Abteilung II — Seeschiffahrt

Frage 1

Fortsetzung der Untersuchungen der vorhergehenden Kongresse (XVII., XVIII. und XIX.):

a) Entwurf und Ausführung von Molen, Anlegedalben und Anlegebrücken für große Schiffe (Tanker, Erzfrachter usw.) an der Küste, in den Flußmündungen und an den großen Strömen.

b) Zulässige Amplitude der Dünung.

c) Aufprallgeschwindigkeit.

d) Festmachevorrichtungen.

e) Gründungen, besonders auf nachgiebigem Baugrund.

Von Dr.-Ing. Erich Lackner, Beratender Ingenieur, Prüfingenieur für Baustatik, Bremen, und Dr.-Ing. Walter Hensen, Professor, Ordinarius für Grundbau und Wasserbau an der Technischen Hochschule Hannover.

Thema

I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven.

II. Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen.

Zusammenfassung

I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven

Im Jahre 1958 ist in Wilhelmshaven eine nach modernsten Gesichtspunkten geplante Öllöschbrücke für Tanker bis zu 100 000 tdw ausgeführt worden. Trotz der schwierigen Bauarbeiten in freier See und auch in den Wintermonaten konnte die Brücke in nur 11monatiger Bauzeit mit verhältnismäßig niedrigem Kostenaufwand erstellt werden.

Für Planung, Entwurf, Bemessung und Bauausführung wurden dabei ganz bestimmte zum Teil allgemein gültige Grundsätze erarbeitet und beachtet, die im folgenden kurz zusammengefaßt werden.

1. Der Standort muß so gewählt werden, daß in Zukunft größte Tanker die Umschlagsanlage ohne Schwierigkeiten erreichen können, genügend Platz für das als Puffer erforderliche Tanklager vorhanden ist, die örtlichen Verhältnisse für die Errichtung und den Betrieb von Brücke und Tanklager geeignet sind und die geographische Lage zu den Hauptverbrauchszentren so günstig ist, daß das Rohöl zu den dort zu errichtenden Raffinerien per Pipeline oder sonstige Transportmittel möglichst billig geliefert werden kann.
2. Die Ausbaugröße ist so zu wählen, daß die teueren Schiffe ohne lange Wartezeiten schnell abgefertigt werden könnnen und auch für die Zukunft noch genügend Erweiterungsmöglichkeiten bestehen.
3. Die Ausbauform moderner Ölhäfen für Supertanker muß den erforderlichen großen Wassertiefen von mindestens 15 m unter SKN angepaßt werden. Die Pump-

fähigkeit des Umschlaggutes beeinflußt und erleichtert die Ausbildung. Ölumschlagsanlagen werden heute in Form offener Pierbrücken bis in die erforderliche Wassertiefe vorgestreckt. Sie setzen sich zusammen aus dem Landanschluß zum Tanklager, der Zufahrtsbrücke, dem Kreuzkopf, der Löschbrücke mit den Löschköpfen, den unabhängig davon ausgebildeten Anlegebauwerken und den Festmacheeinrichtungen mit den zugehörigen Stegen. Die Löschbrücke wird so gut wie möglich in die Stromrichtung gelegt.

4. Einwandfreie Planungs- und Entwurfsgrundlagen bilden die wichtigste Voraussetzung für eine gute Lösung und geringe Baukosten. Vor Beginn der eigentlichen Entwurfsarbeiten müssen daher die örtlichen Verhältnisse betreffend Wind, Wetter, Sicht, Tide, Wasserstände, Sturmfluten, Strömungen, Eisgang, Bodenaufbau, Bodenwerte usw. genauestens bekannt sein, desgleichen die in Frage kommenden Schiffsgrößen mit der Entwicklungstendenz, die Häufigkeit der Schiffsbelegungen und die Vorgesehene Art des Anlegens mit oder ohne Schlepperhilfe.

5. Die Berechnungsgrundlagen, wie Ansatz der Kräfte und deren Zusammenfassung zu Lastfällen, die Festlegung der zulässigen Spannungen und Sicherheiten in Abhängigkeit von den Lastfällen müssen so festgelegt werden, daß unter Beachtung der allgemeinen Vorschriften den besonderen Verhältnissen bei Ölbrücken Rechnung getragen wird.

6. Die Grundmaße der Brückenkonstruktion richten sich bei Großanlagen vor allem nach den unterzubringenden Rohrleitungen. Brücke und Rohrleitungen können auf ganzer Länge eben ausgeführt werden. Die Fahrbrücke wird so hoch über den Rohrleitungen angeordnet, daß alle Rohrkreuzungen unter der Brücke ausgeführt werden können. Auf der Zufahrtsbrücke können die Rohrleitungen beidseitig, auf der Löschbrücke aus Sicherheitsgründen nur landseitig, verlegt werden. Die Fahrbahnbreite richtet sich nach der Brückenlänge und den Sichtverhältnissen. Bei langen Brücken empfiehlt sich eine 5,50 m breite Fahrbahn mit einer Fahrspur und einer Standspur. Letztere ist für die Arbeit eines Montagekranes wichtig. Die Fahrbrücke wird am besten ohne Querscheiben ausgebildet. Die Brückengründung wird zweckmäßig mit Pfählen so ausgeführt, daß Strömung und Eisgang so wenig wie möglich behindert und größere Kolkbildungen in der Hafensohle vermieden werden. Die Pfahlgründungen werden durch Jochbalken aus Stahlbeton zusammengefaßt, die mit der darüber liegenden Fahrbahnbrücke biegesteif verbunden werden. Bei Großanlagen werden die Stahlbetonteile zweckmäßig als Fertigteile an Land hergestellt und mittels schwerem Gerät eingebaut.

7. Die Wahl der Anlegekonstruktion ist für die Baukosten und für den späteren Betrieb von besonderer Bedeutung. Sie wird je nach Ausbildung entsprechend weit vor den Löschköpfen errichtet. Bei großen Wasserstandsschwankungen eignen sich am besten elastische Stahldalben mit vorgehängter Fenderschürze aus tropischem Hartholz. Jeder Liegeplatz wird mit vier Dalben ausgerüstet, von denen die beiden äußeren vor allem beim Anlegen beansprucht werden und die beiden inneren als Schutzdalben für den Löschkopf dienen. Die Dalben sollen mit ihrer Vorderkante etwa 5 m vor Löschkopfvorderkante liegen.

8. Die Bemessung elastischer Stahldalben wird für die bei ordnungsgemäßen Anlegemanövern zu erwartende kinetische Energie so vorgenommen, daß der maximale Anlegedruck in einer Größe bleibt, die das Schiff nicht gefährdet. Außerdem muß der Dalben im Liegebetrieb den Winddruck und sofern vorhanden den Strömungsdruck und deren Auswirkungen aufnehmen können. Die kinetische Energie richtet sich nach der Größe der Schiffe und ihrer Anlegegeschwindigkeit quer zum

Liegeplatz. Letztere hängt ab von der Lage der Brücke und den Anfahrbedingungen. Für die zu berücksichtigenden Anlegegeschwindigkeiten liegen Erfahrungswerte vor. Da bei richtigem Anlegen nicht die gesamte Energie von einem einzigen Dalben aufgenommen werden muß, wird mit einem Abminderungsfaktor gerechnet, der nach deutscher Praxis zwischen 0,4 und 0,5 liegt. Für Wilhelmshaven mußten die Dalben so für 60 tm Arbeitsvermögen bemessen werden, wobei Spannungen an der Streckgrenze zugelassen wurden.

9. Die Festmacheeinrichtungen werden zweckmäßig als Pollerdalben völlig unabhängig von der Löschbrücke gegründet. Ihre Lage richtet sich nach dem Vertäuplan, ihre Bemessung nach den örtlichen Verhältnissen und den anlegenden größten Schiffen. In Wilhelmshaven wurden die Hauptpollerdalben vor Kopf und am Ende eines jeden Liegeplatzes für 250 t Trossenzug und die übrigen Dalben für 125 t Trossenzug bemessen. Die Pollerhauben wurden ersetzt durch Sliphakenstühle mit 1 bis 3 Sliphaken von je 125 t Tragkraft. Diese Ausrüstung hat sich bestens bewährt.

10. Für die Bauausführung in freier See eignen sich besonders sogenannte „Hubinseln" und die Anwendung von Stahlbeton-Fertigteilen. Die Korrossion von Stahlbauteilen unter Wasser muß besonders berücksichtigt und durch geeignete Gegenmaßnahmen in ihrer Wirkung ausgeschaltet werden.

II. Auswirkungen langperiodischer Wellen in Häfen

In einem Grundsatzmodell mit rechteckigem Hafenbecken wurde die Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen untersucht. Von den verschiedenen Möglichkeiten zur Dämpfung der im Hafenbecken u. U. auftretenden Resonanzschwingungen erwies sich der Einbau von Quermolen in verschiedener Lage, Länge und Anordnung als zweckmäßige Maßnahme, die über ein breites Frequenzband wirksam bleibt; die Quermolen sind dabei in den meisten Fällen mit dem Bestimmungszweck des Hafens zu vereinbaren. Die am idealisierten Hafenmodell gewonnenen Erkenntnisse können bei Modelluntersuchungen für gegebene Häfen beliebiger Gestaltung als Richtlinien benutzt werden.

Inhalt

Seite

I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven 170

1. Standortfrage 170
2. Ausbaugröße 170
3. Ausbauform moderner Ölhäfen 172
4. Planungs- und Entwurfsgrundlagen 173
5. Berechnungsgrundlagen 177
6. Grundmaße der Brückenkonstruktion, Einzelheiten der Ausbildung 180
7. Wahl der Anlegekonstruktion 184
8. Bemessung elastischer Stahldalben und ihre Ausbildung 185
9. Ausbildung der Festmacheeinrichtungen in Wilhelmshaven 188
10. Bauleistungen in Wilhelmshaven 192

Seite

II. Auswirkungen langperiodischer Wellen in Häfen 195

1. Vorbemerkung 195

2. Modellversuche 195

3. Ergebnis 199

I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven [1])

1. Standortfrage

Der überwiegende Teil des Rohöls wird in den sogenannten Entwicklungsländern gewonnen und in den hochindustrialisierten Ländern verbraucht. Der Weg von der Gewinnnungsstelle bis zum Verbraucherland führt im allgemeinen über See. Das Rohöl muß dabei in Seehäfen für Ölumschlag gelöscht, zwischengelagert und zu den in den Verbrauchszentren liegenden Raffinerien befördert werden. Die Zwischenlagerung in einem leistungsfähigen Tanklager ergibt sich aus der stoßweisen Anfuhr des Rohöls in Großschiffen und dem kontinuierlichen Weitertransport in einer Pipeline oder sonstigen Transportmitteln wie Tankwagen oder kleineren Tankschiffen. Zur Erzielung geringer Rohölkosten am Ort der Verarbeitung ist daher die richtige Wahl des Standortes einer Löschbrücke von besonderer Bedeutung. Da die Seetransportkosten des Rohöls mit steigender Schiffsgröße abnehmen, muß eine Großtanker-Löschanlage in einem Küstengebiet errichtet werden, das in Zukunft die für größte Tankschiffe notwendige Wassertiefe aufweist. Außerdem müssen die technischen Voraussetzungen für die Errichtung des erforderlichen Tanklagers und der Umschlagsbrücke bei tragbarem Kostenaufwand gegeben sein, ohne daß die Kosten für den Weitertransport des Rohöls zu den Raffinerien zu hoch werden.

Die Standortfrage muß daher in jedem Falle sorgfältigst untersucht werden.

Für die Pipeline Nordsee–Ruhrgebiet–Rheinland ergab sich auf Grund sorgfältiger Untersuchungen des Bauherrn, der Nord-West Oelleitung GmbH. (NWO) der am tiefen Wasser der Jade gelegene Heppenser Groden bei Wilhelmshaven als besonders geeignet (Bild 1). Dieser Standort entsprach auch den sonstigen übergeordneten wirtschaftlichen und verkehrstechnischen Belangen, was in jedem Falle angestrebt werden muß.

2. Ausbaugröße

Ausbaugröße und Ausbaustufe müssen sich nach dem zu erwartenden Umschlag richten. Um teuere Liegezeiten der Tanker zu vermeiden, muß jede Öllöschanlage in Bau und Ausrüstung so gestaltet werden, daß die ankommenden Schiffe im Normalfalle ohne Verzug anlegen, mit hoher Pumpleistung entladen werden und jederzeit ablegen können.

An der Ölbrücke Wilhelmshaven sollen in den ersten Jahren rd. 9 Mill. Jahrestonnen Rohöl umgeschlagen werden, mit einer späteren Leistungssteigerung auf rd. 20 Mill. t. Nach der Inbetriebnahme der Pipeline wird zunächst mit etwa 300 Tankern pro Jahr gerechnet, mit einem späteren Anstieg auf 700 und mehr Tankern bis zu 100 000 tdw.

Die Öllöschbrücke wurde daher vorerst für drei Großschiffsliegeplätze ausgebaut. Sie wird in einer zweiten Ausbaustufe auf sechs Großschiffsliegeplätze erweitert (Bild 2). Zusätzliche Erweiterungen für kleinere Tanker sind durch Fingerpiers zwischen der Hauptlöschbrücke und dem Ufer möglich.

---

[1]) Die Bilder sind der Veröffentlichung des Verfassers: „Entwurf und Baudurchführung der großen neuen Ölumschlagsbrücke in Wilhelmshaven", Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 23./24. Band 1955/57, Springer-Verlag Berlin, 1959, entnommen.

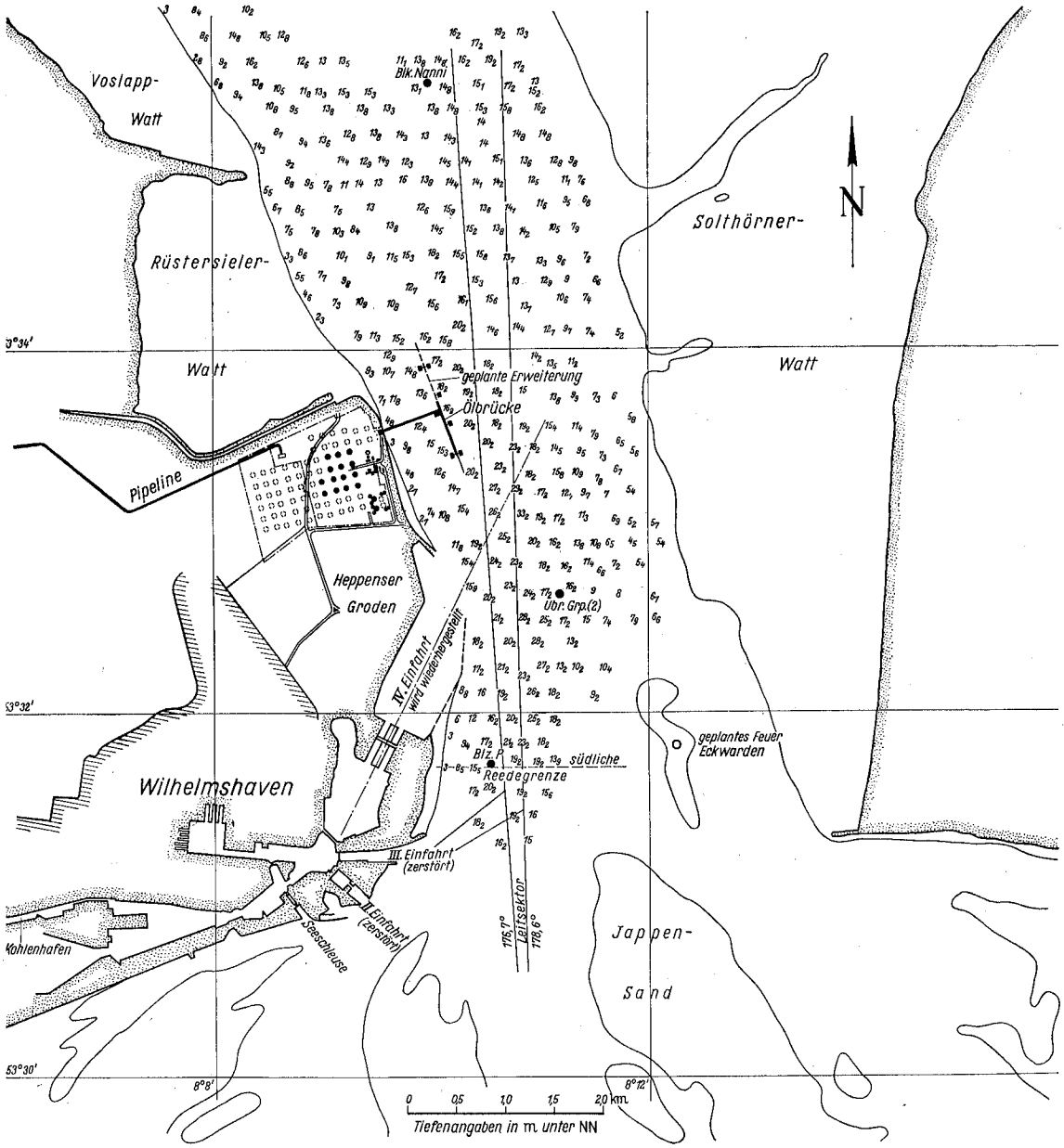


Bild 1

Lage der Ölbrücke im Raum Wilhelmshaven

Umschlagsanlage und Tanklager sind so ausgebildet und gesteuert, daß jede Raffinerie das für sie aus Übersee angelieferte Rohöl tatsächlich erhält. Für das Tanklager wurde ein 1,5 Mill. m² großes Gelände erworben und hierauf in der ersten Ausbaustufe 441 000 m³ Tankraum errichtet, das sind 14 Rohöltanks ⌀ 55 m, 13 m hoch, mit je 31 500 m³ Inhalt (Bild 1). Der weitere Ausbau wird dem Bedarf angepaßt.

Zur Versorgung der Schiffe mit Bunkeröl mußten auf dem Heppenser Groden auch leistungsfähige Bunkeranlagen errichtet werden.

Auch sonst wurden alle Voraussetzungen für eine rasche und einwandfreie Versorgung der Schiffe mit Trinkwasser, Ballastwasser, Lebensmitteln und dergleichen geschaffen und durch gute Verkehrswege dafür gesorgt, daß die Mannschaften trotz der kurzen Liegezeit Gelegenheit haben an Land zu gehen.

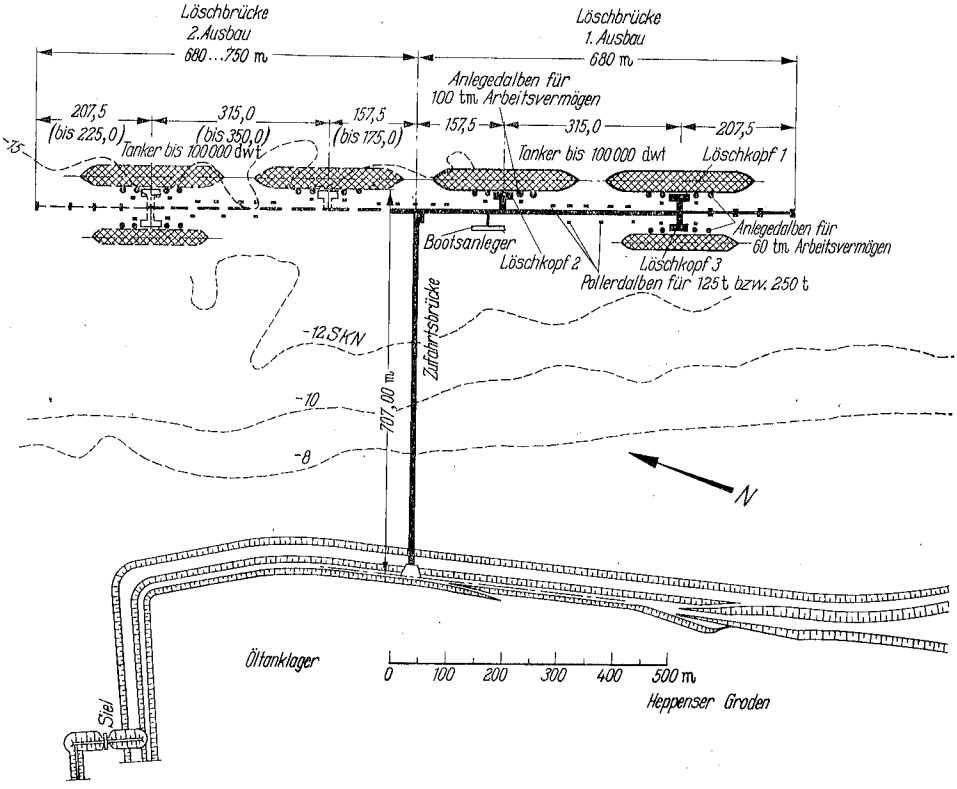


Bild 2
Genereller Übersichtsplan der Ölbrücke

3. *Ausbauform moderner Ölhäfen*

Infolge des wirtschaftlicheren Rohöltransportes in Großschiffen zeigt der Tankerbau seit Jahren den Trend zu immer größeren Supertankern. Gegenüber sonstigen Umschlagshäfen wird in Ölhäfen das Be- und Entladeproblem durch die Pumpfähigkeit des Materials erleichtert. Diese Eigenschaft in Verbindung mit den erforderlichen großen Wassertiefen für Supertanker und der Zwang zu einer möglichst wirtschaftlichen Gestaltung

führten zu einer neuen Form von Hafenanlagen für Großtanker. Es sind dies weit in die See oder den Seeweg bis in das ausreichend tiefe Wasser vorgestreckte offene Pierbrücken. Diese Anlagen unterscheiden sich in Planung, Konstruktion und Baudurchführung grundlegend von den üblichen Umschlagshäfen für Stückgut oder Massengut.

Bei den neuen Hafenanlagen für Großtanker müssen die Bauelemente unter schwierigen Strömungs-, Wellen-, Wind- und Wetterverhältnissen eingebracht werden. Dies muß in der Planung, Konstruktion und Bauausführung berücksichtigt werden, um das Risiko in tragbaren Grenzen zu halten. Alle Anlagen müssen dabei auf das notwendige Minimum beschränkt, aber entsprechend sinnvoll und solide ausgebildet werden.

Das neue System erwies sich auch für Wilhelmshaven als die sowohl in der Anlage als auch im Betrieb technisch und wirtschaftlich zweckmäßigste Lösung (Bilder 1, 2 und 8).

Ölumschlagsbrücken werden heute mit besonders ausgerüsteten Löschköpfen versehen. Sie befinden sich etwa in der Mitte des jeweiligen Liegeplatzes und tragen das erforderliche Schlauchgerüst für die Be- und Entladung. Die Schiffe liegen jedoch zweckmäßig nicht unmittelbar an diesen Löschköpfen, sondern an unabhängigen Anlegekonstruktionen. Diese müssen den Anlegestoß abfedern und den Liegedruck aufnehmen, ohne die eigentliche Brücke zu beanspruchen.

Gleichfalls unabhängig von der Löschbrücke werden die Festmacheeinrichtungen ausgebildet und gegründet. So können sich Überlagerungen nicht nachteilig auf die Brücke auswirken. Die Lage der Festmacheeinrichtungen richtet sich nach dem Vertäuplan der Schiffe.

Die Zufahrtsbrücke erhält den erforderlichen Landanschluß zum Tanklager und zu den Verkehrswegen sowie die erforderliche Anzahl von Rohrleitungen, die beidseitig der Fahrbrücke verlegt werden können. Auf der Löschbrücke liegen die Rohre aus Sicherheitsgründen nur landseitig.

Obige und weitere wichtige Grundsätze sind bei der Planung und beim Bau der neuen Ölbrücke in Wilhelmshaven in allen Konsequenzen berücksichtigt worden.

4. Planungs- und Entwurfsgrundlagen

Voraussetzung für eine einwandfreie Planungs-, Entwurfs-, Ausschreibungs- und Angebotsbearbeitung und eine sinnvolle Bauausführung ist die genaue Kenntnis der örtlichen Verhältnisse betreffend Wind, Wetter, Sicht, Tide, Wasserstände, Sturmfluten, Strömungen, Eisgang, Bodenaufbau, Bodenwerte usw. Dank der über lange Zeiträume laufenden Beobachtungen der zuständigen Dienststellen bereitete das Zusammenstellen der meisten Unterlagen in Wilhelmshaven keine besonderen Schwierigkeiten, zum Unterschied von Entwicklungsländern, in denen langjährige Beobachtungen häufig noch fehlen.

Vor Beginn der detaillierten Planungs- und Entwurfsarbeiten für eine Ölbrückenanlage empfiehlt es sich, eingehende Strömungs- und Modelluntersuchungen durchzuführen und die Ergebnisse beim Entwurf zu berücksichtigen. Sie sollen vor allem die Gefahr von Kolken sowie die Auswirkungen der möglichen Strömungen, des Eisganges usw. auf die vorgesehene Grundlösung der Brücke und auf das Anlegen, Liegen und Ablegen der Schiffe erkunden.

Im Falle Wilhelmshaven sind diese Versuche vom Franziusinstitut der Technischen Hochschule Hannover durchgeführt worden.

Auf Grund allgemeiner Erfahrungen, der Bodenaufschlüsse und der sonstigen besonderen örtlichen Bedingungen stand fest, daß in Welhelmshaven nur eine offene Pierkonstruktion auf verhältnismäßig schlanken, keine tiefen Kolke verursachenden Pfählen in Frage kam. Die Pfähle mußten allerdings stark genug sein, um neben den Beanspruchungen aus den Brückenüberbauten, Rohrlasten, Winddruck und Strömungsdruck, vor allem Eisdruck und Eisstoß sowohl im Bau als auch im Betrieb sicher aufnehmen zu können.

Mit Rücksicht auf den Untergrund durften im Bereich der Ölbrücke Wilhelmshaven keine größeren Baggerarbeiten ausgeführt werden. Die seeseitigen Anlegekonstruktionen mußten daher mit ihrer Vorderkante 707 m vom Deich entfernt angeordnet werden. Sie befinden sich so in einem Gebiet der für 100 000-tdw-Tanker erforderlichen natürlichen Wassertiefe von 15 m unter SKN. Örtliche geringe Glättungen von Sohlenriffeln mußten hierbei in Kauf genommen werden. Größere Baggerungen, die bei der vorhandenen Bodenformation gefährliche Folgen haben konnten, wurden jedoch vermieden. Sie hätten die diluvialen Kies-, Grobsand- und verkitteten Feinsandschichten, die als Deckschichten über den vorwiegend tertiären, schluffigen Mittel- und Feinsanden liegen und die Sohle stabilisieren, beseitigt und damit die gesamte Sohle im Bereich der Ölbrücke in Bewegung gebracht, wobei die Folgen nicht abzusehen gewesen wären.

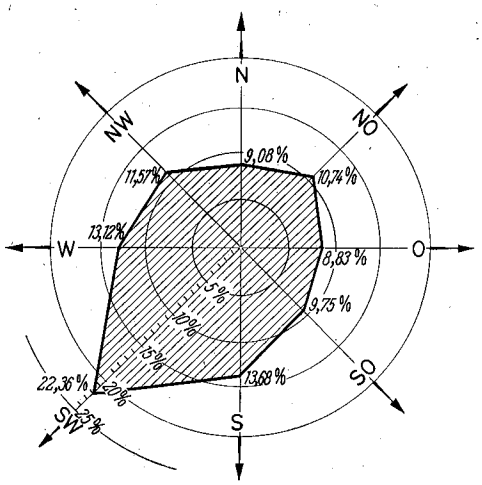


Bild 3
Jahres-Windrose für Wilhelmshaven
(Mittelwerte von 1903 bis 1918)

Um ein einfaches An- und Ablegen und ein ruhiges Liegen der Tanker sicherzustellen, mußte die Löschbrücke möglichst in die Stromrichtung der Jade gelegt werden (Bild 1).

Eingehende Untersuchungen hatten gezeigt, daß im Bereich der Brücke Flut- und Ebbstromrichtung nur um einen Winkel von 6° voneinander abweichen. Da beide Ströme etwa gleich stark sind, wurde die Löschbrückenachse in der Winkelhalbierenden, also unter 3° zum Flut- bzw. Ebbstrom, angeordnet.

Um den späteren Betrieb der IV. Einfahrt Wilhelmshaven nicht zu behindern, mußte der südlichste Pollerdalben der Öllöschbrücke mindestens 500 m von der Schleusenachse entfernt angeordnet werden.

Die nunmehr vorhandenen Fahrwasserverhältnisse in der Jade sind aus Bild 1 ersichtlich. Der Leitsektor des Leuchtturms Arngast mußte hierzu um einige Grade verschwenkt werden. Die Fahrwasserbegrenzung ist nun soweit von der Ölbrücke entfernt, daß die an der Brücke liegenden Schiffe bei langsamem Verkehr im Fahrwasser nicht mehr gestört werden. Gleichzeitig blieb das öffentliche Interesse an einer aufnahmefähigen Reede vor Wilhelmshaven gewahrt.

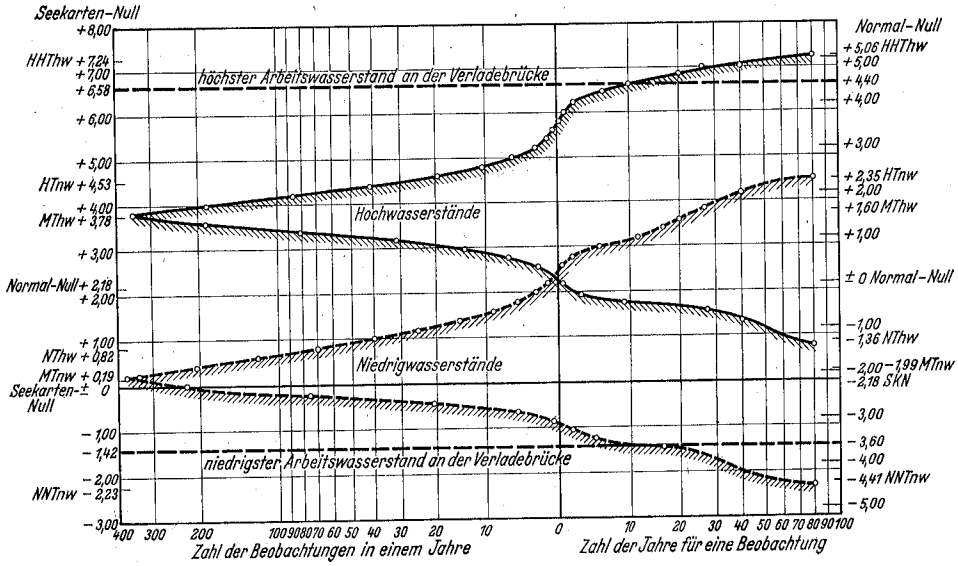


Bild 4

Häufigkeit der Wasserstände an der Seeschleuse Wilhelmshaven

Bezüglich der genauen Angaben über die sonstigen örtlichen Verhältnisse wird auf die unter [1]) genannte Veröffentlichung verwiesen. Zur allgemeinen Unterrichtung werden hier lediglich die Jahreswindrose (Bild 3), die Häufigkeit der Wasserstände (Bild 4), die extremen Tankschiffslagen beim höchsten und niedrigsten Arbeitswasserstand (Bild 5), die extremen Schlauchanschlußlagen (Bild 6) und der Lageplan der Seebohrungen vor dem Heppensen Groden (Bild 7), gebracht.

Die Windverhältnisse an der Brücke sind günstig. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten beträgt 5,7 m/sek, die größte stündliche Windgeschwindigkeit 26 m/sek. Der Windstau in der Jade kann je nach Windrichtung von − 1,30 bis + 2,00 m betragen. Die langjährigen Beobachtungen ergaben im Mittel 5,3 Sturmfluten pro Jahr. Es sind aber nur 2 sehr schwere Sturmfluten in 60 Jahren aufgetreten.

Die größte Wellenhöhe beträgt 1,30 m, die größte Strömungsgeschwindigkeit nach amtlichen Feststellungen 2,5 sm/h. Der mittlere Tiedenhub = rd. 3,60 m.

Die Häufigkeit der Wasserstände gemäß Bild 4 war maßgebend für die zu wählenden extremen Arbeitswasserstände. Man wählte im Hinblick auf die zu erwartende starke Belegung der Brücke als höchsten Arbeitswasserstand + 4,40 NN und als niedrigsten − 3,60 NN. Beide Wasserstände werden in 10 Jahren nur einmal über bzw. unterschritten.

Aus Bild 5 ist zu erkennen, daß bei der vorhandenen Sohlenlage — 15,00 SKN = — 17,24 NN auch bei größten Tankern selbst bei Wasserständen unter dem niedrigsten Arbeitswasserstand eine Bodenberührung mit Sicherheit vermieden werden kann, wenn der Zeitpunkt ihres Anlegens und die Pumpleistung entsprechend aufeinander abgestimmt werden.

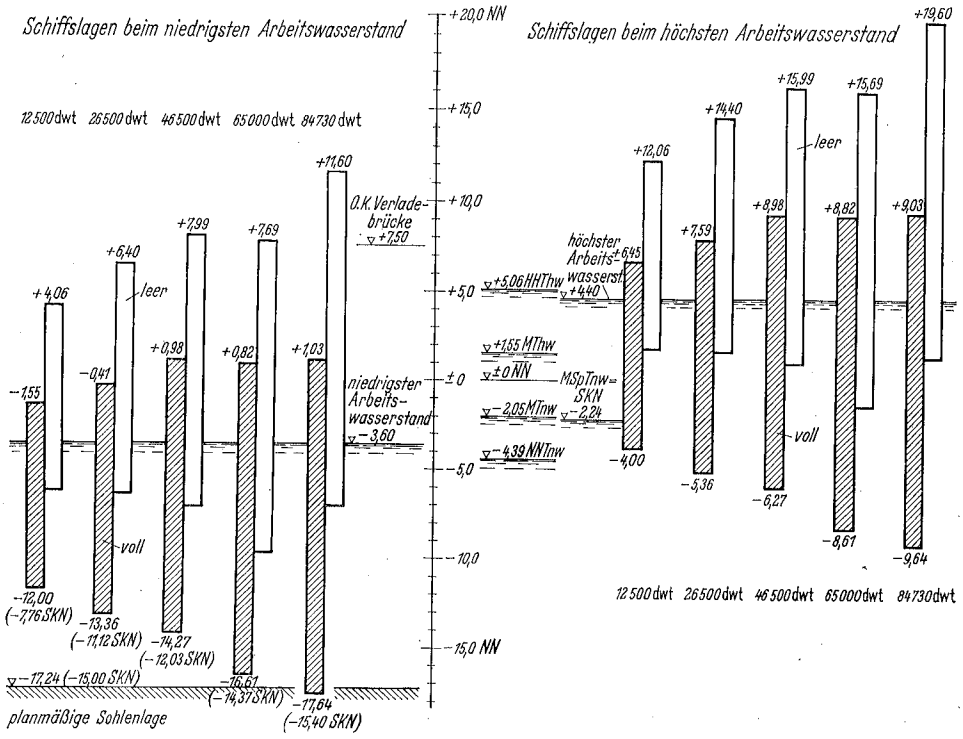


Bild 5

Extreme Tankschiffslagen beim höchsten und niedrigsten Arbeitswasserstand

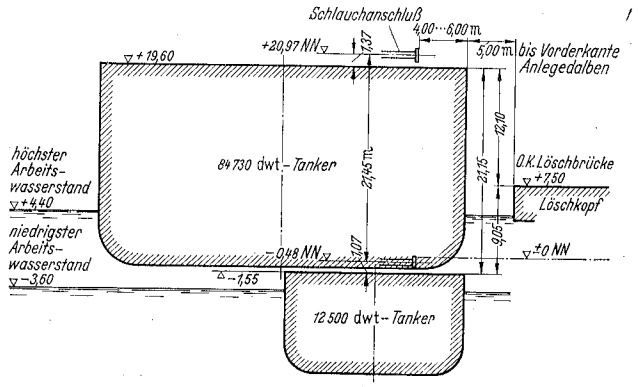


Bild 6

Extreme Schlauchanschlußlagen

Bild 6 zeigt, daß die Schlauchanschlüsse beim kleinsten in Frage kommenden Tanker von 12 500 tdw in tiefster Arbeitslage und dem in höchster Arbeitslage befindlichen 84 730-tdw-Tanker eine Höhendifferenz von 21,45 m aufweisen. Beim 100 000-tdw-Tanker ist die Differenz noch größer. Dies mußte bei den Schlauchgerüsten berücksichtigt werden.

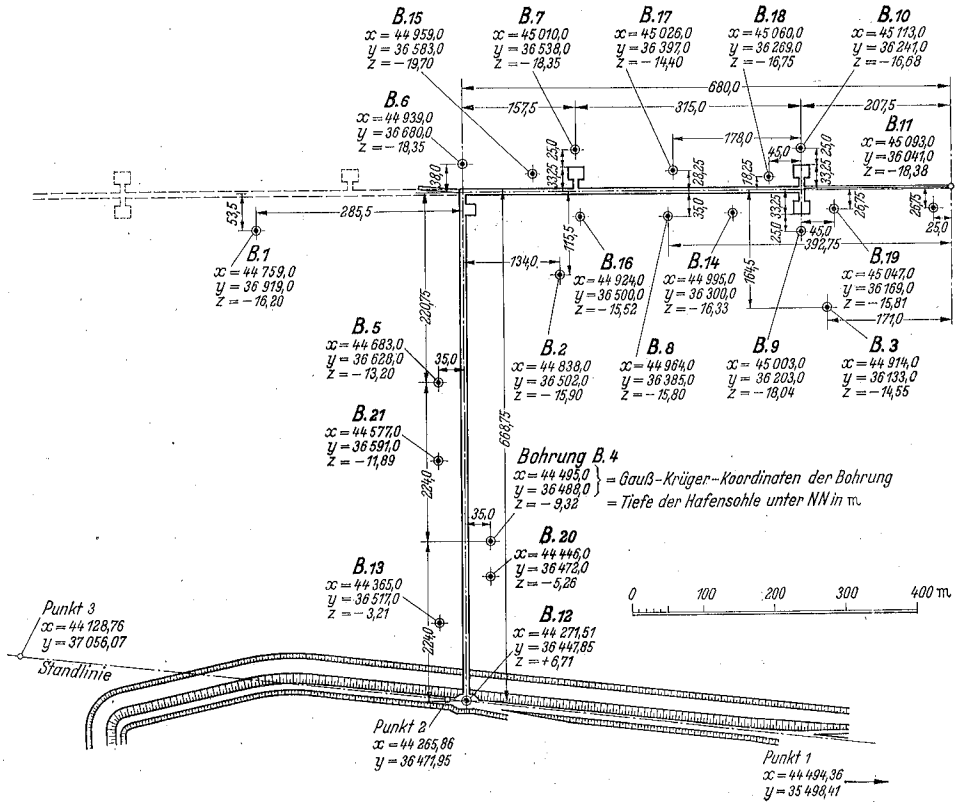


Bild 7

Lageplan der Seebohrungen vor dem Heppenser Groden

Der Untergrund an der Löschbrücke besteht vorwiegend aus Feinsand, Sand und oben aus Kies. Abweichend von den ersten drei Erkundungsbohrungen B_1, B_2, B_3 (Bild 7) wurde zwischen Kreuzkopf und Löschkopf 2 (Bilder 7 und 8) eine 6—8 m unter Hafensohle beginnende, bis zu 2,50 m dicke Lignitschicht erbohrt. Sie war vor allem für die Pollergründungen von Bedeutung, deren Pfähle wegen der aufzunehmenden hohen Zuglasten, durch die Lignitschicht hindurch, tief eingerammt werden mußten. Dank der sorgfältigen Abbohrung wurde diese Schicht rechtzeitig erkannt und die Pollergründung in diesem Bereich mit Sonderpfählen vorgenommen.

5. *Berechnungsgrundlagen*

Die Berechnungsgrundlagen müssen dem jeweiligen Projekt angepaßt werden. Die folgenden für die Ölbrücke Wilhelmshaven gestellten Forderungen sollen hierzu einen allgemeinen Überblick vermitteln.

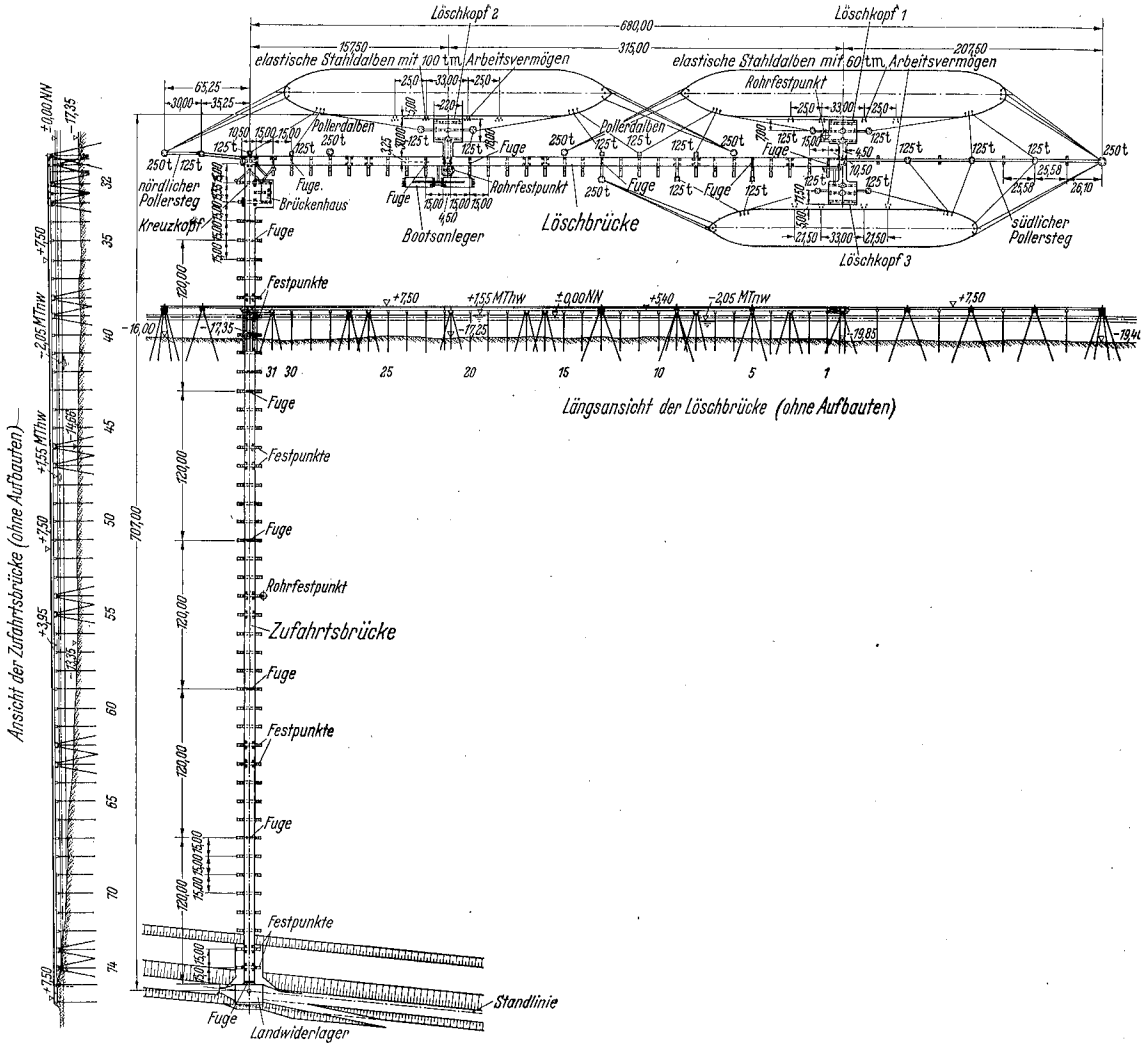


Bild 8
Erste Ausbaustufe der Ölbrücke

5.1 Vorschriften und Belastungsansätze

Es wurden die einschlägigen DIN zugrundegelegt, vor allem für:
Stahlbeton- und Spannbetonbauteile DIN 1045, 1075, 4225, 4227,
Stahlbauteile DIN 1050, 1073, 4114,
Gründungen DIN 1054,
Eigengewichte DIN 1055,
Winddruck und Bremskräfte DIN 1072.

Der Strömungsdruck wurde bei der max. Geschwindigkeit von 1,27 m/sek bei den Rohrpfählen mit einem Formfaktor für Druck und Sog c = 1,5 mit 0,125 t/m² Querschnittsfläche angesetzt.

Die Reibungskräfte wurden bei den Rollenlagern der Rohre und der Brücke mit dem Reibungsfaktor $\mu = 0{,}1$ errechnet. Für Stahlgleitlager wurde $\mu = 0{,}4$ gefordert.

Die Belastung durch Eis wurde durch eine Grundlast von 1 t/lfdm Brücke bzw. 15 t je Pfahl in möglicher Lage rechnerisch erfaßt. Durch eine besondere Eisaussteifung unter Mittelwasserhöhe kann jedoch auch der 4fache Eisdruck bzw. Stoß von den Pfahlgründungen aufgenommen werden.

Bei den elastischen Anlegekonstruktionen wurde die Bemessung für eine Anlegegeschwindigkeit quer zum Liegeplatz gemäß Empfehlung E 40 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft e. V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. gefordert [2]). Die Einbindung in den Boden wurde nach „Blum" [3]) erfaßt. Weitere Einzelheiten s. Abschnitt 8.

Die Trossenzüge wurden nach Empfehlung E 12 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen" festgelegt und zwar: Für Hauptpoller vor Kopf und am Ende eines jeden Liegeplatzes: 250 t/Pollerdalben; für die sonstigen Poller: 125 t/Pollerdalben. Die Anordnung der Pollerdalben wurde gemäß Bild 8 bzw. 15 verbindlich festgelegt. Für die Bemessung der Pollerdalbengründungen war der Pollerzug von 250 t bzw. 125 t je Block, in jeder Richtung wirkend, waagerecht anzusetzen.

Die Pollerköpfe und ihre Anschlüsse mußten für einen Zug von jeweils 250 t bzw. 125 t auch in einer bis zu 30° gegen die Waagerechte nach oben gerichteten Neigung berechnet werden.

5.2 Lastfälle

Folgende Lastfälle mußten untersucht werden, wobei die anzusetzenden Kräfte in ungünstigster Zusammenstellung berücksichtigt werden mußten:

Lastfall 1: Eigengewicht und Verkehrslasten, Rohrlasten, Strömungsdruck sowie die Hälfte der größten Rohrreibungskräfte in gleicher Richtung wirkend.

Lastfall 2: Eigengewicht und Verkehrslasten, Bremskräfte, Rohrlasten, Strömungsdruck, Windlast sowie größte Rohrreibungskräfte in gleicher Richtung wirkend.

Lastfall 3: Eigengewicht und Verkehrslasten, Bremskräfte, Rohrlasten, Strömungsdruck, Windlast, größte Rohrreibungskräfte, falls ungünstig, auch gegenläufig wirkend, Trossenzüge, Eisstoß.

5.3 Zulässige Spannungen

Unter Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse des vorliegenden Bauwerkes und der Lastannahmen, die auch ungünstigste Kombinationen erfassen, wurden folgende Spannungen zugelassen:

Brückenteile, Joche, Poller und zugehörige Pfähle

Lastfall 1: entsprechend den einschlägigen DIN-Vorschriften.

Lastfall 2: 15%ige Spannungserhöhung gegenüber Lastfall 1.

Lastfall 3: 30%ige Spannungserhöhung gegenüber Lastfall 1.

---

[2]) Sammelveröffentlichung aller bis 1959 erschienenen Empfehlungen siehe: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen" Berlin 1960, Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn.

[3]) Blum, H.: „Wirtschaftliche Dalbenformen und deren Berechnung" Bautechnik 1932 Heft 5.

Elastische Stahldalben

Für die geforderten Dalbenbeanspruchungen wurde die Fließgrenze als zulässige Spannung angesetzt.

5.4 Zulässige Belastung der Pfahlgründungen

Grenzlastspannungen im tragfähigen, nicht bindenden Boden bei Rammpfählen:

Spitzenwiderstand	q_s	= 500 t/m²
Mantelreibung	q_m	= 5 t/m²

Hierbei wurde ein so tiefes Einrammen der Pfähle in den tragfähigen Baugrund vorausgesetzt, daß eine ausreichende Verdichtung vor allem in der Umgebung des Pfahlfußes vorhanden ist und bei Stahlpfählen mit Flügeln auch die Pfropfenbildung am Pfahlfuß gewährleistet ist.

Geforderte Sicherheiten gegen Erreichen der Pfahlgrenzlast:

Pfähle der Brückenjoche:

Lastfall 1:	Zug	$\eta = 2{,}00$
	Druck	$\eta = 2{,}00$
Lastfall 2:	Zug	$\eta = 2{,}00$
	Druck	$\eta = 1{,}75$
Lastfall 3:	Zug	$\eta = 1{,}75$
	Druck	$\eta = 1{,}50$

Pfähle der Pollergründungen:

Bei Anwendung von Abreißpollern oder gleichwertigen Konstruktionen wurde sowohl für Zug- als auch für Druck $\eta = 1{,}25$ zugelassen unter der Voraussetzung, daß Stahlrammpfähle angewendet wurden, bei denen Grenzmantelreibung später infolge Verkrustung ansteigt, sonst $\eta = 1{,}50$.

6. Grundmaße der Brückenkonstruktion

Einzelheiten der Ausbildung

Moderne Ölbrücken gliedern sich in den Landanschluß, die Zufahrtsbrücke, den Kreuzkopf, die Löschbrücke, die Löschköpfe, die Anlegekonstruktion und die Festmacheeinrichtungen mit den zugehörigen Pollerstegen. Die entsprechende Gliederung für Wilhelmshaven mit den gewählten Maßen geht aus Bild 8 hervor.

Die großen Rohre werden freispannend über den Jochbalken verlegt. Hierdurch ergibt sich zwangsläufig die Trennung der eigentlichen Rohrbrücke von der Fahrbrücke. Um Schwingungen zu vermeiden, wird die Stützweite der großen Rohre im allgemeinen nicht größer als 15 m gewählt. Der Jochabstand ist somit begrenzt, sofern nicht Zwischenstützen, von der Fahrbrücke auskragend, angeordnet werden. Kleinere Rohre können unter der Brückenfahrbahn angeordnet werden mit einer Stützweite bis zu rd. 7,50 m.

Die Rohre müssen bei dieser offenen Bauweise so hoch gelegt werden, daß sie im ungünstigsten Falle nur noch von den Wellenkämmen berührt werden können.

Für Wilhelmshaven ergab sich so beim HHThw + 5,06 NN und 1,39 m größten Wellenhöhe die Rohrunterkante + 5,60 NN. Unter Berücksichtigung von 20 cm Bauhöhe der Rohrlager und eines 5 cm dicken Mörtelbettes mußte die Oberkante der Bankettbalken auf + 5,35 NN gelegt werden (Bild 9).

Bei großen Anlagen ist es zweckmäßig, Rohrführungen über der Brückenfahrbahn zu vermeiden. Das Fahrplanum muß daher so hoch über den Lagern der großen Rohre und damit der Jochbalken angeordnet werden, daß alle Rohrkreuzungen unter der Brückenfahrbahn Platz finden. Dabei ergibt sich im allgemeinen eine Höhe, die die Anordnung eines Revisionsganges unter der Brückenfahrbahn gestattet. Damit die unter der Brücke liegenden kleineren Rohre und der Revisionsgang ungehindert durchlaufen können, wird die Fahrbrücke ohne Querscheiben ausgeführt. Zur Erhöhung der Steifigkeit können die Fahrbahnplatte durchgehend und die Längsträger über den Jochbalken verstärkt werden.

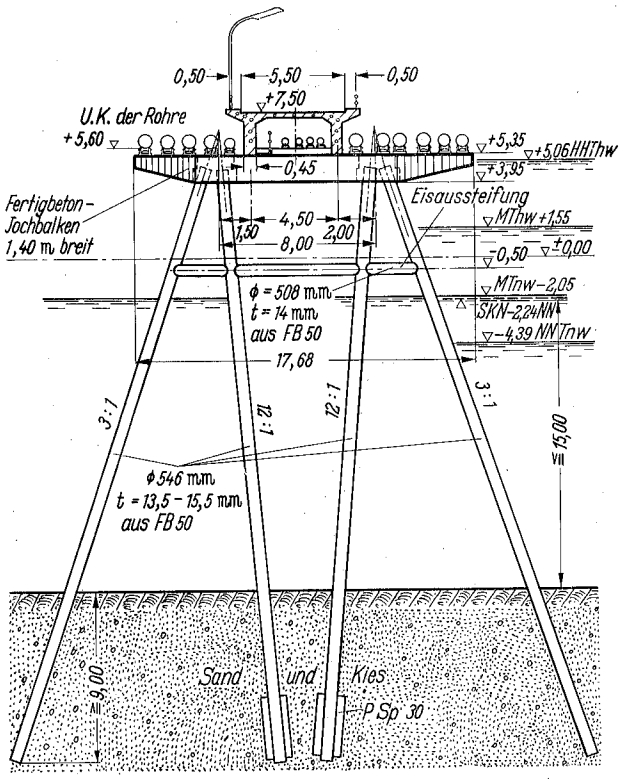


Bild 9
Querschnitt der Zufahrtsbrücke

In Wilhelmshaven ergab sich so die Oberkante der Brückenfahrbahn auf + 7,50 NN und eine Mindestdicke der Fahrbahnplatte von 25 cm (Bilder 9 und 10).

Die Rohre und damit die Fahrbahngradiente können auf ganzer Brückenlänge waagerecht geführt werden.

Die Fahrbahnbreite richtet sich nach der Brückenlänge und den Sichtverhältnissen. In Wilhelmshaven wurde sie 5,50 m breit gewählt mit 0,50 m Schrammborden bis zur Geländerachse (Bilder 9 und 10). Hierbei ergab sich eine 3,00 m breite Fahrspur und eine 2,50 m breite Standspur. Bei 5,50 m Straßenbreite ist der laufende Gegen-

verkehr kleinerer Kraftfahrzeuge, z. B. von Personenwagen, ohne Schwierigkeiten möglich. Die Fahrbahn wird für das 12-t-Regelfahrzeug bemessen. Dadurch ist es möglich, die Brücke mit einem Straßenkran zu befahren und ihn bei notwendigen Reparaturen oder Montagen an beliebiger Stelle einzusetzen.

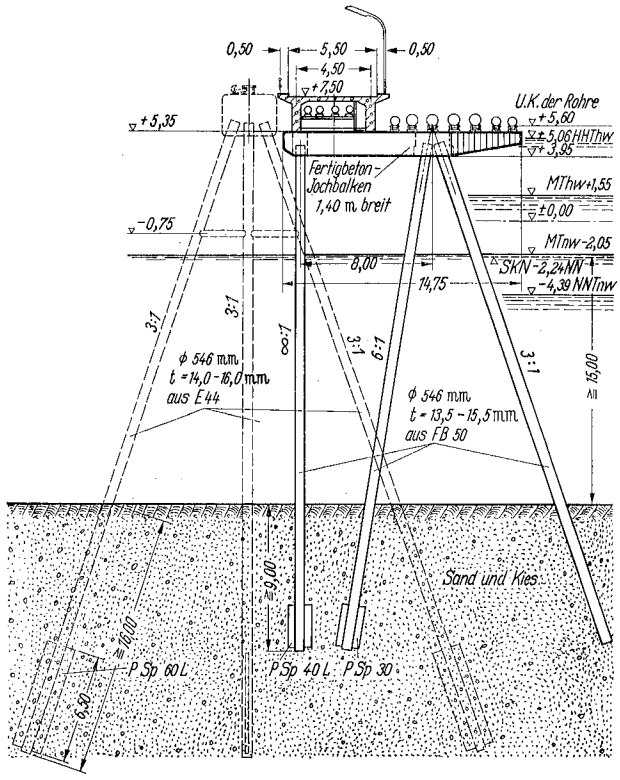


Bild 10
Querschnitt der Löschbrücke

Die Länge der Jochbalken ergibt sich aus den neben der Brückenfahrbahn aufzulagernden Rohrleitungen. In Wilhelmshaven sind die Jochbalken der Zufahrtsbrücke 17,68 m und die der Löschbrücke 14,75 m lang (Bilder 9 und 10).

Die Löschköpfe müssen den Schlauchgerüsten und den Rohrführungen angepaßt werden und auch die Unterbringung einer Gangway gestatten. Damit die Schlepper auch zwischen Schiff und Löschbrücke operieren können, muß die Löschkopfvorderkante 30 m vor der Löschbrückenvorderkante liegen (Bild 8).

In Wilhelmshaven erhalten die Brückenpfähle Drucklasten von 100 bis 180 t, die Pollerpfähle maximal 280 t Druck und 230 t Zug. Die Brückenpfähle wurden 28,0 bis 35,0 m, die Pollerpfähle bis 43,5 m lang ausgeführt.

Als Gründungspfähle wurden, abgesehen vom Landwiderlager, vor allem mit Rücksicht auf den Korrosionsschutz, nahtlose Stahlrohrpfähle ϕ 546 mm aus Feinkornstahl gewählt (Bilder 9 und 10).

Die Wandung des obersten Pfahlrohrschusses, der der Korrosion am meisten ausgesetzt ist, wurde mit einem Zuschlag von 2 mm, bei den Brückenpfählen 15,5 mm und bei den Pollerdalbenpfählen 16,0 mm dick gewählt (Bilder 10 und 13). Der anschließende Schuß ist 1,5 mm dünner. Beim untersten, ganz im Boden befindlichen Schuß wurde die Wanddicke um weitere 0,5 mm vermindert, und damit die statisch erforderlichen Dicken 13,5 bzw. 14 mm eingehalten.

Zur Verminderung der Korrosion mußten alle Außenflächen der Pfähle bis 2,0 m unter Hafensohle durch Sandstrahlung von der Walzhaut und an der Oberfläche befindlichen Lunkern befreit werden. Außerdem wurde gefordert, von Unterkante Betonüberbau bis etwa — 6,40 NN, sowie von 5,00 m über bis 2,00 m unter planmäßiger Hafensohle einen vierlagigen Steinkohlenteerpech-Kaltanstrich aufzubringen. Weiter wurden alle Vorkehrungen für einen späteren kathodischen Schutz mit Fremdstromanlage getroffen.

Die Pfähle wurden durch Veränderung der Einbindelänge in den tragfähigen Boden und durch eine besondere Fußausrüstung mit angeschweißten Stahlflügeln aus kupierten Peiner Spundwandprofilen sowie eine entsprechende Kopfausrüstung den angreifenden Lasten und dem Untergrund angepaßt.

Die Fußflügel mußten so ausgebildet und angeschlossen werden, daß bei einwandfrei gewährleisteter Pfropfenbildung die Pfahlfüße den Rammvorgang ohne Zerstörungen sicher überstehen konnten.

Um die jeweils auftretenden größten Pfahlkräfte sicher in die anschließenden Stahlbetonteile überleiten zu können, wurden die Pfahlköpfe, nach Pfahltypen variiert, mit durchgesteckten und verschweißten Eisenbahnschienen und angeschweißten Laschen ausgerüstet.

Obwohl die Pfähle sowohl im Jochbalken als auch im Erdboden voll eingespannt sind, wirken die normalen Joche in Brückenlängsrichtung infolge Biegsamkeit der Pfähle wie Pendelstützen.

Alle quer zum Brückenbauwerk angreifenden Horizontalkräfte werden laufend durch die Schrägpfahlböcke der Joche aufgenommen (Bilder 9 und 10). In der Straßenbrücke wurden Bewegungsfugen mit Rollenlagern in 120 m Abstand angeordnet (Bild 8). Die Bewegungsfugen in der Fahrbahn wurden durch eine bewährte Schleppblechkonstruktion abgedeckt.

Alle auf diese Brückenabschnitte entfallenden Längskräfte werden an den sogenannten Festpunktjochen durch je 4 in Längsrichtung stehende Pfahlböcke unter 3 : 1 aufgenommen. Als Beton wurde B 225, als Bewehrung Betonstahl I gewählt.

Im übrigen mußten die Brückenabmessungen und die Gestaltung der Einzelteile bei Wahrung der statisch-konstruktiven Belange so gewählt werden, daß die Fertigstellung des gesamten Bauwerkes in der geforderten Qualität und außerordentlich kurzen Bauzeit mit normalem Kostenaufwand möglich wurde.

Dies war nur bei Fertigteilbauweise möglich. Die 75 bzw. 65 t schweren Jochbalken der Zufahrts- bzw. Löschbrücke und die rd. 137 t schweren 14,2 m langen Teile des Brückenüberbaues wurden an Land vorfabriziert, zur Brückenbaustelle gefahren und mit einem schweren Schwimmkran eingesetzt.

Die Plomben in den Jochbalken wurden für die Überleitung der Pfahlkräfte ausgebildet und die Plomben in den Brückenfeldern zur Herstellung einer über 8 Felder durchlaufenden Brücke mit lotrechter Anschlußbewehrung an die Jochbalken. Die Plomben wurden mit B 300 geschlossen, womit eine solide, zusammenwirkende Gesamtkonstruktion erreicht wurde.

7. Wahl der Anlegekonstruktion

Die richtige Wahl und Bemessung der Anlegekonstruktion ist für die Betriebssicherheit jedes Liegeplatzes von besonderer Bedeutung. Sie muß in jedem Ausführungsfalle besonders untersucht werden. Dabei spielen neben der Frage des Anlegens mit oder ohne Schlepperhilfe, die Schiffsgrößen und die Anfahrtbedingungen, die Wind-, Wellen- und Strömungsverhältnisse, und vor allem auch die Wasserstandsschwankungen eine wichtige Rolle.

Die Voruntersuchungen für Wilhelmshaven hatten gezeigt, daß beim vorgesehenen Anlegen mit Schlepperhilfe als Anlegekonstruktion für jeden Liegeplatz ein Berthing Beam oder die Ausrüstung mit 4 elastischen Stahldalben in Frage kam. In beiden Fällen ist die Anlegekonstruktion völlig getrennt von der Brücke.

Der Berthing Beam besteht aus einem kräftigen Stahlbetonkopfbalken auf schräg eingerammten Stahlpfählen. Er wird unter den gegebenen Verhältnissen etwa 75 m lang ausgeführt. Die Enden sind abgeschrägt, so daß ein Schiffsstoß dort üblicherweise nicht angreifen kann. Die kinetische Energie des anlegenden Schiffes wird durch die Hebung des Betonkopfes und die Federspannung der durchgebogenen Pfähle aufgenommen. Die durchlaufende Anlegestrecke erleichtert das Anlegen.

Bei elastischen Stahldalben muß die gesamte Energie durch Federspannung der elastischen Dalbenpfähle aufgenommen werden. Eine durchlaufende Anlegefläche ist nicht vorhanden.

Nach sorgfältiger Gegenüberstellung der beiden Ausführungsmöglichkeiten ergab sich bei den Wilhelmshavener Verhältnissen eine eindeutige wirtschaftliche und technische Überlegenheit der Dalbenlösung. Dies ist vor allem auf die großen Wasserstandsschwankungen zurückzuführen mit einem Höhenunterschied von 8,0 m zwischen höchstem und niedrigstem Arbeitswasserstand.

Da beim Berthing Beam der Auftrieb das wirksame Gewicht des Kopfbalkens stark beeinflussen würde, muß der Kopfbalken über dem höchsten Arbeitswasserstand angeordnet werden. In dieser Lage hätte sich in Wilhelmshaven aber eine sehr teure Fenderung ergeben, zumal beim niedrigsten Arbeitswasserstand und kleinsten voll beladenen Schiff ein tiefster Stoß auf − 2,00 NN berücksichtigt werden mußte.

Die genaue Untersuchung des Berthing Beams hat weiter ergeben, daß das Gewicht des Kopfbalkens bei einem Stoß nahe dem Balkenende keine nennenswerte Arbeit leistet, weil der Hebung im Stoßbereich eine Senkung auf der anderen Balkenseite gegenübersteht. Da ein Berthing Beam für den Stoß im Randbereich bemessen werden muß, ist bei einem Stoß im Mittelbereich das rechnungsmäßige Arbeitsvermögen sehr hoch. Es kann aber nicht genutzt werden, weil sonst die Beanspruchung des Schiffes zu groß würde. Außerdem müßte der Kopfbalken im mittleren Bereich wesentlich stärker ausgeführt werden als bisher üblich, damit er bei einem schweren Stoß im Mittelbereich nicht bricht.

In einem Havariefall ist ein Berthing Beam der bisherigen Ausführungsart nur mit hohem Zeit- und Kostenaufwand wiederherzustellen. Der Liegeplatz fällt während dieser Zeit aus. Zur Vermeidung dieser Nachteile müßte der Berthing Beam noch weiterentwickelt werden. Er müßte den auftretenden Belastungs- und Betriebsfällen angepaßt, eventuell gegliedert ausgeführt werden, so daß auch Wiederherstellungsarbeiten schnell ausgeführt werden können. Diese Verbesserungen müßten mit erhöhten Kosten erkauft werden.

Die Entscheidung fiel daher zugunsten elastischer Stahldalben. Auch diese müssen zur Schonung von Schiff und Dalben mit einer hohen Fenderung ausgerüstet werden. Sie kann aber zu einer Fenderschürze zusammengefaßt werden, die als Ganzes an einen Dalben gehängt und wieder abgenommen werden kann.

Zur gleichmäßigen Beanspruchung auch bei ausmittigen Stößen müssen die Dalben torsionssteif ausgeführt werden. Da sorgfältige Vergleichsrechnungen ergeben hatten, daß die Dalben für die Ölbrücke am wirtschaftlichsten in hochwertiger Stahlrohrkonstruktion hergestellt werden konnten, wurde diese Ausführungsart als verbindlich festgelegt. Sie erleichterte im übrigen durch die mögliche Variation in den Schußlängen und Wanddicken die Anpassung an die örtlichen Verhältnisse wie Sohlentiefe, Bodenschichtung und die Sicherung gegen Korrosion.

8. Bemessung elastischer Stahlalben und ihre Ausbildung

8.1 Allgemeines

Elastische Stahldalben haben gegenüber starren Anlegebauwerken den Vorteil, daß sie die Anlegeenergie weich aufnehmen, indem sie sich wie eine Stahlfeder durchbiegen. Bekanntlich ist bei einer etwa linear anschwellenden Kraft, wie dem Durchbiegungswiderstand eines Dalbens die Formänderungsarbeit A im elastischen Bereich etwa gleich dem halben Produkt aus der Widerstandskraft P zum Zeitpunkt der größten Durchbiegung und der dabei in Kraftrichtung auftretenden Durchbiegung s, $A = P \cdot s/2$. Daraus errechnet sich bei gegebener Arbeit A die Widerstandskraft $P = 2\,A/s$.

Wird der Arbeitsweg kleiner, steigt die Kraft P im umgekehrten Verhältnis an und wird unendlich groß, wenn der Arbeitsweg unendlich klein wird. Eine unnachgiebige Anlegekonstruktion führt daher zu sehr hohen Anlegestößen, die unendlich groß würden, wenn die Schiffswand und eine etwa zwischengeschaltete Fenderung nicht nachgeben würden. Eine ausreichend weiche Stoßaufnahme ist daher für die Schonung des Schiffes von besonderer Bedeutung.

Elastische Stahldalben werden so gestaltet und bemessen, daß der Stoß in einer Größe bleibt, die das Schiff nicht gefährdet. Der Dalben wird für die bei ordnungsgemäßen Anlegemanövern zu erwartenden Beanspruchungen bemessen. Außerdem muß er im Liegebetrieb auch den Winddruck und, sofern vorhanden, den Strömungsdruck und deren Auswirkungen aufnehmen können.

Wird ein elastischer Stahldalben in einem Havariefall überlastet, bricht er noch nicht, sondern verformt sich plastisch, wobei die an der Streckgrenze des Materials der Dalbenrohre erreichte maximale Widerstandskraft P_S konstant bleibt. Er leistet daher bei der plastischen Verformung s_{plast} die Arbeit $A_{plast} = P_S \cdot s_{plast}$. Die Gesamtarbeit des Dalbens ist dann gleich der Summe aus elastischer und plastischer Arbeit und beträgt $A_{res} = \frac{1}{2} \cdot P_S \cdot s_{elast} + P_S \cdot s_{plast}$. Hierin liegt bei biegsamen Stahldalben für Havariefälle erfahrungsgemäß eine beachtliche Arbeitsreserve, die den dahinterliegenden Brückenkonstruktionen zugute kommt, wenn die Dalben ausreichend weit vor diesen Bauwerken stehen.

Die Bemessung der Dalben richtet sich nach der quer zum Liegeplatz wirkenden kinetischen Energie des Schiffes zum Zeitpunkt des Anlegens. Sie hängt ab von der Größe des Schiffes und seiner Anlegegeschwindigkeit quer zum Liegeplatz. Letztere hängt wieder ab von der Länge der Brücke und den Anfahrtbedingungen. Hierfür gibt es Erfahrungswerte, die anläßlich des Internationalen Schiffahrtskongresses in Rom im Jahre 1953 von Baker veröffentlicht worden sind. Die dort genannten Werte wurden im

Jahre 1955 in der Empfehlung E 40 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen" mit nur geringfügigen Abänderungen übernommen. Demnach sind nach deutscher Praxis für den Fall des Anlegens mit Schlepperhilfe folgende Anlegegeschwindigkeiten quer zum Liegeplatz zu berücksichtigen:

Lage	Anlegegeschwindigkeit quer zum Liegeplatz in m/s			
	Anfahrt	bis 1000 BRT ($\leq$ 1500 tdw)	bis 5000 BRT ($\leq$ 7500 tdw)	bis 10 000 BRT und mehr ($\geq$ 15 000 tdw)
starker Wind und Seegang	schwierig	0,75	0,55	0,40
starker Wind und Seegang	günstig	0,60	0,45	0,30
mäßiger Wind und Seegang	mäßig	0,45	0,35	0,20
geschützt	schwierig	0,25	0,20	0,15
geschützt	günstig	0,20	0,15	0,10

Diese Tafel zeigt die Abhängigkeit der zu berücksichtigenden Anlegegeschwindigkeit v von Wind und Seegang, den Bedingungen der Anfahrt und von der Schiffsgröße. Auf die Abnahme der anzusetzenden Anlegegeschwindigkeit mit steigender Schiffsgröße sei besonders hingewiesen.

Da das Schiff beim Anlegen beweglich bleibt und üblicherweise bei solchen Anlagen 4 Dalben je Liegeplatz vorhanden sind, hat ein einzelner Dalben bei einem ordnungsgemäßen Anlegemanöver nicht die gesamte kinetische Energie des Schiffes, sondern nur einen Teil derselben aufzunehmen.

Der von Minikin eingeführte, die Einwirkung auf den Einzeldalben berücksichtigende Abminderungsfaktor für die kinetische Energie quer zum Liegeplatz wird nach deutscher Praxis mit 0,4 bis 0,5 angesetzt.

Nach allgemeinen gültigen Hafenbaugrundsätzen werden Havariefälle bei der Bemessung nicht berücksichtigt, weil die Hafenbaukosten und die Kosten an den dann in verstärktem Maße gefährdeten Schiffen sonst nicht vertretbar ansteigen würden. Sie stünden in keinem Verhältnis zu den Kosten, die nach der bisherigen Praxis durch Havarieschäden in Häfen verursacht werden.

8.2 Bemessung und Ausbildung der Dalben für Wilhelmshaven

Da die Löschbrücke in Wilhelmshaven von der Richtung des Flut- bzw. Ebbstromes nur um einen Winkel von rd. 3° abweicht und eine ausreichend breite Fahrrinne zur Verfügung steht, sind trotz der Lage in der freien Jade die Anfahrtbedingungen günstig. Gleiches gilt bezüglich Wind und Seegang. Die vorherrschenden Südwest-Winde sind durch das vorgelagerte Land bereits geschwächt und vermindern im übrigen die Anlege-

geschwindigkeit quer zu den seeseitigen Liegeplätzen. Das gleiche gilt praktisch auch für die sonst an der deutschen Nordseeküste besonders gefährlichen Nordwest-Stürme.

Bei diesen Verhältnissen wurde für die größten Tanker mit 100 000 tdw = rd. 125 000 t Wasesrverdrängung eine Anlegegeschwindigkeit v quer zum Liegeplatz zwischen 0,10 und 0,15 m/s zugrunde gelegt, obwohl bei einer sinngemäßen Ausdeutung von E 40 bei dieser Schiffsgröße noch kleinere Geschwindigkeiten hätten vertreten werden können.

Bei der Bemessung der Anlegedalben wurden auch die sonstigen deutschen Erfahrungen berücksichtigt. Hierdurch ergab sich eine Kontrolle der zugrunde zu legenden Werte. Nach den bis 1957 gemachten deutschen Erfahrungen mit elastischen Dalben war geplant, elastische Großschiffsdalben an der freien Elbe für ein Arbeitsvermögen von 50 tm zu bemessen.

Im Hinblick auf die noch größeren Schiffe wurde für Wilhelmshaven ein Arbeitsvermögen von 60 tm gewählt. Hieraus ergab sich für das größte in Frage kommende Schiff von 100 000 tdw bei einem mittleren Abminderungsfaktor 0,45 eine maximal zulässige Anfahrgeschwindigkeit quer zum Liegeplatz

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 60}{0{,}45 \cdot 125\,000}} = \sqrt{0{,}021} = 0{,}145 \text{ m/s}$$

Für das kleinste in Frage kommende Schiff von 12 500 dwt mit rd. 17 000 t Wasserverdrängung wird die zulässige Anfahrgeschwindigkeit entsprechend größer. Unter sonst gleichen Voraussetzungen ergibt sich

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 60}{0{,}45 \cdot 17\,000}} = \sqrt{0{,}154} = 0{,}39 \text{ m/s}$$

Bei der gewählten Bemessung für ein Arbeitsvermögen von 60 tm wird demnach die Empfehlung E 40 beim 100 000-tdw-Tanker gut, bei kleineren Tankern sehr gut erfüllt. Die Dalben für 60 tm Arbeitsvermögen können daher die zu erwartenden üblichen Betriebsbeanspruchungen ohne jeden Schaden aufnehmen. Bei unsachgemäßem Manövrieren, Reißen von Schleppertrossen und dergleichen können natürlich noch größere Anfahrgeschwindigkeiten und Beanspruchungen auftreten. In solchen Fällen handelt es sich aber bereits um Havariefälle.

Aus internen Gründen der NWO mußten bei der Bemessung der Wilhelmshavener Anlegedalben neben den deutschen Grundsätzen auch englische und amerikanische Wünsche berücksichtigt werden. Während von englischer Seite eine Bemessung der Dalben für 100 tm gewünscht wurde, wurde nach amerikanischer Praxis ein Arbeitsvermögen von nur 50 tm gefordert. Man einigte sich dann auf einen Kompromiß. Danach wurde der Liegeplatz am Löschkopf 2 mit je vier 100-tm-Dalben ausgerüstet, während die beiden weiteren Liegeplätze je vier 60-tm-Dalben erhielten, die im Bedarfsfalle später auf 100 tm verstärkt werden können. Der größte Anlegedruck der 100-tm-Dalben wurde mit rd. 150 t festgelegt, der der 60-tm-Dalben mit mindestens 90 t, aber so weit unter 150 t, daß im Verstärkungsfalle auf 100 tm wieder ein maximaler Druck in der Größenordnung von 150 t erreicht wird.

Die Bemessung wurde bedingungsgemäß nach den üblichen deutschen Grundsätzen für die Spannungen an der Streckgrenze durchgeführt.

Der Achsabstand der beiden äußeren Dalben der seeseitigen Liegeplätze wurde mit 83 m so groß gewählt, wie im Hinblick auf die Schiffsform möglich. Der Abstand der beiden inneren, vor allem als Schutz für den 22,00 m breiten Löschkopf wirkenden Dalben beträgt 33,00 m. Die Vorderkante der Dalbenfenderung liegt 5,00 m vor der Löschkopfvorderkante (Bild 8).

Die Dalben wurden überhängend gerammt, so daß das Schiff auch bei der größten planmäßigen Durchbiegung des Dalben von rd. 1,30 m nicht gegen die Dalbenpfähle stoßen kann. Bild 11 zeigt die generelle Gestaltung und die Hauptabmessungen des 100-tm-Dalbens. Die Dalben wurden in allen Einzelheiten einwandfrei berechnet und konstruiert.

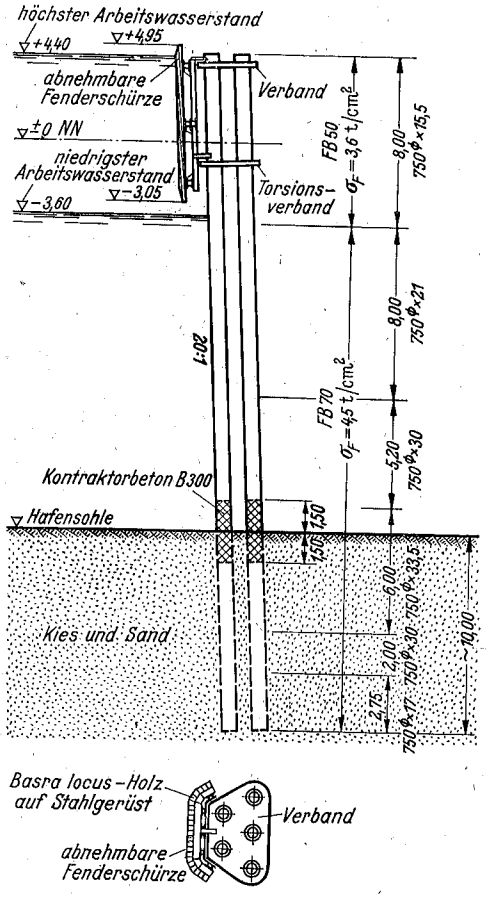
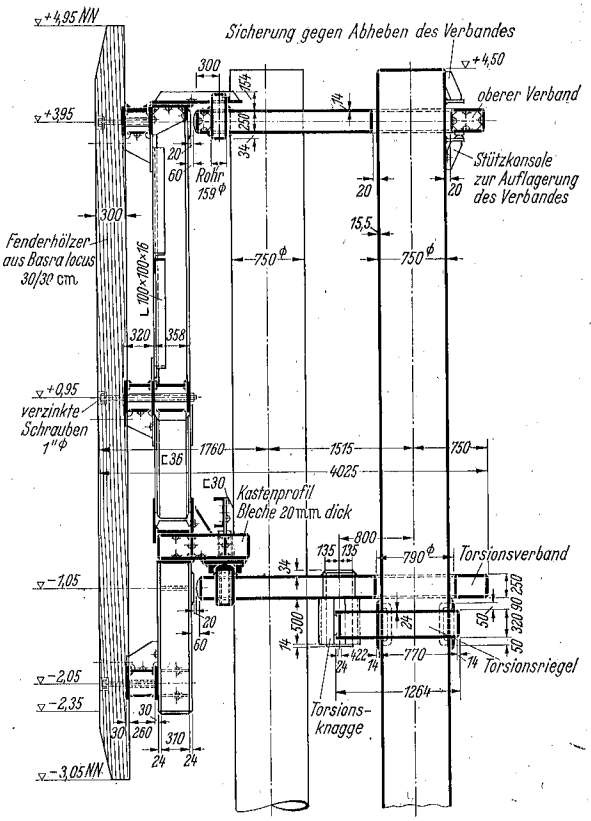


Bild 11
Elastischer Stahlrohr-Anlegedalben mit 100 tm Arbeitsvermögen

Bild 12 gibt einen Überblick über die Einzelausbildung der Verbände und der als Schild vorgehängten Fenderschürze aus Basralocus-Holz auf Stahlgerüst. Verbände und Fenderschürze passen zu allen Daten und können daher ausgewechselt werden.

9. Ausbildung der Festmacheeinrichtungen in Wilhelmshaven

Nach dem Grundsatz, die Festmacheeinrichtungen von der Löschbrücke völlig zu trennen, wurden in Wilhelmshaven zum Festmachen gemäß dem Vertäuplan (Bilder 8 und 15) unabhängig gegründete 125-t- bzw. 250-t-Pollerdalben ausgeführt (Bild 10). Soweit Pollerstege erforderlich, wurden auch die Pollerdalben zu ihrer Auflagerung herangezogen (Bild 13).



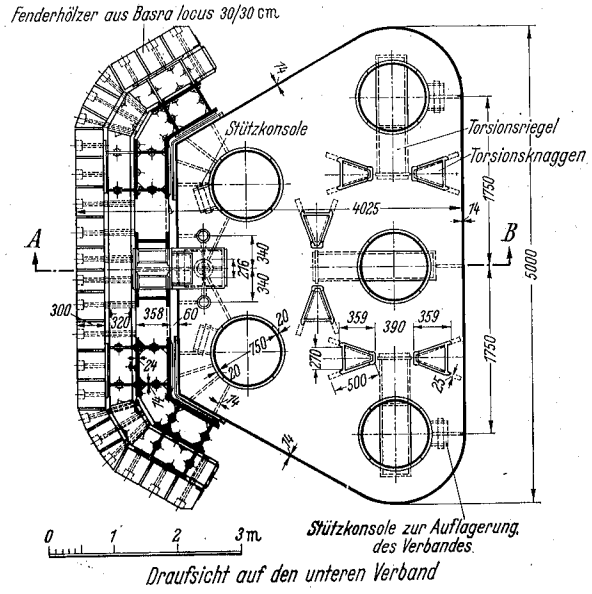


Bild 12

Verbände und Fenderung der Anlegedalben

Die 125-t-Pollerdalben erforderten 4, die 250-t-Pollerdalben 8 hochbelastbare Gründungspfähle (Bild 13). Zur Verminderung der Knicklänge und zur Eisaussteifung erhielten sämtliche Pollerdalben einen alle Pfähle verbindenden Aussteifungsrahmen aus Stahlrohren mit Achse auf − 0,75 NN. Um Schwierigkeiten bei der Überleitung der großen Pollerpfahlkräfte zu vermeiden, wurden alle Pollerdalbenköpfe in Ortbeton B 225 ausgeführt.

Die Pollerdalben sind auch vom Wasser aus über eine Steigeleiter zugänglich. Sie ist mit einer Fenderkonstruktion aus Basralocusholz auf Stahlprofilen verbunden, die das Anlegen von Kleinschiffen ermöglicht (Bild 13).

Alle Pollerdalben auf der Seeseite der Löschbrücke können unmittelbar von der Brücke aus betreten werden. Ein Schleppblech deckt die 15 cm breite Trennfuge ab. Die auf der Landseite befindlichen Pollerdalben sind durch einen leicht abnehmbaren Stahl-

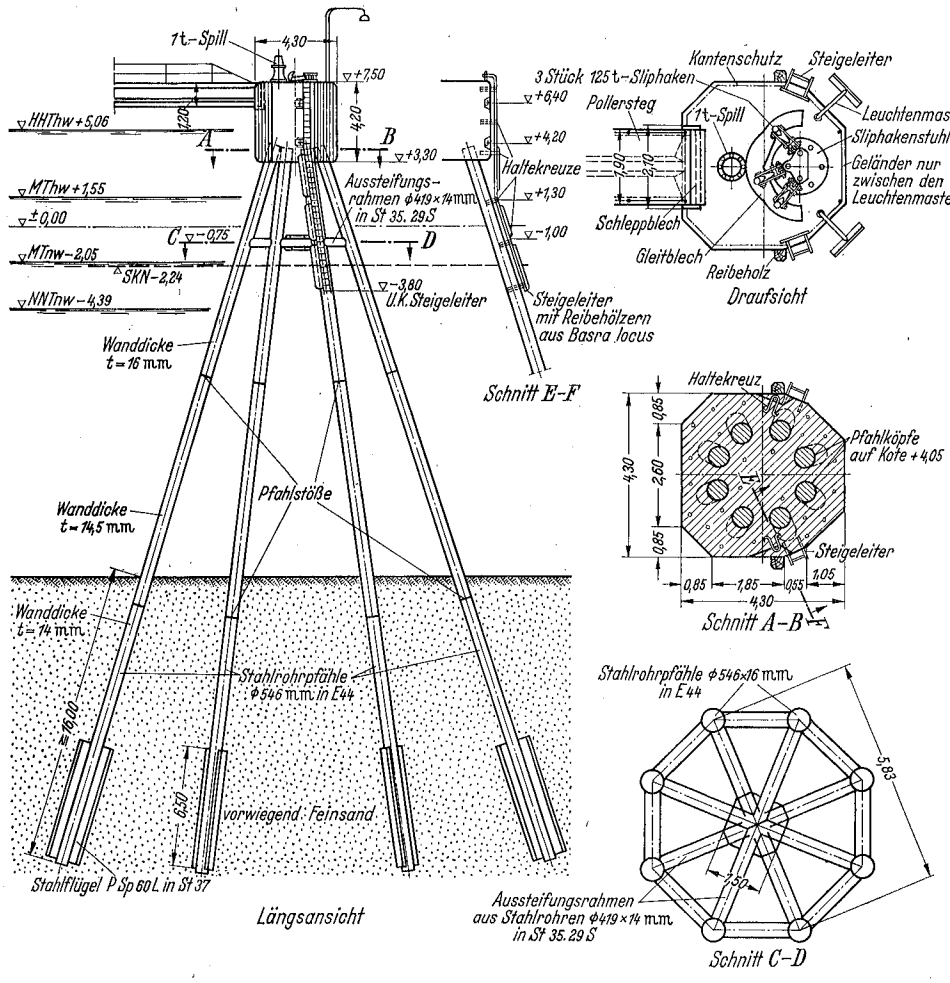


Bild 13

250-t-Endpollerdalben des südlichen Pollersteges

steg mit Gitterrostabdeckung, der über die Rohre hinwegführt, mit der Brücke verbunden. Diese Pollerstege erhielten eine nutzbare Breite von 1,50 m und beidseitig feste Geländer.

Die Verbindungsbrücke zu den Pollerdalben des südlichen und nördlichen Pollersteges (Bilder 8 und 15) wurden, um laufende Unterhaltungsarbeiten zu vermeiden, in Stahlbeton ausgeführt. Sie liegen auf den Pollerdalbenköpfen und auf jeweils einem Zwischenjoch aus 2 Pfählen mit Ortbetonkopf. Das Zwischenjoch wirkt in Stegrichtung als Pendelstütze. Die nutzbare Breite der Stege beträgt 1,70 m.

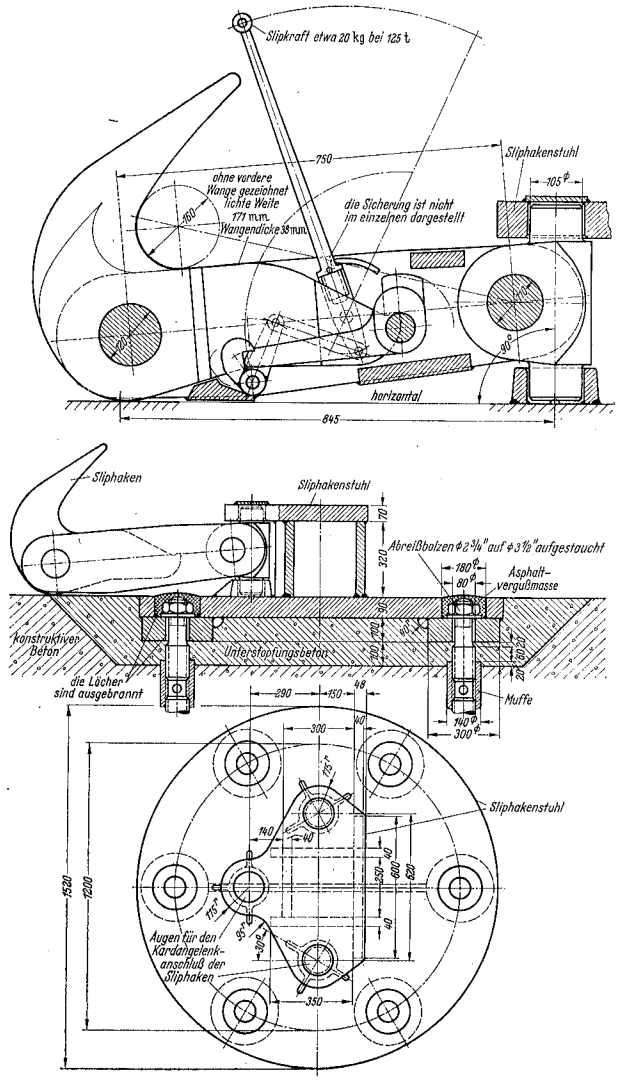


Bild 14
Sliphakenstuhl mit drei Sliphaken

Die Pollerdalben wurden ursprünglich mit jeweils zwei 125-t- bzw. 250-t-Pollern aus Stahlguß geplant. Sie wurden mit einem 1-t-Elektrospill zum Hochholen der Trossen ausgerüstet, und mit einem Stahlkantenschutz versehen, der ein Abgleiten verhindert. Die Abmessungen der Betonköpfe wurden so gewählt, daß ausreichend Arbeitsraum für die Festmacher vorhanden ist und die Köpfe der Gründungspfähle einwandfrei zusammengefaßt werden.

Um bei Gefahr auch Stahltrossen rasch lösen zu können, wurde im Frühjahr 1958 bauseitig in Erwägung gezogen, die Poller zusätzlich mit einem im Ausland bereits angewendeten Slipgeschirr auszurüsten. Eine sorgfältige Untersuchung vorhandener Sliphaken ergab jedoch, daß sie entweder nicht unfallsicher oder unter Vollast nicht betriebssicher waren. Man entschloß sich daher, ein besonderes Slipgeschirr zu entwickeln. Ausgehend von bisherigen Schlepperhaken [4]), wurde ein Sliphaken für eine Grenzlast von 125 t ausgebildet. Die Sliphaken werden mittels Kreuzgelenk an geschweißten Stühlen allseitig beweglich befestigt (Bild 14). Jeder Sliphaken kann mit mehreren Trossen belegt werden. Er gibt sie sowohl bei Vollast als auch bei geringer Belastung durch einen einfachen Handgriff mit geringer Zugkraft frei.

Je nach Pollerbelastung und Zugrichtungen wurden die Pollerblöcke mit 1 bis 3 Sliphaken ausgerüstet, deren Schwenkbereich so groß gewählt wurde, daß sie für alle in Frage kommenden Betriebsfälle ausreichen. Bild 15 gibt einen Überblick über die gewählten Schwenkbereiche der Sliphaken

Die Sliphaken haben sich inzwischen im Betrieb bestens bewährt.

Das neue Slipgeschirr erforderte eine Änderung der bis dahin vorgesehenen Stegauflagerung, insbesondere bei den Stahlbeton-Pollerstegen. Beim raschen Lösen der unter Vollast stehenden Trossen federn die Pollerdalben zurück und pendeln sich in gedämpfter Schwingung in ihre Ruhelage ein. Bei fester Lagerung der Pollerstege würden dabei große Massenkräfte übertragen und in kurzer Zeit Zerstörungen eintreten. Um dies zu vermeiden, wurden alle Pollerstege wie Maschinen auf Spezial-Gummilagern (Schwingmetall) gelagert. Die gewählten Lager können waagerecht bis zu 10 cm ausfedern. Im Bedarfsfalle können sie auch ohne Schwierigkeiten ausgewechselt werden. Sie haben sich bisher einwandfrei bewährt.

10. Bauleistungen in Wilhelmshaven

Das vom Ingenieurbüro Prof. Dr. Agatz Nachfolger Bremen erarbeitetete Projekt wurde unter 25 deutschen Tiefbaufirmen ausgeschrieben. Aufgrund des Ausschreibungsergebnisses, vor allem aber im Hinblick auf die angebotene Ausführung der schwierigen Rammarbeiten mit Hilfe eines damals völlig neuartigen Baugerätes, erhielt die Arbeitsgemeinschaft Olumschlag, bestehend aus der Strabag-Bau AG., der Hochtief AG., der Ed. Züblin AG., der Firma Polensky und Zöllner, der Bauunternehmung Hermann Möller, der Tiefbau AG. „Unterweser" und der De Long-Corporation New York, am 1. 11. 1957 den Auftrag für die Bauausführung mit der Maßgabe, mit den Bauarbeiten sofort zu beginnen und sie bis zum 1. 9. 1958 im wesentlichen abzuschließen. Diese Firmengruppe hatte vorgeschlagen, die außerordentlich schwierigen Rammarbeiten mit Hilfe einer „schwimmenden Insel" und aufgesetzter schwerer Ramme durchzuführen. Die Ramme sollte nach allen Seiten verschieblich und drehbar angebracht werden, so daß aus einer Inselstellung die verschiedensten Pfähle gerammt werden konnten.

[4]) Schlepperhaken der AG „Weser", Werk Seebeck, Bremerhaven

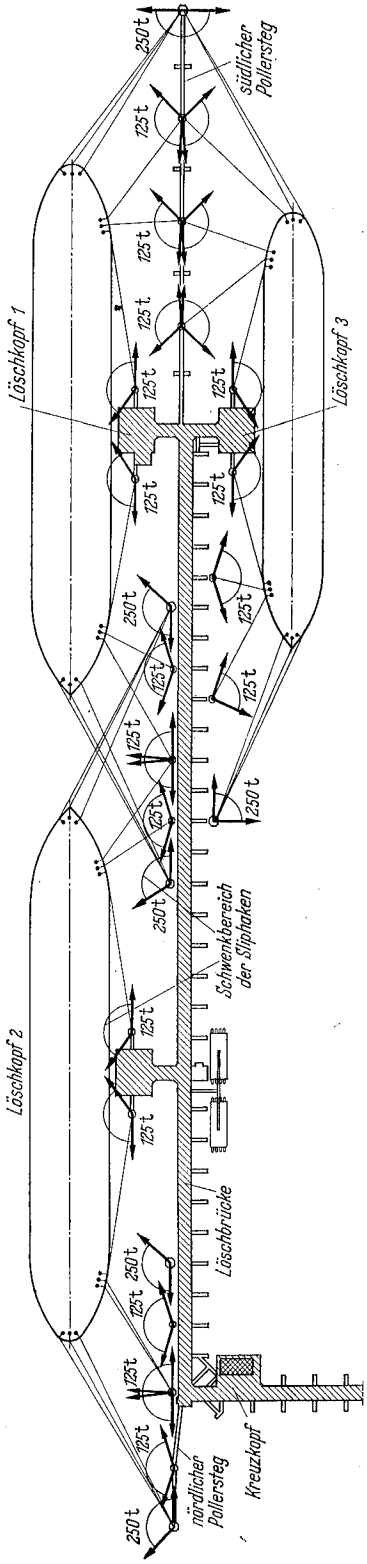


Bild 15

Vertäuplan und Schwenkbereiche der Sliphaken

Das System der „schwimmenden Insel" ist heute aus zahlreichen Veröffentlichungen bekannt. Es sei daher nur kurz zusammengefaßt, daß hierbei ein Stahlponton in absenkbaren starken Stahlrohren mit Hilfe von Preßluftpumpen aus dem Wasser gehoben und wieder abgesenkt werden kann. Auf einer solchen Hubinsel können Bauarbeiten wie auf dem festen Lande ausgeführt werden. Sie bringt weitere Möglichkeiten in der Planung, Ausbildung und Ausführung, vor allem auch für Umschlagsbrücken in freier See. Sie hat in Wilhelmshaven nach ihrem Eintreffen, 3 Monate nach Auftragserteilung, die Bauarbeiten entscheidend beeinflußt.

Die Bauarbeiten für die Brücke einschließlich Anlegedalben und Pollerdalben waren, abgesehen von kleinen Restarbeiten, am 30. 9. 1958 abgeschlossen, obwohl am 27. 4. 1958 in einer Sturmboe fast das gesamte schwimmende Gerät untergegangen war und erst mühevoll wieder gehoben werden mußte.

In dieser kurzen Bauzeit von 11 Monaten wurden unter zum Teil schwierigsten Bedingungen, vor allem in den Wintermonaten, folgende Bauleistungen vollbracht:

Rammarbeiten

416 Brückenpfähle, ϕ 546 × 15,5/14,0/13,5 mm aus FB 50, bis 35,00 m lang aus St 37, Pfahlgewicht bis 7,5 t.

116 Pollerpfähle ϕ 546 × 16,0/14,5/14,0 mm aus E 44, bis 43,5 m lang mit Flügeln PSp 60 L, 6,50 m lang aus St 37, Pfahlgewicht bis 10,0 t.

52 Dalbenpfähle ϕ 750 mm, maximale Wanddicke 33,5 mm, bis 34,90 m lang, aus FB 50 (σ_{S_2} = 3600 kg/cm²) bzw. FB 70 (σ_S = 4600 kg/cm²), Pfahlgewicht bis 14,3 t.

Für die Gründung der Brücke und der Pollerdalben sowie für die Anlegedalben und deren Ausrüstung wurden insgesamt 5385 t Stahl eingebaut.

Betonarbeiten

5505 m³ Fertigbeton für:

29 Stck. Jochbalken der Zufahrtsbrücke

20 Stck. Jochbalken der Löschbrücke

73 Stck. Brückenüberbauten

3919 m³ Ortbeton, davon:

195 m³ Landwiderlagerbeton

1627 m³ Jochbalkenbeton unter + 5,35 NN

1248 m³ Brückenüberbaubeton über + 5,35 NN

791 m³ Beton der Pollerblöcke

58 m³ Unterwasserbeton der Dalbenpfähle

1550 t Betonstahl I bis ϕ 36 mm für die insgesamt 9366 m³ Stahlbeton.

Zur Verwirklichung dieser Bauleistungen wurden von der Arge Olumschlag auf der Baustelle, den Werkplätzen und den Baugeräten im Mittel 250 und maximal 386 Arbeitskräfte eingesetzt.

II. Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen

1. Vorbemerkung

Die zulässige Amplitude von Wellen in Häfen ist natürlich von den Schiffstypen abhängig, die den Hafen anlaufen. Gemeint ist in der Regel der Schwall durch Windwellen oder Dünung. Aber auch andere, nämlich langperiodische Wellen mit kleiner Amplitude können eine sehr unerwünschte Unruhe in Häfen verursachen. Langperiodische Wellen liegen im Bereiche zwischen Wind- und Tidewellen, ihre Periode erstreckt sich von etwa 20 Sekunden bis zu mehreren Stunden. Solche langperiodischen Wellen, deren Ursprung noch nicht vollständig geklärt ist, machen sich in manchen Häfen, teilweise sehr störend bemerkbar, so z. B. im Hafen von Algier, bei Madagaskar, in Kapstadt und Guam.

Die Auswirkung langperiodischer Wellen auf ein Hafenbecken ist zweierlei Art:

a) Periodische Füllung und Leerung des Hafenbeckens

Die Füllung und die Leerung des Hafenbeckens sind von der Periode und dem Betrage der senkrechten Amplitude der langperiodischen Welle abhängig, außerdem von der Größe des Hafenbeckens und dem Verhältnis des Querschnittes in der Einfahrt zur Hafenfläche. Infolge des periodischen Füllens und Entleerens entstehen in der Einfahrt und im Bereiche von Querschnittsverengungen innerhalb des Hafens periodisch alternierende Strömungen, die bei einer senkrechten Amplitude von z. B. nur 10 bis 20 cm Geschwindigkeiten von 2,0 bis 2,5 m/s erreichen können.

b) Anregung von Resonanzschwingungen im Hafenbecken

Die Wassermassen des Hafenbeckens stellen ein schwingungsfähiges System dar, das zu Resonanzschwingungen angeregt wird, wenn die von außen ankommenden langperiodischen Wellen die gleiche Periode wie die Eigenschwingung des Hafenwassers haben. Dabei wird innerhalb des Hafens die Schwingungsamplitude gegenüber derjenigen der erregenden Welle verstärkt. Die Verstärkung kann in einigen Fällen über das 20fache gehen, liegt im allgemeinen aber zwischen dem 4- bis 12fachen. An den Knotenpunkten der stehenden Resonanzschwingung im Hafenbecken treten dabei entsprechend stärkere, waagerechte, mit der Periode alternierdende Strömungsgeschwindigkeiten auf.

2. Modellversuche

a) Aufgabe der Versuche

In grundsätzlichen (schematischen) Modellversuchen wurden mit dankenwerter Unterstützung des U. S. Department of Army, European Research Office, im Franzius-Institut die mit der Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen zusammenhängenden Fragen behandelt *).

Die Aufgabe der Versuche bestand darin, ein Mittel zu finden, mit dem man die Resonanzverstärkung weitgehend unterbinden kann und das möglichst allgemein anwendbar ist. Da die Erregerwellen sich über ein breites Frequenzband erstrecken, scheiden alle Maßnahmen aus, die darauf abzielen, die Resonanzverstärkung im Hafenbecken für eine bestimmte Periode zu beseitigen. Dazu gehört z. B. eine Vertiefung des Hafenbeckens, wodurch die Periode verlängert wird. Aber auch praktisch kaum zu verwirklichende Maßnahmen, wie etwa der Bau eines Vorhafens, der als Resonator dient, scheiden aus. Ebenso scheidet eine Verkleinerung des Querschnittes in der Hafen-

*) Die Versuche wurden von Dr. Otto LINKE durchgeführt.

einfahrt aus, da die Dämpfung der Resonanzschwingung im Hafenbecken erst bei sehr kleinem Querschnitt in der Hafeneinfahrt zu erreichen ist.

Das den Untersuchungen zugrunde gelegte Prinzip besteht darin, die Resonanz durch Einbauten innerhalb des Hafenbeckens zu vermindern, wobei diese Einbauten möglichst zugleich dem Bestimmungszweck des Hafens dienstbar gemacht werden sollten. Dazu eignen sich Quermolen, die in verschiedener Anzahl, Länge und Lage im Hafenbecken angeordnet werden.

Mit derartigen Einbauten kann die Periode der Grundschwingungen eines Hafenbeckens auf den zwei- bis dreifachen Betrag verlängert werden. Das ist insofern von Bedeutung, als sich aus Untersuchungen über die Schiffsbewegung infolge langperiodischer Schwingungen im Hafen ergeben hat, daß für die Praxis die Perioden von 30 bis 120 Sekunden die unangenehmsten sind. Man hat dann in der Möglichkeit, die Periode der Grundschwingung zu verlängern, ein Mittel, aus dem gefährlichsten Frequenzbereich herauszukommen.

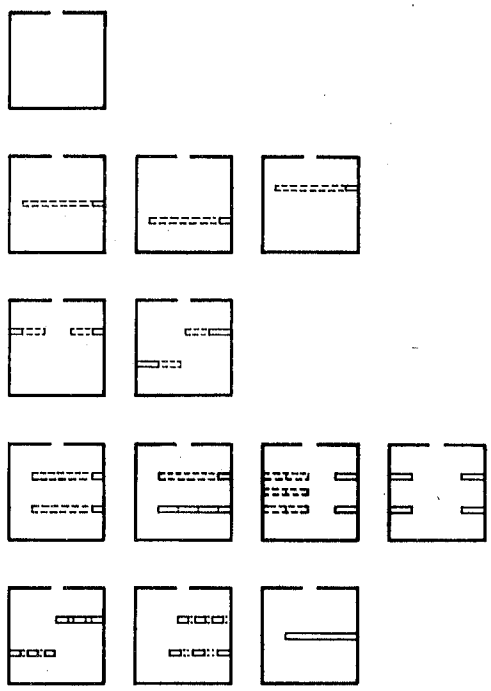


Bild 16
Untersuchte Ausbauzustände

Die Untersuchungen sollten ferner zu allgemein anwendbaren Ergebnissen führen. Sie wurden deshalb an einem quadratischen Hafenbecken gleichbleibender Tiefe durchgeführt. Außerdem wurden sie zunächst nur auf Untersuchungen der Grundschwingung begrenzt, da bei dieser die größten Amplituden auftreten, die bei der ersten und den höheren Harmonischen sehr schnell kleiner werden; z. B. beträgt die Amplitude der ersten Harmonischen nur noch 25 % der Amplitude der Grundschwingung. Die verschiedenen im Modell untersuchten Moleneinbauten sind in Bild 16 dargestellt.

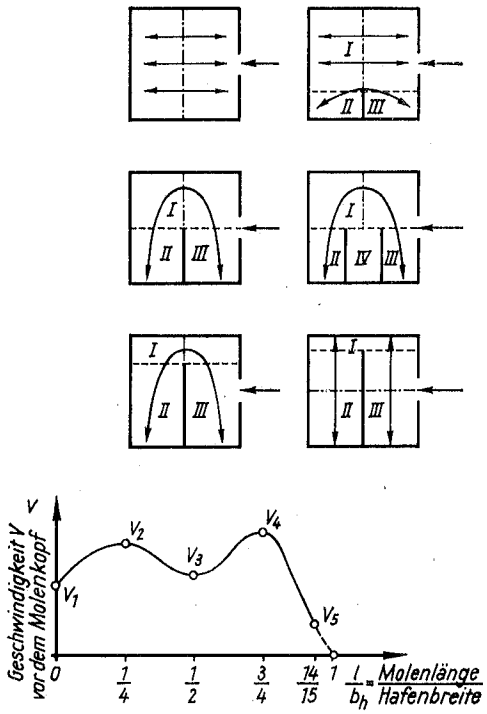


Bild 17

Wirkung von Quermolen verschiedener Längen auf das Schwingungsbild im Hafen und auf die waagerechten Geschwindigkeiten vor dem Molenkopf

b) Ergebnisse der Versuche

Die grundsätzliche Wirkung einer Quermole ist in Bild 17 dargestellt.

Der Einbau einer kurzen Quermole stört zunächst die bestehende Grundschwingung, führt bei allmählich länger werdender Mole zur Ausbildung einer neuen, bogenförmigen Grundschwingung längerer Periode.

Eine weitere Verlängerung der Mole führt zu einer Störung der neuen Schwingung und bei noch weiterer Verlängerung der Mole bildet sich abermals ein neues Schwingungsbild im Hafen aus.

Entsprechend verändern sich die Geschwindigkeiten vor dem Molenkopf, die immer dann am größten sind, wenn die Mole nur störend auf die bestehende Schwingung wirkt.

Nach diesem grundsätzlichen Schema lassen sich auch die Schwingungsformen eines Hafenbeckens mit mehreren eingebauten Quermolen verständlich machen.

In den Übergangsstadien, bei denen die alte Grundschwingung nicht mehr voll und die neue noch nicht voll ausgebildet ist, kommt es zu Schwebungen. Die Schwingungsbäuche sind dann nicht mehr ortsfest, sondern verschieben sich langsam innerhalb eines bestimmten Bereiches im Hafenbecken hin und her. Eine Analogie dazu bilden zusammengesetzte mechanische Schwingungssysteme mit mehreren Freiheitsgraden und loser Koppelung.

Bei der Länge einer Quermole von $^1/_5$ der Hafenbreite ist bei konstanter Periode, die der Eigenschwingung des unverbauten Hafenbeckens gleich ist, die Resonanzschwingung im Hafenbecken vollständig gedämpft, die Resonanzschwingung nimmt sogar negative Werte an.

Bei veränderlicher Periode erzeugt die Quermole im Hafenbecken eine bogenförmige Schwingung, d. h. aber, daß die Periode der neuen Schwingung größer wird. Durch Quermolen von $^3/_4$ bis $^7/_8$ der Hafenbreite wird die Periode auf etwa den doppelten Betrag verlängert. Die dämpfende Wirkung kommt darin zum Ausdruck, daß die senkrechten Amplituden im allgemeinen kleiner bleiben als die der Grundschwingung des unverbauten Hafens. Während die senkrechten Amplituden gleichmäßig mit länger werdender Mole abnehmen, ändert sich die waagerechte Amplitude in Schwingungsknoten vor dem Molenkopf periodisch von kleineren zu größeren Werten und umgekehrt. Solange die Molenlänge etwa $^1/_4$ der Hafenbreite nicht überschreitet, nimmt die waagerechte Amplitude beträchtlich zu, wird aber bei einer Verlängerung der Mole bis etwa $^1/_2$ der Hafenbreite wieder kleiner, was mit dem Auftreten der neuen bogenförmigen Schwingung zusammenfällt. Wird die Mole noch länger, etwa $^3/_4$ bis $^7/_8$ der Hafenbreite, nimmt die waagerechte Amplitude erneut zu. Das gilt nur für den Bereich um den Molenkopf. In der Hafeneinfahrt nimmt die waagerechte Amplitude mit der Molenlänge gleichmäßig zu.

Ordnet man die Mole nicht in der Mitte, sondern im vorderen Drittel einer Hafenseite an, verschiebt sich das Bild etwas. Bei einer Länge der Mole von $^1/_4$ der Hafenbreite ist die waagerechte Amplitude beträchtlich kleiner, bei $^1/_2$ der Hafenbreite jedoch sehr viel größer. In der Hafeneinfahrt ist die waagerechte Amplitude durchgehend größer als bei Anordnung der Mole in der Mitte des Hafens.

Die senkrechten Amplituden sind bei unsymmetrischer Lage der Mole durchgehend in dem schmaleren der durch die Quermole gebildeten Teilbecken größer als in dem breiteren, gleichgültig, ob die Mole im vorderen oder hinteren Drittel des Hafens angeordnet wird.

Werden zwei Quermolen an den einander gegenüberliegenden Hafenseiten eingebaut, dann wird bei einander gegenüberliegenden Molen die Periode nur wenig verlängert. Dagegen wird die dämpfende Wirkung zweier Quermolen ein Maximum, wenn beide Molen gegeneinander versetzt eingebaut werden, die eine Mole im vorderen, die andere im hinteren Hafendrittel. Die wirksamste Länge der Molen beträgt etwa $^3/_8$ der Hafenbreite. Im Hafenbecken ist dann eine S-förmige Schwingung ausgebildet, die beide Molen umschwingt und deren Periode etwa den doppelten Betrag der Periode der Grundschwingung des unverbauten Hafens hat. Die lotrechten Amplituden bleiben durchgehend sehr klein und erreichen nur an wenigen Stellen einen bis 1,5fachen Betrag der lotrechten Amplitude der Erregerwelle. Eine maximale Dämpfung ist nur bei gleichlangen Molen vorhanden. Werden die Molen bei gleicher Lage ungleich lang, werden auch die Amplituden wieder größer.

Versuche mit zwei an einer Hafenseite angeordneten Parallelmolen gleicher Länge ergaben ein Schwingungsbild ähnlich dem einer einzigen Mole, solange der Abstand der beiden Molen voneinander nicht mehr als $^1/_3$ der Hafenlänge beträgt. In diesem Falle schwingt das Wasesr des Hafenbeckens um beide Molen bogenförmig herum, so daß das Teilbecken zwischen den beiden Molen schwingungsfrei bleibt.

Mit der Anordnung von Parallelmolen hat man die Möglichkeit, sehr ruhige Teilbecken innerhalb eines Hafens zu schaffen. Das Schwingungsbild im Hafen mit zwei Parallelmolen ist jedoch stark abhängig von der Periode der Erregerwelle. Man kann bei lang-

sam veränderlicher Periode der Erregerwelle sehr verschiedene Schwingungsbilder erzielen. Die Schwingung kann vom vorderen bis zum mittleren Teilbecken reichen, wobei das hintere Teilbecken ruhig bleibt; sie kann aber auch vom vorderen zum mittleren und von da wieder zum hinteren Teilbecken laufen. Beide Schwingungsarten treten bei kürzerer Periode auf als der der Schwingung vom vorderen zum hinteren Teilbecken unter Auschaltung des mittleren, und sie führen zu größeren waagerechten Amplituden in den jeweilig schwingenden Teilbecken.

Wird bei Anordnung von Parallelmolen eine Mole länger als die andere, treten sofort in dem der längeren Mole anliegenden vorderen oder hinteren Teilbecken erhöhte Schwingungsamplituden auf.

Durch die Anordnung von zwei Parallelmolen an einer und einer dritten Mole an der entgegensetzen Hafenseite wird die Periode der Grundschwingung wirksam verlängert, ähnlich wie bei der Anordnung von zwei Molen in unsymmetrischer Lage zueinander.

Werden an den beiden gegenüberliegenden Hafenseiten jeweils zwei parallele Molen gleicher Länge angeordnet, dann wird die Dämpfung der Amplituden im Resonanzfall wirksamer, als wenn nur zwei Parallelmolen an einer Hafenseite angeordnet werden, deren Länge doppelt so groß ist, d. h. der Querschnittsverbau in beiden Fällen bleibt der gleiche.

Versuche mit teildurchlässigen Molen ergaben, daß die Dämpfung der Schwingungsamplituden im Resonanzfall nur dann erreicht werden kann, wenn die Durchlässigkeit der Mole etwa 10 % beträgt. Bei größeren Durchlässigkeiten treten in den Molenöffnungen hohe Geschwindigkeiten auf, die mit dem Schiffsbetrieb im Hafen nicht zu vereinbaren sind. Eine 10 % durchlässige Mole dämpft die waagerechten Amplituden auf ein Fünftel der Amplituden bei einer gleichlangen, aber undurchlässigen Mole. Teildurchlässigkeit der Mole ist mithin ein zusätzliches Mittel zur Dämpfung von Hafenschwingungen, das auch praktisch brauchbar ist, da die Durchlässigkeit der Mole klein bleibt und auf die ganze Länge der Mole verteilt werden kann. Allerdings wird bei teildurchlässigen Molen die Periode der Grundschwingung etwas kleiner als bei gleich angeordneter, aber undurchlässiger Mole.

3. Ergebnis

Die Grundsatzversuche haben gezeigt, daß es möglich ist, durch den Einbau von Quermolen in ein Hafenbecken folgende Änderungen in der Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen zu erzielen:

a) Die Periode der Grundschwingung des Hafens kann beträchtlich verlängert werden. Dadurch kann die Periode, bei der eine gefährliche Resonanzverstärkung auftritt, in einen Bereich des Frequenzspektrums verlegt werden, in dem die Erregerwellen den Hafen mit sehr kleiner Amplitude erreichen. Das kann z. B der Fall sein, wenn der Hafen in einer Bucht liegt, durch die bereits eine Verstärkung bestimmter Frequenzen herbeigeführt wird.

b) Die lotrechten und waagerechten Amplituden der Resonanzschwingung können in verschiedenen Gebieten des Hafenbeckens sehr wirksam gedämpft werden.

c) Entsprechend werden auch die periodisch alternierenden Strömungsgeschwindigkeiten durch die Hafeneinfahrt kleiner.

Die Fortpflanzung der Wellen hängt vorwiegend von Schwere- und Trägheitskräften ab. Die Ergebnisse von Wellenuntersuchungen in Modellen werden dementsprechend

nach dem FROUDEschen Ähnlichkeitsgesetz vom Modell auf die Natur übertragen. Die maximalen Amplituden bei Resonanzschwingungen treten dann auf, wenn die in den Hafen mit der Erregerwelle gelangende Energie gerade durch Reibungsverluste ausgeglichen wird, die bei der Schwingung der Wassermasse des Hafens auftreten. Die Resonanzverstärkung wird also außer durch Trägheits- und Schwerekräfte entscheidend durch Reibungskräfte beeinflußt. Da beide Arten von Kräften oder, mit anderen Worten, das FROUDEsche und das REYNOLDsche Ähnlichkeitsgesetz in ein und demselben Modell nicht gleichzeitig berücksichtigt werden können, sind auch die Ergebnisse der vorliegenden Grundsatzversuche hinsichtlich der Resonanzverstärkung nur qualitativ auf die Natur übertragbar.

Die Untersuchungen wurden an einem idealen, quadratischen Hafenbecken durchgeführt. Da die geometrische Gestalt der Häfen, die den Einflüssen langperiodischer Wellen ausgesetzt sind, im allgemeinen ziemlich unregelmäßig ist, wird es nötig sein, für einen gegebenen Hafen besondere Modellversuche durchzuführen, um die Auswirkung von Quermolen in diesem Hafen zu untersuchen. Aus solchen Modellversuchen muß die wirksamste Anordnung und Gruppierung von Quermolen auf die Dämpfung der Resonanzschwingung besonders in den wichtigeren Gebieten des Hafenbeckens untersucht werden. Die Ergebnisse und Erfahrungen der durchgeführten Grundsatzversuche können dabei als Richtlinien dienen.