Anfangszustände mit benutzt werden.

2.7.4.7 Will man bei Bodenersatz in Kleigeländen auf den rückhaltenden Abschnitt  $l_2$  verzichten, darf – wenn Zusatzbeanspruchungen auf das Bauwerk vermieden werden sollen – bei sonst guter und sorgfältiger Ausführung des Bodenersatzes die Baggergrubenböschung nur etwa die Neigung 1 : 4 aufweisen. Da es aber auch auf die  $c_u$ -Werte in der Baggergrubenböschung und den wirksamen Wasserüberdruck ankommt, ist stets ein rechnerischer Nachweis zu führen.

2.7.4.8 Bei schlickhaltigem Wasser kommen für die Bauwerksentwässerung nur einwandfreie, doppelt gesicherte Rückstauentwässerungen in Frage. Leistungsfähige Dräagen im hinteren Teil des Ersatzbodens, die zu den Rückstauverschlüssen geführt werden, können den Erfolg der Entwässerung wesentlich verbessern.

2.7.4.9 Fragen im Zusammenhang mit Bodenersatz auf der Erdwiderstandsseite werden in einer besonderen Empfehlung behandelt.

#### 4. Kurzbericht über Planung, Entwurf und Bau der Stromkaimauer für das Containerkreuz in Bremerhaven

Die Containerkaimauer Bremerhaven wurde im Ausbau 1970/72 (Abb. 4, Mittelabschnitt) unter der Oberleitung von o. Professor em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Arnold Agatz, Bremen, entworfen und ausgeführt. Hierüber gibt es eingehende Veröffentlichungen von folgenden am Bauvorhaben maßgeblich beteiligten Fachleuten:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Arnold Agatz, Dipl.-Ing. Peter Conrad, Dipl.-Ing. Heinz Fedders, Dipl.-Ing. Max Haase, Dipl.-Ing. Gerd Hauschopp, Dipl.-Ing. Paul Heiß, Dipl.-Ing. Edgar Heyer, Dr.-Ing. E. Krenkel, o. Prof. Dr.-Ing. Erich Lackner, Baudirektor Dipl.-Ing. Wilhelm Lüninghoner, Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Wolfram Schenck, Oberbaurat Dipl.-Ing. Heinrich Wenning, Prof. Dr.-Ing. Klaus-Peter Wenz, Hafenbaudirektor Dipl.-Ing. Gerhard Wollin.

Die Veröffentlichungen sind in der Zeitschrift „Die Bautechnik“, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, in den nachstehenden Heften erschienen:

DIE BAUTECHNIK, H. 5/1972, S. 145 – 151, H. 3/1973, S. 73 – 85, H. 2/1974, S. 37 – 47, H. 3/1974, S. 74 – 81, H. 5/1975, S. 156 – 164, H. 6/1975, S. 198 – 208, H. 7/1975, S. 217 – 231, H. 6/1976, S. 188 – 197, H. 7/1976, S. 233 – 241, H. 8/1976, S. 271 – 281, H. 9/1976, S. 311 – 319, H. 10/1976, S. 333 – 344.

Aus den dort enthaltenen zahlreichen Abbildungen sind hier – teilweise überarbeitet – zur allgemeinen Unterrichtung die Abb. 2 und 5 wiedergegeben. Sie zeigen für den Aus-

bau 1970/72 die Bodenverhältnisse, die Bodenkenwerte, den Bodenersatz und die konstruktive Lösung einschließlich der Ausrüstung der Stahlpfähle mit Fußflügeln und die Anwendung eines besonders leistungsfähigen und sicher arbeitenden Entwässerungssystems zur Abminderung des Wasserüberdrucks.

Alles Weitere kann den oben genannten Veröffentlichungen entnommen werden.

Für die südliche Erweiterung der Containerkaimauer, Ausbau 1978/79 (Abb. 4), sind zahlreiche sonstige Lösungen systematisch untersucht worden. Es ergab sich aber keine technisch und wirtschaftlich bessere Lösung, so daß das System des Ausbaus 1970/72 beibehalten wurde. Geiches gilt für die 1980 in Angriff genommene nördliche Verlängerung um rd. 360 m (Abb. 1).

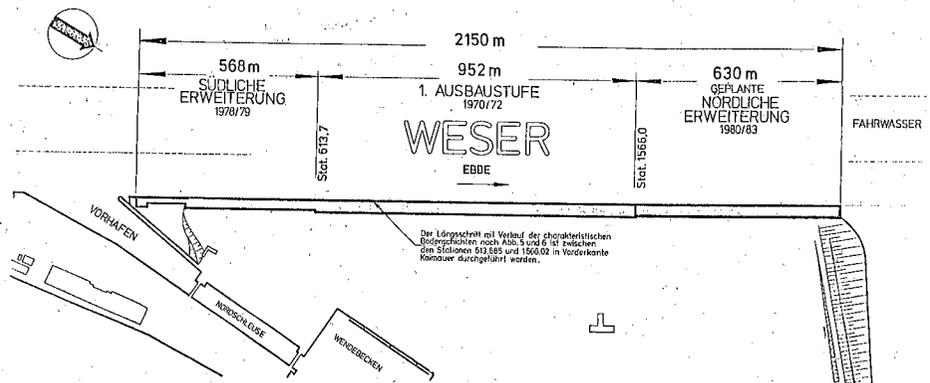


Abb. 1: Übersichtsplan zum stufenweisen Ausbau der Containerkaimauer in Bremerhaven

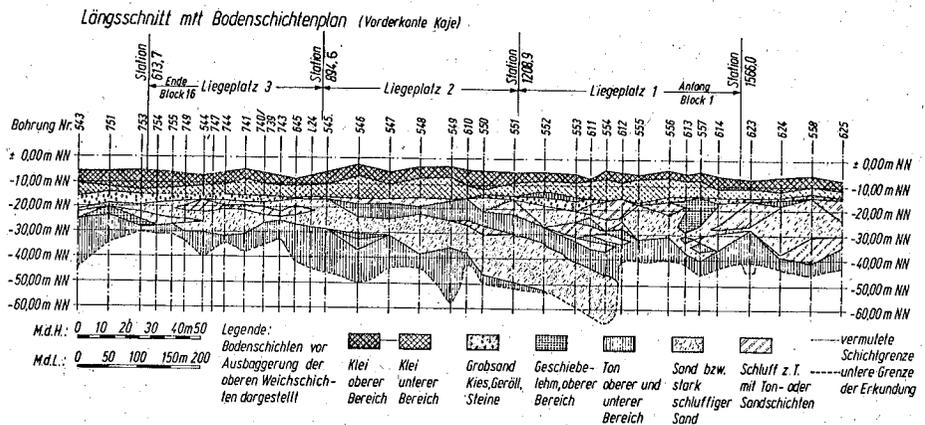


Abb. 2: Längsschnitt mit Verlauf der charakteristischen Bodenschichten. Ausbau 1970-72 (Entnommen aus: „Die Bautechnik“ 52 (1975), H. 7, S. 217)

Hauptbodenart		Signatur	Bodenkennwerte, Rechnungswerte									
			Flackraumgewicht	Fuchtrumgewicht	Auftriebsraumgewicht	Konsistenz	Steifiziffer	Logerdichte	Reibungswinkel	Kohäsion	Bodenpressung unter der Frotzspitze	Horizontale Reibung
			$\gamma_{fl}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_f$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_a$ [kN/m <sup>3</sup> ]	K	E	/	$\varphi$ [Grad]	c	$\sigma_{p0}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_{0.1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
weiche (alluviale) Ablagerungen	oberer Bereich		9,5	15,5	5,5	0 ... 0,3	0,5	-	0	5	-	-
	unterer Bereich		9,5	15,5	5,5	0,2...0,6	1,5	-	0	30	-	-
Ton	oberer Bereich		14,0	18,5	8,5	1,0	1,5	-	10	70	1,0	0,03
	unterer Bereich		16,0	20,0	10,0	>1,0	2,5	-	10	100	2,0	0,035
Grobsand, Kies, Geröll, Steine			18,5	21,5	11,5	-	100	mitteldicht bis dicht	36	0	-	0,05
Sand			18,5	21,5	11,5	-	100	dicht bis sehr dicht	37	0	5,0	0,06
Feinsand, stark schluffig			18,5	21,5	11,5	-	70	dicht bis sehr dicht	37	0	5,0	0,07
Geschiebelehm	oberer Bereich		17,0	20,5	10,5	0,6...1,0	8	-	10 25	bzw. 40 0	0,5	0,02
	unterer Bereich		19,0	22,0	12,0	>1,0	30	-	10 30	bzw. 60 0	1,5	0,07
Schluff, z.T. mit Ton- oder Sondschiehlen			15,0-17,0	19,0-20,5	9,0-10,5	0,5...1,0	15 25	-	10 25	bzw. 60 0	1,0	0,035

\*) Die angegebenen Bodenpressungen und Horizontale Reibungen sind Grenzspannungen. Sie gelten nur, wenn die Pfähle ausreichend tief in die jeweilige Schicht einbinden und unter der Spitze die Schicht noch in ausreichender Dicke existiert.  
 \*\*) Die ungünstigen Werte sind für die Berechnungen maßgebend.  
 \*\*\*) Der Wert E = 15 MN/m<sup>2</sup> gilt für Schichten oberhalb der Höhenkote -30 m NN, der Wert E = 25 MN/m<sup>2</sup> für Schichten unterhalb der Höhenkote -30 m NN.

Abb. 3: Zusammenstellung der maßgebenden Bodenkennwerte für die Berechnung der Stromkaimauer. Ausbau 1970 - 72 (Entnommen aus: „Die Bautechnik“ 51 (1974), H. 2, S. 37)

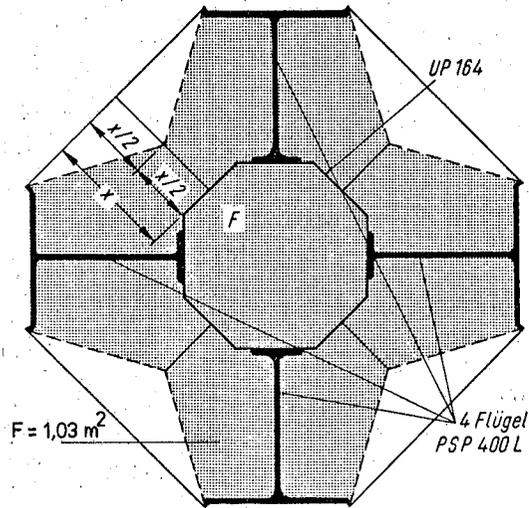
5. Kurzbericht über Planung, Entwurf und Bau des Elbehafens Brunsbüttel

Das vorliegende Bauwerk wurde 1963/64 geplant und 1965/66 ausgeführt. Es mußte an der Elbe nahe der Mündung des Nord-Ostsee-Kanals in einem Gelände errichtet werden, in dem i.M. bis NN - 22,0 m (= SKN - 20,7 m) breiiger Kleiboden anstand, dem tragfähiger Sand als geeigneter Baugrund folgte (Abb. 6 und 7).

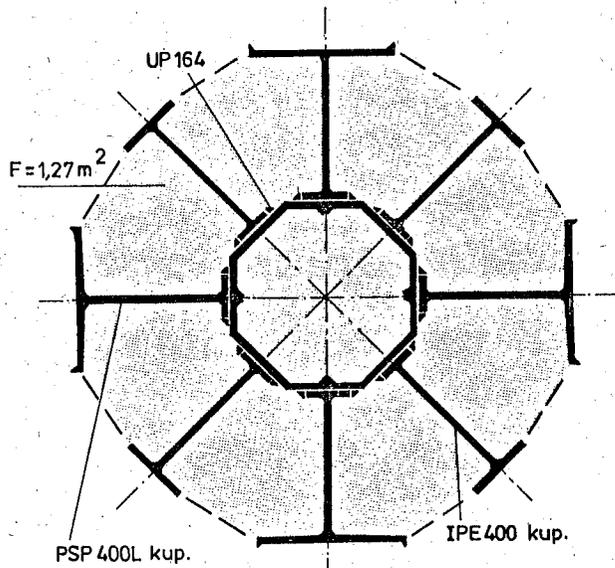
Bei einem Kaiplanum auf NN + 6,62 m sollte die Hafensohle zum Betrieb mit Schiffen von 100.000 dwt im Endausbau auf NN - 15,30 m liegen. Auf eine Bauwerksentwässerung wurde von vornherein verzichtet.

Die generelle Planung sah zunächst einen zentralen, bis O.K. Planum mit Sand ausgefüllten rd. 300 m langen Umschlagbereich mit seitlich anschließenden Stein-Leitdämmen vor. Bald nach Beginn der genauen Bodenaufschlüsse stand aber fest, daß der vorhandene sehr weiche Baugrund Steindämme nicht tragen konnte und daher die Leitwände in Spundwandbauweise (Abb. 6) errichtet werden mußten. Für den eigentlichen Umschlagbereich konnte aber nur durch einen großräumigen Ersatz des weichen Bodens durch Sand eine technisch einwandfreie und wirtschaftliche Lösung erreicht werden. Die im folgenden gebrachten Abb. 6 bis 10 geben einen generellen Überblick über den Kleiersatz, das Arbeitsprogramm für die Sandauffüllung und das Kaimauerbauwerk. Weitere Einzelheiten und auch besondere Angaben über die zu lösenden Probleme können dem Werk: Agatz A. und Lackner E.: „Erfahrungen mit Grundbauwerken“, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1977, Kap. 5.1.2.11 und 17.3 entnommen werden.





Lösung mit 4 Fußflügeln



Lösung mit 8 Fußflügeln

Abb. 5: Pfahlfußausbildung der Ermittlung der Spitzendruckfläche  
(Entnommen aus: „Die Bautechnik“ 52 (1975), H. 6, S. 198)

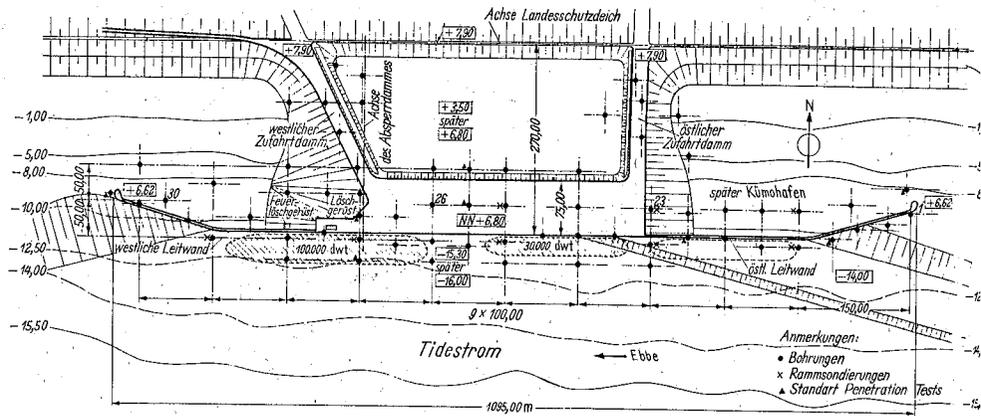


Abb. 6: Übersichtsplan des Elbehafens Brunsbüttel. Ausbau 1965 – 1966 mit Angabe der Bohrungen und Sondierungen

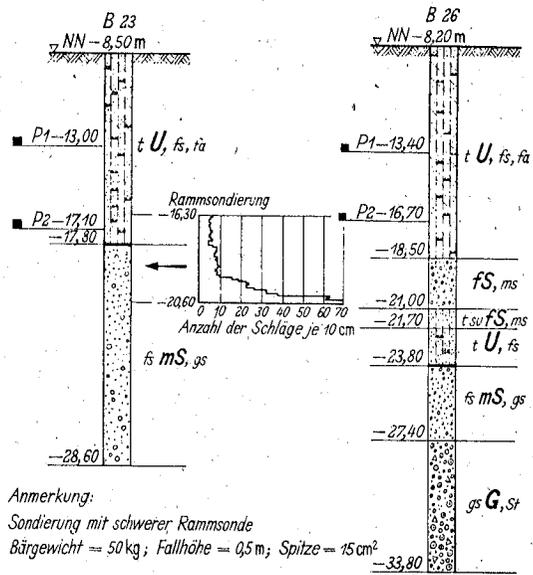


Abb. 7: Zwei kennzeichnende Bohrungen, B 23 und B 26 und Rammsondierung bei B 23

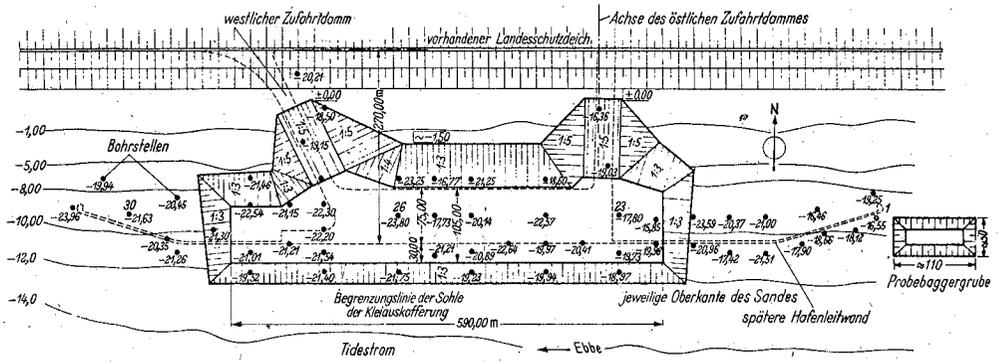


Abb. 8: Kleiauskofterung für den Bodenersatz mit Angabe der Bohrstellen und der jeweiligen Oberkante des tragfähigen Sandes

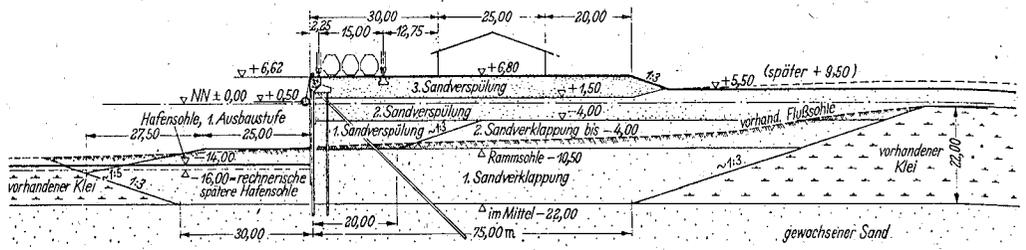


Abb. 9: Normalquerschnitt der Kaianlage mit Arbeitsprogramm für das Sandeinbringen

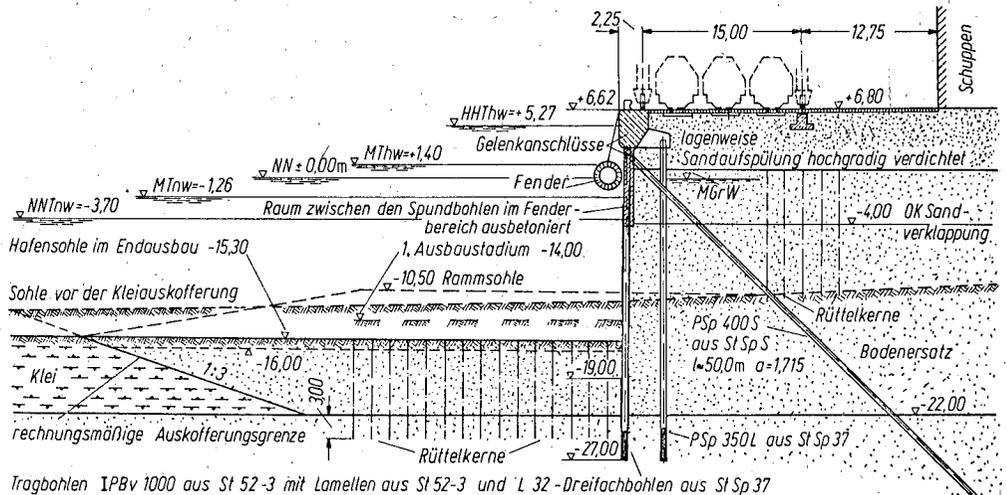


Abb. 10: Ausführungsquerschnitt im voll aufgefüllten Bereich

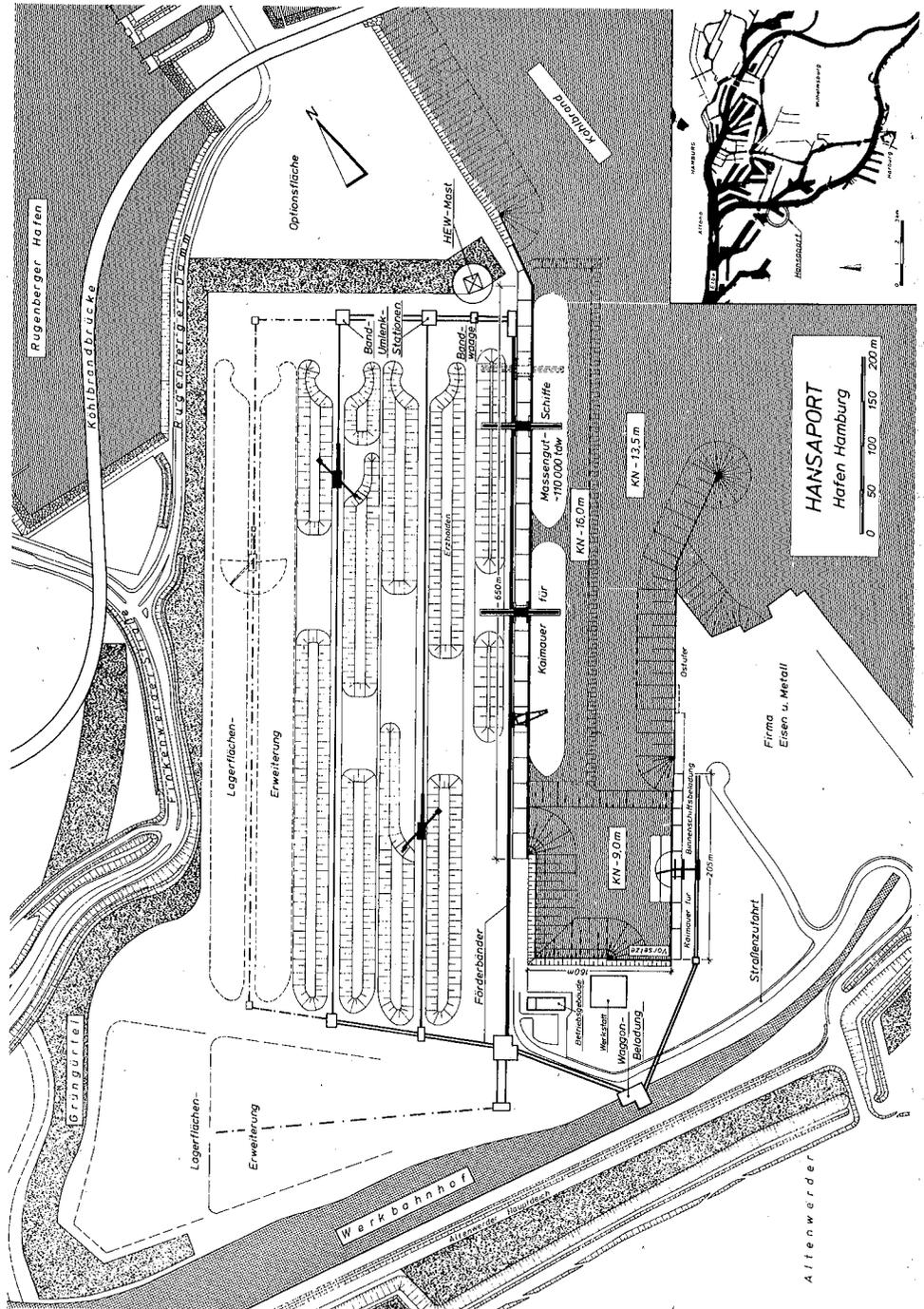


Abb. 11: Übersichtsplan Hansaport, Hamburg

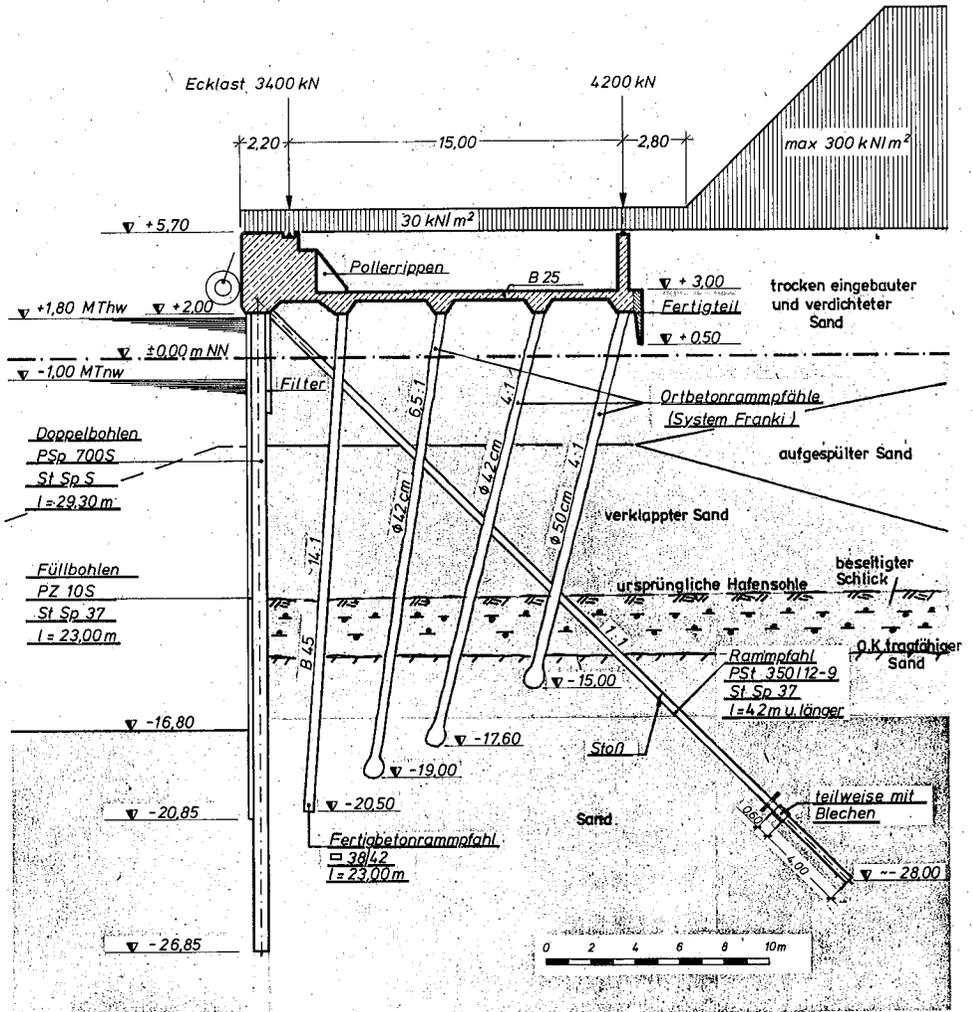


Abb. 12: Querschnitt durch die Hansaport - Kaimauer

## 6. Kurzbericht über die Hansaport-Kaimauer in Hamburg

Ein Beispiel für Bodenaustausch bei Kaimauerbauten im Hamburger Hafen ist die Hansaport-Kaimauer (Abb. 11 und 12). Das Bauwerk liegt im ehemaligen Sandauhafen. Zur Erzverladung mußte hier eine Kaimauer erstellt werden, welche die weit ausladenden Kai-  
brücken tragen konnte sowie die Herstellung einer Hafensohlenlage auf NN - 16,00 m ermöglichte. Wegen der späteren Nutzung mit hohen Erzhalde hinter der Kaimauer ließen die in der Natur anstehenden Schlick- und Kleischichten im Hafenbecken bereits bei den Vorentwürfen ohne Bodenersatz sehr unwirtschaftliche Kaimauerbauten erwarten. Ein Entfernen der Weichschichten mußte daher sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus späteren betrieblichen Gründen im Einflußbereich der Kaimauer angeordnet werden. Die Weichschichten wurden mittels Eimerkettenbaggern ausgehoben (Abb. 12), bevor der sandige Ersatzboden eingebracht werden konnte.

Es mußte mit einer erheblichen Sinkstoffführung des Hafenwassers gerechnet werden, wie auch mit einer mehr oder weniger mit Klei verunreinigten Baggergrubensohle. Zur Erreichung einer Störschicht mit nur minimaler Schichtdicke wurde aufgrund vorliegender Erfahrungen der Sandboden im Bereich der Kai-  
trasse soweit wie möglich durch Verklappen eingebracht. Die hinter dem so erstellten Unterwasserdamm, dessen Krone aus baubetrieblichen Gründen auf NN - 4,0 m liegen mußte, fehlenden Sandmengen wurden sodann landseitig aufgespült und mittels Raupen hinter die Kaimauer geschoben.

In der statischen Berechnung wurde in der ehemaligen Baggergrubensohle eine 1,0 m dicke Mischbodenschicht berücksichtigt.

Im vorliegenden Fall wurde auch die Pfahlreihe unter der landseitigen Kranbahn schräg angeordnet. Dies führte zu einer zusätzlichen Entlastung der Ankerpfahlreihe. Dabei mußte aber eine stärker wechselnde Axialkraftbeanspruchung der Rostplatte in Kauf genommen werden, die durch eine entsprechende Verdichtung des Sandbetts hinter dem Überbau vermindert werden kann. Bei schweren Belastungen aus den Kai-  
brücken ist es aber fallweise zweckmäßig, die Pfahlreihe unter der landseitigen Kranbahn lotrecht anzuordnen und den Kranbahnbalken entsprechend steif auszubilden.

Weitere Einzelheiten zum vorliegenden Bauwerk können der Veröffentlichung: Höfer, R., Schrader J. P., Thomas E.: „Hansaport - Eine neue Umschlaganlage für Massenschüttgut im Hamburger Hafen“, Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 36. Band, 1977/78, S. 111 bis 127, entnommen werden.

## 7. Schlußbemerkungen

Unter Berücksichtigung der Empfehlungen E 109 und E 110 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der HTG und der DGEG ist es heute möglich, auch bei tiefreichendem schlechten Baugrund unter Anwendung von Bodenersatz Großkaimauern wirtschaftlich und sicher zu errichten. Die gebrachten Anwendungsbeispiele geben dazu weitere Anregungen.