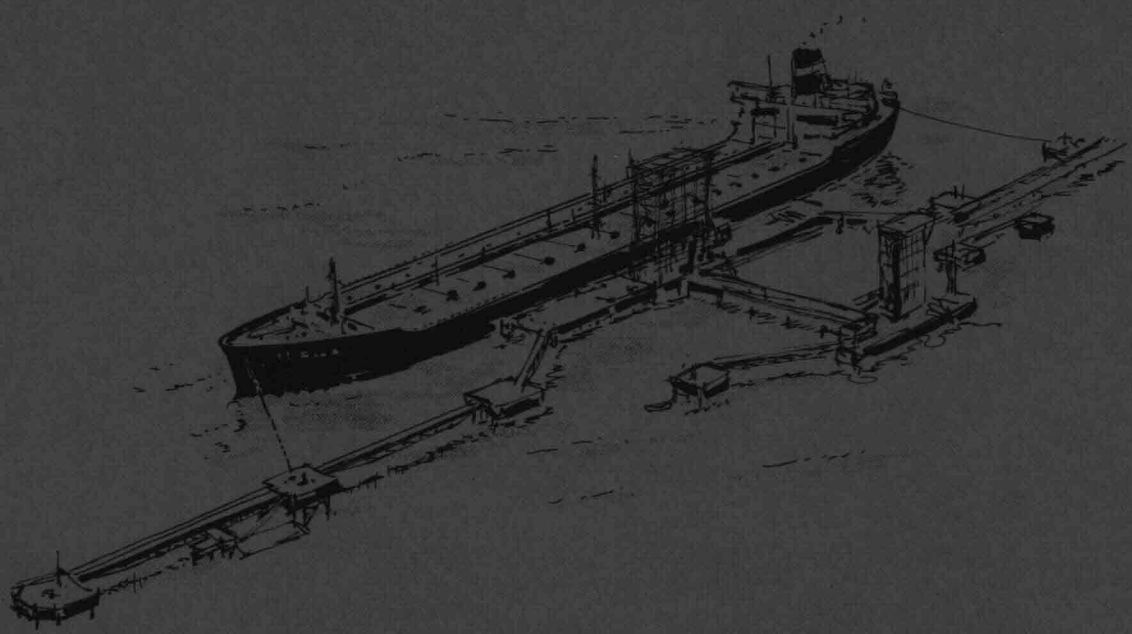
Technische Hogeschool Delft

Afdeling de Civiele Techniek



Vakgroep Waterbouwkunde

f 9A Waterbouwkundige Constructies b.o. I

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
Afdeling der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

Waterbouwkundige Constructies b.o. I

College f9 A

Samengesteld door:

ing. K.G. Bezuijen
ir. G.P. Bourguignon
prof.ir. A. Glerum
dr.ir. P.A. Kolkman
C.H.A. van Putten
ir. J. Schippers

onder redactie van prof.ir. A. Glerum

Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Civiele Techniek

uitgave febr.82			f9a.I	554000					f 8,--

Voorwoord

Door de korte tijd van voorbereiding draagt dit collegedictaat een voorlopig karakter.
Dit komt onder meer tot uiting in het feit, dat de bijdragen van de heren C.H.A. van Putten en dr.ir. P.A. Kolkman (althans voor wat betreft de invloed van de traagheid op de afmeerkrachten) als losse delen aan het eind van het dictaat zijn toegevoegd en niet zijn geïntegreerd in de tekst van hoofdstuk 2.
Bovendien zijn bepaalde onderwerpen uitvoeriger uitgewerkt dan noodzakelijk, terwijl andere te kort zijn behandeld.

College f9A - Waterbouwkundige constructies, b.o. I

INHOUD

Hoofdstuk 1 INLEIDING

1.1. Ontwikkelingen in de scheepvaart
1.2. Ontwerpfilosofie
1.3. Schaalvergroting, schaalverkleining
1.4. Schaalwetten
1.5. Eenhedenstelsel

Hoofdstuk 2 AANLEG- EN GELEIDECONSTRUCTIES VOOR SCHEPEN

2.1. Omschrijving gebruikelijke benamingen
2.2. Overdracht kinetische energie schip aan meersysteem
  2.2.1. Het aanlopen van de haven en de methoden van meren van een schip
  2.2.2. Algemene beschouwing
  2.2.3. Schematisering van het probleem
  2.2.4. Massaveersystemen
  2.2.5. Wind-, stroom- en golfbelastingen en troskrachten
2.3. Meersystemen
  2.3.1. Algemene beschouwing
  2.3.2. Berekening van meer- en bolderstoelen
  2.3.3. Berekening meerbalk
2.4. Open constructies (steigers)
2.5. Gesloten constructies (kademuren)

Hoofdstuk 3 STUWEN

3.1. Inleiding
3.2. Bevaarbaar maken van een stuk rivier
3.3. Stuwmiddelen

Hoofdstuk 4 SCHUIVEN

4.1. Hydraulische aspecten, algemeen
4.2. Krachtenspel
4.3. Cavitatie
4.4. Trillingen door stroming
4.5. IJsvorming
4.6. Schotbalken

Hoofdstuk 5 GEMALEN

5.1. Inleiding
5.2. Het opvoerwerktuig
5.3. De statische en manometrische opvoerhoogte
5.4. Aandrijving en overbrenging; appendages
5.5. Pompgebouw en leidingen
5.6. Toepassingen

Los toegevoegd:

- "Het meren van VLCC's in Europoort", door C.H.A. van Putten
- "Notitie ten behoeve van college f9A over de invloed van de traagheid" Collegenotitie 1, febr. 1981, door dr.ir. P.A. Kolkman
- Voorbeelden uitgevoerde steigers

1. Inleiding

1.1. Ontwikkelingen in de scheepvaart (zee- en binnenvaart)

In de waterbouwkunde is de schaalvergroting zichtbaar in verschillende sectoren van het vakgebied.
Voor wat betreft de scheepvaart:
als gevolg van de vergroting van de te transporteren hoeveelheden en van de transportafstanden is de grootte van de schepen sterk toegenomen (zeevaart → olie- en ertstankers; binnenvaart → duwvaart). Dit heeft gevolgen voor de waterbouwkundige kunstwerken.
Voor wat betreft de buitengaatse (offshore) activiteiten:
bij het zoeken naar energiebronnen gaat men steeds verder en ook dieper de zee in. Zie hiervoor het college f9B.
De ontwikkelingen in de scheepvaart hebben tot gevolg:

a. grotere schutsluizen met gevolgen voor de fundering, de constructie van sluislichamen, afsluitmiddelen, geleidewerken en het systeem van vullen en ledigen van de schutkolk, de uitvoering van het werk en de exploitatie en bediening van de sluis.
b. bredere en diepere vaargeulen en scheepvaartkanalen (de geul naar Europoort en het Amsterdam-Rijnkanaal).
   Dit heeft gevolgen voor het onderhoudsbaggerwerk en de oeververbindingen (langere en hogere bruggen en bovendien de tendens om meer dan in het verleden tunnels i.p.v. bruggen te bouwen).
c. grotere vaarsnelheden.
   Dit resulteert in grotere scheepsgolven wat leidt tot een vergrote aanval en daardoor grotere aantasting van de oevers.
d. zwaardere kademuren en steigers met grotere los- en laadcapaciteit en zwaardere meersystemen.
   Dit heeft tot gevolg:
   grotere bovenbelasting door de los- en laadinstallaties (bv. voor erts) en grotere horizontale belastingen (remkrachten, windkrachten en meerkrachten).
e. langere en in dwarsdoorsnede grotere havendammen omdat ze tot grotere diepte in zee moeten worden uitgebouwd.
   De grotere diepte leidt tot hogere golven met als gevolg grotere golfkrachten en hierdoor zwaardere constructies en moeilijker uitvoering.

1.2. Ontwerpfilosofie

Om de moeilijkheden bij het ontwerp en de uitvoering van steeds grotere waterbouwkundige (kunst)werken het hoofd te bieden zou men op de volgende manieren tewerk kunnen gaan:

1. Het werken van klein naar groot (o.a. de Deltawerken) om ervaring op te doen en schaaleffecten tijdig te kunnen onderkennen.
   Het zonder meer direct extrapoleren van een klein naar een groot werk is niet mogelijk. Schaalwetten en schaaleffecten spelen een grote rol. Een schaalwet geeft op min of meer exacte wijze aan hoe een bepaalde grootheid afhangt van de geometrisch gelijkvormige vergroting.
   Een schaaleffect is een invloed, die niet in een exacte wet of regel wordt voorspeld.

2. Het uitvoeren van modelproeven en experimenten in de natuur (een modelproef schaal 1 : 1).
   Hiermede is het mogelijk enig inzicht te verkrijgen in de invloed van schaaleffecten.

3. Het doen van een schaalonderzoek.
   Het analyseren van alle deelproblemen en langs wetenschappelijke weg trachten de invloed van de vergroting hierop na te gaan.

4. Afzien van extrapolatie van bestaande constructies en een geheel nieuw ontwerp maken volgens een fundamentele, systematische ontwerpmethodiek.

Een combinatie van bovengenoemde werkwijzen verdient de voorkeur.

1.3. Schaalvergroting en -verkleining

Schaalvergroting kan in vele aspecten tot uiting komen, bv. in:

- de geometrie van het project, bv. de oppervlakte van een landaanwinning- of irrigatiegebied en de vergroting van een constructie.
- de belastingen
  (krachten, stoten en energieën, o.a. golfklappen en scheepsstoten).
  Grotere belastingen geven aanleiding tot zwaardere constructies. Deze op hun beurt zijn weer de oorzaak van grotere belastingen, bv. door het toegenomen eigen gewicht van de constructie.
- de snelheid
  vaarsnelheid van het schip en de stroomsnelheid van het water.

- de intensiteit van verkeer en vervoer.
- het tempo van uitvoering
  Om een lange bouwtijd te voorkomen (o.m. ter beperking van de rente).
- de kosten
- de diversiteit van de technische problemen.
- het aantal specialisten (deskundigen) van instituten en laboratoria.
- werkwijze bij de uitvoering
  bv. de ontwikkeling van afsluitingstechnieken bij de afsluiting van getijgeulen.
- wijze van aanbesteding van werken
  (o.a. raamcontracten)
- aantal betrokken maatschappelijke aspecten
  planologie, weg-, scheepvaart- en luchtverkeer, recreatie, industrie, milieu (aantasting natuur), volksgezondheid, landbouw, veeteelt, visserij, veiligheid, politiek (ook buitenlandse politiek), watervoorziening, afwatering.
  Zie o.a. Oosterscheldeproblematiek.

Schaalverkleining treedt op bij het doen van modelproeven (de ontworpen constructie moet worden verkleind om de modelproef te kunnen uitvoeren) en het teruggaan van grotere naar kleinere eenheden.

In de afgelopen decennia is er vaak sprake geweest van een schaalvergroting bij waterbouwkundige werken (Oosterschelde, zeesluizen in België en Frankrijk, offshorevoorzieningen, projecten in het Midden-Oosten) en een bijbehorend stuk extrapolatie t.o.v. het bestaande.
Ongetwijfeld zal deze trend zich ook in de toekomst doorzetten (nieuwe vormen van energiewinning etc.). Daarnaast tekent zich echter in Nederland, evenals in andere dichtbevolkte industrielanden, een ontwikkeling af, die vraagt om kleinere eenheden, die minder ingrijpen in de omgeving. Een vorm hiervan is de renovatie van bestaande kunstwerken (m.a.w. het dusdanig aanpassen, dat wordt voldaan aan de huidige en toekomstige functie) daar waar in een vorig beleid zonder meer een nieuwe constructie zou worden gebouwd. Deze kleinschaligheid, die ook in sommige ontwikkelingslanden is vereist, o.m. gezien de financiële middelen, betekent enerzijds een herleving van het oude ambacht (houten puntdeuren kunnen aantrekkelijk zijn bij kleinere sluizen) doch anderzijds is het zaak de juist bij de schaalvergroting opgedane

fundamentele kennis ook toe te passen bij kleinere eenheden, zie zich maar al te gauw lenen voor een traditionele benadering.

1.4. Schaalwetten

Voor de behandeling hiervan wordt verwezen naar het collegediktaat b80, Waterloopkundig onderzoek, augustus 1976 en naar de artikelenserie in De Ingenieur, Werktuig- en Scheepsbouw, van 2 en 16 december 1966, 13 en 27 januari en 10 februari 1967, naar aanleiding van de leergang "Modellen en Schaalregels" TH Eindhoven, gehouden op 18 en 19 januari 1966.

Nog een enkele opmerking over het samenspel tussen de in het water aanwezige waterbouwkundige constructie en het water.

Verschil tussen statische en dynamische belasting.

De statische belastingen geven geen bijzondere moeilijkheden, doch de dynamische belastingen kunnen trillingen doen ontstaan met kans op resonantie.

De resonantie veroorzaakt in de constructie grote spanningen, die aanleiding geven tot vermoeidheid en uiteindelijk leiden tot breuk van de constructie. Het is een moeilijk probleem.

In het algemeen heeft een constructie niet één enkele eigen trilling, maar meestal meerdere. De onderdelen van een constructie kunnen ook afzonderlijk gaan trillen (zie college b15).

Indien een externe dynamische belasting trillingen veroorzaakt moeten we, behalve met de massa en de elasticiteit van de constructie, ook rekening houden met een meetrillende watermassa, de zg. hydrodynamische massa.

Er kan ook een terugkoppeling optreden als de trillende constructie het turbulentiepatroon van het water beïnvloedt. De demping van de constructie en de energie-absorptie van het water zijn eveneens belangrijke factoren, die in het geheel spelen. In dit laatste geval zal men zeker een modelonderzoek uitvoeren. Soms zijn meerdere modellen nodig, bv. één voor de waterbeweging en één of meer voor de constructie.

1.5. Eenhedenstelsel

In dit dictaat zal het SI-eenhedenstelsel consequent worden gehanteerd.
Voor ons van belang zijn de volgende basisgrootheden (met grondeenheden):

basisgrootheid		grondeenheid	
naam	symbool	naam	symbool
lengte	l	meter	m
massa	m	kilogram	kg
tijd	t	seconde	s

Afgeleide grootheden o.a.:

grootheid		SI-eenheid	
naam	symbool	naam	symbool
oppervlakte, oppervlak	A	vierkante meter	m^2
volume, inhoud	V	kubieke meter	m^3
volumieke massa (massa)dichtheid	ρ	kilogram per kubieke meter	kg/m^3
frequentie, perioden per seconde	f, v	hertz(= per seconde)	Hz(= s^{-1})
cirkelfrequentie	ω	per seconde	s^{-1}
kracht, gewicht	F, G	newton	N(= $kg.m/s^2$)
druk, spanning	p	pascal=newton per vierkante meter	$Pa=N/m^2$
moment van kracht	M	newton meter	N.m
arbeid, energie, hoeveelheid warmte	A,E,W, Q	joule(= newton meter)	J(=N.m)
vermogen, energiestroom	P	watt(= joule per seconde = newton meter per seconde)	W(=J/s = N.m/s)

Voor meer uitgebreide informatie wordt verwezen naar de normbladen van het Ned. Normalisatie-instituut, zie o.a. NEN 950, 1221, 1222, 3021 en 3035.

Voor de herleiding van enige Angelsaksische en technische eenheden tot SI-eenheden zie NEN 3021 en 3035.

2. Aanleg- en geleideconstructies voor schepen

2.1. Omschrijving gebruikelijke benamingen

Om verwarring te voorkomen zal eerst een aantal begrippen wat nader worden omschreven. Tevens zal worden getracht het geheel zo systematisch mogelijk te benaderen om zo verantwoord mogelijk te komen tot een bepaling van de verschillende ontwerpcriteria.

Inhoudsmaten van schepen

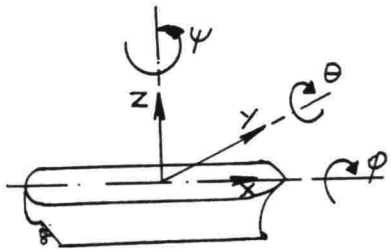
Onder de Brutotonnenmaat (Bruto Register Ton = BRT) of gross tonnage verstaat men de inhoud van alle gesloten ruimten van het schip, uitgedrukt in 100 cu.ft (= 2,83 m^3) (een inhoudsmaat). Deze is veelal de aanduiding voor passagiersschepen.
De Nettotonnenmaat (Netto Register Ton = NRT) is alleen de inhoud van de laadruimen en wordt verkregen door de BRT te verminderen met de inhoud der dienstruimten (machinekamers, bunkers enz.).
De verhouding NRT : BRT $\simeq$ 0,6 : 1.

Het draagvermogen of deadweight is het verschil in waterverplaatsing van het geladen en het lege schip. Het is gelijk aan het gewicht van de max. te vervoeren lading inclusief brandstof en verbruiksstoffen.
Het draagvermogen (Ton Dead Weight = TDW of DWT) is een gewichtsmaat, uitgedrukt in Long Tons (= 1016 kgf = 9967 N $\simeq$ 10 kN).
Dit begrip wordt meestal voor vrachtschepen gehanteerd.

Onder waterverplaatsing (deplacement = $\gamma \nabla$) van een schip verstaat men het gewicht van de door het geladen schip verplaatste watermassa. Hiermede is de massa van het schip te bepalen.

Voor tankers en ertsschepen kan globaal de volgende verhouding worden aangehouden:
BRT : TDW : max. waterverplaatsing $\approx$ 1 : 1,5 : 2.

Scheepsbewegingen



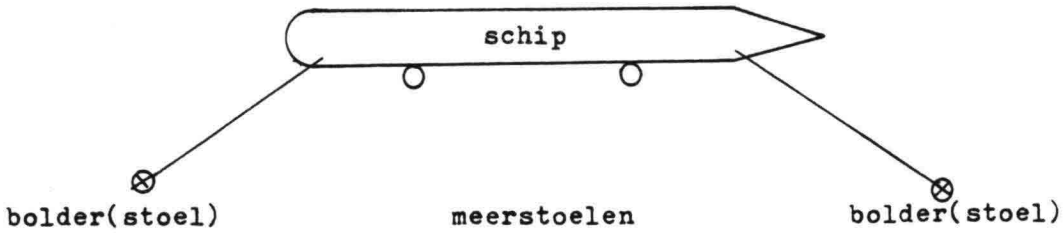
De beweging van een schip wordt gekenmerkt door zes vrijheidsgraden, die in de scheepsbouw de volgende benamingen hebben:

translaties	(schrikken (surge)	= x ,	langsrichting (horizontaal)
	(verzetten (sway)	= y ,	dwarsrichting (horizontaal)
	(dompen (heave)	= z ,	verticaal
rotaties	(slingeren (roll)	= φ (phi) ,	om lengteas
	(stampen (pitch)	= θ (thêta) ,	om dwarsscheepse as
	(gieren (yaw)	= Ψ (pzi) ,	om verticale as

Meerconstructies

Voor de verschillende meerconstructies wordt het volgende woordgebruik gehanteerd:
de constructies, die de scheepsstoten tijdens het meren moeten opnemen, worden meerstoelen genoemd;
de constructies, waaraan de trossen van het gemeerde schip zijn bevestigd, worden bolders of bolderstoelen genoemd.

Schema



Voor het meren zijn vaak nog extra meerstoelen nodig. Eveneens extra bolders of bolderstoelen voor het gemeerde schip.

Meerstoel	Bolder(stoel)
Engels: Berthing dolphin	Mooring dolphin
Frans: Duc d'Albe d'acostage	Duc d'Albe d'amarage

De meerstoelen zijn meestal flexibele constructies die, behalve de scheepsstoten tijdens het meren, ook nog de krachten (drukkrachten, geen stoten) van het gemeerd liggende schip t.g.v. wind, golven en stroming en trekkrachten t.g.v. de op de meerstoel aanwezige bolders moeten kunnen opnemen.

De bolders of bolderstoelen zijn stijve constructies, die alleen de (in sterkte wisselende) troskrachten, ontstaan door wind, golven en stroming, moeten opnemen.
Indien schepen van verschillende grootte moeten worden ontvangen, kunnen de meerstoelen worden vervangen door een zg. berthing beam **(meerbalk) een lang horizontaal remmingwerk, in zijn eenvoudigste vorm niets anders** dan een doorgaande horizontale ligger (balk) ondersteund door een aantal palen). Deze heeft het grote voordeel, dat de excentriciteit tijdens het meren altijd maximaal is (ofwel de excentriciteitcoëfficient C_e is minimaal, dus een maximale reductie van de op te nemen bewegingsenergie van het schip, zie onder 2.2.3.).

Fender: de letterlijke **vertaling is** bescherming; een tussen twee schepen of tussen schip en kade (steiger, meerstoel, platform) aangebracht beschermingsmiddel om het schip en de kade (steiger, meerstoel, platform) te vrijwaren tegen beschadiging. Kan **bestaan enkel** uit wrijfhouten (wrijfstijlen) aan een kademuur of uit een ingewikkeld samenstel van bv. holle rubber cilinders met een houten wrijfschot aan een grote meerstoel.

Steigerconstructies (open constructies)

Een steiger is in het algemeen een constructie, die het talud overspant en een verbinding vormt tussen het schip en de wal. Een steiger is niet grondkerend.
Een steigerconstructie bestaat uit een **dek, dat** op palen is gefundeerd. In een steiger zijn dikwijls zg. strongpoints aanwezig. Dit zijn verzwaarde gedeelten van de steiger, waar de horizontale krachten worden opgenomen en afgevoerd naar de ondergrond.
Steigers loodrecht op de oever **bieden, indien lang genoeg, aan beide zijden gelegenheid tot meren.**
Een steiger is in het algemeen slecht bestand tegen horizontale krachten en wordt door vrijstaande meerstoelen tegen de scheepsstoten beschermd.

Kadeconstructies (grondkerende constructies)

Dit zijn dichte constructies (grondkerend), die in het algemeen voor grote constructies duurder zijn, met name in ontwikkelingslanden waar de toepassing van beton en staal tot hoge kosten kan leiden. Men kan dan beter een steigerconstructie in hout uitvoeren, daar dit materiaal meestal wel aanwezig is.

Op een rotsachtige bodem (bv. Noorwegen en Canada) waar het heien van palen onmogelijk is, worden vaak caissons toegepast.

Wil men toch een constructie op palen maken, dan kan men gaten boren in de rotsbodem. De palen worden nu in het geboorde gat geplaatst en m.b.v. grout in de rotsbodem vastgezet.

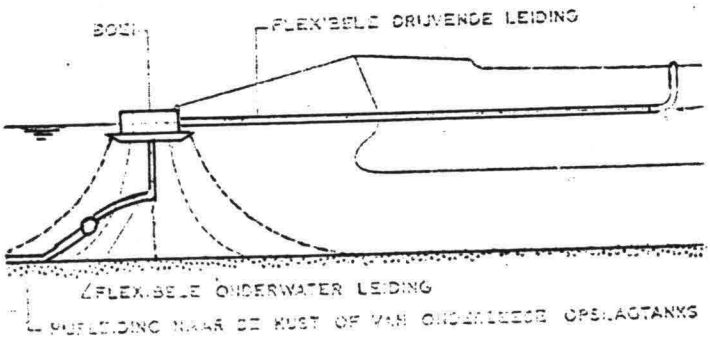
Voor- en nadelen van dichte en open constructies

De golfaanval is bij een gesloten constructie veel groter dan bij een open constructie (staande golven en golfklappen). Bij een open constructie gaan de golven, mits het dek hoog genoeg boven de golftoppen ligt, tussen de palen door.

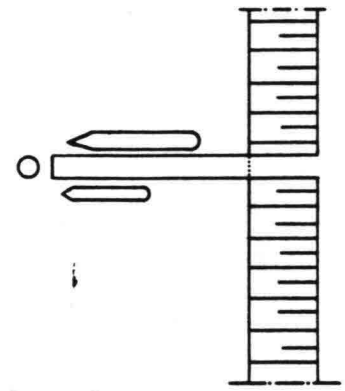
Een groot voordeel van een dichte wand is de opstuwing, die tussen een langszij komend schip en de wand kan ontstaan, de opstuwing gaat dan als buffer werken.

De wateropstuwing is uiteraard sterk afhankelijk van de "keel-clearance" (of bodemvrijheid = hoogte tussen de kiel van het schip en de havenbodem) en de vorm en grootte van het schip.

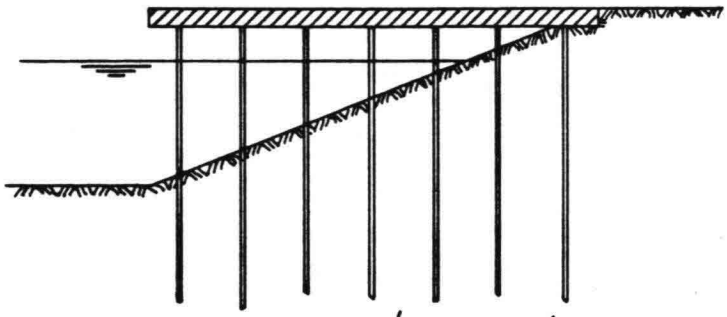
SPM (Single Point Moorings = éénpuntsmeersystemen - Offshore)



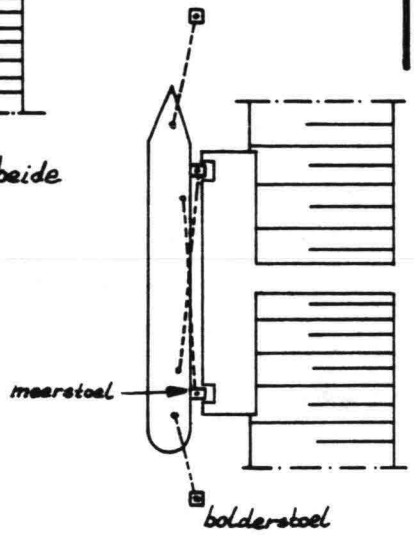
STEIGERS. niet grondkerend.



(vinger)pier
mogelijkheid om aan beide zijden van de pier aan te leggen.



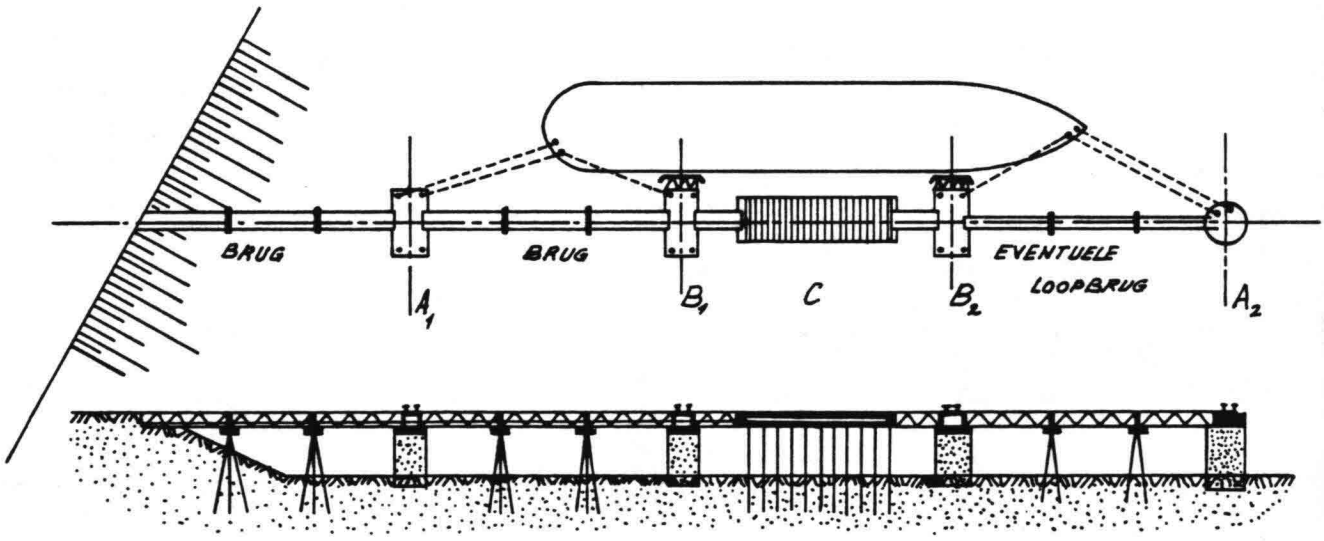
steigerwerk



T- steiger (jetty)

de steiger is beschermd door meerstoelen, die los van de steiger staan, enigszins verend zijn en de scheepsstoten moeten opnemen.

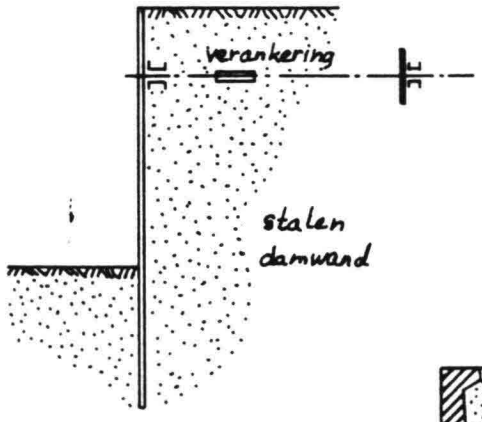
Indien de meerstoelen als dragende elementen in de steiger zijn opgenomen, moeten ze scheepsstoten kunnen opnemen zonder merkbare vervormingen, ze moeten dus stijf zijn. Ze worden dan behangen met verende fenders.

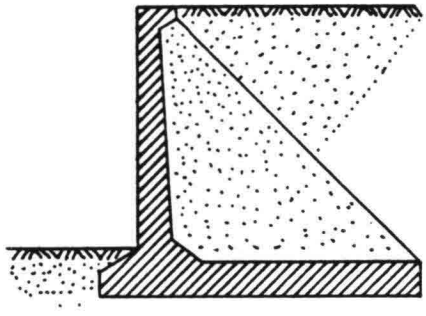


A_1 en A_2 zijn bolderstoelen
B_1 en B_2 zijn meerstoelen, die het op palen gefundeerde platform (waarop de pompinstallaties staan) tegen scheepsstoten moeten beschermen. Daar zij als onderdeel van de steiger zijn uitgevoerd, dienen ze star te zijn. Ze zijn gemaakt van cellendamwand, met zand gevuld en afgedekt met een plaat van gewapend beton.

GRONDKERENDE KONSTRUKTIES

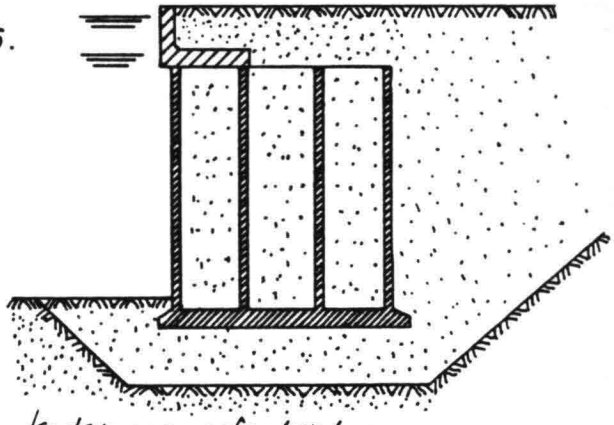
a. beschoeiing





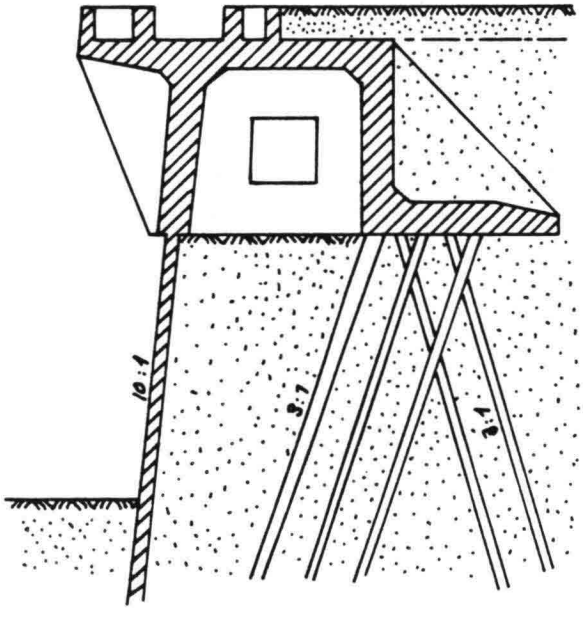
gewichtsmuur van gewapend beton → gewichtsbesparing. een deel van het voor het evenwicht benodigde gewicht, wordt gelaverd door de grond die op de fundatieplaat rust.

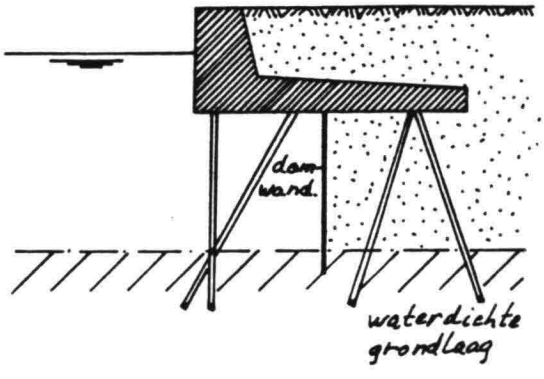
KADE - KONSTRUKTIES.



kademuur gefundeerd op zinkbakken (caissons).

c. samengestelde muren (op palen).





Een éénpuntsmeersysteem (SPM) is de flexibele verbinding tussen het aardvaste punt op de zeebodem en het bewegende schip op het zeeoppervlak. Momenteel alleen bruikbaar voor vloeistoffen (o.a. olie).
Met het toenemende aantal olietankers (VLCC's)*), dat de wereldzeeën gaat bevaren, ontstaat het probleem hoe deze tankers te laden en te lossen. Er zijn maar weinig havens in de wereld, die deze zeer grote schepen kunnen ontvangen en behandelen.
Men ontwikkelde hiervoor de zg. eenpuntsmeersystemen (SPM), waarmee momenteel ULCC-tankers**) tot ongeveer 500.000 TDW op zee kunnen worden geladen en gelost.
Deze laad- en lossytemen zijn bekend als:

CALM - Catenary Anchor Leg Mooring
SBS - Single Buoy Storage
SALM - Single Anchor Leg Mooring
RAM - Rigid Arm Mooring
ELSBM - Exposed Location Single Buoy Mooring
SPAR - Mooring/Storage/Loading Terminal
MOPS - Mobile Offshore Production and Storage
SALS - Single Anchor Leg Storage

Aan een éénpuntsmeersysteem kunnen, afhankelijk van <u>plaatselijke</u> omstandigheden en weersinvloeden, de volgende voor- en nadelen kleven:

<u>voordelen</u>:

- een korte constructietijd;
- geen baggerwerk (o.a. toegangsgeulen) en geen dure havenconstructies; het SPM-systeem is veel goedkoper, doch de pijpleiding over of in de zeebodem is duur
- Voor het meren zijn geen sleepboten nodig, wel een vlet; ook een loods is **meestal overbodig;**
- de tanker, die aan zijn boeg gemeerd ligt, kan, ook tijdens het laden en lossen, vrij ronddraaien onder invloed van de krachten, uitgeoefend door golven, wind en stroming. Zodoende wordt de minste weerstand ondervonden;
- de grote mammoettankers worden buiten de drukke vaarroutes gehouden, de toegang tot de haven geeft een grotere kans op aanvaringen;
- de tanker kan op eigen kracht vertrekken en behoeft geen assistentie van sleepboten.

---

*) VLCC = Very Large Crude Carrier
**) ULCC = Ultra Large Crude Carrier

nadelen:

- het aanleggen bij een windsnelheid (v_w) $>$ 13,5 m/s en een zeegang H_s $>$ 2 - 2,5 m is niet mogelijk. De mooring-launch (vlet) is hier de beperkende factor. Hierdoor moeten de schepen vaak wachten totdat het rustiger weer is geworden. Er kan dan een groot aanbod ontstaan van schepen, die alle moeten worden geladen of gelost. Een eenpunts-meersysteem vereist derhalve een grotere **overslagcapaciteit**, want het kan slechts **één** schip tegelijk behandelen;
- de onbeschutte ligging. Indien v_w $>$ 27 m/s en H_s $>$ 3,5 - 5 m wordt, moet het schip worden losgemaakt en op grote afstand van de SPM rustiger weer afwachten. De werkbare tijd ligt dus lager;
- de gebondenheid aan een bepaald overslagsysteem (vloeibaarheid van het produkt vereist);
- de bemanning kan **moeilijker van/aan boord**;
- langere duur van diensten;
- het lossen van ballast kan moeilijker zijn;
- **de betrouwbaarheid van het goed functioneren van het systeem, voornamelijk afhankelijk van de beheerder, is geringer, dus het risico van fouten is groter.**

Van groot belang is derhalve een goed onderhoud.

Geleidewerken en wachtplaatsen

Bij schutsluizen worden geleidewerken toegepast om de invaart van de sluis vanuit het bredere kanaal te vereenvoudigen en daardoor de schutcyclus te verkorten (zie f1). In plattegrond gezien betreft het als regel trechtervormige constructies. De geleiding is zowel visueel als fysisch. Schepen, welke bij aankomst niet direkt de sluis kunnen binnenvaren, meren langs de wachtplaatsen. Deze bevinden zich in de onmiddellijke nabijheid van de sluis (vaak aansluitend op de geleidewanden).

Remmingwerken

Remmingwerken voorkomen dat bepaalde objecten worden getroffen door scheepsstoten (bv. bepaalde rivierpijlers van een brug). Er is hier dus sprake van een functiesplitsing. In plattegrond gezien kunnen remmingwerken zo worden uitgevoerd, dat zij tevens zorgen voor een betere geleiding van schepen door een nauwe doorvaartopening (bv. tussen 2 **brugpijlers**). In die toepassing gaan de begrippen geleide- en remmingwerken in elkaar over.

2.2. Overdracht kinetische energie schip aan meersysteem

2.2.1. Het aanlopen van de haven en methoden van meren van het schip

Voor een beschouwing vanuit de praktijk wordt verwezen naar: "Het meren van VLCC's in Europoort" door de loods C.H.A. van Putten.

In verband met het aanlopen van de havenmond, het passeren van de mond met de daaropvolgende uitloop en stopmanoeuvre en het navigeren in de haven door de zeer grote schepen, kunnen enkele algemene eisen aan het zeegebied voor de havenmond en de haven zelf worden geformuleerd.

Zeegebied

a. de configuratie en samenstelling van de zeebodem moet een voldoende beschikbare diepte waarborgen of zodanig zijn dat met een minimum aan initieel en onderhoudsbaggerwerk kan worden volstaan t.b.v. een scheepvaartroute naar de haven;
b. de overheersende stroomrichting en -sterkte t.o.v. de scheepvaartroute naar de haven moet zodanig zijn dat hiervan zo min mogelijk hinder wordt ondervonden. Dit geldt eveneens voor het genoemde onder c. en d.;
c. de dominerende golfbeweging (zeegang en deining) vooral voor wat de richting betreft;
d. de overheersende windrichting.

Haven

1. deze moet onder vrijwel alle weersomstandigheden en onder alle getijverschijnselen toegankelijk zijn. Hieraan is niet altijd te voldoen. Voor havens met een groot vertikaal getijverschil kunnen grote tankers soms alleen over de top van de vloed de haven binnenkomen.
2. de vaarroutes, zowel vanuit zee als in de mond en de haven zelf, moeten zo gestrekt of zo vloeiend mogelijk verlopen. De vaarroute in zee voor de havenmond bij voorkeur gestrekt over een afstand van 10 à 15 km;
3. de havenmond liefst zo wijd mogelijk, doch met een zo groot mogelijke beperking, in en binnen de mond, van de golfbeweging (zeegang en deining) en het seiches-effect. De bodembreedte tussen de havendammen moet ongeveer 200-400 m bedragen met een diepte beneden LLWS van 20-25 m, afhankelijk van het grootste scheepstype. De aanloopsnelheid varieert van ca. 5-7 knopen (9-12,5 km/uur). Algemeen kan worden gesteld, dat de sleepboten, indien mogelijk, vastmaken buiten de havendammen. In Europoort wordt door de sleepboten pas vastgemaakt als het schip ongeveer 1 km in de havenmond is doorgedrongen. Dit is wel afhankelijk van de weersomstandigheden (bij veel golfbeweging wordt niet vastgemaakt).

In Europoort dienen de sleepboten bijtijds aanwezig te zijn (ze kunnen direkt nodig zijn, bv. bij machineschade) en op de afgesproken plaats.

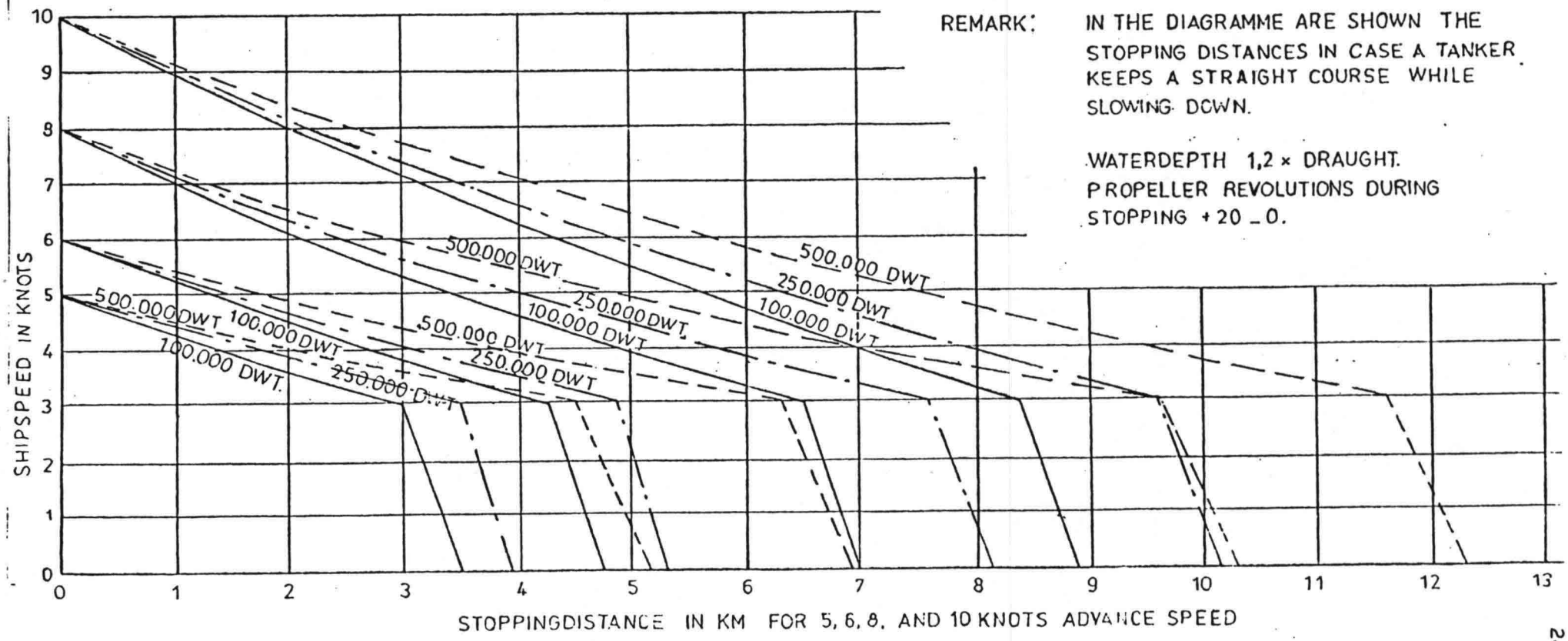
4. de uitlooplengte vanaf de mond moet voldoende zijn om de grootste schepen tijdig te kunnen stoppen. Om de gedachten te bepalen: voor een tanker van 425.000 DWT, die de havenmond met een snelheid van 3 - 6 knopen passeert, bedraagt de totale stopweg ongeveer 5 - 7 km, zie figuur op blz. 2-11.
   Is de snelheid van het schip teruggelopen tot 3 knopen (5,5 km/uur) dan begint de eigenlijke stopmanoeuvre, d.w.z. de machine wordt op volle kracht achteruitgezet. Tijdens deze manoeuvre is het schip voor wat de besturing betreft geheel afhankelijk van de assistentie van de sleepboten. Tussen de havendammen wordt nooit achteruitgeslagen.
5. het samenvloeien, kruisen en splitsen van de verschillende verkeersbanen moet veilig en overzichtelijk kunnen plaatsvinden.
6. de manoeuvreerruimte, ook bij sleepbootassistentie, moet voldoende zijn.
7. in de haven moet voldoende ruimte om te zwaaien aanwezig zijn om het meren m.b.v. de sleepboten onder "alle" weersomstandigheden te verzekeren. De tankschepen worden nl. in deze "ruimte" gedraaid en met de "kop naar zee" gemeerd. Dit heeft het voordeel dat ingeval van brand e.d. de tanker, indien nodig op eigen kracht, de haven zo snel mogelijk kan verlaten. De diameter van de "zwaaikom" bedraagt ongeveer 2 à 3 maal de lengte van het grootste te verwachten schip.

De mammoettankers worden in Europoort normaal met behulp van 4 sleepboten gemeerd. De translatiesnelheid tijdens de sleepmanoeuvre in de haven bedraagt ½ - 1 knoop (1 - 2 km/uur), de snelheid tijdens het meren ongeveer 10 à 20 cm/s.
In Rotterdam-Europoort hebben de sleepboten een vermogen van 880, 1320 en 2200 kW (1200, 1800 en 3000 pk) met een trekkracht van ruwweg 120, 180 en 300 kN (12, 18 en 30 tf).
De sleepkabels hebben een omtrek van 89 mm (= 3½ inch) met een treksterkte van 343 kN (35 tf).

Kenmerkend voor de scheepvaart is de trage reactiesnelheid en dus de grote reactietijd van het schip in het water.

STOPPING DISTANCE IN KM. FOR TANKERS AT SHALLOW WATER

ADVANCE SPEED 5, 6, 8 AND 10 KNOTS



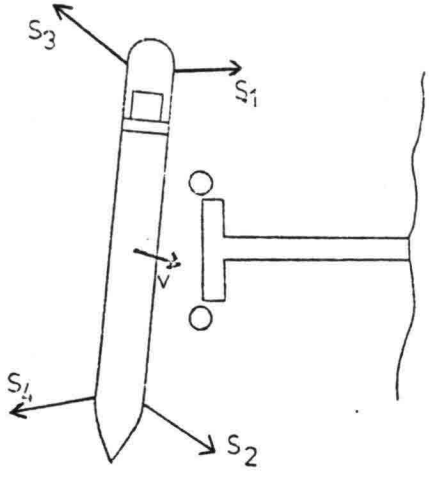
REMARK: IN THE DIAGRAMME ARE SHOWN THE STOPPING DISTANCES IN CASE A TANKER KEEPS A STRAIGHT COURSE WHILE SLOWING DOWN.

WATERDEPTH 1,2 × DRAUGHT.
PROPELLER REVOLUTIONS DURING STOPPING + 20 _ 0.

De oorzaken zijn de volgende:
- de grote massa van het schip,
- de relatief kleine invloed van roer en schroef over korte perioden (beïnvloedingsmechanismen),
- aangezien bij het ontwerp van een schip de economie een grote rol speelt zijn, naast een kleine bemanning, nog belangrijke eisen:
  . weerstand zo klein mogelijk (dus een geringe wrijving tussen schip en water),
  . een relatief klein voortstuwingsvermogen.

Methoden van meren van het schip

Het naderen van de ligplaats geschiedt onder een kleine hoek met de verbindingslijn door de meerstoelen of met de berthing beam om zodoende dicht bij de ligplaats te komen. Daar wordt het schip stilgelegd om het de laatste meters naar de meerstoelen te duwen (gelijktijdig dwarsscheeps en langsscheeps). Bij het dwarsweg duwen garandeert de hoge weerstand in het water een lage naderingssnelheid.



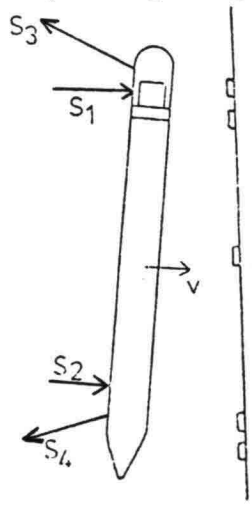
S_1, S_2, S_3 en S_4 trekken

1. m.b.v. sleepboten

1a. De 4 sleepboten, die alle trekken, helpen het schip bij het meren. M.b.v. trossen, wordt getracht het schip volledig te beheersen.
Dit systeem is alleen mogelijk indien de sleepboten over voldoende manoeuvreerruimte beschikken, zoals bij een T-steiger het geval is.
De krachten door de sleepboten S_1 en S_2 uitgeoefend zijn iets groter dan die door S_3 en S_4.

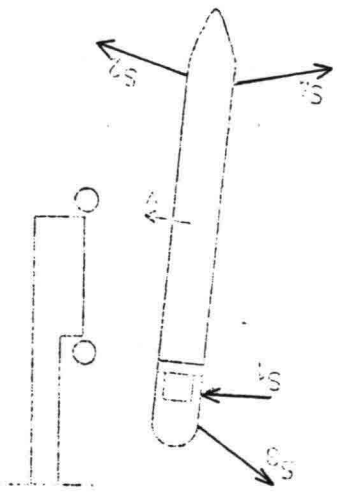
De sleepboten S_3 en S_4 geven met behoud van trosspanning langzaam mee. De meerprocedure wordt op deze wijze geheel beheerst en de meersnelheid v kan klein worden gehouden.

1b. Door gebrek aan ruimte is het bovengenoemde systeem niet altijd mogelijk. Is dit het geval dan gaan één of twee sleepboten duwen, terwijl de andere drie of twee trekken. Deze methode wordt toegepast bij vingerpieren en insteekhavens.



S_1 en S_2 duwen,
S_3 en S_4 trekken

2. m.b.v. lieren en sleepboten

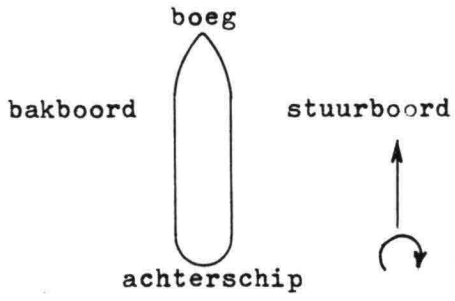


S_1 duwt, rest trekt

Grote schepen (VLCC's e.d.) kunnen niet m.b.v. lieren worden gemeerd.

In het algemeen kan worden gesteld dat een schip aan wisselende krachten is blootgesteld. Dit heeft tot gevolg dat de beweging en de krachtsuitoefening van het schip tamelijk veel kunnen variëren. Aangezien in de kinetische energie van het bewegende schip ($\frac{1}{2}$ m v^2) de snelheid v in het kwadraat voorkomt, is het zaak deze snelheid zo klein mogelijk te houden. Bij het meren met stroom mee zal de stootenergie groter zijn dan bij het meren tegen de stroom in.

Ook is er verschil tussen meren aan stuurboord en aan bakboord.



Bij een vooruit varend schip draait de schroef rechtsom, indien men tegen het achterschip aankijkt.
Wordt er achteruit geslagen (bij een vooruit varend schip) dan verandert de koers naar stuurboord.
De onderkant van de schroef "pakt" beter dan de bovenkant.
Bij een dubbelschroefschip:
de ene schroef draait naar links en de andere naar rechts.

2.2.2. Algemene beschouwing van de factoren, die het meren beïnvloeden

Het meren van een schip tegen een "obstakel" wordt door een zeer groot aantal factoren beïnvloed.
Om een idee te geven van de gecompliceerdheid van het probleem zal worden getracht de belangrijkste parameters, die het meren beïnvloeden, enigszins overzichtelijk te rangschikken.
Als volgt:

1. de karakteristieke eigenschappen van het schip.
2. de karakteristieke eigenschappen van het meersysteem.
3. de door de lokatie (waar het schip wordt gemeerd) bepaalde eigenschappen.
4. de factoren bepaald door:
   - menselijk handelen
   - sleepboten en lieren
   - trossen
   - wrijving tussen scheepshuid en meersysteem
   - werking van schroef en roer

2.2.2.1. Scheepseigenschappen

Deze kunnen als volgt worden onderscheiden:

a. vormgeving schip: lengte, breedte, diepgang en stroomlijn (zie ook 2.2.3.).
   De vormgeving van het schip is van invloed op de stroming rond het schip.

b. waterverplaatsing of massa van het schip en de hydrodynamische massa (de met het merende schip meebewegende hoeveelheid water) (zie ook2.2.3.).

c. veerkarakteristiek van de scheepshuid en mogelijk van het schip als geheel. Hierover is weinig bekend ("een VLCC kronkelt als een slang over de oceaan").

d. plaats van het zwaartepunt van het schip, zowel in horizontale als in vertikale zin. Bij VLCC's ligt het zwaartepunt in beladen toestand meestal enkele meters voor het midden van het schip. Verder zal de ligging van het zwaartepunt afhangen van de beladingstoestand van het schip. In vertikale zin kan de plaats van de stoot tijdens het

meren t.o.v. het zwaartepunt van belang zijn (eventueel slingeren van het schip geldt hooguit voor zeer kleine schepen). Er is geen fender, meerstoel of kade die bij het meren van een VLCC dat schip aan het slingeren krijgt.

Bij een calamiteit (bv. een foute manoeuvre) drijft een VLCC ongestoord dwars door de meerstoelconstructie en steiger heen. En als je de meerstoel en de steiger niet in het water hebt zien verdwijnen, denk je dat ze er nooit zijn geweest.

e. bewegingen van het schip:
   . (hoek-)snelheden
   . (hoek-)versnellingen
   (zie ook 2.1 en 2.2.4.)

2.2.2.2. De eigenschappen van het meersysteem

Een onderverdeling zou er als volgt kunnen uitzien:

A. de aard van het systeem (de constructie) onder de waterlijn:
   A1. open constructie o.a. een steiger.
   A2. gesloten constructie o.a. een kademuur.
   A3. een tussenvorm tussen A1 en A2.

) zie ook 2.1.

B. de dynamische eigenschappen van het meersysteem:
   B1. veerkarakteristiek van de draagconstructie. Voor een starre constructie (kademuur, caisson) kan de veerstijfheid als oneindig groot t.o.v. de andere veerstijfheden (fenders, scheepshuid) worden beschouwd.
   B2. veerkarakteristiek van de fender (zie 2.3.1.)
   B3. aantal meerstoelen of aantal fenders of een berthing beam (zie 2.3.3.)
   B4. afstand tussen meerstoelen of fenders (zie blz. 2-32)
   B5. de massa van het meersysteem. Meestal kan de massa van het meersysteem t.o.v. de massa van het schip worden verwaarloosd (zeker indien het een VLCC betreft).
   B6. de eigenschappen van de ondergrond (o.a. demping) (zie 2.3.2.)

Tijdens de stoot wordt de kinetische energie van het schip omgezet in potentiële energie van een elastisch systeem of de kinetische energie wordt omgezet in warmte.

De potentiële energie kan worden geleverd door:

a. vervormingsenergie
   a1. buiging
   a2. indrukking of uitrekking
   a3. wringing
   a4. afschuiving

b. pneumatische werking (samenpersen van lucht)
c. de zwaartekracht (een gewicht wordt omhooggeduwd)

De omzetting in warmte kan plaatsvinden door:

d. plastische vervorming (bv. van zacht staal)
e. wrijving (bv. als het schip niet alleen een snelheid in dwarsrichting maar ook in lengterichting heeft en daardoor langs de meerconstructie "wrijft")
f. stromingsverliezen (bv. een vloeistof wordt door kleine openingen uit een ruimte weggeperst d.m.v. een plunjer of een rubber zak met openingen).

2.2.2.3. De eigenschappen van de lokatie

Deze kunnen als volgt worden onderverdeeld:

a. verloop van de bodem
b. aard van de bodem
c. aanwezige waterdiepte ofwel de keelclearance = bodemvrijheid voor een bepaald schip
d. aanwezige manoeuvreerruimte
e. aanwezigheid van stroom
f. aanwezigheid van golven (scheeps- en windgolven en deining)
g. aanwezigheid van wind

2.2.2.4. De overige factoren, die bij het meren een rol spelen

Het menselijk handelen tijdens het meren van een schip speelt een belangrijke rol, want het is de mens (kapitein, loods), die de snelheid en de te volgen baan, waarmee het schip wordt gemeerd, bepaalt; althans voor een deel. Er zijn ook krachten, bekende en onbekende, die snelheid en baan beïnvloeden.
Onder schijnbaar identieke omstandigheden zullen de snelheid en de baan van het schip steeds weer verschillend zijn; schijnbaar omdat er onbekende krachten van buitenaf werkzaam zijn.
Het lijkt onwaarschijnlijk dat het menselijk handelen in één of andere benaderings (berekenings)wijze kan worden verwerkt (verschillende personen).
Voor sleepboten en lieren zie blz. 2-12 en 2-13.

Reeds tijdens het meren wordt begonnen scheepstrossen naar de wal uit te zetten.
Bij VLCC's oefenen de trossen bij het meren nauwelijks invloed uit op het meerproces.

De wrijving tussen de scheepshuid en het meersysteem is afhankelijk van het feit of het schip een tangentiële snelheidscomponent bezit (in de lengterichting van het schip). De dan optredende wrijvingskracht zal een functie zijn van de stootkracht en van de wrijvingscoëfficiënt tussen scheepshuid en meersysteem. Deze wrijvingscoëfficiënt is moeilijk te bepalen (er is weinig over bekend) en is sterk afhankelijk van:

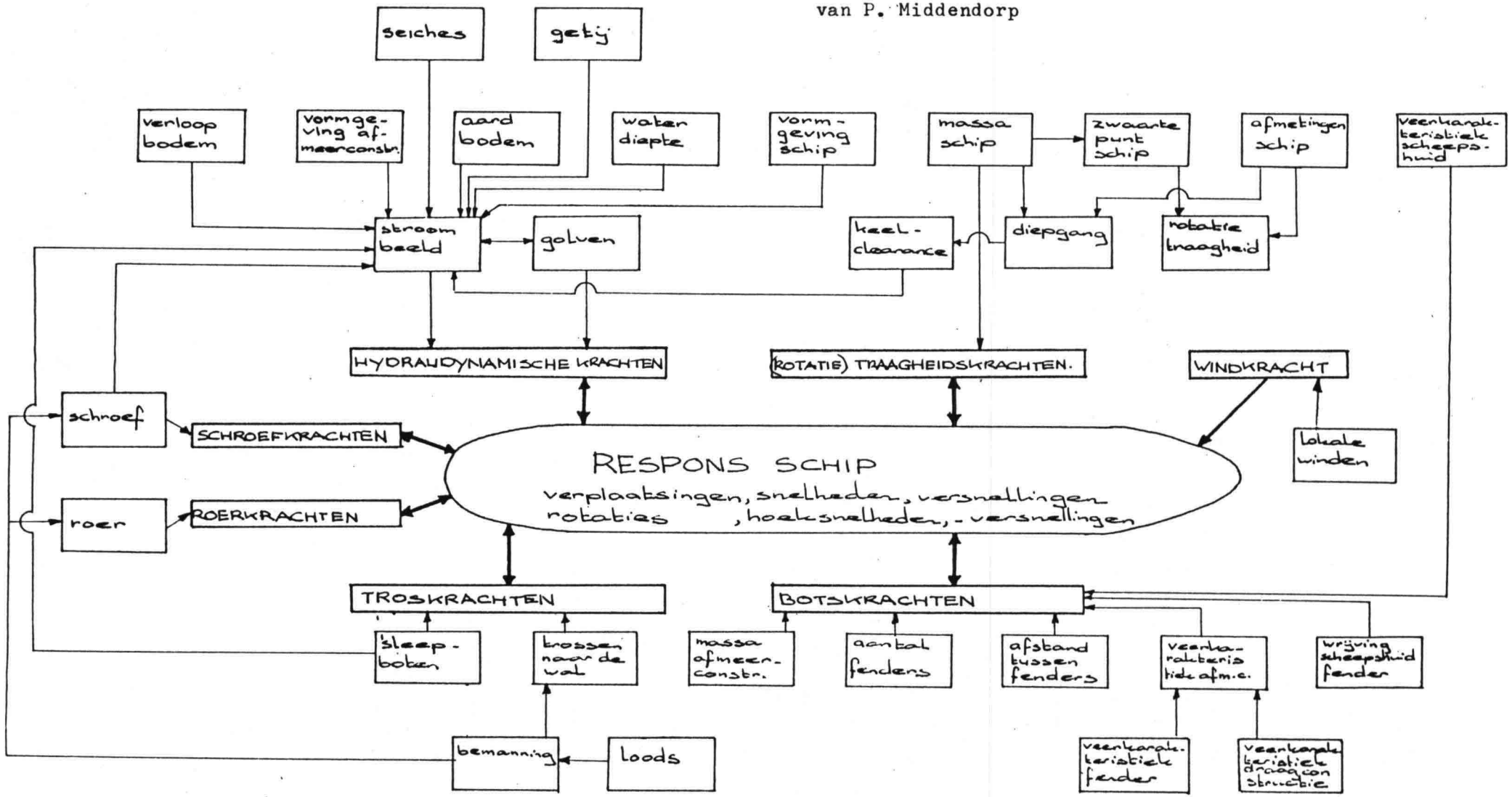
- de gebruikte materialen (in schip en meersysteem)
- de mate van vochtigheid van het wrijvingsoppervlak
- de olieverontreiniging van het wrijvingsoppervlak
- de (mariene) "begroeiing" van het wrijvingsoppervlak
- de druk (duwende sleepboten, wind, volgstroom)

De waarde van de wrijvingscoëfficiënt ligt in het interval tussen ca. 0,2 en 0,6.

De gecombineerde werking van schroef en roer is ingewikkeld.
Op blz. 2-14 is er iets meer over gezegd.

Uit hetgeen in het voorgaande is vermeld, blijkt dat het gehele meerproces (het schip van een toestand van bewegen naar een rusttoestand brengen) een ingewikkeld verlopend proces is.
De aangedragen parameters zijn afzonderlijk behandeld, doch in werkelijkheid beïnvloeden zij elkaar.
In de figuur op blz. 2-19 (uit het afstudeerrapport van P. Middendorp) is getracht de onderlinge samenhang tussen de verschillende parameters aan te geven. De dunne pijlen geven de onderlinge relaties aan. De invloeden van de verschillende parameters zullen als krachten (met dikke pijlen aangegeven) op het schip aangrijpen, wat weer een responsie van het schip oplevert. Deze beïnvloedt op haar beurt weer de verschillende parameters. Deze krachten zullen het schip volgens de tweede wet van Newton versnellingen doen ondergaan. De tweede wet van Newton houdt in dat de traagheidskracht (het -moment) gelijk is aan de som van de uitwendige krachten (momenten). Indien deze krachten bekend zouden zijn dan zouden de voor de manoeuvre van belang zijnde bewegingsvergelijkingen kunnen worden opgesteld.

Uit het afstudeerontwerp
van P. Middendorp



Verband tussen de verschillende factoren die bij het afmeren een rol spelen

2.2.3. Schematisering van het probleem

Het meren van een schip is een overgangstoestand, nl. van bewegen naar rust. Het is duidelijk dat het probleem van het meren van een schip en de oplossing hiervan een schaalprobleem in zich bergt afhankelijk van het feit of een zeilboot tegen een drijvende steiger, een veerboot tegen een kademuur, een begeleidingsvaartuig tegen een bevoorradingsschip of een olietanker tegen meerstoelen moet worden gemeerd.
In ieder geval heeft elk meersysteem, in welke vorm dan ook, geplaatst tussen het schip en de constructie (het "obstakel") waartegen (waarlangs) wordt gemeerd om een goede afgebakende positie t.o.v. het obstakel te verkrijgen, hetzelfde doel, nl.:
het zonder schade opnemen van de kinetische energie van de bewegende drijvende massa.

Het meren van grote schepen geschiedt, zoals reeds is besproken, altijd met behulp van sleepboten.
Indien de sleepboten een schip volledig zouden kunnen beheersen, zouden meerconstructies niet nodig zijn. In de praktijk blijken ze echter wel degelijk nodig. Behalve voor het meren aan een SPM (zie blz. 2-4, 2-7 en 2-8) en in die gevallen, waarin het schip tegen een dichte constructie meert en de keel clearance niet al te groot is (o.a. in het Calandkanaal in Rotterdam-Europoort). Het opgestuwde water tussen schip en kade werkt als buffer (veer).
Het meren van schepen is nog steeds een kwestie van ervaring van kapiteins, loodsen en ontwerpers (zie de bijdrage van de loods C.H.A. van Putten.)
Het probleem van het merende schip is zeer ingewikkeld en een exacte berekening is dan ook niet te geven. In het volgende zal sterk worden geschematiseerd en zullen veel veronderstellingen worden gemaakt om het probleem toch enigszins theoretisch te kunnen benaderen.
Het probleem schip-obstakel is een botsingsprobleem: twee massa's, die met een bepaalde snelheid met elkaar in aanraking komen. Zoals reeds in het voorgaande is gesteld, wordt meestal tussen het schip en het obstakel (kademuur, steiger) een meersysteem geplaatst, dat de kinetische energie van de bewegende drijvende massa (het schip) zonder schade aan schip, meersysteem en obstakel moet kunnen opnemen.

Aangenomen wordt dat het meren van een schip in hoofdzaak een beweging in het horizontale vlak is (schrikken, verzetten en gieren). Verticale krachten en bewegingen kunnen bij een eerste benadering worden verwaarloosd. Dit houdt niet in dat de eigenschappen in verticale zin, zoals de keelclearance, van minder belang zouden zijn.
Gaan we uit van de hoeveelheid kinetische energie, die een bewegende massa met een constante snelheid bezit ($E = \frac{1}{2} m v^2$), dan zijn er twee onbekenden, nl. de massa en de snelheid v. Over de naderingssnelheid v van het schip is, binnen zekere grenzen, wel het één en ander bekend. Maar de belangrijkste onbekende is de grootte van de massa, die voor het bewegende schip in rekening moet worden gebracht. En vooral de grootte van de meebewegende hoeveelheid water (de hydrodynamische massa m_w).
Deze hydrodynamische massa is tijdens de stoot afhankelijk van de volgende parameters:

- afmetingen van het schip
- diepgang van het schip
- (under)keelclearance (bodemvrijheid)
- stijfheidskarakteristiek van het meersysteem
- de wijze van meren van het schip
- de naderingssnelheid van het schip
- de "dichtheid of openheid" van het obstakel waartegen het schip aanlegt.

Bij de meeste ontwerpmethoden worden slechts enkele van de bovenvermelde parameters in rekening gebracht.
In de praktijk is het gebruikelijk dat de massa van het schip met een constante toegevoegde massa wordt vergroot, onafhankelijk van de bovengenoemde effecten.

Uitgaande van de wet van behoud van energie moet het verlies aan kinetische energie van het schip als arbeid door het meersysteem worden geleverd:

$$A = \int_0^{\delta} F \cdot ds = \alpha \cdot F \cdot \delta \qquad \text{(lineair dan } \alpha = \tfrac{1}{2}) (0 < \alpha < 1)$$

δ = max. uitwijking
F = kracht

$E_{kin} = : \frac{1}{2} m v^2 \cdot C_t = E_{pot} = \alpha \cdot F \cdot \delta$, waarin

C_t = een produkt van dimensieloze coëfficiënten, dat aangeeft welk deel van $\frac{1}{2} m v^2$ door het meersysteem moet worden opgenomen.

Er zijn verschillende berekeningsmethoden in omloop om het meren van schepen te benaderen. In de praktijk gaat men meestal uit van de vorm van de energievergelijking volgens Saurin met de dimensieloze coëfficienten C_m, C_e en C_s (zie lit. (1)).
De door het meersysteem op te nemen energie is nu:

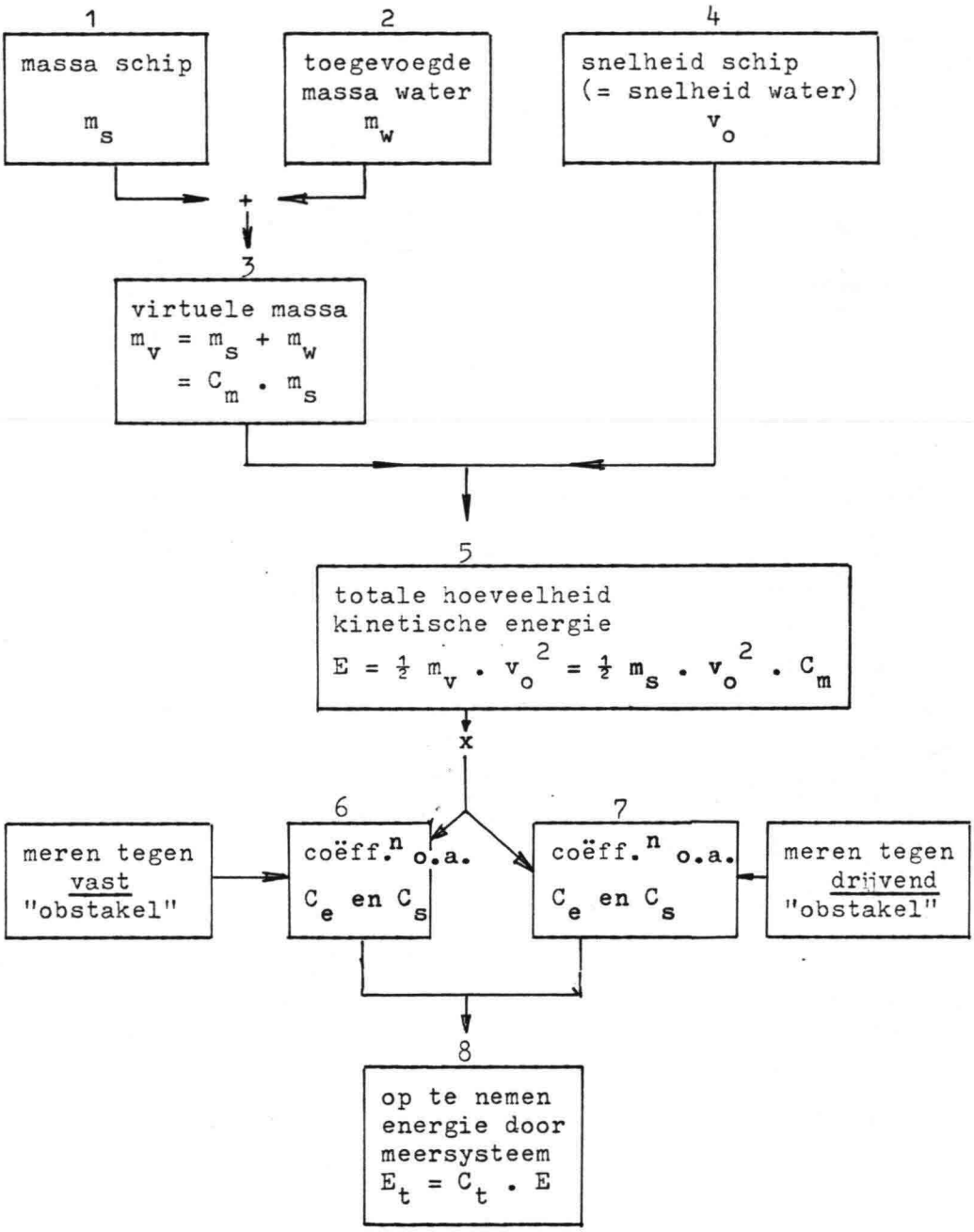
$$E_{kin} = \tfrac{1}{2} m_s v_o^2 \cdot C_m \cdot C_e \cdot C_s = A = E_{pot} = \alpha \cdot F \cdot \delta$$

waarin:

A = arbeid door meersysteem te leveren in Nm of kNm
m_s = massa schip in kg of ton
v_o = snelheid schip in dwarsrichting op het moment van contact maken met het meersysteem in m/s
C_m = coëfficiënt voor de hydrodynamische massa ($C_m \geq 1$)
C_e = excentriciteitscoëfficiënt ($C_e \leq 1$)
C_s = deformatiecoëfficiënt of relatieve stijfheidscoëfficiënt van het schip ($C_s \leq 1$)

Een bezwaar van deze formule is, dat C_m onbekend is (er ligt geen goede berekening aan ten grondslag) en in de afleiding van C_e de J_{polair} van het water, die de draaiing van het schip beïnvloedt, niet wordt meegenomen.
Ook de invloed van de bodemvrijheid en de veerstijfheid van het meersysteem is niet in de formule verwerkt.

De berekening van het meerproces kan als volgt schematisch worden weergegeven:



De variabelen 1 t/m 8 zullen nu aan een nader onderzoek worden onderworpen

De massa van het schip (1)

De massa van het schip is te bepalen m.b.v. het deplacement (= waterverplaatsing = gewicht verplaatste hoeveelheid water).

deplacement = $\gamma_w \cdot \nabla = \rho_w g \nabla$ (zie ook 2.1.)

ofwel $m_s = \frac{\text{depl.}}{g} = \rho_w \nabla$

met γ_w = soortelijk gewicht water
ρ_w = massadichtheid water
∇ = volume onderwatervorm van het schip = inhoud verplaatste hoeveelheid water.

Voor verschillende soorten schepen gelden bij benadering de volgende coëfficiënten:

type schip	deplacement	blokcoëfficiënt
olietankers en ertstankers	BRT x 2 of DWT x 1,3	0,85
vrachtschepen	BRT x 2 of DWT x 1,6	0,65 - 0,8
passagiersschepen	BRT x (1 à 1,2)	0,4 - 0,5
oorlogsschepen	is altijd gegeven	0,3 - 0,5
vissersschepen	BRT x (2 à 2,5)	0,3 - 0,4
Hovercraft (luchtkussen-vaartuigen)	BRT x 2	

Het deplacement van een schip kan ook worden bepaald m.b.v. de afmetingen van het schip en de blokcoëfficiënt.

blokcoëfficiënt (prismatic coëff.) $= \frac{\nabla}{L \times B \times T}$

waarin ∇ = inhoud verplaatste hoeveelheid water in m^3
L = lengte schip in m (lengte over alles)
B = breedte schip in m (breedte over alles)
T = diepgang schip in m (in geladen toestand)

deplacement = ρ_w g . L . B . T . blokcoëfficiënt

De toegevoegde massa water (2)
(de hydrodynamische massa)

Het blijkt dat bij het afremmen (door het meersysteem) van het schip met massa m_s ook een toegevoegde massa water m_w, die met het schip meebeweegt, moet worden afgeremd.
Zoals reeds eerder is vermeld, is de hydrodynamische massa tijdens de stoot afhankelijk van de volgende parameters:
- afmetingen en vorm van het schip
- diepgang van het schip
- (under)keelclearance (bodemvrijheid)
- stijfheidskarakteristiek van het meersysteem
- wijze van meren van het schip
- naderingssnelheid van het schip
- de "dichtheid of openheid" van het obstakel waartegen het schip aanlegt.

De hydrodynamische massa m_w kan bij benadering worden bepaald door het schip in dwarsrichting (verzetten) een harmonische beweging op te leggen. Het blijkt dat m_w frequentie-afhankelijk is.
Momenteel zijn betere (doch minder eenvoudige) berekeningsmethoden dan de formule van Saurin ($E = \frac{1}{2} m_s v^2 . C_m C_e C_s$) beschikbaar om de door het meersysteem op te nemen energie te bepalen.
In het onderstaande zullen deze methoden globaal worden beschreven.
Voor een meer exacte benadering zij verwezen naar de bij dit ontwerpdictaat gevoegde "Notitie ten behoeve van college f9A over de invloed van de traagheid van het water op de afmeerkrachten" van P.A. Kolkman, dd. februari 1981.
Twee van deze modernere methoden maken, om de kracht van het water op het schip te bepalen, gebruik van de golftheorie (potentiaalstroming), waarbij (in gedachten) het schip periodiek oscilleert (in het horizontale vlak verzetten en/of roteren (gieren)).

1. De methode van Van Oortmerssen (NSP, zie lit. (2) en (3))
die de oscillerende scheepscontouren simuleert met een vaste scheepshuid belegd met pulserende bronnen en putten. Aangezien bij één bron of put de analytische oplossing bekend is, kan (een zeer uitgebreide berekening) de relatie scheepsbeweging en kracht door het water uitgeoefend op het schip worden bepaald (de zg. overdrachtsfunctie in het frequentiedomein).

2. De methode van Fontijn (THD, zie lit. (4) en (5))
die voor het bewegen (verzetten) van het schip een vereenvoudigde (2-dimensionale) oplossing (alleen geschikt voor open constructies) geeft en voor roteren een constante en frequentie-onafhankelijke J_{polair} voor het water invoert.
De oplossing voor verzetten is ook experimenteel geverifieerd met oscillatieproeven.
Kolkman heeft de theoretische oplossing van Fontijn nog verder vereenvoudigd door alleen de lange golftheorie te gebruiken. Vooral de term, die het meest van belang is, de zg. "in fase term", is vrij redelijk beschreven.
Zowel Fontijn als Van Oortmerssen berekenen uit de overdrachtsfunctie de impulsresponsie (dit kan zolang het een lineair systeem betreft).
Kolkman heeft samen met Middendorp (zie [6]).
de lange golftheorie zodanig toegepast dat hiermee direct een differentiaalvergelijking ontstaat, die een analytische oplossing geeft.
Dit betreft speurwerk van de vakgroep Waterbouwkunde.
De berekeningen van Middendorp zijn getoetst aan de resultaten van botsproeven, waarbij een modelschip (uitgevoerd als rechthoekige bak) tegen een veer (modelfender) botste.
Bij dit verschijnsel is de beweging niet meer zuiver harmonisch, waardoor tijdens het botsproces niet langer van een constante toegevoegde massa kan worden gesproken. De toegevoegde massa is immers frequentieafhankelijk en bij een niet-harmonische beweging zijn meer frequenties in het geding.
De berekening van de meerkrachten bij centrisch en excentrisch botsen van een schip tegen een meerstoel (berthing dolphin) volgens de methode van Kolkman en Middendorp wordt niet gegeven. Alleen de conclusies worden hier vermeld.
Voor een centrische botsing kunnen we m.b.v. de formule van Saurin voor de te leveren arbeid door het meersysteem schrijven:

$$A = \tfrac{1}{2}\, m_s\, v_o^2 \cdot C_m \cdot C_s \quad (C_e = 1).$$

Stel $C_s = 1$ (geldt zeker in model) dan vinden we voor
C_m met $A = \tfrac{1}{2} F \delta = \tfrac{1}{2} k \delta^2$

$$\boxed{C_m = \frac{k\,\delta^2}{m_s\, v_o^2}}$$ voor een centrische botsing.

Deze formule voor C_m suggereert een afhankelijkheid van de verschillende parameters, die er niet is. Uit de proeven van Blok en Dekker (zie [1]) blijkt dat C_m niet lineair afhankelijk is van k en dat C_m onafhankelijk is van v_o!

C_m is afhankelijk van de frequentie van de scheepsbeweging

($\omega = \sqrt{\frac{k}{m_s}}$) en van de stijfheid (k) van het meersysteem.

Uit de resultaten volgt:
hoe kleiner de keelclearance (bodemvrijheid),
des te groter de C_m-waarde.
Een grote bodemvrijheid geeft een lage C_m-waarde.
Naarmate de veer stijver (k groter) is, geeft dit een kleinere C_m-waarde.
Een slappe veer (k klein en δ groot, δ^2 nog groter) geeft een grote C_m-waarde.
Deze resultaten zijn in overeenstemming met hetgeen Blok en Dekker in het NSP hebben gevonden.
Fysische verklaring:
door de vertraging (het afremmen) van het schip door het meersysteem ontstaat een translatiegolf ($z \ll D$, lange golf), die een extra kracht in de bewegingsrichting op het schip uitoefent (uitgangspunt van Kolkman en Middendorp).
- langzaam vertragen (slappe veer, k klein) dan een kleine (lage) translatiegolf
- snel vertragen (stijve veer, k groot) dan een grote (hoge) translatiegolf.

Bij een stijf meersysteem is de vertraging groter en dus de opgewekte golf groter. Hierdoor wordt meer energie afgevoerd (in de golf) en behoeft er dus minder energie te worden opgenomen.

In het algemeen kan worden gesteld dat verder onderzoek naar de grootte en de invloed van de verschillende parameters op de hydrodynamische massa beslist noodzakelijk is.

<u>De virtuele massa</u> (3)
Onder de virtuele massa van een schip (m_v) verstaat men de som van de massa van het schip (m_s) en de toegevoegde massa water (m_w, de hydrodynamische massa).
In formule $m_v = m_s + m_w = C_m \cdot m_s$

$$\text{of} \qquad C_m = \frac{m_s + m_w}{m_s} = 1 + \frac{m_w}{m_s} > 1$$

De waarde van C_m, gevonden uit modelproeven, kan variëren van ca. 1,5 tot 4.

In de praktijk wordt voor vrachtschepen en olie- en ertstankers voor C_m vaak een waarde aangehouden, die ligt in de buurt van 1,5 à 2,0. Als volgt te benaderen: $m_w \approx \frac{\pi}{4} T^2 \cdot L \cdot \rho_w$, waarin

T = diepgang schip

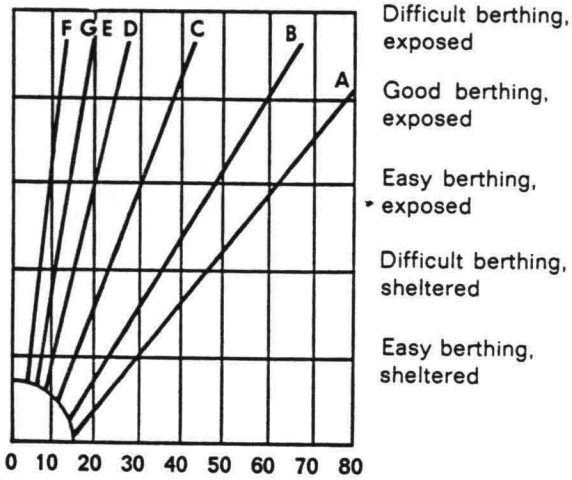
L = lengte schip

ρ_w = massadichtheid water

De snelheid van het schip (4)

De snelheid v_o, die in de formule moet worden ingevoerd, is theoretisch gezien de snelheid van het contactpunt van het schip met het meersysteem. Praktisch wordt deze snelheid begrensd door de sterkte van de scheepshuid (het schip) en de sterkte van het meersysteem.
Heeft het schip een translatie u en een rotatie ω dan is (in vectornotatie): $\vec{v}_o = \vec{u} + \vec{\omega} \cdot r$, waarin r de afstand tussen contactpunt en zwaartepunt schip is en ω een teken heeft.

Graph for determining berthing speeds



A = for vessels of about 1,000 tons
B = " " " " 5,000 tons
C = " " " " 10,000 tons
D = " " " " 20,000 tons
E = " " " " 30,000 tons
F = " " " " 80,000 tons
G = " " " " 100,000 tons and larger

uit "Rubber Fenders", een Vredesteinbrochure

Geen rotatie dan $\vec{v}_o = \vec{u}$. Enkel rotatie dan $\vec{v}_o = \vec{\omega}\ r$.
Vaak heeft het schip niet alleen een snelheidscomponent loodrecht op de meerconstructie maar ook één (een kleinere) in de langsrichting daarvan.
Het schip wil langs het meersysteem verschuiven. Het systeem moet ook hierop zijn berekend.
Op welke manier het meren ook wordt uitgevoerd, de snelheid moet zo laag (klein) mogelijk worden gehouden en dit is zeker erg belangrijk voor grote en zeer grote schepen.
In werkelijkheid is de snelheid van het schip afhankelijk van een groot aantal parameters, o.a.:
- de vorm en afmetingen van de haven en de aanlegplaats
- de grootte en belading van het schip
- **de manoeuvreereigenschappen van het schip**
- de wel of niet beschutte ligging
- de weersomstandigheid (windsnelheid en zicht)
- de toestand van de zee (het water) (golven en stroom)
- **sleepboten**

Van invloed zijn verder nog:
. de kwaliteit van de aanwezige beloodsing en
. de betrouwbaarheid van de bemanning.

De snelheden tijdens het meren ($\perp$ meerstoel) liggen in het algemeen, afhankelijk van de scheepsgrootte, tussen ongeveer 5 cm/s (VLCC m.b.v. sleepboten) en 80 cm/s (kleine schepen, bv. vissersschepen).
In ieder geval is het zeer belangrijk de meersnelheid zo nauwkeurig mogelijk te weten, want deze komt in de energieformule in het kwadraat voor.

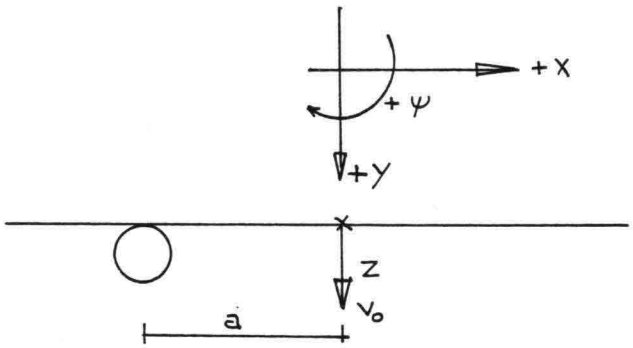
<u>De totale hoeveelheid kinetische energie</u> (5)
De energie, die het schip m.b.v. het meersysteem moet afvoeren, bedraagt nu

$$E = \tfrac{1}{2}\, m_v \cdot v_o^{\,2} = \tfrac{1}{2}\, m_s \cdot v_o^{\,2} \cdot C_m$$

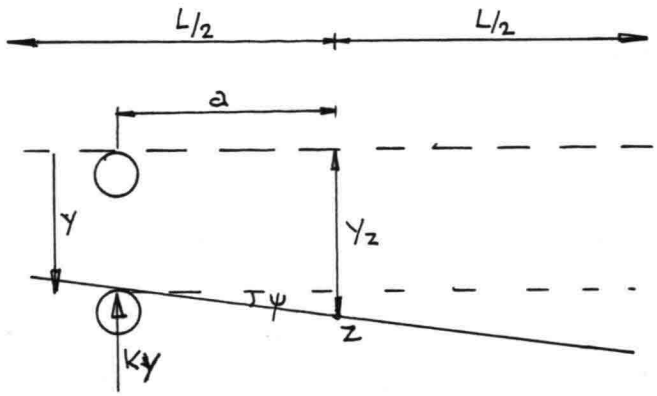
<u>Meren tegen een vast "obstakel"</u> (6)
Onder een <u>vast</u> "obstakel" wordt verstaan:
- een massieve kademuur
- een enigszins open kademuur
- een steiger, een meerstoel of een berthing beam.

Bij het meren tegen een vast obstakel wordt de onder 5 bepaalde waarde van E vermenigvuldigd met de coëfficiënten C_e (excentriciteit), C_s (deformatie schip) en eventueel met C_k ("openheid van de constructie"). De belangrijkste reductie wordt geleverd door de excentriciteitscoëfficiënt C_e.
De excentriciteit wordt veroorzaakt door het feit, dat het schip als regel onder een (kleine) hoek het meersysteem nadert. Dit betekent, dat het eerste contact met een zekere excentriciteit t.o.v. het zwaartepunt van het schip plaatsvindt.
In de onderstaande figuren is het schip geschematiseerd tot een homogeen materieel lijnsegment met een lengte L en is het meersysteem gedacht te bestaan uit 2 elastische meerstoelen ieder met een veerconstante k (de reactiekracht is dus ky). Doordat het schip het meersysteem onder een zekere hoek nadert, wordt in eerste instantie slechts één meerstoel geraakt (de andere is niet getekend).

a. Op het moment van raken. Het schip heeft een snelheid v_o in de positieve richting van de y-as. Het nulpunt van het assenstelsel bevindt zich halverwege de lengte L van het schip (in het zwaartepunt daarvan). Het schip raakt de meerstoel op een afstand a uit het zwaartepunt.



b. Enige tijd later. De meerstoel is verplaatst (doorgebogen t.o.v. de inklemming in de grond) over een afstand y. Het schip heeft zowel een verplaatsing in de y-richting als een rotatie ψ om haar zwaartepunt ondergaan.



Voor kleine hoeken geldt $y_2 = y + a\,\psi$

Indien we de toegevoegde watermassa, de demping etc. verwaarlozen zijn de bewegingsvergelijkingen van en t.o.v. het zwaartepunt Z:

$$m\ddot{y}_z = -k\,y \quad \text{of} \quad m\,(\ddot{y} + a\,\ddot{\psi}) = -k\,y \tag{1}$$

$$\text{en } J_\psi\,\ddot{\psi} = k\,y\,.\,a \tag{2}$$

Het betreft hier de tweede afgeleide naar de tijd van y en ψ ($\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}$)

J_ψ = polair massatraagheidsmoment t.o.v. de Z-as. Hiervoor kan worden geschreven $m\,.\,j_\psi^2$ (massa van het schip, resp. polaire massatraagheidsstraal).

Vergelijking (2) gaat dan over in

$$m\,\ddot{\psi} = \frac{a\,k\,y}{j_\psi^2} \tag{3}$$

(3) ingevuld in (1) geeft:

$$m\,\ddot{y} + \frac{a^2\,k\,y}{j_\psi^2} = -k\,y$$

Verdere uitwerking leidt tot:

$$m\,\frac{j_\psi^2}{a^2 + j_\psi^2}\,.\,\ddot{y} = -k\,y \tag{4}$$

Zouden we alleen te maken hebben gehad met een verplaatsing y en niet met een hoekverdraaiing ψ (dus een centrische botsing) dan zou de vergelijking zijn geweest:

$m \ddot{y} = - k y$ (zie par. 2.2.4.).

Als gevolg van de excentriciteit van de botsing wordt dus aan de massa m een term $\frac{j_\psi^2}{a^2 + j_\psi^2}$ toegevoegd. Dit is de zogenaamde excentriciteitsfactor C_e, die kleiner of gelijk is aan 1. In de bovenstaande afleiding is het schip geschematiseerd tot een homogeen materieel lijnsegment (dus zonder breedte, met $j_z = 0{,}29$ L). Door rekening te houden met de breedte b moeten we r inplaats van a in de formule voor C_e invullen (r = afstand zwaartepunt schip tot contactpunt met meerstoel $= \sqrt{a^2 + \frac{1}{4} b^2}$).
Voor geladen tankers ligt j_ψ in de orde van 0,2 à 0,25 L. Hiermee wordt:

voor a = 0 (centrische botsing)	$C_e = 1$
voor a = $\frac{1}{4}$ L	$C_e = 0{,}39$ à $0{,}5$
voor a = $\frac{1}{2}$ L	$C_e = 0{,}14$ à $0{,}2$

Dit laatste geval zal zich voor een systeem bestaande uit 2 meerstoelen naar alle waarschijnlijkheid niet voordoen, echter wel ten naaste bij bij het meren tegen een doorgaande constructie (bv. kademuur, berthing beam zonder vooruitstekende punten).
Bij de bovenstaande afleiding moeten 2 kanttekeningen worden geplaatst:
1. Na de eerste botsing volgt de tweede met de andere meerstoel (of een ander punt van de kademuur of berthing beam). Teneinde een economische constructie te maken moeten de krachten bij de tweede botsing niet groter zijn dan die bij de eerste. Uit een berekening, waarbij geen energieverliezen in rekening worden gebracht, volgt dat de eerste stoot gelijk is aan de tweede, indien de afstand tussen de 2 meerstoelen gelijk is aan 2 x j_ψ . Aangenomen is daarbij dat het zwaartepunt van het schip zich midden tussen de 2 meerstoelen bevindt. Bij kleinere afstanden tussen de 2 raakpunten is de eerste stoot kleiner dan de tweede (bij grotere groter). In werkelijkheid wordt het schip door de verplaatsing en de verdraaiing door het water afgeremd, dit maakt dat de raakpunten verder uit elkaar kunnen worden ontworpen. Als regel wordt de onderlinge afstand echter gesteld op 0,3 à 0,4 L ($j_\psi \sim$ 0,2 L); daarbij is dan rekening gehouden met het grootste schip, voor kleinere is de afstand uitgedrukt in de traagheidsstraal groter. Terzijde zij opgemerkt, dat indien

de beide meerstoelen gelijktijdig worden geraakt, C_e voor ieder van beide meerstoelen 0,5 bedraagt, indien zwaartepunt van het schip zich midden tussen beide meerstoelen bevindt.

2. Voor de afleiding van de term C_e is rekening gehouden met de massa en het polair traagheidsmoment van het schip. In wezen zouden ook die van de hydrodynamische massa moeten worden ingecalculeerd. Daarbij blijkt, dat de keelclearance en de veerstijfheid van het meersysteem een belangrijke invloed hebben op de waarde van C_e (een toenemende keelclearance en een grotere veerstijfheid geven beide een grotere waarde van C_e). Eén en ander is nader uitgewerkt in de bij dit ontwerp-dictaat gevoegde "Notitie t.b.v. college f9A over de invloed van de traagheid van het water op de afmeerkrachten" van P.A. Kolkman dd. februari 1981.

Wil men ook nog de vorm van het vaste obstakel in rekening brengen dan zou men een coëfficiënt C_k kunnen invoeren:

- voor een dichte kademuur $C_k \approx 0,8$ (opstuwing van water tussen kade en schip, vooral bij een kleine bodemvrijheid en grote schepen).
- voor een enigszins open kademuur $C_k \approx 0,9$ (het water kan gemakkelijker wegstromen).
- voor een steiger, meerstoel of berthing beam $C_k = 1$.

De energie, die het schip bij het meren opneemt als gevolg van de elastische vervorming van de scheepshuid en de eventuele vervorming (buiging) van het gehele schip, wordt in rekening gebracht door de deformatiecoëfficiënt C_s. $C_s \approx 0,9$ à $0,95$.
Voor kleine schepen en schepen met een berghout (zoals sommige Ro-Ro-schepen) is $C_s \approx 1$ (tamelijk stijve schepen).
Door de botsing kan ook nog wat energie verdwijnen door trillingen in het schip.
Ligt het contactpunt schip-meersysteem niet op dezelfde hoogte als het zwaartepunt, dan kan het schip in slingering geraken (geldt hooguit voor zeer kleine schepen). Meestal worden alleen C_e en C_s in rekening gebracht.

Meren tegen een drijvend "obstakel" (7)

Onder een drijvend "obstakel" wordt hier verstaan een schip of een ponton.

Tussen de twee schepen bevinden zich meestal drijvende fenders (bv. rubber cilinders met lucht gevuld).
De belangrijkste reductie wordt ook hier geleverd door de excentriciteitscoëfficiënt C_e.
De berekening is hetzelfde als voor een vast obstakel. C_e zal in het algemeen liggen tussen 0,5 en 1.
Voor grote schepen (olietankers en ertscarriers) zou men ook hier voor de opstuwing van water tussen de beide grote schepen een factor $C_k \approx 0{,}9$ kunnen invoeren. Voor diep water zal $C_k \approx 1$ zijn.
De energie, die het merende schip opneemt, kan ook hier in rekening worden gebracht door de factor $C_s \simeq 0{,}9$ à $0{,}95$.
De traagheid van het schip waartegen wordt gemeerd, kan in rekening worden gebracht m.b.v. de theorie van de "zachte" botsing. De coëfficient hiervoor is als volgt:

$$C_z = \frac{1}{1 + \frac{m_v}{m^1_v}}$$

waarin m_v = virtuele massa merende schip

m^1_v = virtuele massa schip, waartegen wordt gemeerd.

Om de grote moeilijkheid van de hydrodynamische massa te omzeilen kan eenvoudigweg worden gesteld:

$$C_z = \frac{1}{1 + \frac{m_s}{m^1_s}}$$

waarin m_s = massa merende schip

m^1_s = massa schip, waartegen wordt gemeerd.

Voor $m_s = m^1_s$ is $C_z = \frac{1}{2}$.

<u>Op te nemen energie door het meersysteem</u> (8)
De uiteindelijk door het meersysteem op te nemen energie bedraagt nu:

$$E_{t(otaal)} = E \cdot C_t = \tfrac{1}{2} m v^2_o \cdot C_t$$

De belangrijkste coëfficiënten waaruit C_t is samengesteld zijn dus:

$$C_t = C_m \cdot C_e \cdot C_s$$

$$\boxed{E_t = \tfrac{1}{2} m v^2_o \cdot C_m \cdot C_e \cdot C_s}$$

met C_m tussen ca. 1,5 en 4

C_e tussen 0,2 en 1

C_s tussen 0,9 en 1

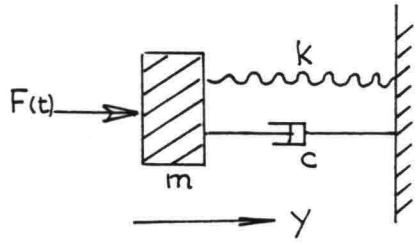
Hieraan zouden eventueel nog kunnen worden toegevoegd de besproken coëfficiënten C_k ($\sim$ 0,8 - 1) en C_z.

2.2.4. Massaveersysteem

Voor de afleiding van de excentriciteitscoëfficiënt C_e in de vorige paragraaf zijn schip en meerstoel als een enkelvoudig massaveersysteem beschouwd.
Voor een dergelijk systeem (zonder excentriciteit) geldt:

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot \dot{y} + k \cdot y = F(t)$$

waarin: m = massa
c = demping
k = veerstijfheid
F (t) = uitwendige kracht
y = verplaatsing



Voor een vrije trilling zonder demping (een harmonische beweging) geldt:

$$m \ddot{y} + k y = 0 \quad \left(\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{k}{m} \cdot y = 0\right)$$

Algemene oplossing: $y = \hat{y} \sin \omega t$
waarin $\hat{y} = y_{max}$ = amplitude
$\ddot{y} = - \hat{y} \omega^2 \sin \omega t = - \omega^2 y$
Dit ingevuld geeft: $- \omega^2 \cdot y + \frac{k}{m} \cdot y = 0$ of $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$
De eigen periode T bedraagt dus $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ $\left(T = \frac{2\pi}{\omega}\right)$
D.w.z. m groter ⟶ T groter ⟶ langzamer trillen
k groter (stijver) ⟶ T kleiner ⟶ sneller trillen.

Afgezien van de andere in de "Notitie t.b.v. college f9A over de invloed van de traagheid van het water op de afmeerkrachten" genoemde zaken, hebben we echter te maken met een meervoudig massaveersysteem, dat is opgebouwd uit de massa's en veerstijfheden van het schip, de fender en de meerstoel (of steiger).
In de "klassieke" benadering ($\frac{1}{2} m v^2 \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_e = \alpha F y$) is één en ander echter tot een enkelvoudig massaveersysteem vereenvoudigd, waarin:

- de massa's van de fender en de meerstoel zijn verwaarloosd, daar deze als regel klein zijn t.o.v. die van het schip (x C_m). Hierbij zij opgemerkt dat bij zware meerstoelen het feit dat deze plotseling moeten worden meegenomen met een snelheid gelijk aan die van het merende

schip wel degelijk aanleiding kan zijn tot grote krachten, tenzij de fender voldoende slap is;

- de veerstijfheid van het schip is ondergebracht in de term C_s, terwijl de veerstijfheden van fender en meerstoel zijn samengetrokken tot één. Stel dat de veerstijfheid van de fender k_f en die van de meerstoel k_m bedraagt, dan kunnen we zeggen dat voor de samengestelde veer geldt:

$$y = y_f + y_m \qquad \text{of} \qquad \frac{F}{k} = \frac{F}{k_f} + \frac{F}{k_m}, \quad \text{m.a.w.} \quad k = \frac{k_f \cdot k_m}{k_f + k_m}$$

Om bij open constructies (steigers) en flexibele meersystemen de max. kracht te beperken, is de toelaatbare verplaatsing van het meersysteem vaak vrij groot en ligt in de orde van 1 à 2 m.

2.2.5. Wind-, stroom- en golfbelasting en troskrachten (op het gemeerde schip)

Als het schip eenmaal ligt gemeerd, moeten de krachten op het schip ten gevolge van wind, stroom en golven via trekkrachten (op te nemen door de trossen) en drukkrachten (op te nemen door het meersysteem) naar de ondergrond worden afgevoerd.
Meestal is de windkracht sterk overheersend. De troskrachten (trek) en drukkrachten zijn dus afhankelijk van:

wind, stroming } sleepkrachten

golven: a. windgolven
b. haalgolven van langsvarende schepen.

sleepkrachten zijn voor te stellen door:

$F_{sleep} = p \cdot A \cdot C$ waarin

p = stuwdruk = $\frac{1}{2} \rho v^2$

A = getroffen oppervlak

C = vormcoëfficiënt (dimensieloos).

In het kader van de omvang van het college f9A (slechts 2 semesteruren) wordt ter informatie verwezen naar BSRA-report NS 386 (1973) (BSRA = British Ship Research Association) en naar EAU 1980 (Empfehlungen der Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen"), 6. Auflage, 1980.

NB: De in het BSRA-report gebruikte coëfficiënten zijn niet dimensieloos.

Golfkrachten zijn periodieke krachten en zijn voor te stellen door:

$M_u \sin \omega t$, waarin

M_u = amplitude (max. kracht of max. moment) en een functie van de volgende grootheden

$M_u = f\{ \rho_w, g, H, k, D, L, B, T, l_s \}$ met

ρ_w = dichtheid water

g = versnelling zwaartekracht (van de vrije val)

H = golfhoogte

k = golfgetal = $\frac{2\pi}{\lambda}$ (λ = golflengte)

D = waterdiepte

L = lengte schip

B = breedte schip

T = diepgang schip

l_s = karakteristieke lengte schip (bv. voor slingeren $l_s = h_m$)

Verwezen wordt naar de colleges b76 (korte golven) en b78 (windgolven) en naar de volgende literatuur:

- Remery, G.F.M. en Van Oortmerssen, L.
"The mean wave, wind and current forces on offshore structures and their role in the design of mooring systems"
OTC (Offshore Technology Conference) 1973, paper OTC 1741, Houston.
- Glazik, G.
"Hydraulic fundamentals for the computation of the wave damping effect of permeable jetties and breakwaters"
International Navigation Congress, Ottawa 1973, section II, subject 1.
- Nato ASI (Advanced Study Institute)
"Analytical treatment of problems in the berthing and mooring of ships"
Wallingford, 1973
- Remery, G.F.M.
"Mooring forces induced by passing ships"
OTC paper 2066, Houston, 1974

2.3. Meersystemen

2.3.1. Algemene beschouwing

Een meersysteem heeft twee functies:

- het zonder schade voor schip, meersysteem en kade (steiger) opnemen van de kinetische energie van het merende schip.
- het schip, nadat het ligt gemeerd, veilig en zonder schade langs de steiger of kade te houden.

Voor het ontwerp van het meersysteem betekent dit onder meer dat:

1. krachten naar de ondergrond moeten worden afgevoerd (hierbij moet eraan worden gedacht, dat merende schepen vaak ook een kracht in langsrichting afgeven)
2. onderdelen, waartegen schepen meren of waarlangs zij gemeerd liggen, zoveel mogelijk bestand moeten zijn tegen mechanische beschadiging en/of slijtage
3. ondanks het gestelde in punt 2 toch rekening moet worden gehouden met een mogelijke vervanging van deze onderdelen. Dit vereist dat zij eenvoudig te monteren en demonteren zijn.

Een meersysteem kan opgebouwd zijn uit de volgende onderdelen:

- kade (steiger, platform) + fenders of
- meerstoel (meerpaal, meerbalk) + fenders (of fenderconstructie).

De kade kan t.o.v. de fenders als oneindig stijf worden beschouwd. Bij een meerstoel en een meerbalk (berthing beam) is dit niet het geval. De palen van een meerstoel en de palen en horizontale verbindingsligger van de meerbalk zijn elastisch (een relatief slappe constructie) en worden ook als zodanig berekend. Bij een steiger kunnen we een aantal gradaties onderscheiden: steigers welke t.o.v. de fenders als oneindig stijf zijn te beschouwen, omdat zij zijn gefundeerd op palen, welke schoor zijn geheid in het vlak, dat evenwijdig is aan de naderingsrichting van het merende schip en steigers, welke over een zekere flexibiliteit beschikken doordat zij zijn gefundeerd op verticale (stalen) palen, welke in de bodem zijn ingeklemd.
Opgemerkt zij dat het voor steigers vaak niet toelaatbaar is, dat de constructie plotseling beweegt door een merend schip. Dit met het oog op kranen e.d. op het steigerdek.

We kunnen dus in beginsel twee typen meersystemen onderscheiden:

1. het meersysteem is opgenomen in (maakt deel uit van) de kade- of

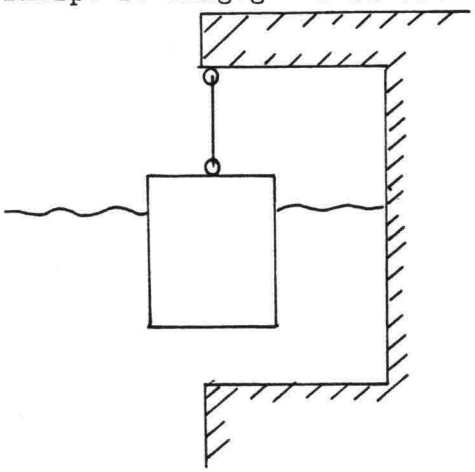
steigerconstructie, die de door het schip afgegeven energie overbrengt naar de ondergrond

2. het meersysteem (meerstoel, meerbalk) staat geheel los van de steiger en brengt zelf de door het schip afgegeven energie over naar de ondergrond.

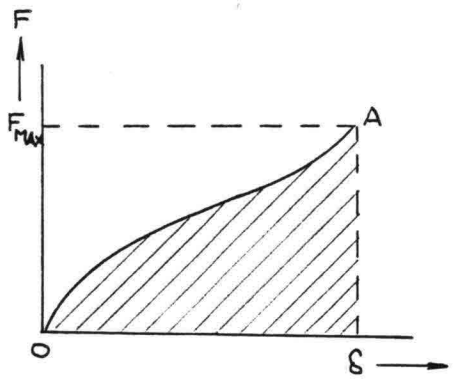
Voor het geval van 2 meerstoelen bedraagt de optimale afstand ca. 0,3 à 0,4 van de scheepslengte (ongeveer 2 j_ψ).
De eisen, die het meren en het gemeerd liggen aan het meersysteem stellen, zijn niet geheel dezelfde:
- het meren vergt een relatief slappe constructie
- het gemeerd liggen vraagt om een relatief stijve constructie.

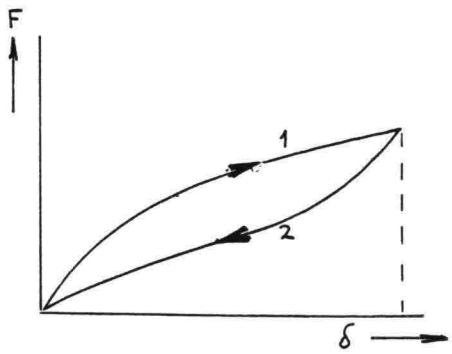
Dit zijn enigszins tegenstrijdige eisen, die een optimaal ontwerp voor een meersysteem niet eenvoudig maken.
Bovendien moet de door het meersysteem uitgeoefende max. reactiekracht zodanig over de scheepswand zijn gespreid, dat de belasting van de scheepswand niet groter is dan de toelaatbare druk. Deze wordt bepaald door de opbouw van de scheepswand (dikte van de huidplaten, spantafstand, horizontale en verticale verstijvingen etc.). Sommige schepen (o.a. Ro-Ro) zijn voorzien van een berghout.
Afhankelijk van het scheepstype werkt men met toelaatbare drukken, die variëren tussen bv. 200 en 400 kN/m^2.
Eerder is in deze paragraaf gesteld dat kaden, steigers en meerstoelen worden voorzien van fenders.
In hun meest eenvoudige vorm zijn dit houten bekledingen, die geen wezenlijke bijdrage leveren aan de elasticiteit van het systeem, doch uitsluitend bedoeld zijn om mechanische beschadigingen te voorkomen. Dit is bv. het geval bij een kade met een stalen damwandfront over de volle hoogte (meestal bij kleinere waterdiepten). Houten regels (en eventueel stijlen) voorkomen, dat het schip beschadigingen oploopt tegen de harmonicavormige damwandprofielen. Maar ook bij kademuren met een betonnen bovenbouw treft men wel (meest plaatselijke) houten bekledingen aan. Het moge bij dit soort kademuren, die zelf relatief stijf zijn, enigszins vreemd aandoen, dat geen voorzieningen worden getroffen met een grotere elasticiteit. De reden is dat de naderingssnelheid van de schepen als regel zeer gering is door het opgestuwde water tussen het schip en het gesloten kadefront.
Ook bij meerstoelen wordt wel volstaan met een houten bekleding (stalen

in de grond ingeklemde buispalen kunnen in voorkomende gevallen zelf voldoende buigslap zijn).
Wel "elastisch" zijn de zogenaamde zwaartekrachtfenders, waarvan één type in principe is aangegeven in onderstaande schets.



De energie van het merende schip wordt daarbij gedeeltelijk opgenomen door het in beweging brengen en optillen (bij een hoekverdraaiing om de pendelstijl) van het als regel zeer zware blok.
Daar deze zwaartekrachtfenders nogal onderhevig zijn aan mechanische beschadigingen, worden zij tegenwoordig niet veel meer toegepast, mede gezien de ontwikkelingen in de afgelopen 20 jaar in de rubberfenders, waarop in het navolgende zal worden ingegaan.
De rubberfenders geven aanleiding tot de volgende beschouwing.





De kinetische energie van het schip wordt als arbeid van de fender opgenomen d.m.v. een aan de beweging van het schip tegengesteld gerichte reactiekracht en een verplaatsing (indrukking) van de fender.

Mathematisch weergegeven: $E = \int_0^{\delta} F(y)\,dy$ of eenvoudiger

$E = \alpha \cdot F_m \cdot \delta$

met $0 < \alpha < 1$.

De door de fender opgenomen energie wordt dus weergegeven door het gearceerde oppervlak in het krachtverplaatsingsdiagram.

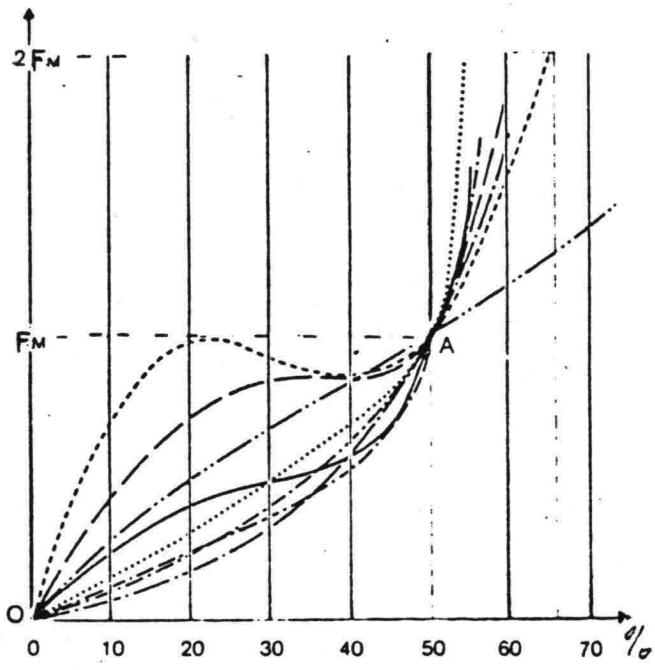
$\alpha = \frac{1}{2}$ indien OA een rechte lijn is (lineair verband).

Opgemerkt moet worden dat de opgenomen energie tijdens de indrukking (kromme 1) gedeeltelijk wordt teruggegeven aan de massa, die de compressie veroorzaakt, en gedeeltelijk wordt omgezet in de vorm van warmte in het materiaal van de fender (hysteresis).

De keuze van een fender is afhankelijk van de grootte van de hoeveelheid op te nemen energie, de grootte van de reactiekracht, afmetingen van de fenders, toelaatbare druk op de scheepswand, de verhouding energie/reactie en de stijfheid van de fender.

Teneinde enige vergelijking tussen de verschillende fendertypen mogelijk te maken zijn in de onderstaande grafiek op de horizontale as de deformatiecoëfficiënt $\frac{\delta}{h}$ in % en op de verticale as de kracht uitgedrukt in F_m uitgezet. δ is de indrukking, h de aanvangshoogte van de fender. F_m is de maximaal toelaatbare kracht in de gebruikstoestand. Grofweg kan worden gesteld dat voor de meeste fendertypen geldt, dat bij een deformatie van 50% de kracht F_m bedraagt (er zijn echter duidelijke afwijkingen).

reactiekracht



→ deformatiecoëfficiënt δ/h in %

soorten rubber fenders

De vorm van de kromme geeft een idee van de efficiëntie van de fender om energie op te nemen en van de grootte van de stoot.
We kunnen drie karakteristieke vormen van krommen onderscheiden en wel de krommen, die een eind boven de diagonaal OA liggen (de zg. stijve (harde) fenders), die rond de diagonaal OA liggen (middelsoortige (medium) fenders) en die een eind beneden de lijn OA liggen (slappe (zachte) fenders).
Slappe fenders staan een wat progressiever meren toe. Moeten schepen van verschillende grootte op een bepaalde plaats meren, dus grote verschillen in op te nemen energie, dan zijn stijve (harde) fenders niet altijd aan te bevelen.
Is te verwachten dat de normale snelheid, waarmee het schip meert, een enkele maal wordt overschreden, dan is het van belang de vorm van de kromme voorbij de normale deformatie ($\sim$ 50%) in ogenschouw te nemen. Men moet dan dat type fender kiezen waarvoor de kromme zo langzaam mogelijk toeneemt.

Voorbeeld: Een schip meert met een snelheid v. De op te nemen energie veroorzaakt een deformatie van 50% en een max. reactiekracht F_m voor een bepaalde fender. Indien nu het meren van het schip met een 20% hogere snelheid (dus v^1 = 1, 2. v) zou plaatsvinden (dus op te nemen energie E = 1,44 E), dan wordt de bijbehorende reactiekracht F_m^1 resp.:

2.F_m voor en (trapeziumvormig en afgeknotte kegel).

3 F_m voor (cilinder).

1,3 F_m enkel voor (dokfender).

In het bovenstaande zijn de verschillende fendertypen in relatieve zin vergeleken, dat wil zeggen, onafhankelijk van de werkelijke grootte van F_m (resp. E). In de praktijk zijn de materiaaleigenschappen, de dimensies en de vormgeving bepalend voor de krachten en de vervormingen, die de fenders kunnen opnemen. Zo zullen bv. de in de grafiek getoonde deltavormen alleen worden gemaakt voor het opnemen van kleine belastingen, de cilinders daarentegen ook voor grote belastingen.
Voor nadere informatie zijn verwezen naar de leveringsbrochures van de verschillende producenten.

Soms is het noodzakelijk de reactiekracht over een groter oppervlak te spreiden. We kunnen dan een fenderschot (van hardhout) toepassen. Dit schot wordt vóór de fenders aangebracht. De benodigde oppervlakte A is eenvoudig te berekenen:

$$A = \frac{F_m}{p_m} = \frac{\text{maximale reactiekracht}}{\text{max. toelaatbare druk op de scheepshuid}}$$

Meert een schip tegen een drijvend obstakel (een ponton of een schip) dan gebruikt men meestal drijvende fenders (drijvende cilinders, met lucht of met schuim gevulde fenders).

Bij gebruik van de kracht-verplaatsings-diagrammen kan het nuttig zijn nog een drietal factoren in beschouwing te nemen die, zonder de gegeven karakteristieken van de fenders wezenlijk te veranderen, toch in bepaalde gevallen van belang zijn en een iets gewijzigd gedrag kunnen verklaren. We noemen alleen kwalitatieve effecten.
De 3 factoren hebben betrekking op de invloed van de temperatuur, de snelheid en de tijd.

De invloed van de temperatuur.
Als normale gebruikstemperatuur geldt ongeveer 20°C. In het algemeen kan worden gesteld dat bij hogere temperatuur de fender iets slapper wordt en bij lager wordende temperaturen stijver.

De invloed van de snelheid.
Het is bekend dat visco-elastische materialen, waaruit de rubberfenders in hoofdzaak bestaan, afhankelijk van de snelheid van belasten verschillend reageren. Of anders gezegd, de dynamische stijfheid varieert afhankelijk van de snelheid van deformeren. Dus naarmate de snelheid van meren van het schip groter wordt (grotere energie, grotere krachten) en de tijd om de max. (normale) indrukking te bereiken kleiner wordt, wordt de stijfheid van de fender groter.

De invloed van de tijd.
Een fender op basis van elastomeren vertoont, speciaal gedurende de eerste belastingen, niet voor elke deformatie dezelfde kromme. Men kan van een zg. gewenningsperiode spreken. Eerst een aantal opeenvolgende deformaties, voordat de fender zich "normaal" gedraagt. In het algemeen is de fender na een drietal deformaties gestabiliseerd. Dit geldt niet voor met lucht gevulde fenders.

2.3.2. Berekening van meer- en bolderstoelen

De meeste constructies zijn gefundeerd op één of meer palen. De berekening van de grondweerstand, de inheidiepte en de mate van inklemming in de bodem is niet exact uit te voeren. Voor benaderende berekeningsmethoden wordt verwezen naar:

- methode Blum, zie Bautechnik, jrg. 10, Heft 5, 29 jan. 1932, p. 50-55.
  zie ook:
  EAU 1980 (Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen"), 6. Auflage, 1980 en
  CHR-brochure 78-1 "Houten damwanden en meerpalen", Stichting Centrum voor Houtresearch (CHR), Delft, 1978.
- methode Toornend, zie De Ingenieur van 4 maart 1964.
- methode van Leyden, zie De Ingenieur van 11 juni 1971.

De verdere uitwerking is gebaseerd op de methode Blum, die tot op zekere hoogte eenvoudiger is dan de andere, die uitgaan van een elastische en een elasto-plastische ondersteuning (door het invoeren van de EI van de meerstoel en een verplaatsingsafhankelijke reactie van de grond zijn zij overigens "exacter" dan Blum, die deze factoren buiten beschouwing laat).

Berekenen op een zekere overbelasting is gewenst om zoveel mogelijk beschadiging van steiger- of kadeconstructies te voorkomen.
We kunnen de meersystemen onderscheiden in starre (stijve) en elastische (flexibele) constructies:

a. starre (stijve) uitvoering:
   nadelen: - vrij kostbaar
   - grotere kans op schade aan schip en meersysteem bij aanvaring (calamiteit)
   - kans op scheef staan van het meersysteem als gevolg van blijvende verplaatsing in minder draagkrachtige grond.

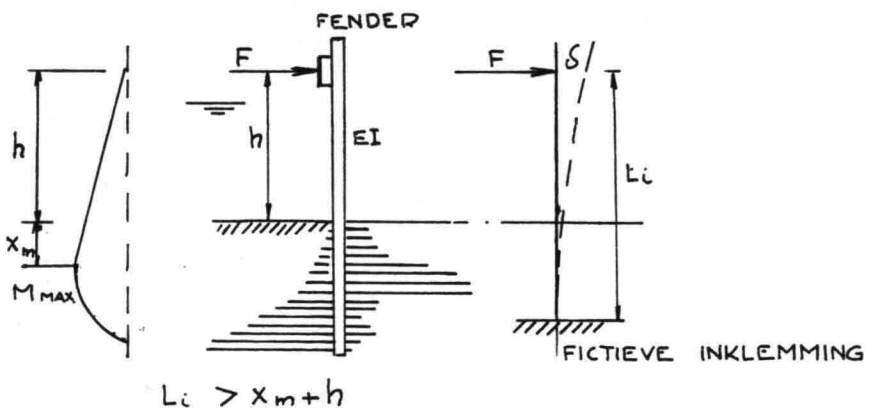
b. elastische (flexibele) uitvoering:
   voordelen: + de energie wordt op een gunstige manier opgenomen arbeid = kracht x weg. Door de elastische (slappe) constructie is de weg groot en dientengevolge de kracht klein bij een gegeven hoeveelheid op te nemen energie. Weinig kans op schade.
   + de kinetische energie van het schip wordt omgezet in niet-blijvende vormveranderingsarbeid van de constructie (elastische vormveranderingen)

Een elastische constructie is dus meestal te verkiezen boven een starre.
De mate van elasticiteit van een constructie is echter gelimiteerd.
Ten eerste door het toegepaste materiaal en de dimensionering.
Ten tweede door het feit dat aan de grootte van het meersysteem praktische grenzen zijn gesteld.
We beschouwen nu verder alleen de elastische constructies.
De berekening van een meerstoel, bestaande uit een aantal vertikale palen plus een fenderconstructie, verloopt als volgt.
De constructie moet aan de volgende eisen voldoen:

- een gegeven hoeveelheid energie moet worden opgenomen.
- de materiaalspanningen moeten binnen de toelaatbare waarde blijven.
- de druk op de scheepswand moet, afhankelijk van de constructie van de scheepswand, beneden een aanvaardbare grens blijven.

De berekening is in principe iteratief:

1. schatten van de afmetingen van de meerstoel (palen en fenders). Voor een eerste benadering worden de palen vaak even lang in de grond als erboven aangenomen.
2. met de geschatte dimensies de veerconstante k bepalen.
3. m.b.v. de op te nemen energie E en k de kracht F bepalen ($E = \alpha F^2/k$, lineair dan $\alpha = \frac{1}{2}$).
4. met F de materiaalspanningeń berekenen.
5. indien nodig nieuwe afmetingen schatten en opnieuw berekenen.

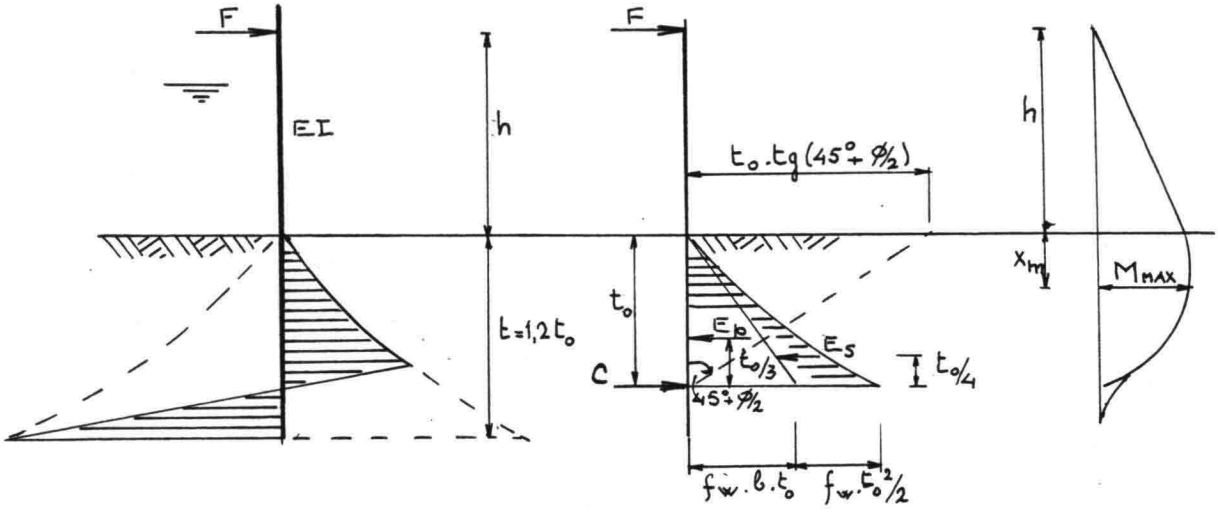


Teneinde de veerconstante k van de paal (of palen) te bepalen wordt vaak gewerkt met een fictieve inklemming op een diepte L_i beneden het aangrijpingspunt van de stootkracht F (of de troskracht).
Het moment t.p.v. de inklemming is daarbij $M_i = F\ L_i$.
Het in werkelijkheid optredende grootste moment (M_{max}) is kleiner. Als regel ligt M_{max} in de orde van 0,75 à 0,85 . M_i.

$$\delta = \frac{F \cdot L_i^{\,3}}{3\ EI}$$

Globaal is nu $\delta = \frac{F}{k}$ en $k = \frac{3\ EI}{L_i^{\,3}}$

De fictieve lengte L_i kunnen we bepalen m.b.v. de methode Blum. Deze gaat uit van de volgende schematisatie:



C = "Ersatzkraft" (vasthoudkracht)

t = inheidiepte

t_o = diepteligging C

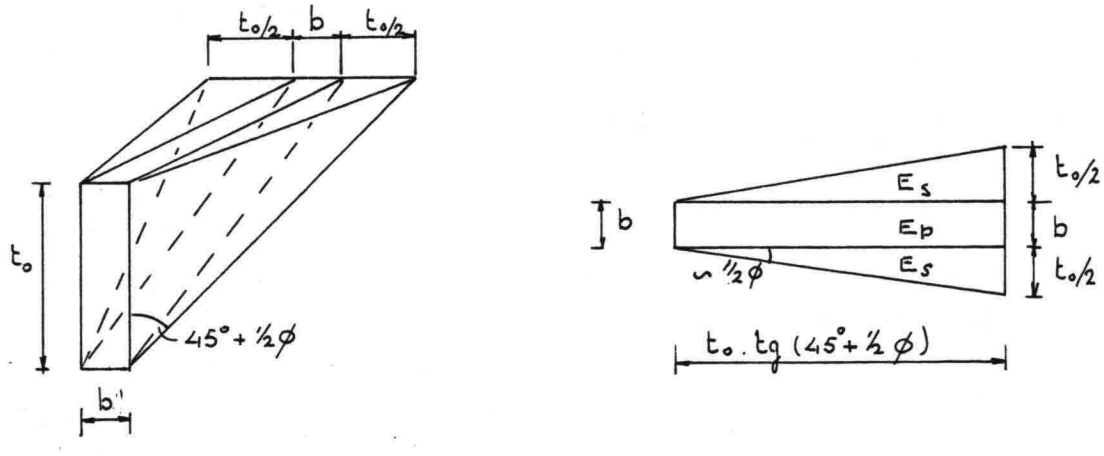
b = breedte paal (of paalgroep)

$f_w = \gamma \cdot \lambda_p \; (= \gamma \cdot tg^2 \; (45 + \phi/2))$

γ = volumegewicht grond = ρg

Ter toelichting diene het volgende:

- Ter vereenvoudiging van het rekenwerk wordt in het geschematiseerde (ideële) belastingschema de Ersatzkraft C ingevoerd, die dus de passieve reactie aan de linker-onderzijde vervangt. Deze kracht moet echter gemobiliseerd kunnen worden. Daarvoor moet onder C de paal over voldoende diepte worden doorgezet. Talrijke berekeningen hebben aangetoond, dat hiervoor 0,2 t_o voldoende is.
- De actieve korreldrukken worden verwaarloosd gezien hun geringe bijdrage.
- De passieve korreldrukken worden anders bepaald dan bij in de grond ingeklemde damwandschermen, welke in het vlak loodrecht op de tekening grote afmetingen hebben. In het geval van een meerstoel met geringe afmetingen in die richting (de diameter b) zal de reactie worden geleverd door een grondlichaam, dat enigszins uitwaaiert t.o.v. de breedte b. In de onderstaande figuur is het grondlichaam getekend, dat door Blum voor zijn berekeningsopzet is gebruikt.



E_p = passieve grondreactie recht achter de paal

E_s = grondreactie van de zijdelingse wiggen.

$$E_p = \tfrac{1}{2} \cdot b \cdot t_o^2 \cdot \gamma \cdot \lambda_p = \tfrac{1}{2}\, b\, t_o^2 \cdot f_w$$

$$E_s = 2 \cdot 1/12 \cdot t_o^3 \cdot \gamma \cdot \lambda_p = 1/6\, t_o^3 \cdot f_w$$

Het volumegewicht γ (= $\rho \cdot g$) van de grond behoeft enige toelichting. Blum rekent voor een statische belasting (troskrachten) met het volumegewicht van grond onder water γ_o (= $\gamma_{\text{natte grond}} - \gamma_{\text{water}}$). Voor een stootbelasting neemt hij het volumegewicht van de natte (met water verzadigde) grond. Hij neemt aan dat bij een stootbelasting het water in de grond niet zo snel kan ontsnappen, waardoor het water ook een aandeel in de tegendruk levert. Tevens wordt de wandwrijving verwaarloosd ($\delta_p = 0$).
In de EAU 1980 wordt aanbevolen zowel voor de stootbelasting als voor de troskrachten met het volumegewicht van grond onder water γ_o te rekenen en eveneens de wandwrijving $\delta_p = -\ 2/3\, \phi$ in rekening te brengen.
Voor de stootbelasting geeft het geen groot verschil. Voorbeeld:

zand $\phi = 30^\circ$ voor $\delta_p = 0$ is $\lambda_p = 3$

voor $\delta_p = -\ 2/3 \cdot 30 = 20^\circ$ is $\lambda_p = 5{,}75$

$\gamma_{\text{zand + water}} = 20\ \text{kN/m}^3$

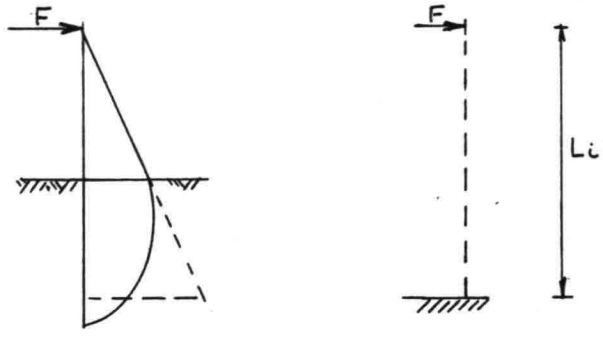
$\gamma_o = 20 - 10 = 10\ \text{kN/m}^3$

Blum met $\delta_p = 0$ $\lambda_p = 3$ en $\gamma_n = 20$ is $f_w = 20 \cdot 3 = 60\ \text{kN/m}^3$;

met $\delta_p = -\ 20^\circ$, dus $\lambda_p = 5{,}75$ en $\gamma_o = 10$ is $f_w = 10 \cdot 5{,}75 = 57{,}5\ \text{k/m}^3$

Het verschil is slechts klein.
In het algemeen zal de gang van zaken zo zijn, dat voor een bekende waarde van F (dit geldt voor een troskracht, niet voor een scheepsstoot, waarbij F afhankelijk is van de doorbuiging) eerst t_o wordt bepaald uit de voorwaarde, dat de som van de momenten veroorzaakt door F_p, E_p en E_s om C nul is. Daarmee ligt ook de inheidiepte vast (1,2 t_o). Vervolgens wordt M_{max} bepaald (daar waar de dwarskracht nul is). De verplaatsing (δ) t.p.v. F is gelijk aan het statisch moment van het momentenvlak t.o.v. F gedeeld door EI.
Indien men t.b.v. de bepaling van de scheepsstoot de inklemming in de grond vervangt door een fictieve inklemming op een diepte L_i, dan moet

L_i dusdanig worden gekozen, dat de daarbij behorende verplaatsing gelijk is aan die bij een inklemming in de grond. Met andere woorden, de statische momenten van beide momentenvlakken t.o.v. F moeten gelijk zijn.



Momentenvlakken Virtuele inklemming

Het één en ander is analytisch uitgewerkt door Blum en vastgelegd in formules waarvan hieronder de voornaamste zijn vermeld. De volgorde, waarin de formules worden geciteerd, is anders dan die bij de verbaal beschreven gang van zaken in de voorgaande alinea's omdat voor het ontwerpen van meerstoelen wordt begonnen met het aannemen van de dimensies van de constructie (de F kan pas later worden bepaald).

$$M_{max} = \frac{f_w}{24} \cdot x_m^2 \left\{ 3 x_m^2 + x_m (4 h + 8 b) + 12 h \cdot b \right\} \qquad (1)$$

waarin $f_w = \}\ . \lambda_p$

x_m = diepte M_{max} onder kanaalbodem

h = hoogte F boven kanaalbodem

b = breedte paal (of paalgroep) loodrecht op de krachtrichting.

Het moment op een afstand x onder de bodem wordt gegeven door:

$$M_x = F (h + x) - f_w \left(\frac{b x^3}{6} + \frac{x^4}{24}\right) \qquad (1a)$$

Voor een gegeven paal ($\bar{\sigma}$, W en I bekend) is $\bar{M}_{max}$ ($= \bar{\sigma} . W$) bekend, zodat m.b.v. vgl. (1) x_m proberenderwijs is te berekenen.
Met de gevonden x_m kunnen we nu t_o berekenen uit:

$$t_o^3 \frac{t_o + 4 b}{t_o + h} = 4 x_m^2 (x_m + 3 b) \qquad (2)$$

De <u>inheidiepte</u> t wordt nu: $t = 1{,}2\ t_o$ (3)

De maximum toelaatbare kracht (stoot- of troskracht) is te bepalen uit:

$$F = \frac{f_w}{6} \cdot x_m^2 \, (x_m + 3\,b) \qquad (4)$$

En de uitwijking δ ter plaatse van F volgt uit;

$$\delta = \frac{F}{3\,EI} (h + 0{,}78\,t_o)^3 \qquad \text{of}$$

$$\delta = \frac{F}{3\,EI} (h + 0{,}65\,t)^3 \qquad (5)$$

De afstand van het aangrijpingspunt van F tot de plaats van de fictieve inklemming is dus

$$L_i = h + 0{,}78\,t_o = h + 0{,}65\,t > h + x_m.$$

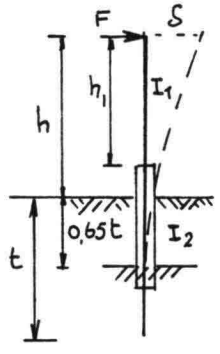
De uitwijking δ^1 t.p.v. de bodem bedraagt:

$$\delta^1 = \frac{F}{EI} \left\{ \frac{(h + 0{,}65\,t)^3}{3} - \frac{(h + 0{,}65\,t)^2\,h}{2} + \frac{h^3}{6} \right\} \qquad (5a)$$

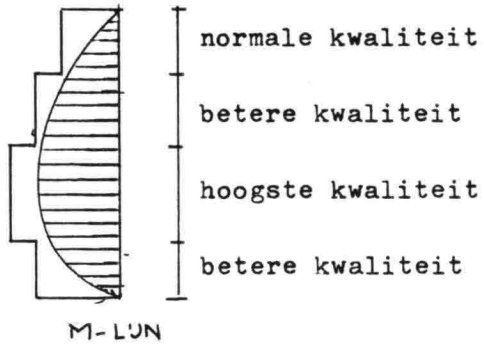
Voor het bereiken van een grotere uitbuiging bij een gegeven paal kunnen we deze verjongen (bij stalen buispalen de wanddikte verminderen). We vinden dan voor de uitwijking δ:

$$\delta = \frac{F}{3\,EI_2} \left\{ (h + 0{,}65\,t)^3 + h_1^3 \, \frac{I_2 - I_1}{I_1} \right\} \qquad (6)$$

waarin $I_2 > I_1$



Bij stalen palen kunnen we ook spelen met de staalkwaliteit. Bijvoorbeeld:



De door de paal te leveren arbeid kan als volgt worden omgewerkt:

$$\text{Arbeid} = \tfrac{1}{2}\frac{F^2}{k} = \tfrac{1}{2}\frac{1}{k}\cdot\frac{M_i^{\,2}}{L_i^{\,2}} \approx \tfrac{1}{2}\frac{L_i^{\,3}}{3\,EI}\cdot\frac{\bar{\sigma}^2\cdot W^2}{L_i^{\,2}}$$

$$\text{Arbeid} \approx \frac{1}{6}\cdot\frac{\bar{\sigma}^2}{E}\cdot\frac{W^2}{I}\cdot L_i \qquad (E = \text{elasticiteitsmodulus})$$

Hierin $\frac{\bar{\sigma}^2}{E}$ een materiaalfactor, hoe groter $\frac{\bar{\sigma}^2}{E}$ des te geschikter is het materiaal (azobé, staal, polyester, geen beton).

materiaal	$\bar{\sigma}$		E	$\frac{\bar{\sigma}^2}{E}$
	N/mm^2	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2
azobé	60	$60 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^6$	212
staal Fe 360	240	$240 \cdot 10^3$	$210 \cdot 10^6$	274
staal Fe 510	360	$360 \cdot 10^3$	$210 \cdot 10^6$	617
gew. polyester	200	$200 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^6$	2000

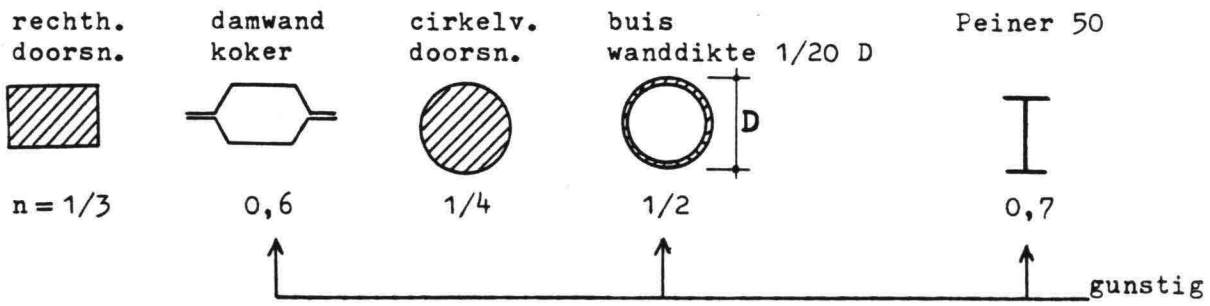
In de tabel is voor $\bar{\sigma}$ de vloeispanning (resp. 2% rekgrens, etc.) gehanteerd. Dit is voor meerstoelen niet geheel ongebruikelijk zij het dat de "veiligheid" in de op te nemen scheepsenergie (E) moet zijn verwerkt. Bovendien is hier gerekend met het fictieve inklemmingsmoment M_i, dat hoger is dan het "werkelijk" optredende M_{max}. Deze zaken zijn hier, waar het om een vergelijking gaat, buiten beschouwing gelaten.

Azobé (tropisch hardhout) en staal Fe 360 ontlopen elkaar dus niet zo veel. Staal Fe 510 is zeer gunstig.
Gewapend polyester zou het aangewezen materiaal zijn, maar uitvoering is nog niet mogelijk.

De vormfactor $\frac{W^2}{I}$, omgewerkt:

$$\frac{W^2}{I} = \frac{(\alpha\, b\, h^2)^2}{\beta\cdot b\, h^3} = \frac{\alpha^2}{\beta}\cdot b\, h = n\cdot A,$$

waarin A = oppervlak
n = factor (dimensieloos)



Stalen (cirkelvormige) buispalen worden tegenwoordig veel gebruikt. Ze hebben een gunstige vormfactor en het voordeel dat zowel de sterkte als de stijfheid in alle richtingen even groot is. Bovendien is het verjongen en/of het toepassen van verschillende staalkwaliteiten goed mogelijk.

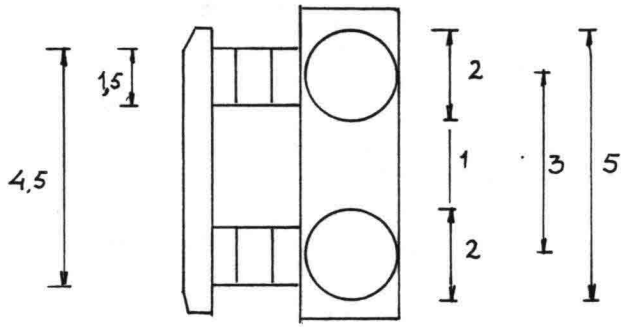
Opgemerkt moet nog worden dat hoe lager de stoot op de paal aangrijpt, des te ongunstiger (L_i kleiner, dan k groter (stijver), F groter en M groter (voor eenzelfde hoeveelheid energie)).

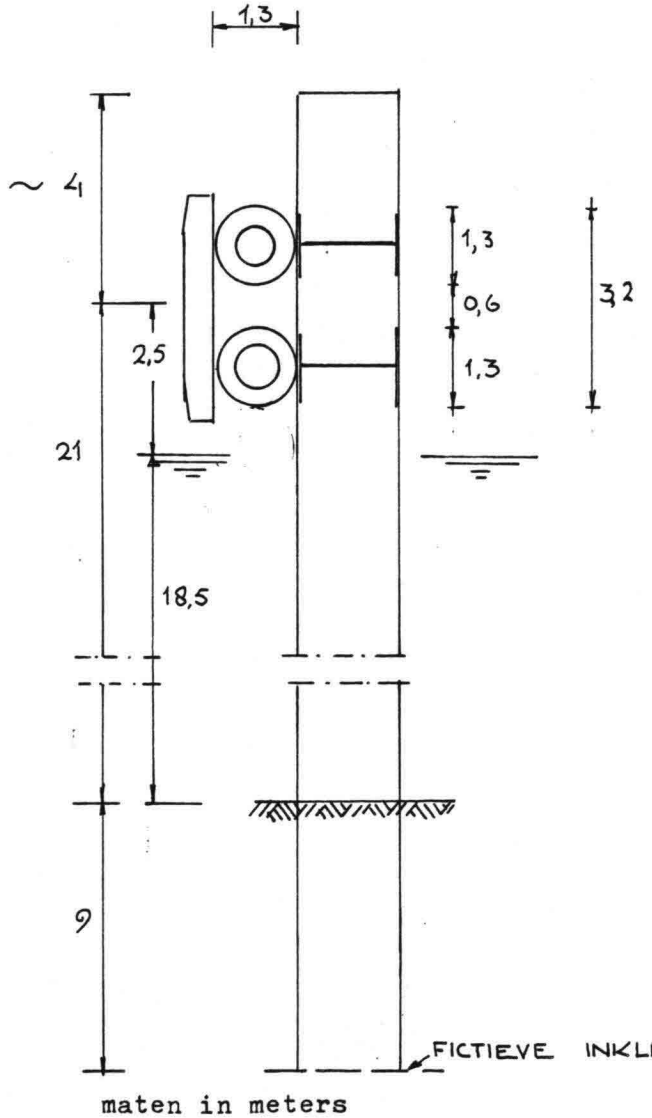
De berekening moet dus in ieder geval voor de laagste waterstand worden uitgevoerd.

Getallenvoorbeeld:

Een constructie van twee gekoppelde stalen buispalen, waarbij voor elke paal nog twee rubber fenders zijn gemonteerd (voor de 4 fenders wordt een hardhouten schot aangebracht).

Palen:





maten in meters

Ø buis = 2,0 m = $D_{uitw.}$

wanddikte w = 1/40 D = 5.10^{-2} m

$D_{inw.}$ = 1,9 m

$A = \pi . D . w = 0,314\ m^2$

$W = 0,16\ m^3$

$I = 0,16\ m^4$

L_i = 30 m (geschat)

$\bar{\sigma} = 360.10^3\ kN/m^2$)
) Fe 510
$E = 210.10^6\ kN/m^2$)

$M_{max} = \bar{\sigma} . W = 360.10^3 . 0,16$

$= 57,6 . 10^3$ kNm

$F_{opneembaar} \approx \frac{M_{max}}{L_i} = 1920$ kN

(= 192 tf)

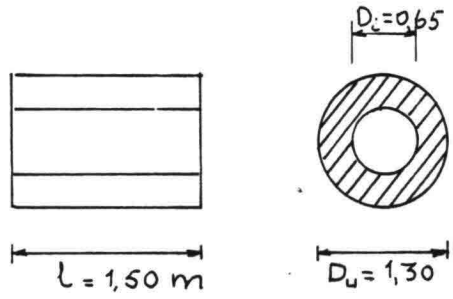
$k = \frac{3\,EI}{L_i^3} = 3730$ kN/m

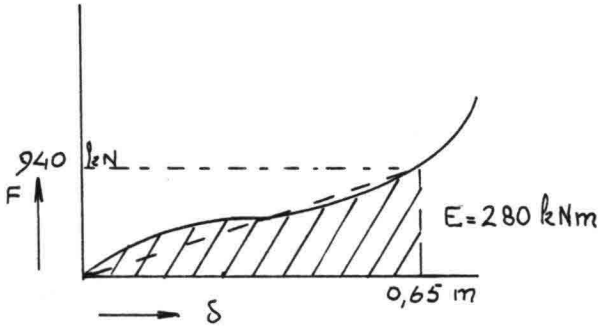
= 373 tf/m)

Voor 2 palen:

$k_{p(aal)} = 2 . 3730 = 7460$ kN/m

$F_p = 2 . 1920 = 3840$ kN





Fenders: Vredestein Gigant

$D_{uitw.} = 1{,}30$ m) $\frac{D_u}{D_i} = 2$
$D_{inw.} = 0{,}65$ m)

$l = 1{,}50$ m; gewicht = 17,6 kN

$E_{opn.} = 280$ kNm)
$F = 0{,}65$ kN) $\alpha \approx 0{,}46$
$\delta = 0{,}65$ m)

contactopp. (ingedrukt) = 1,53 m^2,

d.w.z. $\frac{940}{1{,}53} = 620$ kN/m^2 > 400 kN/m^2

dus een schot toepassen.

Voor een lineair verloop van het F-δ diagram is

$k \approx \frac{940}{0{,}65} = 1445$ kN/m' ($\alpha = 0{,}46$ i.p.v. $\frac{1}{2}$).

Voor 4 fenders $k_f = 4 \cdot 1445 = 5780$ kN/m

$F_f = 4 \cdot 940 = 3760$ kN < $F_p = 3840$ kN

De fenders zijn maatgevend, dus $F_{max} = 3760$ kN.
We verwaarlozen de massa van de fenders en van de palen t.o.v. de massa van het schip.

$$k_t = \frac{k_f \cdot k_p}{k_f + k_p} = \frac{5780 \cdot 7460}{5780 + 7460} = 3260 \text{ kN/m}$$

$\delta_t = \frac{3760}{3260} = 1{,}15$ m $= y_{max}$ $\qquad \delta_{palen} = \frac{3760}{7460} \approx 0{,}50$ m (= 1,15 - 0,65)

$E_{opneembaar} = \frac{1}{2} \cdot F_{max} \cdot \delta_t = \frac{1}{2} \cdot 3760 \cdot 1{,}15 = 2170$ kNm

Welk schip zou nu langs de constructie kunnen meren?

Stel $v_o = 0,15$ m/s, $C_m = 2$, $C_e = 0,5$ en $C_s = 0,9$

$C_t = 2 \cdot 0,5 \cdot 0,9 = 0,9$

$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot 0,15^2 \cdot 0,9 = 2170$ kNm

ofwel $m = \dfrac{2170 \cdot 2}{0,15^2 \cdot 0,9} = 214000$ ton

Voor een verhouding DWT : waterverpl. $\approx 1,5 : 2$ geeft dit een $\frac{214000 \cdot 1,5}{2} \approx 160000$ DWT tanker met een diepgang van ca. 17 m.

Voor een keelclearance van ca. 9% komen we uit op een waterdiepte van 18,5 m. We zullen nu met behulp van de methode Blum nagaan of de geschatte lengte L_i van 30 m enigszins in overeenstemming is met de werkelijkheid.

Grondgegevens: zand $\phi = 30^\circ$

voor $\delta_p = -2/3 \cdot 30^\circ = -20^\circ$ is $\lambda_p = 5,75$

$\gamma_o = 20 - 10 = 10$ kN/m^3 $\quad f_w = 10 \cdot 5,75 = 57,5$ kN/m

$b_{palen} = 2 + 1 + 2 = 5$ m en $h = 18,5 + 2,5 = 21$ m

$\bar{M} = 2 \cdot 57,6 \cdot 10^3$ kNm (het werkelijk optredend max. moment is iets lager dan $\bar{M}$ zoals later zal blijken).

$$M_{max} = \frac{f_w}{24} \cdot x_m^2 \left\{ 3 x_m^2 + x_m (4 h + 8 b) + 12 \cdot h \cdot b \right\} \qquad (1)$$

$$2 \cdot 57,6 \cdot 10^3 = \frac{57,5}{24} \cdot x_m^2 \left\{ 3 x_m^2 + x_m (4 \cdot 21 + 8 \cdot 5) + 12 \cdot 21 \cdot 5 \right\}$$

$x_m \approx 5$ m

$$t_o^3 \, \frac{t_o + 4 b}{t_o + h} = 4 x_m^2 (x_m + 3 b) \qquad (2)$$

$$t_o^3 \, \frac{t_o + 4 \cdot 5}{t_o + 20} = 4 \cdot 5^2 (5 + 3 \cdot 5)$$

$t_o \approx 12,6$ m

Inheidiepte $t = 1{,}2 \cdot t_o = 1{,}2 \cdot 12{,}6 = 15$ m (3)

Totale paallengte $\approx 4 + 21 + 15 = 40$ m

Inklemmingslengte $L_i = h + 0{,}78\ t_o$ $(= h + 0{,}65\ t) = 21 + 9{,}8 = 30{,}8$ m,

m.a.w. de eerder aangenomen waarde van 30 m was in orde van grootte juist.

Hoe groot is de "veiligheid" van de palen uit een oogpunt van materiaalspanningen?

Indien we het (Fe 510) staal juist tot aan de 2%-rekgrens zouden belasten, zou F_{max} mogen zijn:

$$F_{max} = \frac{2 \cdot 360 \cdot 10^3 \cdot W}{h + x_m} = \frac{2 \cdot 360 \cdot 10^3 \cdot 0{,}16}{21 + 5} = 4440 \text{ kN}$$

(N.B. Voor deze bepaling van F_{max} baseren we ons op de hefboomsarm t.o.v. de plaats van het werkelijke max. moment en niet op die t.o.v. de plaats van de virtuele inklemming - L_i - zoals we dat eerder hebben gedaan voor de berekening van de veerconstante van de palen. De enige verwaarlozing in deze bepaling is het weglaten van de bijdrage van de passieve korreldrukken over de hoogte x_m).

We hebben echter geen F_{max} van 4440 kN maar één van 3760 kN zoals we eerder uitrekenden. De "veiligheid" bedraagt dus ongeveer $\frac{4440}{3760} \approx 1{,}2$ (wordt 1,3 als we de voorgaande formule (4) volgens Blum gebruiken en de passieve korreldrukken dus wel meerekenen).

Recapitulerend:

	totaal	fenders	palen
δ (of y) (m)	1,15	0,65	0,50
F (kN)	3760	3760	3760
E (of Arb.) (kNm)	2170	1220*	950

*) Berekend met lineair verloop $E = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 940 \cdot 0{,}65 = 1220$ kNm, opgave volgens fabriek $4 \cdot 280 = 1120$ kNm.

Het aanrakingsoppervlak van het fenderschot met het schip moet minimaal zijn $A_{schot} = \frac{F_{maatgevend}}{\text{toelaatb. druk op scheepshuid}}$

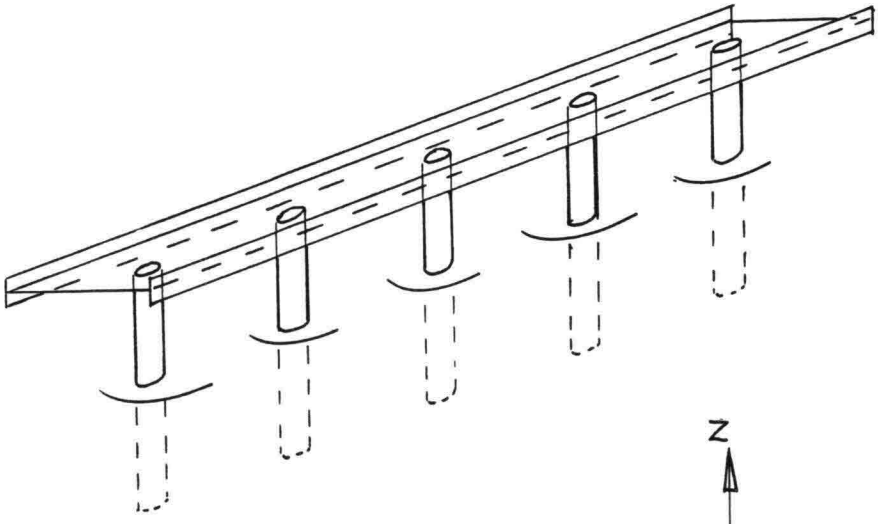
$$A_{schot} = \frac{3760}{400} = 9{,}4 \text{ m}^2$$

Toegepast een schot van $4,5 \cdot 3,2 = 14,4\ m^2$, dus $\sigma_{optr.} = \frac{3760}{14,4} = 260\ kN/m^2$

Voor de berekening van een bolderstoel wordt alleen de troskracht in rekening gebracht. De bolderstoel kan als een stijve constructie worden uitgevoerd.

2.3.3. Berekening meerbalk (berthing beam)

Indien schepen van verschillende grootte moeten worden ontvangen, kunnen de meerstoelen worden vervangen door een zg. meerbalk (berthing beam). In feite een lang horizontaal remmingwerk, in z'n eenvoudigste vorm niets anders dan een doorgaande ligger (balk) ondersteund door een aantal palen. Deze heeft het grote voordeel, dat de excentriciteit tijdens het meren altijd maximaal is (ofwel C_e minimaal). In het horizontale vlak zal de balk een grote buigweerstand moeten bezitten.
De energie van de scheepsstoot wordt in hoofdzaak opgenomen door:

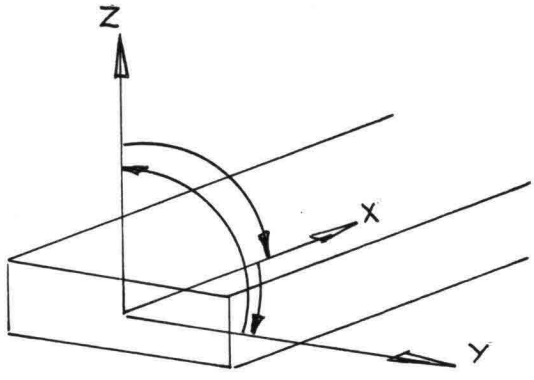


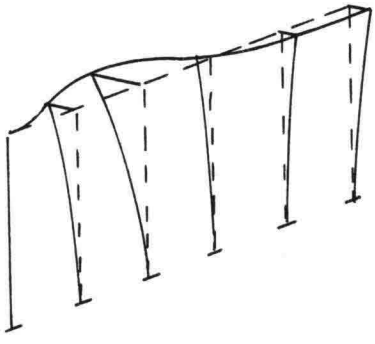
buiging van de palen M_{yz}

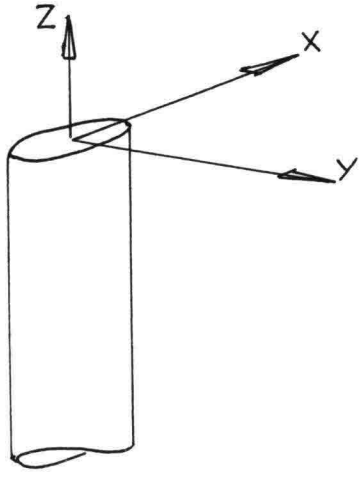
buiging van de ligger M_{xy}

wringing van de palen $M_{wr\ z}$

wringing van de ligger $M_{wr\ x}$

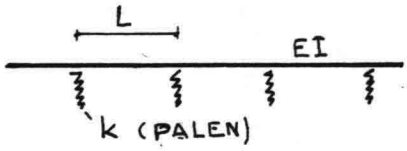






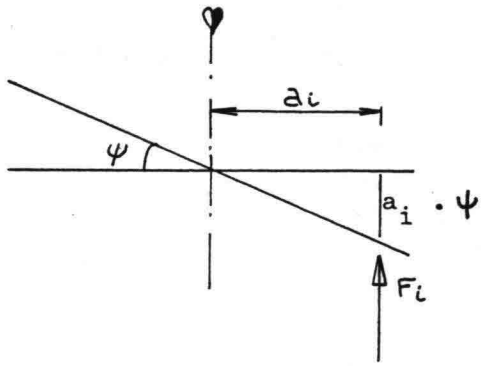
Kijkt men <u>alleen</u> naar de <u>buiging</u>, dan heeft men te maken met een doorgaande ligger op verende steunpunten.
Van groot belang voor het gedrag van de ligger onder invloed van een geconcentreerde belasting is de verhouding tussen de stijfheidsfactoren van paal en ligger.
Zij de veerconstante van de paal k en de stijfheidsfactor van de ligger $\frac{EI}{L}$, dan is

$$\frac{k}{\frac{EI}{L}} = \frac{kL}{EI} \text{ maatgevend.}$$



Is deze waarde groot, dan heeft men feitelijk te doen met een relatief slappe ligger op relatief vaste steunpunten.

Is de waarde klein dan is de ligger stijf t.o.v. de verplaatsingen. In dat geval zou men de ligger bij benadering als oneindig stijf kunnen beschouwen. Dit leidt tot een relatief eenvoudige berekening zoals uit het onderstaande moge blijken,
Teneinde de veerconstante van het systeem, welke afhankelijk is van de plaats van de botsing, te bepalen, worden aan de balk achtereenvolgens een evenwijdige verplaatsing over een afstand y en een hoekverdraaiing ψ t.o.v. haar middenpunt opgelegd. Iedere excentrische botsing zal immers deze twee effecten tengevolge hebben.
We gaan daarbij uit van de volgende veronderstellingen: er zijn n palen op onderlinge afstanden van a; elke paal heeft een veerconstante k; ψ is klein.
De verplaatsing y geeft een reactie $F = n \cdot k \cdot y$ of $y = F/n\,k$.



Voor de hoekverdraaiing ψ geldt:

F_i = reactie van paal i = $a_i \cdot \psi \cdot k$.

Alle palen tezamen geven een reactiemoment

$$M = \sum_1^n a_i^2 \cdot \psi \cdot k = \psi k \sum_1^n \cdot a_i^2 =$$

$$= \psi k W \quad \text{of} \quad \psi = M/kW, \text{ waarin}$$

$$W = \sum_1^n a_i^2$$

De verplaatsing op een afstand e uit het midden bedraagt dus
$e\,\psi = e\ M/k\ W.$
De totale verplaatsing y_t tengevolge van een kracht F, welke aangrijpt op een afstand e uit het midden (en welke kan worden vervangen door een centrische kracht F en een moment F . e) bedraagt ter plaatse van haar aangrijpingspunt:

$$y_t = y + e \cdot \psi$$

$$y_t = \frac{F}{n\,k} + \frac{e^2\,F}{k\,W} = \frac{F}{nk} \cdot \frac{W + n\,e^2}{W}$$

De veerconstante k^1 van de balk voor een kracht met een excentriciteit e is dus:

$$k^1 = \frac{F}{y_t} = \frac{n\,W\,k}{W + n\,e^2} = n\,k\,\frac{W}{W + n\,e^2}$$

Voor een centrische kracht geldt dus: $k^1 = n\,k$

Voorbeeld:

Neem een oneindige stijve balk gesteund door 5 palen, met onderlinge afstanden a en een veerconstante per paal ter grootte van k

$$W = \sum_1^5 a_i^2 = 2\ \left[a^2 + (2\,a)^2\right] = 10\,a^2 \quad \text{en}$$

$$k^1 = \frac{5 \cdot 10\,a^2 \cdot k}{10\,a^2 + 5\,e^2} = \frac{10\,a^2}{2\,a^2 + e^2} \cdot k.$$

Stel dat het merende schip een energie E heeft.

$$E = \tfrac{1}{2} \cdot \frac{F^2}{k^1} \quad \text{of} \quad F = \sqrt{2\,k^1\,E}.$$

Indien het schip tegen de balk botst met een excentriciteit e = a, wordt $k^1 = 3{,}33\ k$, terwijl $F = \sqrt{2 \cdot 3{,}33\ k\ E} = 2{,}58\ \sqrt{k\ E}.$
De hierdoor veroorzaakte kracht in de middenpaal bedraagt
$2{,}58\ \sqrt{k\ E}/5 = 0{,}516\ \sqrt{k\ E}.$
De kracht in de zwaarst belaste, uiterste paal bedraagt

$$0{,}516\ \sqrt{k\ E} + \frac{a \cdot 2{,}58\ \sqrt{k\ E} \cdot 2\,a}{10\,a^2} = 1{,}032\ \sqrt{k\ E}$$

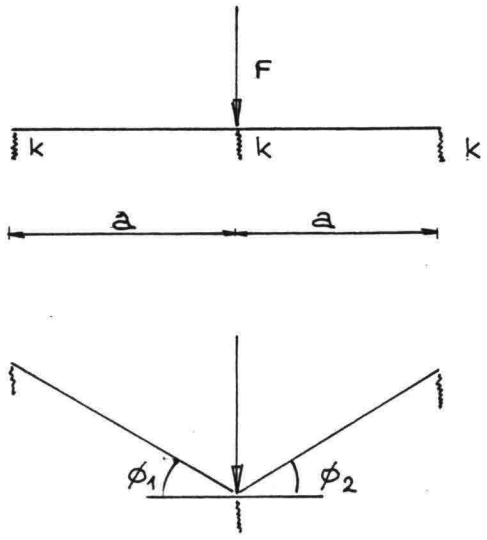
N.B. De laatste term volgt uit het feit, dat $\psi = M/k\ W$ en dat de kracht in een paal op een afstand a_i uit het midden tengevolge daarvan bedraagt: $a_i \cdot k \cdot M/k\ W = a_i \cdot M/W.$

Herhalen we deze berekening voor andere excentriciteiten van de botsing (resp. 0 en 2 a) en vergelijken we de uitkomsten met een botsing tegen één enkele paal met dezelfde k (daarvoor geldt $F = \sqrt{2\ k\ E}$) dan krijgen we het volgende overzicht:

	stootkracht F	kracht middenpaal	kracht uiterste paal
centrische botsing	$3{,}16\sqrt{k\ E}$	$0{,}63\sqrt{k\ E}$	$0{,}63\sqrt{k\ E}$
e = a	2,58 "	0,516 "	1,032 "
e = 2 a	1,83 "	0,366 "	1,098 "
slechts één paal	1,41 "	$1{,}41\sqrt{k\ E}$	

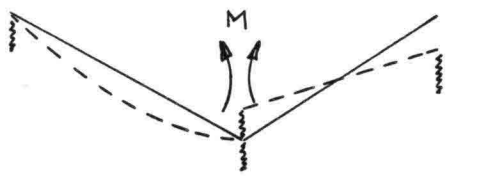
Opgemerkt kan nog worden dat er bij enkele palen altijd 2 zijn (min. 2 meerstoelen). Bij een meersysteem dat uit een meerbalk bestaat worden de palen dus minder zwaar belast en kunnen ook lichter worden gedimensioneerd. Dit leidt tot een kleinere veerconstante k en wordt daardoor nog gunstiger (ook voor de kracht op het schip). Daar komt nog bij dat voor de enkele paal en voor de meerbalk is uitgegaan van dezelfde E van het schip. Meerbalken worden echter met een grotere excentriciteit getroffen dan meerstoelen (bedoeld is hier de afstand tussen het zwaartepunt van het schip en het contactpunt met het meersysteem). Dit leidt tot lagere waarden van de excentriciteitscoëfficiënt C_e. Stellen we deze op 0,2 voor de meerbalk en 0,5 voor de meerstoelen, dan is de E van de meerstoelen 2,5 maal zo groot. Voor een goede onderlinge vergelijking zouden we daarom de $1{,}41\sqrt{k\ E}$ in de onderste regel van de tabel moeten vervangen door $1{,}41\sqrt{k\ .\ 2{,}5\ E} = 2{,}23\sqrt{k\ E}$.

In het voorgaande is ervan uitgegaan, dat de balk als oneindig stijf kan worden beschouwd ten opzichte van de palen. Dit zal als regel niet zo zijn, hetgeen betekent dat omvangrijker rekenwerk nodig is. In het onderstaande wordt alleen het principe van de oplossing aangeduid voor een systeem dat eenvoudigheidshalve bestaat uit 3 palen (en wel met de gaapvergelijking).



1e stap:
snede aanbrengen boven steunpunt.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{2\,F}{k\,a}$$



2e stap:
introduceer steunpuntsmoment M.
Dit geeft boven het steunpunt voor iedere balk een hoekverdraaiing $\frac{M\,a}{3\,EI}$ door buiging (hier alleen getekend voor linkerbalk) plus een hoekverandering $\frac{2\,M}{a^2\,k}$ doordat de steunpunten door de oplegreacties in- resp. uitveren (getekend voor rechterbalk).

$$\varphi_{totaal} = 2\left[\frac{M\,a}{3\,EI} + \frac{2\,M}{a^2\,k}\right]$$

3e stap:
gelijkstelling van de hoekverdraaiingen uit de 1e en 2e stap geeft:

$$\frac{2\,F}{k\,a} = 2\left[\frac{M\,a}{3\,EI} + \frac{2\,M}{a^2\,k}\right]$$

Uit deze vergelijking kunnen we M oplossen, waarna de relatie tussen F en y (de verplaatsing van het middensteunpunt) kan worden bepaald.
F gedeeld door y geeft de gezochte veerconstante.
Voor meerbalken welke worden gesteund door meerdere palen zullen als regel computerprogramma's worden gebruikt.
Indien aan bepaalde voorwaarden wordt voldaan (wèlke zullen we aan het

einde van deze beschouwing vermelden) kan het rekenwerk aanzienlijk worden vereenvoudigd door gebruik te maken van de theorie van de elastisch ondersteunde liggers (zie ook college b13).
Bij een gelijkmatig verdeelde belasting q op een ligger, die over de gehele lengte elastisch is ondersteund, geldt dat de reactie $p = k^1 y$, waarin y = indrukking en k^1 = beddingsconstante.
Dan is de vergelijking van de elastische lijn van de ligger

$$EI \frac{d^4 y}{d x^4} = - k^1 y + q$$

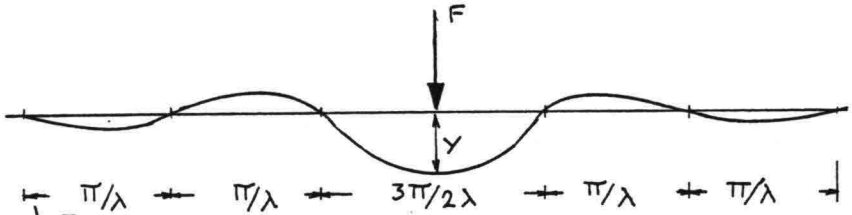
p en q in N/m, k^1 in N/m^2

De oplossing is:

$$y = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x).$$

met $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k^1}{4 EI}}$ in m^{-1}

Voor een puntlast F op een lange balk geldt de volgende elastische lijn (indien de last ver genoeg van de balkeinden is verwijderd):

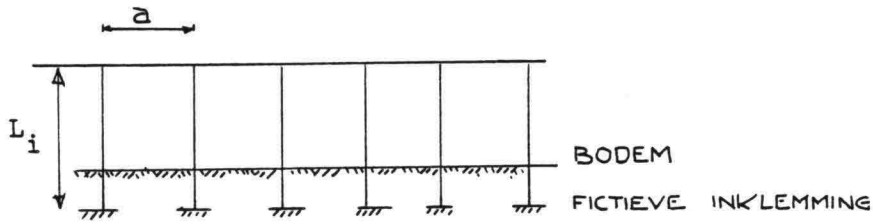


$y = \frac{\lambda F}{2 k^1}$, terwijl het grootste moment in de ligger (optredend onder F) bedraagt $M = F/4\lambda$.
Door F te delen door de bovenvermelde waarde van y zouden we de waarde van de veerconstante van de meerbalk krijgen, welke nodig is voor het bepalen van de scheepsstoot. We hebben echter niet te maken met een elastische ondersteuning over de gehele lengte, maar met een aantal plaatselijke veren (i.c. de palen).
Door M. Hétényi ("beams on elastic foundation", University of Michigan Press, 1967) is afgeleid, dat er slechts geringe afwijkingen optreden, indien de plaatselijke veren (ieder met een veerconstante k) worden vervangen door een gelijkmatige beddingsconstante $k^1 = k/a$ (waarin a = afstand tussen de palen), mits er <u>tenminste</u> 4 paalafstanden vallen binnen de zogenaamde karakteristieke golflengte π/λ van het systeem, m.a.w. indien

$$\pi/\lambda > 4a \quad \text{of} \quad \pi > 4a\lambda \quad \text{of} \quad \pi > 4a\sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad \text{of}$$

$$\pi > 4a\sqrt[4]{\frac{k}{4EIa}} = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot a^3 \cdot k}{EI}}$$

Ter illustratie van deze voorwaarde diene het volgende voorbeeld van een meerbalk. De stijfheid van de balk bedraagt $(EI)_b$, die van de palen $(EI)_p$.



Voor de individuele palen geldt: $k = 3(EI)_p/L_i^3$

De ondersteuning mag worden beschouwd als een gelijkmatige over de hele lengte van de balk, indien geldt:

$$\pi > \sqrt[4]{\frac{64 \cdot a^3 \cdot 3(EI)_p}{(EI)_b \cdot L_i^3}} = \sqrt[4]{\frac{192 \cdot a^3 \cdot (EI)_p}{(EI)_b \cdot L_i^3}} .$$

Voor $(EI)_p = (EI)_b \longrightarrow 0{,}8 > a/L_i$
" $8(EI)_p = (EI)_b \longrightarrow 1{,}6 > a/L_i$
" $(EI)_p = 8(EI)_b \longrightarrow 0{,}4 > a/L_i$

Met andere woorden, indien de verhouding a/h blijft beneden de aangegeven waarden, kunnen we de meerbalk zonder al te grote verwaarlozingen beschouwen als een over haar hele lengte elastisch ondersteunde ligger. Door gebruikmaking van de gegevens en tabellen vermeld in het boek van Hétényi kan de berekening eenvoudiger verlopen dan die noodzakelijk bij een door plaatselijke veren ondersteunde ligger.
In veel gevallen geldt echter, dat we de meerbalk niet als een elastisch ondersteunde ligger en evenmin als een oneindig stijve ligger mogen beschouwen, waardoor we zijn aangewezen op de eerder vermelde meer omvangrijke (computer-)berekeningen.
Dit geldt temeer indien men de in de aanhef van deze paragraaf vermelde wringing eveneens in rekening wil brengen (voor de richtingen zij verwezen naar de daar opgenomen perspectieftekeningen).

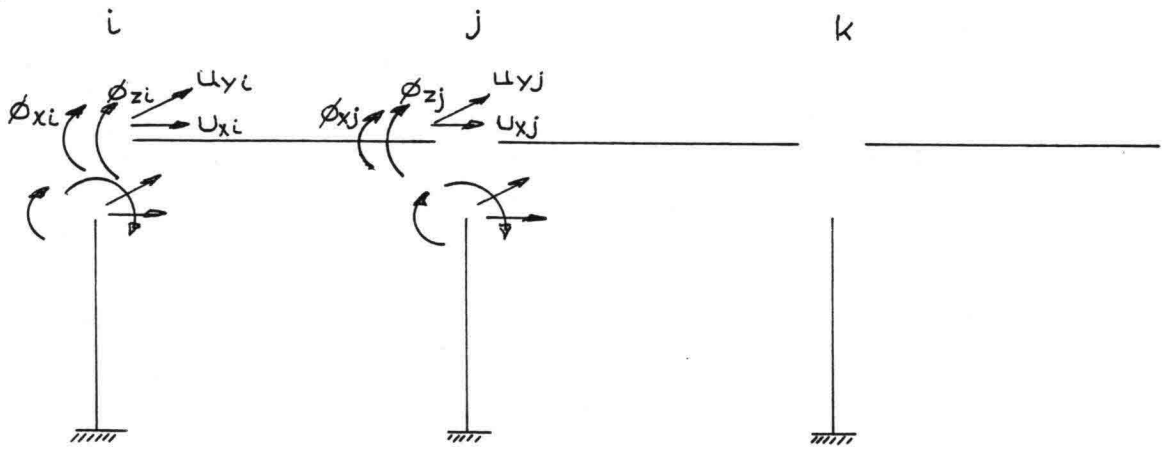
Daarbij kunnen de volgende mogelijkheden worden onderscheiden:

a. alleen wringing in de palen in rekening brengen (denk bv. aan het feit, dat de ligger ter plaatse van de aansluiting met de paal een buigings-hoekverdraaiing in het xy-vlak kan ondergaan, terwijl de paal aan de onderzijde een zekere "torsie-inklemming" in de grond heeft, waardoor een wringend moment in de paal ontstaat).

b. alleen wringende momenten in de ligger in rekening brengen (denk aan het feit, dat de ene paal ter plaatse van de aansluiting met de ligger een grotere buigings-hoekverdraaiing in het yz-vlak kan ondergaan dan de andere).

c. met wringing in de palen en in de ligger.

De verbinding tussen paal en ligger wordt beschouwd als een knooppunt van een raamwerk. Er wordt nu een relatie opgesteld tussen de krachten (en momenten) in elk knooppunt en de verplaatsingen door middel van de stijfheidsmatrix.
Daartoe wordt de constructie gesplitst in elementen: de palen en de liggerstukken tussen de paalkoppen.



Men kan nu voor de afzonderlijke elementen de stijfheidsmatrix opstellen, die het verband geeft tussen verplaatsingen en krachten (ook momenten). In geval a (alleen wringing in de palen en buiging in de ligger t.o.v. de Z-as), met bovendien de restrictie dat geen krachten en verplaatsingen in X-richting optreden, geldt dan voor een liggerelement:

$$\begin{vmatrix} 12\,EI/l^3 & 6\,EI/l^2 & -12\,EI/l^3 & 6\,EI/l^2 \\ 6\,EI/l^2 & 4\,EI/l^2 & -6\,EI/l^2 & 2\,EI/l \\ -12\,EI/l^3 & -6\,EI/l^2 & 12\,EI/l^3 & -6\,EI/l^2 \\ 6\,EI/l^2 & 2\,EI/l & -6\,EI/l^2 & 4\,EI/l \end{vmatrix} \left\{ \begin{matrix} u_{yi} \\ \phi_{zi} \\ u_{yj} \\ \phi_{zj} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} F_{yi} \\ M_{zi} \\ F_{yj} \\ M_{zj} \end{matrix} \right\}$$

Voor de paalkoppen geldt

$F_{yi} = k\, u_{yi}$ en

$M_{zi} = \varkappa \cdot \phi_{zi}$ ($\varkappa$ = kappa = de veerconstante voor wringing aan de paalkop).

Zijn alle elementen gelijk, dan geldt bovenstaande matrix voor elk liggerelement en ook voor alle palen geldt dezelfde relatie tussen krachten en verplaatsingen.

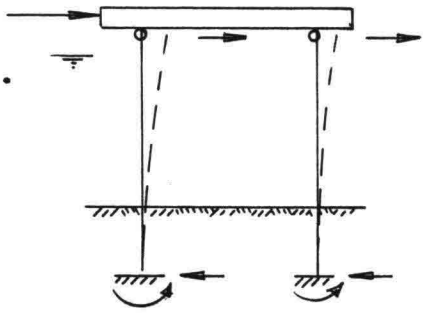
Met behulp van deze gegevens kan nu de stijfheidsmatrix voor de gehele constructie worden opgebouwd, waarin een uitwendige stootkracht F kan worden ingevoerd.
Zie hiervoor bv. collegedictaat b14 (numerieke methoden in de mechanica van constructies).
Voor een dergelijke constructie als de meerbalk (berthing beam) is een computerprogramma aanwezig in het ICES.STRUDL SPACE FRAME pakket.

2.4. Open constructies (steigers)

2.4.1. Algemene beschouwing

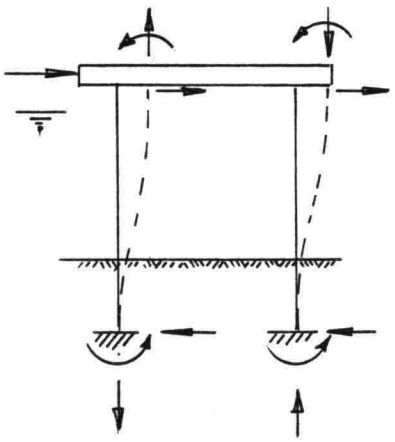
De open constructies zullen slechts summier worden behandeld.
Open constructies (steigers) kunnen zowel op een beschutte plaats (haven of rivier) als voor de kust in open zee worden gebruikt (als er geen baai of haven aanwezig is).
In een haven zijn golf- en stroombelasting meestal niet aanwezig. In een rivier heeft men meestal wel te maken met stromingskrachten op de palen. Voor de kust in open zee is meestal pas op een bepaalde afstand uit de kust (soms enkele km's) voldoende waterdiepte aanwezig om het schip langs een platform te laden en/of te lossen. Dit geldt vooral voor rotsige kusten en kusten waarvan de bodem uit een aantal meters slappe klei boven op de vaste ondergrond bestaat (baggeren is dus niet mogelijk of heeft geen zin).
Deze open constructies worden aan wind, golven en stroom (getijstroom) blootgesteld. Het steigerdek moet zo hoog worden aangebracht dat de ontwerpgolf onder het dek doorloopt en dit dek niet raakt (geen golfklappen tegen de onderkant van het dek).
In tropische gebieden moet rekening worden gehouden met cyclonen.
De richting, waarin het schip wordt gemeerd (dus ook de oriëntatie van het platform) t.o.v. wind, golven (hoogte en periode) en stroom is voor een rustige ligging van het schip zeer belangrijk.
De vormgeving van het dek wordt bepaald door de gebruikseisen, die men heeft opgesteld. De ondersteuningsconstructie (de palen met eventuele verbindingsbalken) wordt aan de constructie van het dek aangepast.
Een belangrijke randvoorwaarde is ook of men de energie, die tijdens het meren van het schip wordt afgegeven, rechtstreeks door de steiger naar de ondergrond laat overbrengen al of niet via aan de steiger bevestigde fenders of door een apart, los van de steiger gefundeerd, meersysteem. Meestal zal men een apart meersysteem aanbrengen omdat een steiger geen grote stootenergie kan opnemen. Bovendien zullen bij op de steiger aanwezige kranen en transportbanden geen grote horizontale verplaatsingen toelaatbaar zijn.
Een steiger bestaat uit een dek(vloer) gefundeerd op palen. Schematisch kunnen een aantal typen worden onderscheiden.

1.



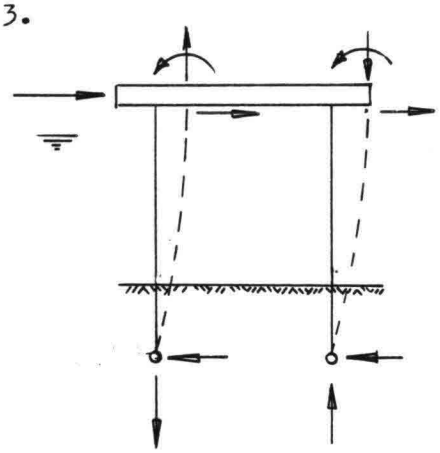
Scharnierverbinding tussen palen en dek. Inklemming in de grond.
Vertoont t.a.v. de scheepsstoot veel overeenkomst met de eerder uitgewerkte berthing beam.

2.



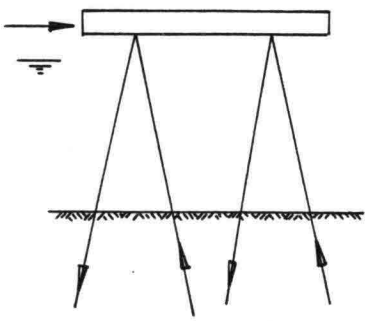
Onder en boven inklemming.
Indien de EI van het dek oneindig stijf is t.o.v. die van de palen, dan zijn de momenten onder en boven in de palen gelijk. Zo niet, dan zijn de ondermomenten het grootst.

3.



Alhoewel dit schema theoretisch denkbaar is, is het praktisch moeilijk te verwezenlijken.

4.



Schoorpalen, die overwegend op normaalkrachten worden belast.
Ten opzichte van 1 t/m 3waar de palen op buiging worden belast, is de constructie zeer stijf voor het opnemen van meerkrachten (fenders of losse meerstoelen noodzakelijk).

Voorts kent men steigers met zogenaamde strong-points: zwaarder uitgevoerde delen, die in plattegrond gezien naar voren uitsteken t.o.v. de normale steigerconstructie. De schepen meren af en liggen gemeerd tegen de strong-points. Het resterende steigerdeel hoeft niet op scheepskrachten te worden berekend.

2.4.2. Ontwerp en berekening

De belastingen

a. de verticale belastingen volgen uit het gebruik:
   - gewicht van beladen transport- en overslagmiddelen: voertuigen, transportbanden, kranen.
   - mogelijk opslag van materialen.

b. de horizontale belastingen worden veroorzaakt door:
   - wind, stroom en golven, zowel direkt als indirekt en het afremmen van kranen, transportbanden enz.
   - verder eventueel door het gemeerd liggende schip via de fenders.

   b.1. de windkracht op de gemeerde schepen kan via de fenders en/of via op de steiger bevestigde bolders worden overgebracht.

   b.2. de windkracht op kranen en transportmiddelen wordt door het steigerdek aan de palen overgedragen.

   b.3. de direkte windbelasting op de steiger zelf is meestal gering.

   b.4. de stroming oefent sleepkrachten uit op het schip, die mogelijk via de fenders en de trossen op de steiger komen. De stroom levert ook sleepkrachten op de palen.

   b.5. de golven werken op het gemeerde schip en eventueel via fenders en/of bolders op de steiger (schip met de kop in de golven)!

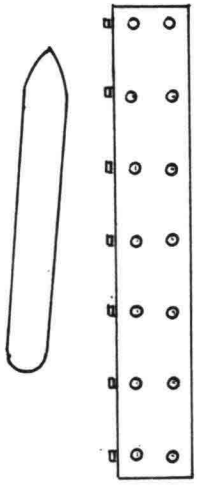
   b.6. de golven werken ook op de palen van de steiger. Deze krachten zijn bij wind- en deiningsgolven periodiek.

   b.7. een combinatie van stroming en golven. Bij verschillende richting van golfvoortplanting en stroom moeten de golf- en stroomkrachten vectorisch worden samengesteld.

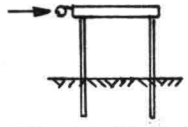
   b.8. wervelbeweging rond de palen door stroom. Deze kan een spectrum van wisselende krachten op de palen veroorzaken door het loslaten van wervels. Hierbij is het gevaar voor het optreden van resonantie aanwezig. Vooral bij ronde palen, waar het loslaatpunt heen en weer wandelt over het paaloppervlak en grote drukschommelingen in dwarsrichting (dwars op de stroom) ontstaan.

b.9. mogelijk stootkrachten door het merende schip via fenders overgebracht naar het steigerdek.

Voor het ontwerp en de sterkteberekening is het allereerst noodzakelijk dat een maatgevende combinatie van belastingen wordt bepaald.
Voor het vaststellen van maatgevende belastingscombinaties zal overleg nodig zijn tussen ontwerper enerzijds en opdrachtgever, rederij en havendienst anderzijds.



Meert het schip langs de steiger (dus een belasting in dwarsrichting van de steiger) en moet de steiger de stootenergie van het schip naar de ondergrond overbrengen (bv. vissersschepen langs een houten steiger) dan verloopt de berekening betrekkelijk eenvoudig, indien we aannemen dat het dek in het horizontale vlak zo stijf is dat geen vervorming in dit vlak plaatsvindt en als de wringing in de palen wordt verwaarloosd.
Het dek zal in horizontale zin transleren en om een verticale as roteren. Niet alle portalen nemen evenveel arbeid op.



PORTAAL CONSTRUCTIE

Er zijn nu nog twee mogelijkheden:
a. de steiger is aan het landeinde in dwarsrichting gefixeerd.
b. de steiger is niet gefixeerd.
Verwezen wordt naar de berekening van de meerbalk (zie 2.3.3.) met oneindig stijve ligger t.o.v. de palen.

2.5. Gesloten constructies (kademuren)

Een kademuur is een verticale scheiding tussen land en water, die wordt gebruikt voor het afmeren en lossen en laden van schepen.

2.5.1. Soorten belastingen

1. bovenbelastingen

a. opslag. Voor stukgoederen kan de belasting bv. 40 kN/m^2 bedragen; voor containers 120 à 160, terwijl zij voor kolen, maar vooral voor erts kan oplopen tot 300 kN/m^2. Voor bv. olie e.d. kan de belasting daarentegen laag zijn, daar de af- en aanvoer via pijpleidingen geschiedt naar verder weg gelegen tanks. Opgemerkt zij dat ook voor andere goederen geldt, dat de opslag als regel enige afstand heeft tot het voorfront van de constructie.

b. kranen, vrachtwagens, treinen, transportbanden, pijpleidingen e.d. Rekening moet niet alleen worden gehouden met de verticale, maar ook met de horizontale belastingen (veroorzaakt door wind, remkrachten etc.).

2. scheepsstoten

De bepaling van de grootte hiervan is niet anders dan bij de andere constructies. Wel vormt de kademuur zelf als regel een zeer stijf element in de berekening. Vaak wordt de kadeconstructie als geheel niet berekend op de scheepsstoot. Men gaat er daarbij vanuit dat de constructie over voldoende "incasseringsvermogen" beschikt: zij is onder meer berekend op een naar het schip toe gerichte horizontale korreldruk (bij $\phi = 30^\circ$ is $\lambda_a = 1/3$). Indien de constructie als gevolg van de stoot in de tegenovergestelde richting over een kleine afstand verplaatst, kunnen de korreldrukken toenemen tot waarden, die 9x zo groot zijn ($\lambda_p = 3$). Alhoewel in de praktijk op grond van deze overwegingen de contrôle op scheepsstoten voor de constructie als geheel vaak achterwege wordt gelaten, is het toch belangrijk om na te gaan of de passieve druk inderdaad voldoende geactiveerd kan worden en of dit niet tot te hoge materiaalspanningen leidt (het kan bijvoorbeeld zo zijn, dat de resulterende passieve druk te laag ligt t.o.v. het niveau van de stoot). Bepaalde onderdelen zullen altijd op de stoot moeten worden berekend.

Alhoewel de naderingssnelheid van het schip meestal kleiner zal zijn dan bij open constructies (opstuwing van het water) moet toch rekening worden gehouden met de toelaatbare drukken op de scheepshuid. Dit kan in bepaalde gevallen leiden tot de toepassing van (rubber) fenders.

3. bolderkrachten en naar de kade toe gerichte krachten veroorzaakt door het afgemeerde schip.
Voor grotere schepen worden de bolders vaak op enige afstand achter het voorfront van de constructie geplaatst.

4. horizontale korrel- en waterdrukken

5. eigen gewicht

2.5.2. Soorten constructies

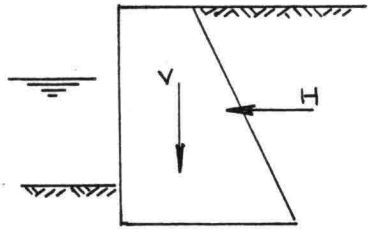
Een onderscheid kan worden gemaakt tussen de navolgende hoofdtypen:

I. Gewichtsconstructies
II. Damwanden over de volle lengte
III. Korte steigers
IV. Combinaties van I t/m III

In het navolgende zal hierop kort worden ingegaan.

I. Gewichtsconstructies

a. massieve muren

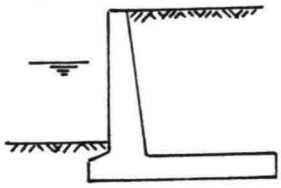


evenwichtsvoorwaarden:
1e. $n\,H = V \tan\phi$ waarin $\angle$
2e. resultante H en V snijdt de bases binnen de kern, waarbij de maximale korrelspanning kleiner moet zijn dan de toelaatbare waarde.
(N.B. Daar het gaat om de korrelspanningen is V de som van alle neerwaartse krachten verminderd met de opwaartse waterdruk).

De constructie, die veel materialen (metselwerk, beton met grove toeslag etc.) en een diepe bouwput met bemaling vraagt, doet op het eerste gezicht enigszins "verouderd" aan. Desalniettemin zijn er een aantal recente constructies waarbij de kade in de natte is gebouwd en is samengesteld uit geprefabriceerde blokken (minder grondwerk, geen bemaling).

$\angle$ n = veiligheidsfactor $\approx$ 1,2 à 1,5

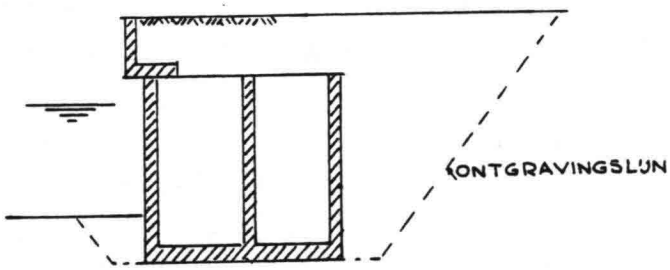
b. op staal gefundeerde L-muren



In wezen een variant op a.
Nu echter levert de goedkopere grond een belangrijk gedeelte van het verticale gewicht. De constructie zelf moet echter in gewapend beton worden uitgevoerd. Dit type is recent uitgevoerd in het havengebied op de linker Scheldeoever bij Antwerpen. De grondslag was gunstig voor het maken van zeer steile ingravingen, terwijl door de lage k-waarden kon worden volstaan met een kleine bemalingscapaciteit.

c. caisson-muren

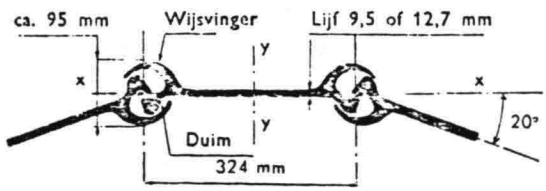
Doosvormige elementen worden elders geprefabriceerd, drijvend vervoerd en door het inlaten van ballast geplaatst (college f9B).

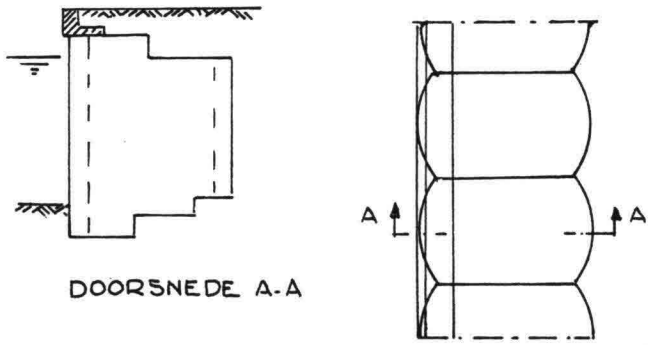


Het afzinken geschiedt als regel door het inlaten van water. Ten behoeve van de stabiliteit in de eindfase wordt het inwendige verder met grind gevuld. Het bovengedeelte (de L) wordt ter plaatse gestort (voor een strakke afwerking en het onderbrengen van verschillende voorzieningen, bv. wrijfstijlen en kraanrails). O.a. in Rotterdam zijn vele van deze constructies in het verleden gebouwd. Meer recent zijn een aantal uitvoeringen in het buitenland.

d. cellendamwanden

PROFIEL „LACKAWANNA"





DOORSNEDE A-A

Het benodigde gewicht V wordt verkregen door de grond welke door de cellen wordt omsloten. Ter bepaling van de vertikale korrelspanningen (σ_v) wordt ter hoogte van de onderzijde van de damwanden de volgende berekening uitgevoerd:

$$\sigma_v = \frac{V}{A} \pm \frac{H\ e}{W}$$, waarin:

A = oppervlak binnen cel

W = weerstandsmoment van oppervlak A

e = hoogte boven het grondvlak A, waarop de resulterende horizontale kracht aangrijpt.

Uit σ_v kan de horizontale belasting op de damwand worden bepaald ($= \lambda_a \cdot \sigma_v$). Via de ketelformule wordt dan de trekkracht in de damwand bepaald ($= R \cdot \lambda_a \cdot \sigma_v$, waarin R de straal is van het voorvlak).

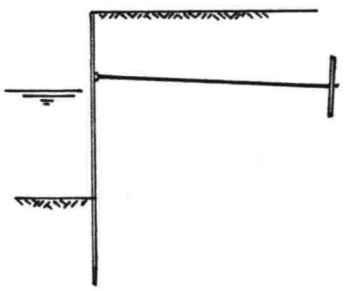
Twee dingen zullen hierbij duidelijk zijn:

- Het betreft een wel zeer gesimplificeerde berekening. De grond binnen de cel zal zich ongetwijfeld anders gedragen dan hierboven gedefinieerd door de formule $\sigma_v = V/A \pm He/W$, etc.
- In de damwanden zullen grote trekkrachten ontstaan, die met name door de sloten moeten worden overgebracht (krachten van 1000 kN per meter slot zijn geen uitzondering). Vooral het punt waar de 3 damwandvlakken samenkomen kan ongunstig worden belast. Niet alleen de vormgeving van de sloten is van belang, maar ook de uitvoering: er mogen geen planken "uit het slot staan", daar dit de stabiliteit van de gehele constructie in gevaar brengt (niet meer over kunnen brengen van de trekkracht, maar ook "leeglopen" van de grondvulling, die moet zorgen voor het benodigde gewicht). Gestaffeld heien is met het oog hierop de beste uitvoeringswijze.

De laatste jaren zijn in het buitenland nogal wat kademuren van dit type gebouwd.

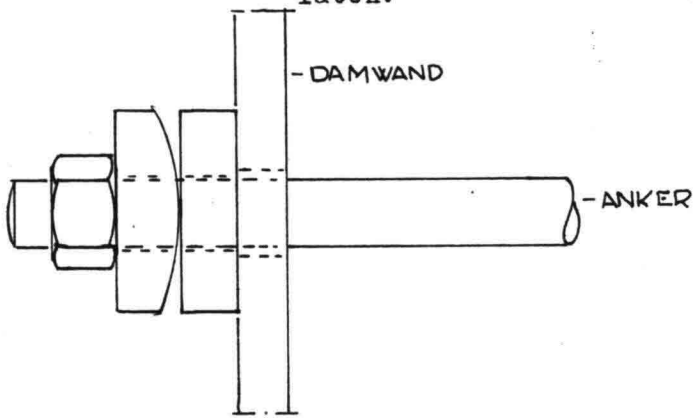
Behalve de hierboven geschetste plattegrond worden ook cirkelvormige cellen toegepast. Tussen deze cirkels bevinden zich dan aan voor- en achterzijde korte cirkelsegmenten teneinde een doorgaande constructie te verkrijgen.

II. Damwanden over de volle hoogte



Voor de berekening hiervan zij o.a. verwezen naar het collegedictaat f9. Het harmonicaprofiel van de damwanden maakt het noodzakelijk aan de voorzijde houten stijlen en/of regels toe te passen teneinde beschadiging van de schepen te voorkomen. Bijzondere aandacht moet worden besteed aan eventuele doorbuiging van de ankers, die kan leiden tot buigende momenten naast de normale trekkracht veroorzaakt door de belasting van de voorwand, Mogelijkheden ter beperking van deze buigende momenten zijn bijvoorbeeld beschermkappen op de ankers, die door voldoende hoogtespeling voorkomen, dat de grond op het anker gaat rusten:

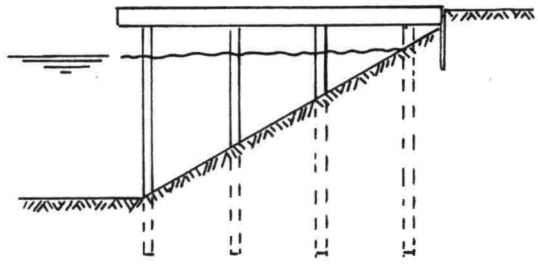
Vaak worden doorvoeringen door de damwand toegepast, die een hoekverdraaiing in het vertikale vlak toelaten:



De damwandconstructies over de volle hoogte blijven vaak beperkt tot "kleinere" kerende hoogten door de moeilijkheden met het opnemen van grote horizontale ankerkrachten, alsmede om te grote momenten in de damwand zelf te voorkomen (en daarmee te zware profielen).
Als variant op de damwand treft men de toepassing van diepwanden aan. Een interessant voorbeeld daarvan is de door een Nederlands ingenieursbureau ontworpen kademuur voor Bandar Abbas (zie Dock & Harbour Authority, January 1980). De waterdiepte bedraagt daar 16,50 m, terwijl

de voorwand bestaat uit een diepwand met een T-profiel, ter verkrijging van de nodige sterkte en stijfheid.

III. Korte steigers

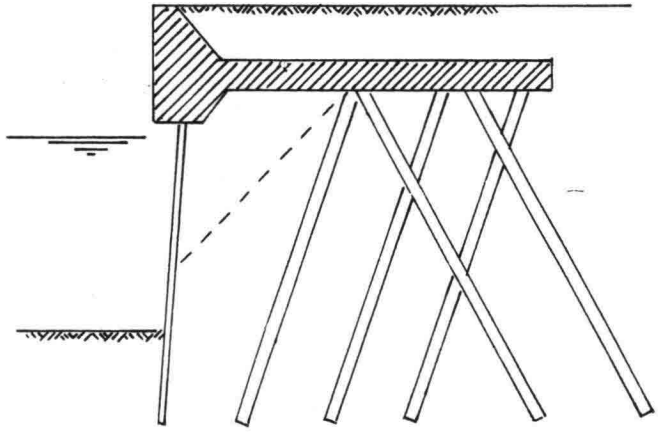


De horizontale belasting tengevolge van korrel en waterdrukken wordt hierbij vermeden. Voor het opnemen van stootkrachten wordt echter geen passieve gronddruk geactiveerd (de palen moeten hierop dus worden berekend of er moeten meerstoelen worden geplaatst).

De vertikale bovenbelasting moet bovendien geheel via de palen naar de ondergrond worden afgevoerd.
Opgemerkt zij dat bij de voorgaande constructietypen (zeker bij II), de bovenbelasting weliswaar rechtstreeks naar de ondergrond wordt overgebracht, maar anderzijds resulteert in een horizontale belasting ($\lambda \cdot \sigma_v$), die werkt over de gehele hoogte en door de constructie moet worden opgenomen.

IV. Combinaties van I t/m III

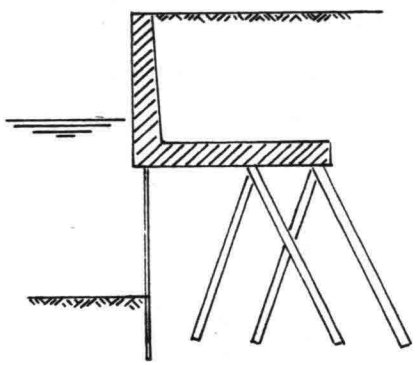
a. Hooggelegen ontlastplaat



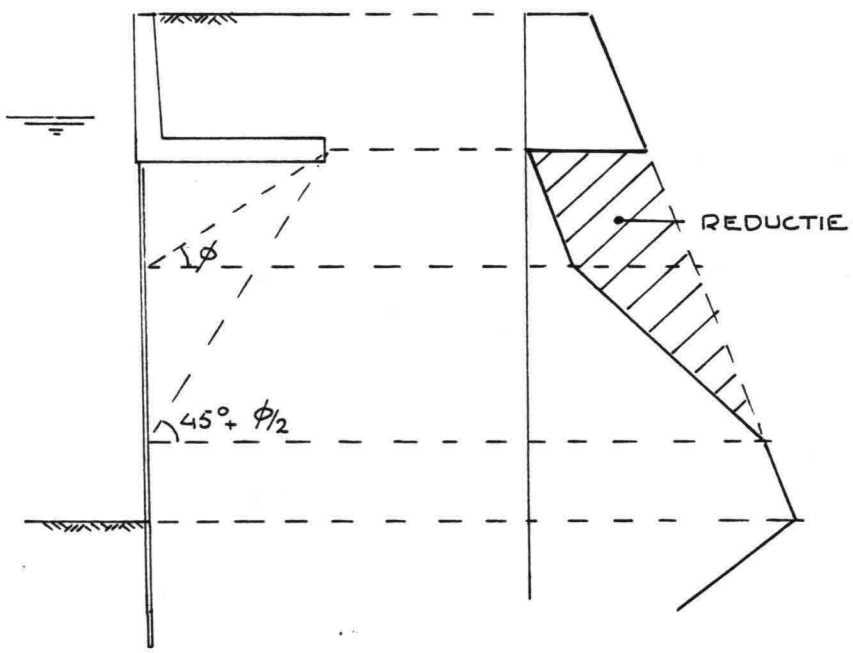
De plaat voorkomt, dat de bovenbelasting resulteert in horizontale korreldrukken op de damwand. Indien een talud volgens de streeplijn

wordt gemaakt, kunnen de damwandbelastingen verder worden verminderd. Door de toepassing van palen kunnen meestal grotere horizontale krachten worden opgenomen dan bij type II (m.a.w. grotere kerende hoogten).

b. Gewapend betonnen L-muur plus damwand

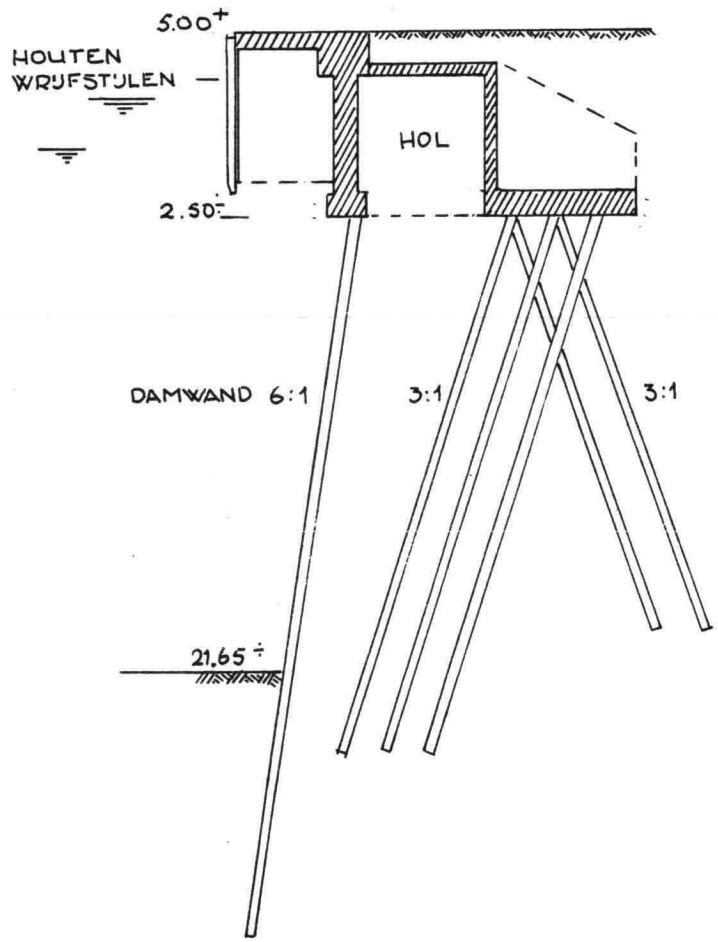


In principe is dit dezelfde oplossing als de voorgaande, alleen de plaat is lager geprojecteerd.
Dit kan het voordeel hebben dat er meer bovenbelasting staat op de naar achteren gerichte palen.
Deze worden door de horizontale belasting op trek belast. Palen kunnen als regel beter druk dan trek opnemen (simpel gezegd: de druk wordt afgegeven door stuit en wandwrijving; voor de trek is er uitsluitend wandwrijving).
Een ander voordeel is (maar dit kan ook bij oplossing a worden verwezenlijkt), dat de corrosiegevoelige damwanden zich geheel onder de waterlijn bevinden.
Ook hier treedt een reductie van de actieve horizontale korreldrukken op:



De druk op de wand zou verder kunnen worden verminderd door een talud onder de plaat aan te brengen (zie ook de stippellijn in de figuur bij IV.a). Een dergelijk talud maakt overigens de uitvoering van de plaat, die normaliter op een werkvloer op de bodem van de ontgraving wordt gestort, niet eenvoudiger (een mogelijkheid is het talud te overbruggen met prefab-plaatjes).

Deze vermindering van de horizontale korreldrukken is ook terug te vinden in de onderstaande schets van de ertskade op de Maasvlakte. Het betreft één van de hoogste kademuren ter wereld.



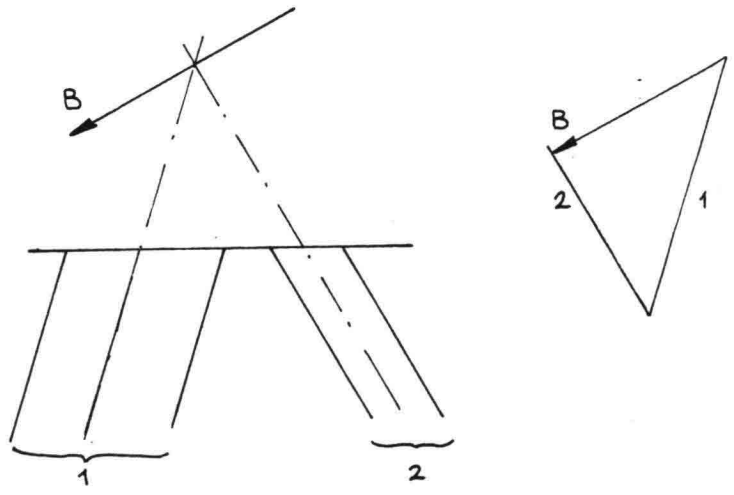
De plaat op 2,50⁻ en de holle ruimte daarboven verminderen de horizontale korreldrukken op de damwand. Eenzelfde effect heeft de 6:1 helling van deze wand. De palen hebben voldoende bovenbelasting (opnemen van hor. krachten), terwijl de neerwaartse belasting op de damwand, die ook een dragende functie heeft, wordt gereduceerd door de holle ruimte.. De constructie kraagt over de damwand naar voren onder meer

om te voorkomen, dat schepen de damwand raken. De gestippelde (plaatselijke) schotten geven de constructie de nodige stijfheid.

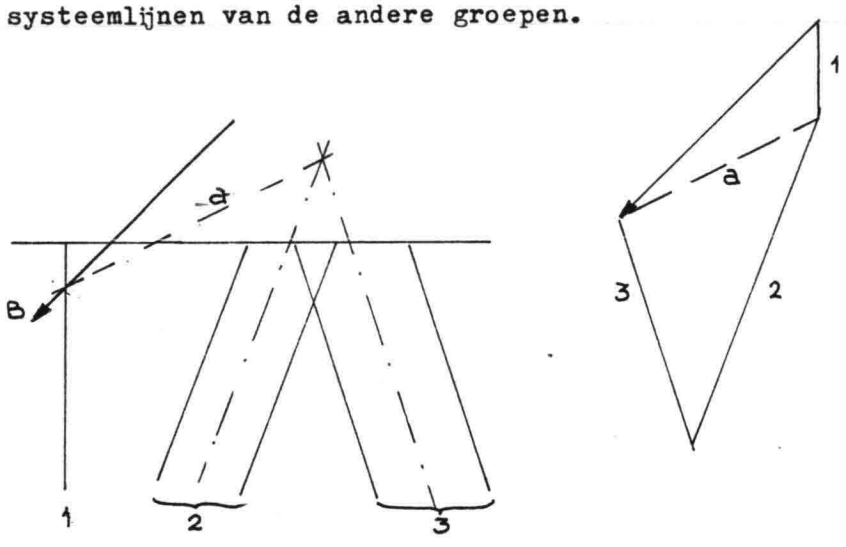
In het voorgaande zijn een aantal oplossingsprincipes voor kademuren gegeven. Er zijn er echter meer. Gezien het grote aantal variabelen is het niet doenlijk te zeggen welke mogelijkheid in welke omstandigheden de meest geëigende oplossing is. In de praktijk zullen altijd meerdere varianten met elkaar worden vergeleken. Daarbij zal het niet alleen gaan om de bouw- en onderhoudskosten, maar meestal ook om bouwtijd, mogelijke hinder voor de omgeving e.d.

2.5.3. Enige beschouwingen over paalfunderingen van kademuren

Paalfunderingen vormen een belangrijk element van de veel toegepaste constructies volgens categorie IV uit de vorige paragraaf. Daarbij is er niet alleen sprake van betonnen palen (die om uitvoeringstechnische redenen veelal zijn gebonden aan een maximum helling van 3:1), maar ook van stalen palen, die onder een grotere helling kunnen worden geheid en daardoor een gunstiger richting hebben voor het opnemen van de horizontale belastingen op de kade. Men treft dan ook ontwerpen aan met (bijv.) 1:1 stalen palen in de "trekrichting" en (bijv.) 3:1 betonnen palen in de "drukrichting". Daarnaast wordt ook de "kerende" damwand vaak gebruikt voor het opnemen van vertikale belastingen.
Voor ieder ontwerp zullen eerst de resulterende belastingen B (resultante van H en V) worden vastgesteld. Het betreft hier een aantal resultanten daar we immers verschillende belastingsgevallen kunnen onderscheiden (met en zonder bovenbelasting, met en zonder troskrachten etc.). De palen worden nu dusdanig onder de constructie gegroepeerd, dat de toelaatbare belastingen niet worden overschreden en dat alle palen zoveel mogelijk worden benut (dus bij voorkeur tot de max. toelaatbare kracht worden belast).
Het meest eenvoudig is de bepaling van de paalkrachten bij een systeem, dat bestaat uit 2 groepen en waarbij B gaat door het snijpunt van de 2 systeemlijnen.



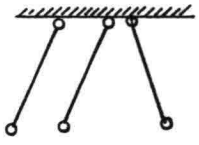
Bij een systeem bestaande uit 3 paalgroepen kan iedere kracht worden ontbonden over de verschillende paalgroepen (en dus over de palen door de kracht per paalgroep te delen door het aantal palen van de groep). Dit geschiedt m.b.v. de hulplijn a, welke het snijpunt van B met de systeemlijn van één der paalgroepen verbindt met het snijpunt van de systeemlijnen van de andere groepen.



In wezen is hier sprake van een benadering daar geen rekening is gehouden met de hoekverdraaiing. De oplossing geeft alleen redelijke antwoorden indien de onderlinge afstanden van de palen binnen één groep klein zijn.

In het navolgende zal de "exactere" methode Nökkentved worden behandeld, waarmee de paalkrachten voor ieder willekeurig palensysteem kunnen worden berekend.
Ook deze rekenmethode gaat uit van enige veronderstellingen:

- de plaat is ∞ stijf.
- de palen nemen uitsluitend normaalkrachten op

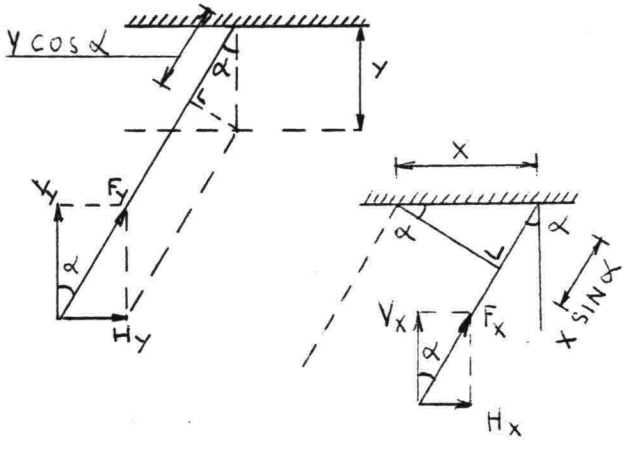


en worden beschouwd als pendelstijlen (één scharnier aan de onderzijde en één aan de bovenzijde).

Begonnen wordt met de vloer een vertikale verplaatsing y op te leggen.
Voor een paal met hellingshoek α geldt dan:

$k = \frac{EA}{L}$ E = elasticiteitsmod.) paal
A = opp.doorsnede)
L = lengte)

paalkracht $F_y = k\ y \cos\alpha$, indien k de veerconstante van de paal is.



$V_y = F_y \cdot \cos\alpha = k\ y \cos^2\alpha$

$H_y = F_y \cdot \sin\alpha = k\ y \cos\alpha \cdot \sin\alpha$

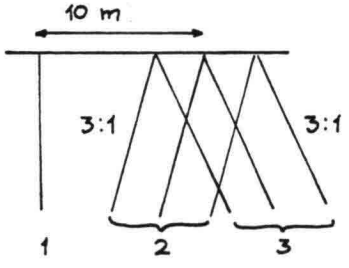
Door de H_y's en V_y's van de individuele palen onder de vloer samen te stellen krijgen we de resultante R_y van alle palen onder de vloer bij een vertikale verplaatsing y.
Voor een horizontale verplaatsing x van de vloer geldt: $F_x = k\ x \sin\alpha$

$V_x = k\ x \sin\alpha \cdot \cos\alpha$

$H_x = k\ x \sin^2\alpha$

Voor de verplaatsing x kunnen we nu de resultante R_x van alle palen onder de vloer bepalen.
Het snijpunt van R_y en R_x heet het systeemnulpunt (S). Alle belastingen, die door S gaan leiden slechts tot een horizontale en een vertikale verplaatsing van de vloer en daarmee tot gelijke krachten in alle palen, die behoren tot één paalgroep (die dus een gelijke richting en eenzelfde k hebben). Een zo gunstig mogelijk ontwerp van het palenplan ontstaat dus als het systeemnulpunt een zo klein mogelijke afstand heeft tot de belastingsresultanten.

Hieronder volgt als voorbeeld de bepaling van het systeemnulpunt van een paalfundering bestaande uit 3 paalgroepen. Daarbij is verondersteld, dat alle palen een gelijke veerconstante hebben en dat zich in elke paalrij (dus ⊥ op de tekening) evenveel palen bevinden.



voor 2 en 3 geldt:

$\cos \alpha = 3/\sqrt{10}$ dus

$\cos^2 \alpha = 0,9$

$\sin \alpha = 1/\sqrt{10}$ en $\sin^2 \alpha = 0,1$

$\sin \alpha \cos \alpha = 0,3$

Voor een vertikale verplaatsing y geldt:

$$\Sigma V_y = \Sigma k\ y \cos^2 \alpha = [1 + 6 \cdot 0,9]\ k\ y = 6,4\ k\ y$$

ΣV_y ligt op een afstand $\frac{10 \cdot 5,4\ k\ y}{6,4\ k\ y} = 8,45$ m uit 1.

$\Sigma H_y = 0$ [1 geeft geen horizontale component, die van 2 en 3 compenseren elkaar).

R_y is dus gelijk aan ΣV_y.

Voor een hor. verplaatsing x geldt, dat 1 geen reactie geeft en 2 en 3 tezamen uitsluitend een horizontale reactie, welke is gelegen in de as van de vloerplaat (dit is de gezochte R_x). $\Sigma H_x = \Sigma k\ x \sin^2 \alpha = 0,6\ k\ x$

Het systeemnulpunt (het snijpunt van R_y en R_x) bevindt zich dus in het hart van de voetplaat, 8,45 m rechts van 1.

Na bepaling van het systeemnulpunt kunnen de paalkrachten worden berekend veroorzaakt door een belasting B, welke door dit punt gaat. Hiertoe ontbinden we B in een vertikale en een horizontale component, B_v resp. B_H.

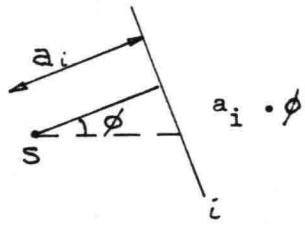
$$B_v = \Sigma k\ y \cos^2 \alpha + \Sigma k\ x \sin \alpha \cos \alpha$$

$$B_H = \Sigma k\ y \cos \alpha \cdot \sin \alpha + \Sigma k\ x \sin^2 \alpha$$

Uit deze vergelijkingen kunnen we x en y bepalen en daarmee de krachten in de individuele palen berekenen.

Ook al wordt ernaar gestreefd de belastingsresultanten zoveel mogelijk door het systeemnulpunt te laten gaan, toch zal er als regel enige excentriciteit (e) overblijven. Een bepaalde B wordt dus "overgebracht" naar S (ontbonden in B_v en B_H, etc.), terwijl daarenboven de paalreacties t.g.v. het moment B . e in rekening moet worden gebracht.

Teneinde dit te onderzoeken zullen we het gehele systeem aan een hoekverdraaiing ϕ om S onderwerpen. Voor de afstand van elke individuele paal tot S voeren we de term a_i in.



Tengevolge van de hoekverdraaiing geeft paal i een reactie $F_\phi = k_i \cdot \underbrace{a_i \cdot \phi}$ en een moment om S van $k_i \cdot a_i^2 \cdot \phi$. voor kleine ϕ

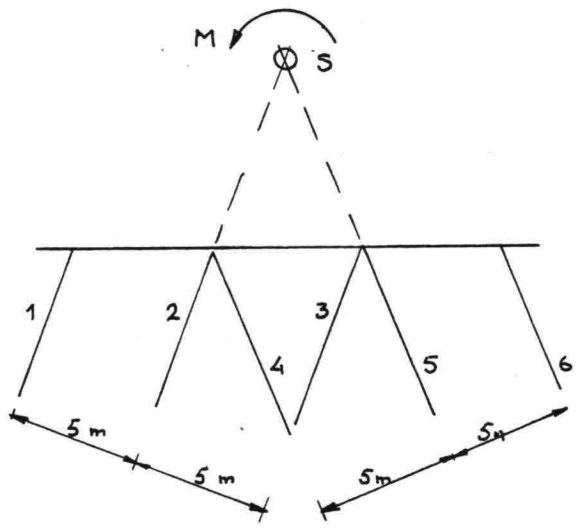
Voor alle palen tezamen geldt $I = \sum_1^n k_i \cdot a_i^2$

$M = \phi \sum_1^n k_i \cdot a_i^2 = \phi\, I$, waarin I wel het traagheidsmoment van de paalfundering wordt genoemd; $\phi = M/I$.

De kracht F_i, welke in een bepaalde paal op afstand a_i wordt veroorzaakt door een uitwendig moment M (in ons geval B . e), is:

$$F_i = k_i \cdot a_i \cdot \phi = k_i \cdot a_i \frac{M}{I} = k_i \cdot a_i \frac{M}{\sum_1^n k_i \cdot a_i^2}$$

Ter illustratie diene het in de volgende schets aangegeven palensysteem, waarbij ervan wordt uitgegaan dat de palen gelijke k-waarden hebben en voorts dat er zich in iedere paalrij ($\perp$ op de tekening) slechts 1 paal bevindt.



$$I = \sum_1^6 k_i \cdot a_i^2 =$$

$$= 4 \cdot k \cdot 5^2 = 100\ k$$

$$F_1 = F_4 = \frac{5\ k\ M}{100\ k} =$$

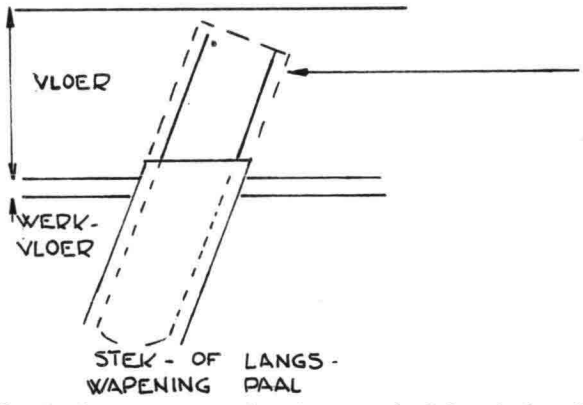
$$= 0{,}05\ M \text{ (druk)}$$

$$F_3 = F_6 = 0{,}05\ M \text{ (trek)}$$

$$F_2 = F_5 = 0$$

De methode Nökkentved gaat uit van een ∞-stijve plaat. In veel gevallen zal dit de werkelijkheid redelijk benaderen. In meer gedetailleer-

de computerprogramma's (een door elastische veren ondersteunde ligger) wordt rekening gehouden met de werkelijke EI-waarde.
Voorts is aangenomen dat de palen functioneren als pendelstijlen, waardoor noch momenten noch dwarskrachten vanuit de vloer naar de palen worden overgedragen. Theoretisch gezien is dit niet juist, omdat de palen in werkelijkheid meestal buigvast met de vloer worden verbonden (voor betonpalen zij verwezen naar de navolgende schets), terwijl een vrije draaiing om het onderscharnier van de pendel (de voet van de paal) een illusie is, omdat de paal over haar volle hoogte is opgenomen in de grond. In werkelijkheid is het meestal een redelijke benadering omdat bij verplaatsingen van het boveneinde van de paal loodrecht op haar lengte-as grondreacties ontstaan, die zeer gering zijn t.o.v. de krachten in de paal-as. De benadering is echter onjuist indien palen van grote diameter zouden worden gebruikt. Daarbij spelen ook een rol de EI van de paal en de horizontale beddingsconstante van de grond (we kunnen de paal immers beschouwen als een elastisch ondersteunde ligger, waarvan het uiteinde een verplaatsing $\perp$ op haar lengte-as ondergaat).

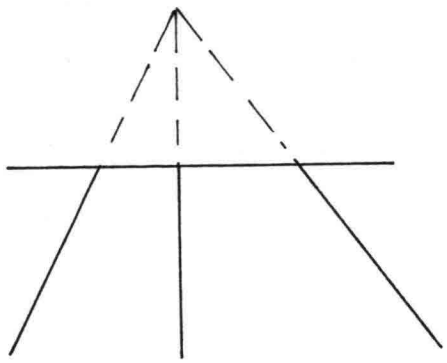


Na het heien te slopen paalkopgedeelte. De - niet verwijderde - stekwapening wordt ingestort in de vloer.

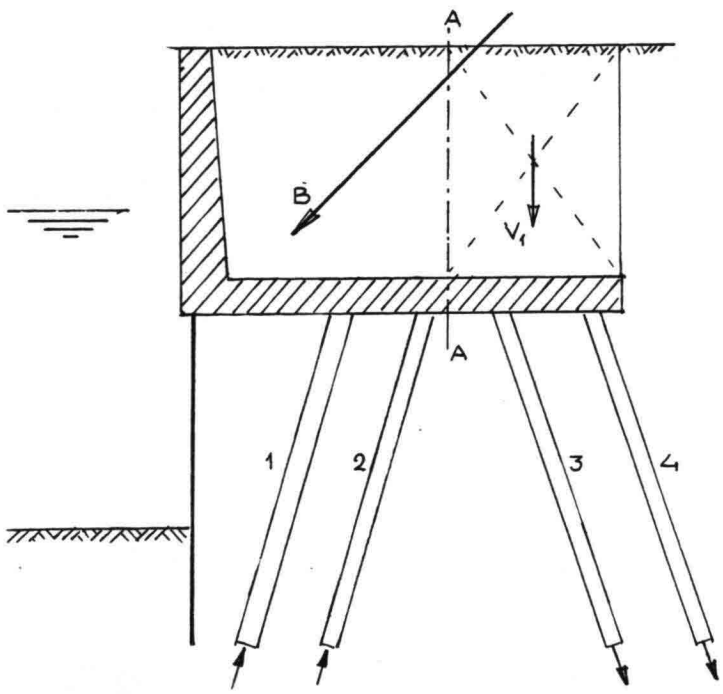
In het voorgaande is gesteld, dat alle palen zoveel mogelijk moeten worden benut. Een van de vereisten is daarbij, dat de resultanten van de verschillende belastingsgevallen zo dicht mogelijk langs het systeempun gaan, waardoor momenten worden beperkt en de palen binnen elke groep een gelijke belasting krijgen.
Zouden we ons echter in de gelukkige (en tevens onwaarschijnlijke) situatie bevinden, dat alle belastingsresultanten elkaar in één punt snijden en zouden we het palenplan dusdanig ontwerpen dat het systeempunt samenvalt met het snijpunt, dan nog moeten we ervoor zorgen, dat het palenplan een zeker vermogen bezit om momenten op te nemen (I mag

nooit nul zijn). Dit met het oog op het feit dat belastingen en belastingscombinaties kunnen afwijken van die aangenomen voor de ontwerpberekening (bv. een andere λ, een andere waterstand etc.).
Een voorbeeld van een palenplan dat nooit gemaakt mag worden is aangegeven in de onderstaande schets.

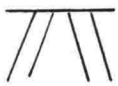
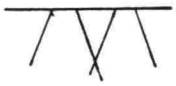
$I = 0$



Het palenplan is niet een autonoom gedeelte van het ontwerp van een kademuur. Met andere woorden: een fundering waarvan alle palen tot hun toelaatbare belasting worden benut wil nog niet zonder meer zeggen, dat daarmee ook de constructie als geheel optimaal is. Daarvoor is er een te grote onderlinge relatie tussen de verschillende onderdelen. Dit moge geïllustreerd worden aan de hand van de onderstaande constructie, waarvoor we aannemen, dat de palen in dit of een ander belastingsgeval (dus een andere B) volledig benut zijn.



De palen 3 en 4 worden op trek belast. Rechts van de lijn A-A werkt ook de kracht V_1 (grond + vloergewicht) in neerwaartse richting. Dit kan aanleiding geven tot zeer hoge buigende momenten in de gewapend betonnen vloerplaat t.p.v. doorsnede A-A. Een verbetering daarvan zou worden verkregen door de palen anders te plaatsen. Dus

niet zo  maar zo. 

Het systeemnulpunt S komt hierdoor echter lager te liggen, hetgeen weer consequenties heeft voor de palen, waarvan we aanvankelijk hebben aangenomen, dat ze alle volledig worden benut. Onderzocht zal moeten worden of we kunnen volstaan met het geschetste palenplan en dus met een dikke, zwaar gewapende vloer of dat we bijv. een andere ligging van de vloerplaat en een ander palenplan moeten overwegen. Een gewijzigde hoogteligging van de vloer heeft weer consequenties voor de overspanning van de damwand en mogelijk voor de grootte van de horizontale korreldrukken op de damwand (denk daarbij aan het in par. 2.5.2. onder categorie IV b genoemde "afschermende" effect van horizontale platen). Een optimaal ontwerp is dat waarvan de som van alle kosten minimaal is: palen, damwand, betonconstructie, grondwerken en eventueel bemaling.

Literatuurlijst (voor hoofdstuk 2)

(1) J.J. Blok and J.N. Dekker
"On hydrodynamic aspects of ship collision with rigid or non-rigid structures"
OTC 1979, Houston, Paper OTC no. 3664

(2) G. van Oortmerssen
"The berthing of a large tanker to a jetty"
OTC 1974, Houston, Paper OTC no. 2100

(3) G. van Oortmerssen
Proefschrift THD "The motions of a moored ship in waves"
Wageningen, 1976

(4) H.L. Fontijn
"An approximative method for the determination of the hydrodynamic coefficients of a ship in case of swaying and yawing on shallow water"
Communications on Hydraulics, Report no. 75-4. Delft Univ. of Techn., Dept. of Civil Eng., 1975

(5) H.L. Fontijn
"The berthing ship problem: Forces on berthing structures from moving ships"
Delft Univ. of Techn., Dept. of Civil Eng., 1978, Report no. 78-2

(6) P. Middendorp
"Onderzoek naar de optredende krachten en energieën t.g.v. het afmeren van een VLCC in ondiep water, als functie van de veerstijfheid van de afmeerconstructie, keelclearance en aanvaarsnelheid".
Afstudeerverslag TH Delft, Civiele Techniek, juni 1977.

3. Stuwen

3.1. Inleiding

STUWEN zijn waterbouwkundige kunstwerken die in de eerste plaats tot doel hebben de waterstand bovenstrooms van het kunstwerk te verhogen. Daarnaast kunnen stuwen nog een aantal andere, meestal secundaire, functies vervullen. Om een beeld van die functies te krijgen zal eerst een overzicht worden gegeven van de wijzen, waarop door de mens van natuurlijke waterlopen gebruik gemaakt is en wordt.

Natuurlijke waterlopen (zoals rivieren, beken etc.) komen al sinds mensenheugenis in allerlei vormen en afmetingen op aarde voor. De natuurlijke functie van deze waterlopen is het verzorgen van de afvoer van regen- en smeltwater. Als gevolg van de aantasting van de bodem door het afstromende water zal de rivier ook het transport van de erosieprodukten op zich nemen.

Deze functievervulling van de natuurlijke waterlopen heeft altijd hinder opgeleverd voor de menselijke samenleving. Zo kunnen bij hoge afvoeren overstromingen optreden en kan door erosie, vooral bij een beweeglijk rivierbed, het oeverland worden aangetast, waardoor bewoond en bebouwd land verloren kan gaan. Tevens vormen de waterlopen natuurlijke barrières voor menselijke contacten op allerlei gebied.

Tegenwoordig is de mens in staat aan bovenstaande problemen het hoofd te bieden (zie hiervoor o.a. de collegediktaten Rivierwaterbouwkunde).

Tegenover deze hinder voor de samenleving staat het nut dat de natuurlijke waterlopen de mens kunnen bieden.

Dit kan betrekking hebben op:

a. transport te water.

De rivier wordt in dit geval gebruikt als een vervoersweg voor goederen en personen met vervoersmiddelen van de holle boomstam vroeger tot de duwvaartconvooien nu.

b. watervoorziening.

Een zeer oude vorm hiervan is de onttrekking van water aan de rivier ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Ook het gebruik van rivierwater voor de bevloeiing van landbouwgebieden wordt al heel lang toegepast.

Een meer moderne vorm van watergebruik door de mens is het benutten van het rivierwater als koelwater voor de industrie en de elektriciteitscentrales. Dit koelwater is gebruikswater en komt vrijwel geheel

terug in de rivier, zij het verontreinigd door warmte en eventueel op een andere plaats. De industrie kan ook water nodig hebben voor het fabricageproces (proceswater), maar lang niet al dit water komt weer in de rivier terecht.

c. afvalwaterlozing.

In plaats van water aan de rivier te onttrekken kan er ook sprake zijn van het lozen van afvalwater op de rivier. Dit betreft dan meestal rioolwater of industriewater, ook in de vorm van verdunningsmiddel voor vaste afvalstoffen (bv. bij de kalimijnen in de Elzas).

d. energievoorziening (waterkracht)

Een andere moderne vorm van het gebruik van rivierwater is die ten behoeve van de energiewinning (elektriciteit). Reeds vroeger werd met behulp van watermolens het arbeidsvermogen van het water omgezet in mechanische energie, zoals draaiende molenstenen. Later, toen de verkregen mechanische energie kon worden omgezet in elektrische energie die over grote afstanden kon worden getransporteerd, hebben de waterkrachtcentrales een grote vlucht genomen. Bij de moderne centrales wordt de potentiële energie van het water omgezet in elektrische energie door middel van het scheppen van een kunstmatig verval.

e. grondstoffenonttrekking uit bodem en oeverlanden.

Hiermee wordt bedoeld de winning van materialen als zand, grind en klei.

f. recreatie.

Alle genoemde mogelijkheden ter benutting van een rivier kan de rivier zelf niet optimaal realiseren. Zo zullen de meeste rivieren in hun oorspronkelijke staat niet zonder meer als scheepvaartweg kunnen worden gebruikt. Door de variatie in waterafvoer, en de daarmee gepaard gaande variatie in waterstanden, zullen in perioden met hoge afvoer van rivierwater hoge stroomsnelheden kunnen optreden, terwijl in perioden met lage afvoer onvoldoende vaardiepte voor de scheepvaart zal kunnen ontstaan. Er zullen dan bepaalde kunstmatige ingrepen vereist zijn om voor een verbetering van de situatie te zorgen.

Uit de rivierwaterbouwkunde is bekend dat de ingrepen, die men kan verrichten om tot een betere beheersing en benutting van de rivier te komen, betrekking kunnen hebben op:

het rivierbed
de rivierwaterafvoer
de rivierwaterstand

Bij de werken ter regulering van het rivierbed gaat men uit van het geven van een gewenste regelmatige vorm aan het laagwater- of het hoogwaterbed over een bepaalde lengte van de rivier. Het voornaamste doel is:

het verbeteren van de hoogwaterafvoer en
het fixeren van de (scheepvaart)geul.

Bij afvoerregulering gaat het om de gewenste veranderingen in het natuurlijk verloop van de rivierwaterafvoer. In het algemeen geschiedt deze regeling met behulp van reservoirs, waarin het rivierwater bij hoge afvoeren wordt opgevangen en wanneer gewenst (bij lage afvoeren bv.) eruit kan worden afgelaten. De vorming van zo'n reservoir kan geschieden door in de natuurlijke waterloop een dam te bouwen die het rivierwater opstuwt. De dam wordt meestal uitgevoerd als een vaste stuw, in welk geval men spreekt van een stuwdam.
Waterafvoerregeling wordt vooral toegepast voor de hoogwaterbestrijding, de waterkrachtwinning, de watervoorziening en in mindere mate ten behoeve van de scheepvaart.

De regulering van de rivierwaterstand heeft primair tot doel het kunstmatig veranderen van de waterstand in de rivier, zonder daarbij de waterafvoer te wijzigen. Het gaat hier altijd om een waterstandsverhoging. Dit kan wel tot gevolg hebben dat de afvoer verandert, maar de waterstandsverhoging staat centraal. Om deze waterstandsverhoging te realiseren zijn kunstwerken nodig die zowel een waterkerende als een waterafvoerende functie hebben. Immers, er moet een bepaald verval tot stand worden gebracht, maar ook moet het rivierwater worden doorgelaten. Ligt de nadruk op de eerstgenoemde functie, dan spreekt men van stuwen.
Waterstandsregulering wordt vooral toegepast ten behoeve van de scheepvaart om ook bij lage afvoeren over voldoende vaardiepte te beschikken. Een volledige regulering van de waterstand van een rivier met behulp van stuwen leidt tot kanalisatie van de rivier.
Andere doelen van een waterstandsregulering kunnen zijn het mogelijk maken van waterkrachtwinning en watervoorziening. Bij de waterkrachtwinning wordt door de opstuwing van het water plaatselijk een groot verval tot stand gebracht. Wil men met de waterstandsregulering zowel de scheepvaart als de waterkrachtwinning mogelijk maken, dan stuit men op strijdige eisen. Voor een gunstig rendement van de waterkrachtwinning

zou men een zo groot mogelijk verval wensen, terwijl de belangen van de scheepvaart juist een zo klein mogelijk verval vereisen.
Wegens de complexiteit van de ontwerpeisen voor een stuw, wordt er in het verdere gedeelte van dit hoofdstuk vanuit gegaan, dat de eisen van de scheepvaart voorrang krijgen en dat aan andere eisen bv. vanuit het oogpunt van waterkrachtwinning zo goed mogelijk wordt voldaan.
Om de functies van de stuwen en hun plaats in het geheel van de waterbouwkundige kunstwerken wat duidelijker te maken, wordt eerst uitgegaan van een algemene probleemstelling: "het bevaarbaar maken van een bepaald riviergedeelte".

3.2. Bevaarbaar maken van een stuk rivier

3.2.1. Inleiding

Een verbetering van de bevaarbaarheid van een rivier is vaak een voorwaarde voor de ontwikkeling van de scheepvaart. Dit gaat echter meestal gepaard met zeer hoge kosten, die economisch gezien niet altijd even gemakkelijk zijn te rechtvaardigen. Men moet zich er daarom voor hoeden direkt aan rigoureuze ingrepen als kanalisatie te denken. Ook veel eenvoudigere oplossingen, die dan wel niet optimaal aan de scheepvaarteisen voldoen, kunnen over het geheel bezien het gunstigste uitvallen. Zo'n - eventueel tijdelijke - oplossing zou kunnen zijn het handhaven van de bestaande toestand van de rivier en uit te gaan van een aanpassing door de scheepvaart aan de huidige situatie. Dit zou bv. mogelijk zijn door het verstrekken van een goede, up-to-date informatie over de riviergesteldheid, wat betreft de waterstanden, stroomsnelheden en geulliggingen. Men kan hierbij denken aan het beschikbaar zijn van loodsen, van informatiebulletins met de laatste gegevens, die eventueel via de radio kunnen worden verstrekt en aan een markering van de vaargeulen of juist van de ondiepten.
In het verdere verloop van dit hoofdstuk zal echter voornamelijk worden ingegaan op een verbetering van de rivier voor scheepvaartomstandigheden en dan speciaal op een verhoging van de waterstand in de rivier.

3.2.2. Oplossingsprincipes

Als de kern van het probleem (PFB) zou men kunnen stellen dat het maatgevende schip op het riviertraject A-B van plaats A naar plaats B v.v. moet kunnen komen. In deze fase van het ontwerpproces is het belangrijk dat niet direkt allerlei beperkingen worden opgelegd. Het zou in dit

geval daarom niet vanzelfsprekend moeten zijn dat de scheepvaart ook van de rivier zelf gebruik moet maken. Een vervangende vaarweg, ja zelfs een hulpmiddel waarbij het schip niet zichzelf voortbeweegt, kan tot de mogelijke oplossingsprincipes behoren.
Wordt er uitgegaan van de gedachte dat het schip de rivier als vaarweg dient te gebruiken, dan zal veelal de beschikbare vaardiepte een belemmerende factor opleveren, speciaal bij lage rivierafvoeren.

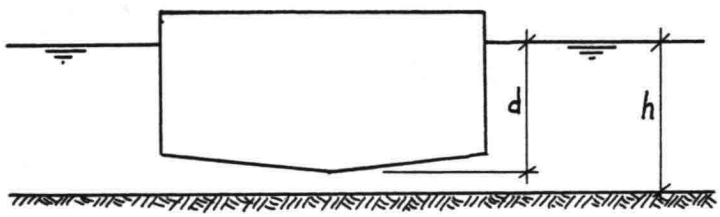


fig. 3.a

Het bevaarbaarheidsprobleem wordt dan beheerst door de diepgang van het maatgevende, geladen schip en de waterdiepte in de rivier, dus in wezen door een drietal factoren:
- diepgang van het schip
- bodemligging van de rivier
- waterhoogte in de rivier.

Elke factor op zich kan nu op een aantal manieren worden beïnvloed, zoals is aangegeven in de ontwerpboom in fig. 3.2.b.
Met nadruk wordt erop gewezen dat de geschetste ontwerpboom niet de enig juiste oplossing van het gestelde probleem is. Er zijn beslist nog andere splitsingen mogelijk die tot weer andere oplossingsprincipes kunnen leiden. Ieder dient hier zijn eigen creativiteit optimaal te leren gebruiken.
Voor het verdere verloop zal vooral de tak van de waterstandsverhoging de aandacht krijgen, omdat daar tenslotte de stuwen uit tevoorschijn komen. Uit de rivierwaterbouwkunde is bekend, dat de waterstand in een geschematiseerde rivier kan worden geschreven als

$$h^{3/2} = \frac{Q}{C \cdot b \cdot i^{\frac{1}{2}}}$$

Van deze formule is gebruik gemaakt om tot een aantal oplossingsprincipes te komen (zie fig. 3.2.b).
In de volgende paragraaf zullen de naar voren gebrachte ideeën worden

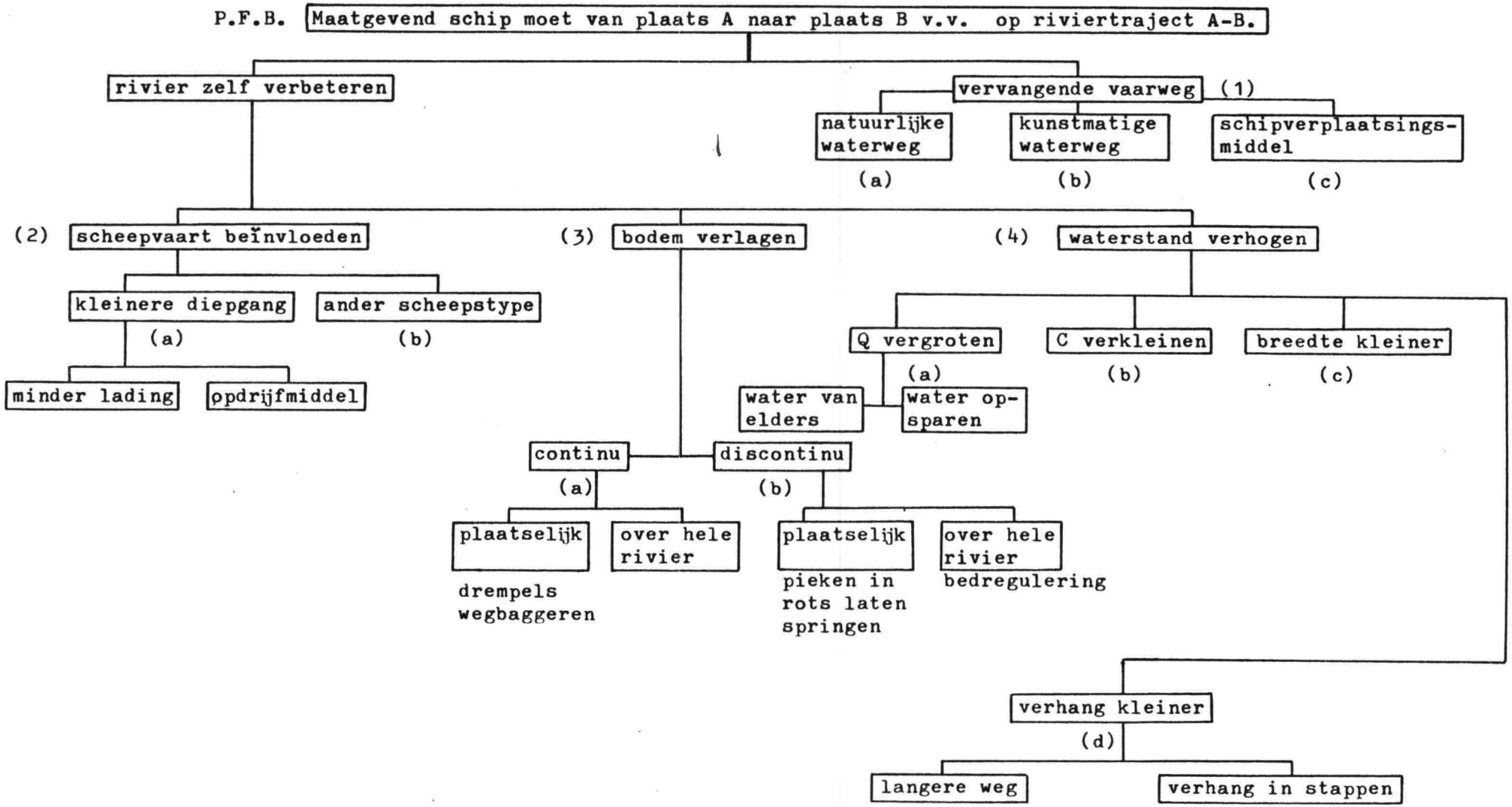

P.F.B.
Maatgevend schip moet van plaats A naar plaats B v.v. op riviertraject A-B.
rivier zelf verbeteren
vervangende vaarweg
(1)
natuurlijke waterweg
(a)
kunstmatige waterweg
(b)
schipverplaatsings-middel
(c)
(2)
scheepvaart beïnvloeden
(3)
bodem verlagen
(4)
waterstand verhogen
kleinere diepgang
(a)
ander scheepstype
(b)
minder lading
opdrijfmiddel
Q vergroten
(a)
C verkleinen
(b)
breedte kleiner
(c)
water van elders
water op-sparen
continu
(a)
discontinu
(b)
plaatselijk
over hele rivier
drempels wegbaggeren
plaatselijk
over hele rivier
pieken in rots laten springen
bedregulering
verhang kleiner
(d)
langere weg
verhang in stappen

fig. 3.2.b.

getoetst op hun realisering vooral wat betreft hun technische uitvoerbaarheid. De grootste aandacht zal daarbij uitgaan naar de oplossing van de verkleining van het verhang i en zullen de overige oplossingen summier worden toegelicht met speciale aanduiding wanneer de betreffende oplossing een haalbare kaart zou kunnen zijn.

3.2.3. Toetsing van oplossingsprincipes

1. vervangende vaarweg

1.a. natuurlijke waterweg

1. andere rivier gebruiken (parallelroute)
   Deze rivier moet natuurlijk wel aanwezig zijn, goed bevaarbaar zijn en niet teveel kosten voor de scheepvaart door het omvaren met zich meebrengen.
2. nieuwe "rivier" tussen A en B graven.

In de eerste plaats moet de mogelijkheid, landschappelijk gezien, kunnen. Het is te beschouwen als een grootschalige bochtafsnijding, waarvan de gevolgen uit de rivierwaterbouwkunde bekend zijn.
Daarnaast zal bij een nieuw traject dat korter is als het oude traject A-B bovenstrooms van dit traject uitschuring ontstaan, terwijl benedenstrooms van het traject juist aanzanding zal optreden. Er ontstaat een nieuw evenwicht en het is maar de vraag of de eindsituatie er beter op is geworden.

1.b. kunstmatige waterweg

Hier zou men gebruik kunnen maken van functiesplitsing door de waterafvoer langs de bestaande rivier te laten plaatsvinden en de scheepvaart langs een nieuw traject te laten afwikkelen. Voor dit laatste zou men kunnen denken aan een scheepvaartkanaal (geen stromend water, dus nagenoeg horizontale waterspiegel), waarbij het verval tussen A en B in één of meerdere stappen wordt overwonnen. Het kanaal bestaat dan uit een aantal panden, onderling verbonden door bv. schutsluizen of scheepsliften. Meestal zal dit scheepvaartkanaal vlak langs de rivier lopen en daarom worden aangeduid als lateraal kanaal. Een bekend voorbeeld in Nederland is het Julianakanaal langs de Maas.

1.c. schipverplaatsingsmiddel

Het schip beweegt niet zichzelf voort, maar wordt op de één of andere manier voortbewogen, bv. in een bak met water. Het probleem is dan feitelijk terug te voeren tot het brengen van het schip van het niveau in A tot het niveau in B over de afstand A-B. Zie voor de oplossingsprincipes van dit probleem het collegediktaat f1, hoofdstuk schutsluizen.
Hier kan nog worden gesteld dat deze oplossing alleen in aanmerking komt bij een kleine afstand A-B, d.w.z. minder dan 2 km bv.

2. diepgang van de schepen verkleinen

2.a. bestaande schepen

2.a.1. De waterverplaatsing en daarmee de diepgang van een schip wordt voornamelijk bepaald door het totale gewicht van het schip, dus eigen gewicht + lading. De factor die het gemakkelijkste is te beïnvloeden is het gewicht van de lading. In de praktijk betekent dit dat de hoeveelheid lading en daardoor de diepgang wordt aangepast aan de op dat moment aanwezige waterdiepte. Dat is economisch gezien nadelig omdat om dezelfde hoeveelheid vracht te vervoeren meer schepen moeten worden ingezet. Toch wordt deze oplossing nog veel toegepast omdat andere ingrepen nog veel kostbaarder zijn. Denk bv. in dit verband aan de regelmatig terugkerende perioden met lage waterstand op het Duitse gedeelte van de Rijn.

2.a.2. opdrijfmiddelen gebruiken.
Te denken valt hierbij aan tanks of pontons die naast het schip worden gebracht, vastgemaakt en leeggepompt. Dit idee is hoogstens rendabel te maken over een zeer korte afstand, dus bv. door een schip over een plaatselijke ondiepte heen te tillen. In Nederland werden zo vroeger bij Pampus - een ondiepte in de Zuiderzee vóór Amsterdam - wel scheepskamelen ingezet.

2.b. ander scheepstype ontwerpen of gebruiken

Het doel moet zijn het schip, met behoud van de hoeveelheid te vervoeren lading, een kleinere diepgang te geven. Dit zou op de volgende manieren gerealiseerd kunnen worden:

1. zoeken naar een gunstige verhouding tussen het gewicht van de lading en het eigen gewicht van het schip. Dit kan men bv. bereiken door het voortstuwingsmechanisme los te koppelen van de laadeenheid, zoals bij duwkonvooien het geval is.

2. zoeken naar een andere verhouding tussen de lengte, breedte en diepgang van het schip. Als voorbeeld hiervan kan gelden het ontwerp van een "restricted draught" tanker (beperkte diepgang) die door de geul bij de Maasvlakte Europoort moet kunnen bereiken.
In het algemeen zijn de oplossingen in deze categorie zeer ingrijpend en zeer kostbaar.

3. verlaging van de bodem van de rivier.
In de ontwerpboom is onderscheid gemaakt tussen een continu en een discontinu proces. Bij een continu proces moet men denken aan werkzaamheden die een tijdelijk karakter hebben, dus telkens opnieuw dienen plaats te vinden. Bij een discontinu proces is er sprake van werken die een permanente ingreep in de bodemligging betekenen.

3.a. continu proces

De meest bekende tijdelijke ingreep in de bodemligging is het baggeren. Dit moet steeds weer gebeuren als de ondiepten zich opnieuw gevormd hebben, zoals bv. na het optreden van een hoge-waterafvoer. Het baggeren heeft daarom slechts zin als een plaatselijke ingreep, zoals bv. bij ondiepten ontstaan als de geul in de rivier van de ene naar de andere oever oversteekt (crossings).
Bovendien moet men eraan denken dat de baggerschepen hinder kunnen opleveren voor de scheepvaart.

3.b. discontinu proces

Hierbij wil men een permanente verlaging van de rivierbodemligging bereiken. Er zal in dat geval een regulering van het rivierbed moeten worden toegepast over het gehele riviertraject of over het gedeelte dat de hinderlijke ondiepten bevat. Men zou dan kunnen denken aan de volgende oplossingen:

3.b.1. normalisatie van de rivier
Door gebruik te maken van een vergroting van de stroomsnelheid in de

rivier kan men een verdieping tot stand brengen. Daarvoor zal men de rivier smaller dienen te maken, wat in de praktijk gebeurt door middel van het aanbrengen van kribben en strekdammen. De versmalling van de rivier kan nadelige gevolgen voor de scheepvaart met zich meebrengen. In de eerste plaats kan de voor de verdieping benodigde breedte kleiner zijn dan de voor de scheepvaart vereiste minimale breedte. Verder kan door de verdieping de stroomsnelheid toenemen tot een voor de scheepvaart onaanvaardbare grootte. Een ander nadeel kan zijn dat de rivier ongeschikt is geworden voor het afvoeren van grote debieten.

3.b.2. opruiming van plaatselijke "harde" obstakels

Deze obstakels kunnen worden gevormd door bv. rotsdrempels of leembanken. Het opruimen hiervan kan soms verstrekkende gevolgen voor de rivier en de omgeving hebben. Het obstakel kan namelijk werken als een soort vaste stuw, waardoor de laagwaterstand en ook de bodem bovenstrooms van het obstakel wordt opgestuwd (zie fig. 3.c).

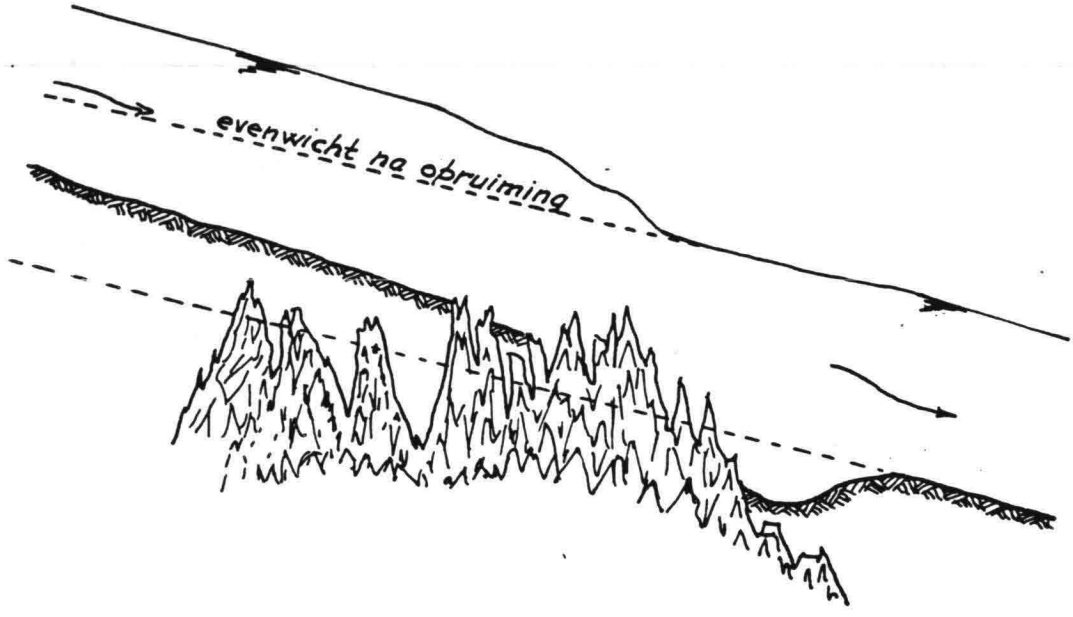


fig. 3.c

Wordt het obstakel verwijderd, dan treden er bovenstrooms sterkere verhangen op, waardoor daar de zandtransportcapaciteit gaat toenemen en een uitschuring het gevolg is. Er wordt pas een nieuw evenwicht bereikt als de gehele rivier bovenstrooms een waterspiegeldaling heeft ondervonden. Dit kan tot gevolg hebben dat nieuwe obstakels bloot komen te liggen, dat de funderingen van kunstwerken gevaar lopen en dat

er gevaar bestaat dat de grondwaterspiegel gaat dalen. Bovendien zal gedurende de tijd van uitschuring bovenstrooms, aan de benedenstroomse zijde van het verwijderde obstakel een sterke aanzanding optreden.

4. waterstandsverhoging in de rivier

4.a. waterafvoer vergroten

De waterafvoer van een rivier over het gehele jaar bezien en zeker ook over een aantal jaren is lang niet altijd constant en kan soms grote variaties opleveren met name in tropische gebieden. Door het water in tijden van overvloed bij hoge rivierafvoeren op te sparen en bij watertekort af te laten op de rivier kan een nivellering van de rivierwaterafvoer worden bereikt. Men kan zo over een aantal jaren de gemiddelde afvoer vaststellen : $Q_{gem.}$.
Voor een goede bevaarbaarheid van de rivier is een bepaalde waterafvoer noodzakelijk: $Q_{vereist}$. Deze $Q_{vereist}$ is te berekenen uit de volgende formule:

$$Q = C \cdot b \cdot h^{3/2} \cdot i^{\frac{1}{2}}$$

daarin is C - de bodemruwheidscoëfficiënt, bv. 50 $m^{\frac{1}{2}}/sec$
b - de aanwezige, evt. benodigde rivierbreedte voor de scheepvaart
h - de vereiste waterdiepte
i - het verhang over het riviertraject A-B

Men kan nu twee gevallen onderscheiden:

4.a.1. $Q_{vereist} > Q_{gem.}$

4.a.2. $Q_{vereist} \leq Q_{gem.}$

4.a.1. De rivierwaterafvoer is, ook over een aantal jaren genomen, niet toereikend om de gewenste bevaarbaarheid te leveren. Een oplossing zou dan nog kunnen bestaan uit het aanvoeren van water van elders, zoals uit meren of andere rivieren met behulp van zijrivieren of stroomkanalen. Dit systeem is o.a. toegepast in de Rhein-Main-Donauverbinding op het gedeelte waar de aansluiting van de Donau met het Europakanaal plaatsvindt.
Een eerste vereiste is natuurlijk dat een geschikte waterbron aanwezig is.

4.a.2. Als de rivier gemiddeld gesproken wel voldoende afvoer heeft, dan zal men het water bij hoge rivierafvoeren dienen te kunnen opvangen (buffervorming). Daarvoor zal men meestal in de bovenloop van de rivier op een geschikte plaats een reservoir moeten creëren door het aanbrengen van een stuwdam in de rivier. Een dergelijke dam, die ook gebruikt kan worden bij de hoogwaterbestrijding of t.b.v. waterkracht, brengt wel een grote verandering in het benedenstroomse regime van de rivier met zich mee. Uit de rivierwaterbouwkunde is bekend dat door de onderbreking van het zandtransport, direkt benedenstrooms van de dam uitschuring zal optreden. Door deze verdieping zal het verhang kleiner worden en de waterspiegel gaan dalen.
Bovenstrooms van de dam zal juist aanzanding plaatsvinden, waardoor het bassin (reservoir) kan dichtslibben en zijn functie als bergingsmogelijkheid kan verliezen.
Een voorbeeld van deze methode is de dam met reservoir in de Niger bij Timboektoe. Door op geregelde tijden water af te laten kan de bevaarbaarheid van de Niger benedenstrooms van de dam met enkele maanden per jaar worden verlengd.

4.b. bodemruwheid C verkleinen

Dit betekent dat men de rivierbodem en oevers ruwer moet maken. Het principe komt neer op een vergroting van de weerstand. In het laagwaterbed van de rivier is een kunstmatige ingreep vrijwel niet mogelijk omdat de natuur zelf daar de zandribbels vormt, die bepalend zijn voor de C-waarde. Deze oplossing wordt daarom ook verworpen.

4.c. verkleining van de rivierbreedte

Deze oplossing is eerder indirekt aan de orde gekomen bij 3.b.1. normalisatie van de rivier. De bezwaren die daar zijn genoemd tegen een kleinere rivierbreedte, gelden ook hier. Bovendien moet men eraan denken dat een plaatselijke versmalling van de rivier een discontinuïteit geeft in de stroomvoerende breedte, waardoor er sprongen in de rivierbodem kunnen optreden.

4.d. verkleining van het verhang $i = \frac{H}{L}$

4.d.1. lengte van riviertraject vergroten

Deze oplossing lijkt erg op die genoemd bij 1.a. een vervangende vaarweg. Er gelden dezelfde bezwaren met nu nog het feit dat de schepen een

langere weg dienen af te leggen, wat de oplossing minder rendabel maakt. Wat betreft de aansluiting aan het niet veranderde riviergedeelte kan worden gesteld dat ook daar aanzandingen en uitschuringen zullen optreden, maar nu juist tegengesteld aan die genoemd bij de bespreking in 1.a.

4.d.2. het hoogteverschil H in één of meer stappen verkleinen (kanalisatie)

Door het aanbrengen van stuwmiddelen in het riviertraject is het mogelijk overal voldoende vaardiepte te krijgen. Maatgevend is hierbij de waterstand direkt bij de stuw aan de benedenstroomse zijde bij een minimale rivierafvoer (zie fig. 3.d).

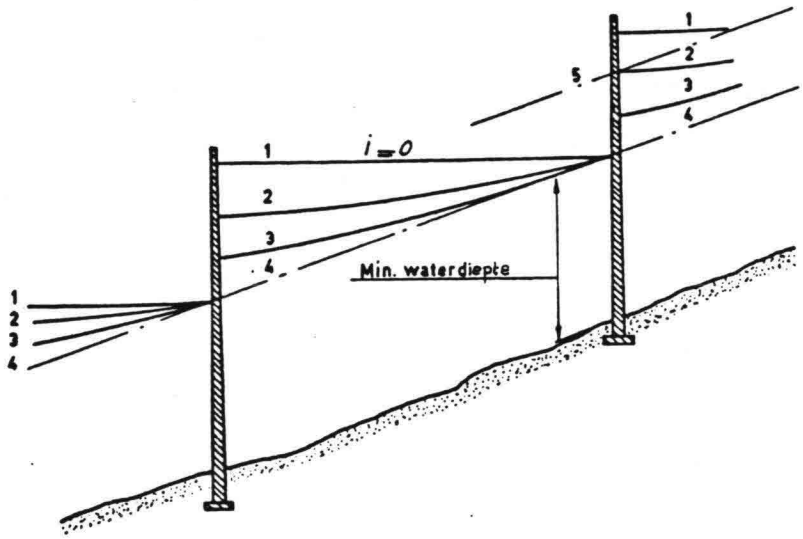


fig. 3.d

Heeft de rivier helemaal geen afvoer, dan is i = 0 en loopt de waterspiegel dus horizontaal. Bij elke gestuwde toestand van de rivier, dus als $Q_{optredend} < Q_{bevaarbaar}$ is, zal een middel ter overwinning van het verval door de scheepvaart aanwezig moeten zijn. Deze middelen, zoals bv. een schutsluis, zijn behandeld in het college f1 - Inleiding in de waterbouwkunde.
Een nadere bespreking van de stuwmiddelen en de gevolgen van de kanalisatie komen in par. 3.2.5. aan de orde.

3.2.4. Keuzebepaling

Uit de veelheid van mogelijke oplossingsprincipes is niet gemakkelijk een zij het voorlopige keuze te maken. Bij de bespreking van de verschillende mogelijkheden is zo goed mogelijk aangegeven wat de haalbaarheid van de

oplossing is, evenals de beperkingen die het principe in zich houdt. Veelal zal de keuze toch worden bepaald door de minimale totaalkosten voor de voorgestelde oplossing. Een goede kostenraming is in dit stadium van het ontwerpproces echter nog niet zo eenvoudig.
Omdat dit hoofdstuk over stuwen gaat is gekozen voor een kanalisatie van het riviertraject A-B. Als voorbeeld van een globale kostenraming zal hier de opzet worden gegeven voor de berekening van het aantal stappen (stuwen + schutsluizen) waarin het riviertraject moet worden verdeeld.
In het algemeen kan worden gezegd dat bij de aanleg van veel stuwen er een klein verval over de stuw staat, wat gunstig is voor de aanlegkosten, terwijl er weinig verhoging van de waterstanden bovenstrooms van de stuwen optreedt, waardoor de dijken maar weinig opgehoogd dienen te worden en de grondwaterspiegel van het terrein slechts een geringe verhoging vertoont. Daartegenover staat als ongunstig effect van veel stuwen dat de scheepvaart meer oponthoud heeft door het grote aantal schutsluizen.
De voornaamste factoren die een globale kostenraming bepalen zijn:

- aanlegkosten van de stuwlichamen
  de schutsluizen
  de bedijkingen etc.
- kosten door oponthoud voor de scheepvaart
- schade aan omgeving door de hogere waterstand en de kosten die moeten worden gemaakt om de nadelige invloed te beperken
- exploitatie- en onderhoudskosten.

Als variabele zal worden ingevoerd n - het aantal stappen waarin het riviertraject wordt verdeeld.

A. aanlegkosten

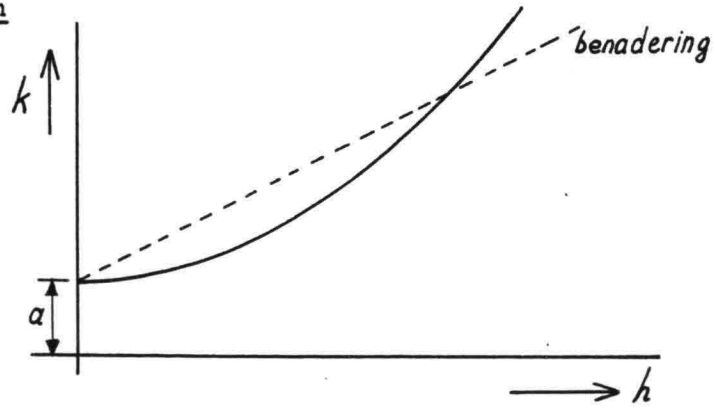


fig. 3.e

Deze kosten bestaan voor een gedeelte uit vaste kosten a en een gedeelte dat afhankelijk is van het plaatselijke verval h. Benaderen we deze afhankelijkheid door een lineair verband, dan kan men de aanlegkosten per stuw als volgt schrijven:

$$k = a + b \cdot h$$

dus bij n stuwen:

$$K = n \cdot a + b \cdot h \cdot n$$

en aannemende dat bij elke stuw ongeveer een gelijk verval heerst:

$$K_a = n \cdot a + b \cdot H$$

We zien hieruit dat bij een kleiner aantal stappen, dus minder kunstwerken, de aanlegkosten van de werken kleiner worden.

B. <u>kosten door oponthoud voor de scheepvaart</u>

Het oponthoud van de schepen bij de passage van een stap (schutsluis bv.) bestaat uit een aantal constante elementen, zoals wachten, invaren e.d. en een variabel element, nl. het brengen van het schip van het ene peil naar het andere. Het oponthoud van één schip bij de passage van één stuw is dan te schrijven als

$$t_o = \alpha + \beta \cdot \sqrt{h}$$

(De vultijd is namelijk gelijk aan 2 maal de schutschijf, gedeeld door het debiet dat bij getrokken schuif en volledig verval zou ontstaan, vermeerderd met de halve heftijd van de schuiven; zie ook college f9).
Is er sprake van n stuwen en sluizen en N schepen per jaar, dan is het totale oponthoud

$$N\ (n.\alpha + n.\beta.\sqrt{H/n})$$ tijdseenheden bv. uren/jaar

De gemiddelde kosten voor de wachttijden neemt men aan op P gulden/uur. Voor grotere schepen nemen deze kosten toe.
De totale schadepost per jaar is dan

$$K_j = P \cdot N \cdot (n.\alpha + n.\beta.\sqrt{H/n})$$

Deze kosten moet men kapitaliseren om ze te kunnen vergelijken met de aanlegkosten, dus (indien we de afschrijving buiten beschouwing laten):

$$K_{op} = K_j \cdot \frac{1}{r} = \frac{P \cdot N}{r} (n.\alpha + n.\beta.\sqrt{H/n})$$

waarin r de rentevoet voorstelt.

C. schade aan omgeving

Bij benadering kan men stellen, dat de kosten van maatregelen ter bescherming van de omgeving tegen hogere waterstanden, zoals de aanleg van dijken $:: h^2$ zijn. Dan geldt

$$k_s = \gamma . \frac{H^2}{n^2}$$, oftewel voor n stappen :

$$K_s = \gamma . \frac{H^2}{n}$$

D. exploitatie- en onderhoudskosten

Hieronder valt het beheer, de bediening, het onderhoudspersoneel e.d. Deze kosten kunnen recht evenredig met het aantal stappen worden aangenomen.

$$K_n = \delta . n$$

De totaalkosten kunnen dan worden geschreven als:

$$K_{totaal} = a . n + b . H + \frac{P . N}{r} (n.\alpha + n.\beta.\sqrt{\frac{H}{n}}) + \gamma.\frac{H^2}{n} + \delta.n$$

Om tot een minimum bedrag te komen, moet men gaan differentiëren naar de variabele n.

$$\frac{\delta K}{\delta n} = a + \frac{\alpha}{r} . (P . N) + \frac{\beta}{2 r} . (P . N).\sqrt{\frac{H}{n}} - \gamma.\frac{H^2}{n^2} + \delta = 0$$

Deze vergelijking is moeilijk oplosbaar. Omdat het toch maar om een indicatie van het aantal stappen gaat, zou de term $\frac{\beta}{2 r} . (P . N) .\sqrt{\frac{H}{n}}$ eruit kunnen worden geschrapt , als kan worden aangetoond dat de term $\frac{\alpha}{r} . (P N)$ aanzienlijk groter is. Aannemende dat het verval per schutsluis ca. 5 m zal bedragen, gaat het om de verhouding tussen α en β. Omdat bij de normale schutsluizen β slechts een klein gedeelte van α is, mag de term $\frac{\beta}{2 r} . (P . N) .\sqrt{\frac{H}{n}}$ in eerste instantie worden verwaarloosd t.o.v. de term $\frac{\alpha}{r} . (P . N)$.

De vergelijking wordt dan:

$$\frac{\delta K}{\delta n} = a + \frac{\alpha}{r} . (P . N) - \gamma . \frac{H^2}{n^2} + \delta = 0$$ waaruit volgt

$$n = H . \sqrt{\frac{\gamma}{a + \delta + \alpha/r . P . N}}$$

$\frac{\delta^2 K}{\delta n^2}$ = positief, dus is er sprake van een <u>minimum</u>.

Uit de formule voor n zijn een aantal conclusies te trekken:

- als de schadeverwachting $\int$ (of zoals hier de kosten gemaakt om schade te voorkomen) groter wordt, moet men het aantal stuwen vergroten. Het zal dus zaak zijn de schade te beperken door bv. de plaatsing van de stuwen op gunstige punten te laten geschieden zoals daar waar hoge oevers zijn of daar waar langs het traject de minste kans op schade is te verwachten.
- worden de vaste kosten (d.w.z. onafhankelijk van het verval) van de kunstwerken groter, dan kan men beter met minder stuwen volstaan.
- komen er meer schepen op het betreffende riviertraject, dus N groter, dan moet men minder stuwen aanbrengen.
- zijn er op het riviergedeelte A-B vooral grotere schepen aanwezig, dus grotere P, dan is het voordeliger met minder stuwen en schutsluizen te werken.

Bij dit alles moet men bedenken dat hier slechts een schematische opzet voor een berekening is gegeven en dat men de gevonden uitkomst wel moet relativeren. Zo zal het verval h per stuw in de praktijk lang niet altijd gelijk zijn, is helemaal geen rekening gehouden met factoren als verdamping in de stuwpanden (in de tropen een belangrijk gegeven), gevolgen van sedimenttransport, de visstand etc.

In het verdere verloop van dit hoofdstuk zal nu worden ingegaan op het ontwerp van de stuwmiddelen. De schutsluizen zijn reeds in het college f1 behandeld. Achtereenvolgens zullen de functies van de stuwmiddelen worden bekeken met de daaruit voortvloeiende ontwerpeisen, de mogelijke oplossingsprincipes en hun toepasbaarheid en tenslotte enkele voorbeelden van veel voorkomende stuwtypen.

3.3. Stuwmiddelen

3.3.1. Functies van stuwmiddelen

Uit de eerder gegeven definitie van een stuwmiddel blijkt dat de voornaamste functie is het omhoog brengen van de waterstand bovenstrooms van het kunstwerk. Er is dus in de eerste plaats sprake van een waterpeilregelende functie. Dit geldt alleen voor het riviergedeelte bovenstrooms van het stuwmiddel, want uit de rivierwaterbouwkunde is bekend dat de waterstand benedenstrooms niet of nauwelijks door het stuwmiddel kan worden beïnvloed. Deze waterstand moet door het eerstvolgende stroomafwaarts gelegen stuwmiddel worden geregeld.

In nauwe relatie met de peilbeheersing staat de regeling van de waterafvoer. De rivierwaterafvoer zal in de tijd gezien schommelingen in grootte vertonen. Bij lage afvoeren zal het water gebruikt moeten kunnen worden om het waterpeil in het bovenstroomse pand op de gewesnte hoogte te brengen, terwijl bij hoge afvoeren het teveel aan water moet kunnen worden doorgelaten. Het stuwmiddel heeft dus ook een waterafvoerende functie.

In perioden met lage afvoeren zal het stuwmiddel zijn waterpeilregelende functie uitoefenen om de scheepvaart op het bovenstroomse riviergedeelte mogelijk te maken. Daardoor ontstaat een verschil in waterstand bovenstrooms en benedenstrooms van het stuwmiddel, welk verval de scheepvaart moet overwinnen met behulp van een speciaal kunstwerk, zoals behandeld is in het college f1, bv. een schutsluis.

In perioden met hoge waterafvoeren zal er in het algemeen voldoende waterdiepte voor de scheepvaart aanwezig zijn, zodat niet van de hulp van stuwmiddelen gebruik hoeft te worden gemaakt. De schepen zouden in dit geval voor het passeren van de kunstwerken niet van de schutsluis, maar van het stuwmiddel gebruik kunnen maken. Het stuwmiddel kent dan ook nog een scheepvaartdoorlatende functie.

Daarnaast zal nog een aantal "voorwerpen" de kunstwerken moeten kunnen passeren. Daarbij valt te denken aan:

- drijvend materiaal zoals vuil, ijs, etc.
- vis
- sediment

Het stuwmiddel heeft daarom ook een functie als doorvoermogelijkheid van vaste voorwerpen.

Tenslotte kan er in sommige gevallen sprake zijn van een energie-opwekkende functie. Door de opstuwing van het waterpeil bovenstrooms van het

stuwmiddel wordt immers de energie van het water geconcentreerd in het verval ter plaatse van het stuwmiddel. Indien dit verval groot en constant genoeg is, is het aantrekkelijk hiervan gebruik te maken.

Bij het ontwerpen van het stuwmiddel behoeven niet persé alle functies te worden vervuld, maar kan ook worden uitgegaan van functiesplitsing. Bij de verdere behandeling van het stuwmiddel zullen de peilregelende, de waterafvoerende en de scheepvaartdoorlatende functie voorop staan. Er wordt nu een korte analyse van deze functies verricht, waaruit een aantal relevante ontwerpeisen naar voren komt.

a. <u>peilbeheersing</u>

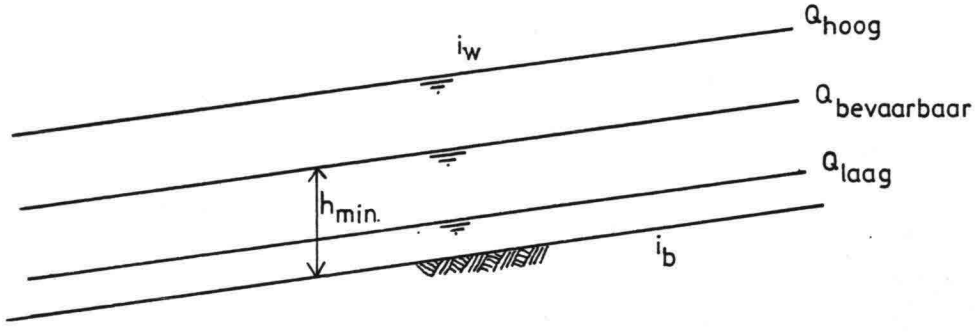


fig. 3.f.

Aangenomen dat de waterafvoer Q en de dwarsdoorsnede van de rivier constant zijn, kan er gesproken worden van een evenwichtsdiepte h van de rivier, waarbij het verhang van de waterspiegel evenwijdig loopt aan het bodemverhang. Als de waterafvoer niet snel in de tijd gezien verandert, krijgt de rivier telkens de gelegenheid zich aan de verandering aan te passen tot een nieuwe evenwichtssituatie is bereikt.
Als de minimaal benodigde vaardiepte h_{min} wordt gesteld, dan hoort daarbij een rivierafvoer $Q_{bevaarbaar}$ waarbij nog net scheepvaart mogelijk is. Zodra de waterafvoer $< Q_{bevaarbaar}$ wordt, zal de waterdiepte van de rivier $< h_{min}$ worden en zal het stuwmiddel in werking moeten treden.
Bij een zeer kleine afvoer van de rivier, dus nagenoeg een nul-afvoer, loopt de waterspiegel in de stuwpanden vrijwel horizontaal. Immers $Q = 0$, dus $i = 0$ (zie de lijn 0 in fig. 3.g.). De peilregelende functie van de stuwmiddelen moet zodanig zijn, dat overal in het bovenstroomse pand tenminste h_{min} aanwezig is. De kritieke plaats is dan direkt benedenstrooms van de stuwmiddelen gelegen (zie h_{min} benedenstrooms van stuw B in fig. 3.g.).

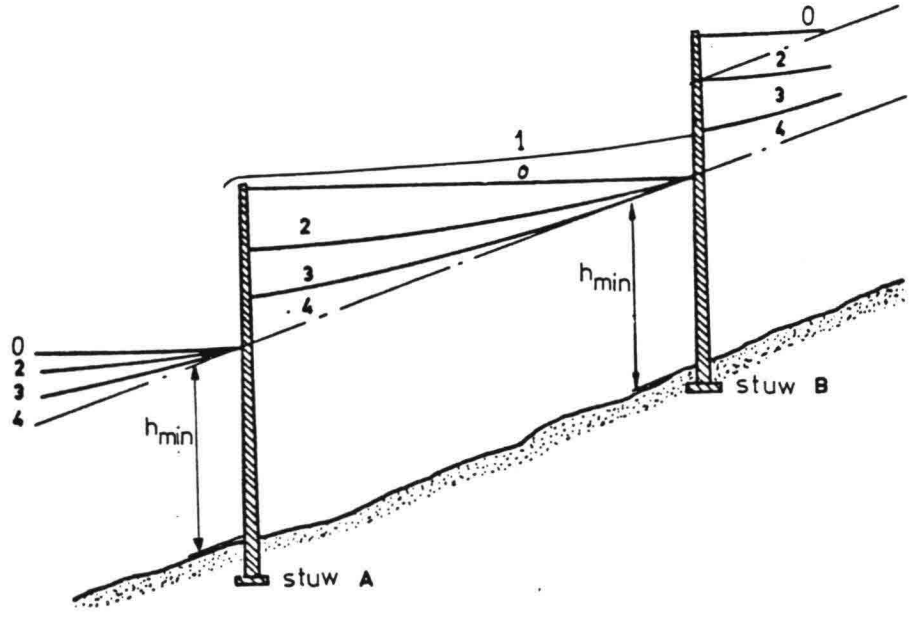


fig. 3.g.

Gaat er een grotere afvoer optreden, - maar wel zodanig dat $Q < Q_{bevaarb.}$ zodat nog steeds gestuwd moet worden - dan zal bij een <u>vaste stuw</u> door de overstort bij bv. stuw A de waterstand daar stijgen. De optredende stuwkromme in het pand bovenstrooms van A zal de waterstand net benedenstrooms van stuw B nog sterker doen stijgen (zie de lijn 1 in fig. 3.g.). Het verval over het stuwmiddel B wordt dus kleiner.
De waterdiepte bij B wordt bij gebruik van een vaste stuw echter groter dan voor de scheepvaart noodzakelijk is. Uit dat oogpunt zou men de waterstandshoogte nabij B willen beperken door het stuwmiddel A te voorzien van regelbare openingen (<u>regelbare stuw</u>). Men zou dan het stuwmiddel A zo kunnen manipuleren, dat steeds benedenstrooms van het stuwmiddel B een vaste waterstand h_{min} aanwezig is (zie de lijnen 2, 3, 4 in fig. 3.g.). Dit betekent dat stuwmiddel A geheel moet zijn weggenomen als de rivierafvoer de waarde $Q_{bevaarbaar}$ bereikt. Men spreekt in zo'n geval van een <u>minimum stuwprogramma</u>, omdat het kantelpunt ter plaatse van B is gelegen. Doordat tengevolge van de opstuwing veranderingen in de bodemligging optreden, is het vaak wenselijk dit kantelpunt een eind stroomafwaarts van B te leggen (zie ook fig. 3.1.).
Uit het bovenstaande volgt dat het stuwmiddel in ieder geval een <u>waterkerende functie</u> krijgt. Dat betekent dat de waterdruk door de constructie moet worden opgenomen en naar de ondergrond afgevoerd. Deze waterdruk zal in het algemeen de grootste waarde vertonen bij een maximaal verval

over het stuwmiddel, dus bij een nul-afvoer (zie fig. 3.g.).
De mate van waterdichtheid, die vereist is, kan het beste kwalitatief worden aangeduid. In gevallen waarbij waterverliezen tot een minimum beperkt dienen te worden, zal men sterke aandacht aan de waterafdichting dienen te besteden. Dit zal bv. het geval zijn als men het stuwmiddel tevens wil benutten voor het opwekken van waterkracht, waarbij een constant verval wenselijk is. Ook bij rivieren met langdurige perioden van kleine afvoeren speelt het waterverlies een grote rol. Overigens zal men de verliezen door het stuwmiddel heen moeten relateren aan andere waterverliezen uit het stuwpand, zoals de schutwaterverliezen en - in tropische gebieden - verdamping.
Wat betreft de nauwkeurigheid van de peilbeheersing hebben wij al gezien dat een regelbare stuw de voorkeur verdient.

b. <u>waterafvoer</u>
In perioden met zeer lage afvoeren zal het afstromende water worden gebruikt om de stuwpanden gevuld te houden.
Bij hogere afvoeren, maar nog wel met $Q < Q_{bevaarb.}$ zodat het gebruik van het stuwmiddel toch nodig is, zullen de stuwmiddelen een bepaalde hoeveelheid water moeten kunnen doorlaten, zonder hinder te geven in het benedenstroomse pand.
Worden de afvoeren nog groter, dan komt er een moment dat het stuwmiddel eigenlijk niet meer nodig zou zijn. Vooral bij de zeer hoge afvoeren van de rivier is het van belang dat het doorstromingsprofiel bij het stuwmiddel zoveel mogelijk het oorspronkelijke dwarsprofiel van de rivier benadert. Dit in verband met de optredende stroomsnelheden, die niet teveel van de normale stroomsnelheden afwijken, om het sedimenttransport niet in ongunstige zin te beïnvloeden. Men kan daarbij denken aan ongewenste geulvormingen en aanzandingen op kritieke plaatsen.
Bij de zeer hoge afvoeren zal men ervoor moeten zorgen dat net als bij de normale rivier, de aanwezige uiterwaarden kunnen worden gebruikt, als afstroommogelijkheid voor het rivierwater.

Onder 3.3.1.a.is al gesproken over de mogelijkheid van een vaste of een regelbare stuw. Bij vergelijking van deze twee typen kan als belangrijk <u>voordeel van de vaste stuw</u> gelden dat deze <u>relatief goedkoop</u> is, zeker als bij de regelbare stuw sprake is van een grote wegneembare doorstroomopening, volgend uit de eis van lage stroomsnelheden.

Als voornaamste nadelen van vaste stuwen kunnen worden genoemd het feit dat de scheepvaart ook bij hoge afvoeren van de schutsluis gebruik moet maken, omdat altijd een bepaald verval aanwezig is en het feit dat er een permanente verhoging van de waterstand, vooral direkt bovenstrooms van het stuwmiddel, optreedt wat van invloed kan zijn op de grondwaterstand in de omgeving en bij hoge afvoeren van de rivier tot een verhoging van de oeververdediging (dijken) kan leiden.
Daarnaast is er nog het effect van de verandering in de bodemligging.

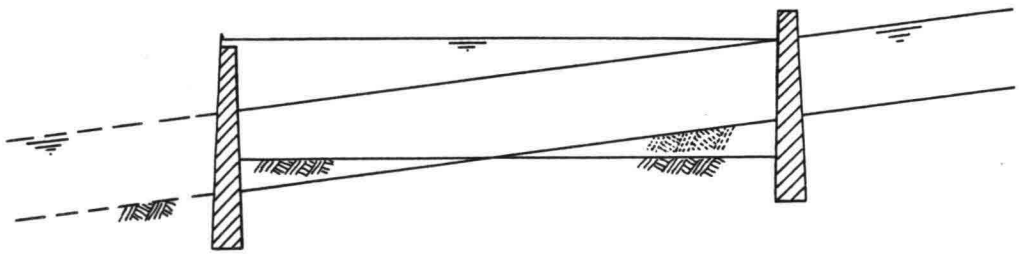


fig. 3.h.1.

Een vaste stuw vormt een obstakel in de stroom, waardoor het sedimenttransport wordt onderbroken. Bovenstrooms van de stuw zal door de verkleining van het verhang aanzanding optreden, terwijl bendenstrooms van de stuw de zandtransportcapaciteit van het overstromende water zo groot is geworden dat juist uitschuringen ontstaan. Dit heeft een bodemligging tot gevolg als in fig. 3.h.1. is aangegeven. Door de aanzandingen en uitschuringen gaat ook de stuwkromme zich wijzigen. Mede omdat het zandtransport over de stuw gaat plaatsvinden, ontstaat er een eindsituatie als aangegeven in fig. 3.h.2.

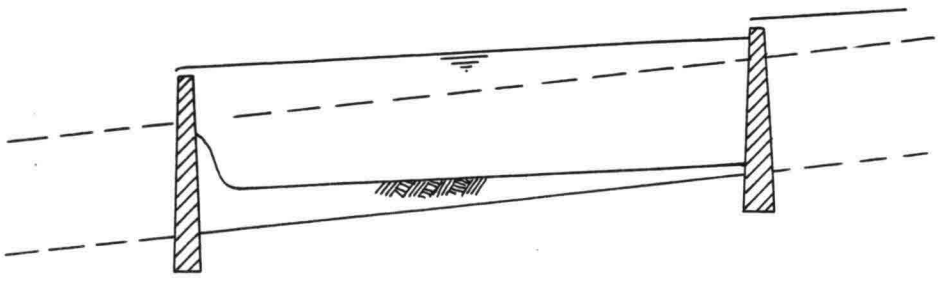


fig. 3.h.2.

Bij regelbare stuwen ziet men in de gesloten - dus stuwende - stand hetzelfde verschijnsel optreden als bij de vaste stuw (fig. 3.h.1.). In perioden met hoge afvoeren, als de stuwmiddelen worden verwijderd, zal vaak de zandtransportcapaciteit van de rivier groot zijn, zodat de aanzandingen en uitschuringen deels teniet worden gedaan. De bodem van het stuwpand vertoont dan een gemiddelde ligging als aangegeven in fig. 3.i.

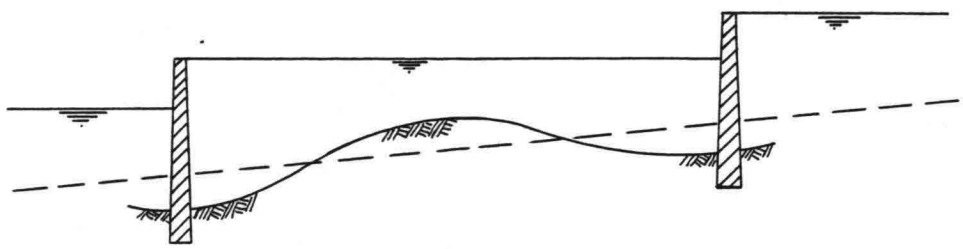


fig. 3.i.

Tegenwoordig wordt bij de kanalisatie van een rivier ten behoeve van de scheepvaart vrijwel altijd gebruik gemaakt van <u>regelbare stuwen</u>. Er moet bij het stuwontwerp dan wel rekening worden gehouden met de veranderingen die in de bodemligging kunnen optreden. Door de te verwachten bodemdaling ter plaatse van het stuwmiddel zal de vloer van de constructie lager gelegd moeten worden dan de oorspronkelijke rivierbodem. Bij de kanalisatie van de Nederrijn zijn de vloeren van de stuwen bij Hagestein e.a. ruim 1 m onder het rivierbodempeil gelegd.
Verder geeft de hogere bodemligging in het midden van het stuwpand mogelijk problemen voor de scheepvaart. In dat geval zal het stuwprogramma moeten worden aangepast (zie 3.3.1.a.).
In het verdere ontwerp van het stuwmiddel zal nu worden uitgegaan van een regelbare stuw.

c. <u>scheepvaartdoorlaat</u>

Bij afvoeren lager dan $Q_{bevaarb.}$ zal het stuwlichaam moeten functioneren om de minimum benodigde waterdiepte voor de scheepvaart te realiseren. De scheepvaart moet het verval, dat over het stuwmiddel staat, overwinnen met behulp van een apart kunstwerk zoals een schutsluis.
Worden de afvoeren groter dan $Q_{bevaarb.}$, dan kunnen de stuwmiddelen

worden verwijderd. Voor de scheepvaart bestaat dan eventueel de mogelijkheid om van de doorstroomopening(en) in de stuw gebruik te maken. Dan hebben de schepen immers geen tijdverliezen, die bij het passeren van de schutsluis wel aanwezig zijn.
Bij zeer hoge afvoeren wordt de stroomsnelheid op de rivier in het algemeen zo groot, dat geen scheepvaart meer mogelijk is. Deze situatie kan enkele dagen per jaar voorkomen. Men dient dan voor voldoende vluchthavens voor de scheepvaart te zorgen.

Tegen het gebruik van de doorstroomopeningen of van aparte doorvaartopeningen in de stuw door de scheepvaart is een aantal bedenkingen in te brengen. Allereerst is voor de scheepvaart een opening met een grote dagwijdte noodzakelijk. De breedte van deze opening is o.a. afhankelijk van het soort schepen, het aantal schepen, de grootte van de schepen, is er sprake van opvaart en afvaart en de grootte van de stroomsnelheid. Men moet in het algemeen minstens rekenen op een breedte van 2 à 2½ maal de maatgevende scheepsbreedte. Dit betekent bv. bij de aanwezigheid van 4-baks duwconvooien een breedte van 45 à 50 m, wat als regel belangrijk meer is dan de economische overspanning van waterbouwkundige staalconstructies. Dit betekent dat een aparte doorvaartopening in de stuw, alhoewel vaak vereist, relatief duur is.
Ook de eerdergenoemde maximum toelaatbare stroomsnelheid in de stuw met betrekking tot de scheepvaart maakt dat de doorstroomopening in de stuw niet veel mag verschillen van het effectieve dwarsprofiel van de rivier bij hoge afvoeren, als nog scheepvaart mogelijk is. Dit leidt tot grote openingen, wat weer een kostbare zaak is, dan wel tot een groter aantal kleine openingen, waarbij de pijlers het doorstroomprofiel versmallen.
Een ander probleem is de bodemligging van de rivier bij de aansluiting met de stuw. Om de scheepvaartgeul constant op de scheepvaartopeningen in de stuw gericht te houden zijn vaak kostbare voorzieningen noodzakelijk. Immers door de wisseling van open en gesloten stand van het stuwmiddel wordt het sedimenttransport steeds op andere wijze beïnvloed.
Tenslotte zal de scheepvaartbeweging door de stuw ook in hoogtezin beperkingen opleggen aan met name het afsluitmiddel dat in geopende stand in ieder geval buiten het peil van de hoogste waterstand, waarbij de schepen door de stuw varen, vermeerderd met de vrije hoogte boven de

waterlijn van het schip, moet liggen. De drempelligging moet in ieder geval liggen onder het peil van de laagste waterstand waarbij het schip door de stuw kan varen verminderd met de diepgang van het maatgevende schip en de keel-clearance (dus $h_{min.}$). Maar maatgevend voor de drempelligging zal de bodemligging, en de fluctuaties daarin, van de rivier zijn, zie 3.3.1.b.
De slotconclusie luidt dat aparte scheepvaartopeningen in de stuw altijd veel extra geld kosten. Als het aantal dagen per jaar dat de scheepvaart door de stuw kan varen slechts gering is, bv. 30 dagen per jaar, dan is het in het algemeen niet economisch verantwoord scheepvaartopeningen aan te brengen. Zo zijn bv. bij de kanalisatie van de Donau en de Mississippi geen mogelijkheden voor de scheepvaart om door de stuw te varen. In Nederland bij de kanalisatie van de Maas en de Nederrijn echter wel.

d. doorvoer van vaste stoffen

1. Van het drijvende materiaal is het ijs de belangrijkste factor. Om de ijsvelden en grote ijsschotsen goed te kunnen afvoeren en het ontstaan van ijsdammen te voorkomen, zullen de openingen voor de ijsdoorlaat tamelijk groot dienen te zijn. Verder zal men bij het ontwerp van de pijlers en landhoofden terdege rekening dienen te houden met de ijsbelasting. Andere drijvende voorwerpen zullen hoogstens tot stootbelastingen op het stuwmiddel aanleiding kunnen geven en stellen geen aparte eisen aan de doorlaatopeningen. Voor uit het roer lopende schepen moet eventueel een opvanginstallatie worden aangebracht.

2. Verschillende vissoorten zoals paling, zalm en forel zullen in het seizoen dat zij kuit gaan schieten stroomopwaarts willen zwemmen. Het stuwmiddel vormt dan zonder bepaalde voorzieningen een onneembaar obstakel. Daarom wordt in de landhoofden of in de pijlers wel een zg. vistrap of vislift aangebracht.

3. Voor wat betreft het sedimenttransport kan worden verwezen naar 3.3.1.b. Alleen moet nog worden gewezen op het gevaar van afzettingen op de drempel met het oog op de beweegbare onderdelen zoals het afsluitmiddel. Is er veel sedimenttransport of komen er stenen e.d. voor, dan zal men een profielvernauwing toepassen. Deze moet zodanig zijn dat de stroomsnelheid zo groot wordt, dat een afzetting in de stuw wordt voorkomen.

e. energiebenutting

De energie van het water wordt door de opstuwing geconcentreerd in een plaatselijk verval, waardoor de turbines van de waterkrachtcentrale worden aangedreven. Het arbeidsvermogen van de turbines wordt bepaald door het produkt van de waterafvoer en het verval, Q x H. Een waterkrachtcentrale is dus gebaat bij een constant debiet en een zo groot mogelijk verval; een combinatie derhalve van afvoerregulering en waterstandsregulering. De scheepvaart is echter juist gebaat bij een klein verval. Om te functioneren heeft de centrale een bepaald debiet nodig. Bij zeer lage afvoeren moet met behulp van de stuwmiddelen overal in het stuwpand een minimale waterdiepte in stand worden gehouden. Het is dan lang niet altijd mogelijk om een voldoende debiet uit het stuwpand af te tappen en de centrale zal moeten worden stilgelegd.
Bovendien is een bepaald minimaal verval nodig om de turbines te laten draaien. Wordt de afvoer zodanig dat een kleiner verval over het stuwmiddel wordt bereikt, dan zullen de centrales moeten worden stopgezet (zie fig. 3.g.).
Tenslotte kunnen de turbines ook maar een maximum debiet verwerken.
Men kan zich het al of niet in bedrijf zijn van de centrales dan als volgt voorstellen:

$Q <$ minimaal benodigd debiet	: centrale ligt stil
min. debiet $< Q <$ max. verwerkbaar debiet	: alle afvoer gaat door de centrale
max. debiet $< Q <$ Q bij min. benodigd verval	: er gaat een debiet van Q_{max} door de centrale en de rest gaat door de stuw
$Q >$ Q bij min. benodigd verval	: centrale werkt niet meer. De totale afvoer gaat door de stuw

Men zal tot winning van waterkracht overgaan als het geschetste beeld een rendabele bedrijfsvoering oplevert en de centrale niet te lang stil ligt.
Voor de regeling van de afvoer zal men bijzondere aandacht dienen te besteden aan de situaties dat de centrale moet worden uitgeschakeld en ineens een debiet Q_{max} extra door het stuwmiddel moet worden doorgelaten.

3.3.2. Oplossingsprincipes

Zoals in 3.3.1. is aangetoond, is er een aantal functies waaraan het stuwmiddel moet voldoen. Dat kan nooit in één kunstwerk worden verenigd, zodat in een stuwcomplex in een scheepvaartweg een aantal aparte kunstwerken moet worden ondergebracht. Zonder hier nader op in te gaan kunnen worden genoemd:

a. het eigenlijke stuwmiddel
b. één of meer schutsluizen
c. een waterkrachtcentrale
d. vistrappen
e. aansluitingswerken zoals geleidewerken naar de schutsluizen, toeleidingskanalen, oeververdedigingen, vluchthavens etc.

De onderlinge situering van deze kunstwerken moet zodanig zijn, dat zowel de afvoer van het rivierwater en van het ijs als de doorvaart van de schepen zo ongestoord en gemakkelijk mogelijk kan plaatsvinden. Daarbij moet men niet alleen denken aan de ongestuwde toestand, maar ook aan de perioden als het stuwmiddel gesloten is. De daaruit voortvloeiende eisen zullen hier niet worden behandeld, daarvoor wordt verwezen naar het college Verkeerswaterbouwkunde.
In dit hoofdstuk wordt alleen het eigenlijke stuwmiddel besproken, dus het kunstwerk dat is voorzien van één of meer regelbare openingen. Bij meerdere openingen kan er sprake zijn van één of twee tamelijk brede openingen voor de scheepvaart (en de waterafvoer) en van één of meerdere openingen uitsluitend bestemd voor de waterafvoer en dan met name voor de fijnregeling van de waterstand.
De voornaamste functionele onderdelen van een stuwmiddel zijn:

a. het afsluitmiddel om het water te kunnen keren en opstuwen.
b. de landhoofden en evt. pijlers bij meerdere openingen die dienen om de krachten uitgeoefend op het afsluitmiddel af te voeren naar de ondergrond.
c. de drempel die dient om de stroming onder het afsluitmiddel door of over het afsluitmiddel heen niet gevaarlijk te laten worden voor de stabiliteit van het stuwmiddel. (zie fig. 3.j.)

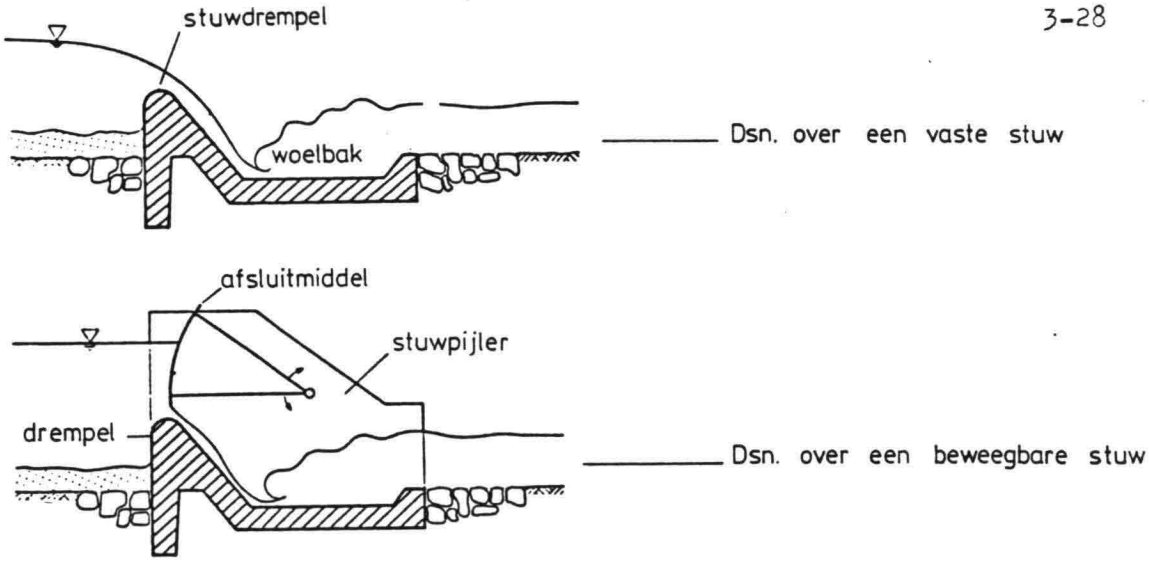


fig. 3.j.

Daarnaast zijn meestal aanwezig:
een bodembescherming
geleidewerken voor de stroming
beschermingsmiddelen tegen aanvaring
etc.
De afsluitmiddelen worden gerekend tot de bovenbouw van de stuw, terwijl de landhoofden, pijlers en drempel de onderbouw vormen. Omdat de laatste de omgrenzing van het afsluitmiddel vormen en daarvoor een zekere stijfheid moeten bezitten, wordt de onderbouw vaak als één constructie opgevat en uitgevoerd (uiteraard voorzien van de nodige dilatatievoegen).
Alvorens de bovenbouw wat uitvoeriger te behandelen zal eerst kort op de onderbouw worden ingegaan.

De belangrijkste functies van de onderbouw zijn:
a. de krachtsoverdracht van de op de bovenbouw werkende belastingen naar de ondergrond
b. de verhindering van schadelijke gevolgen van de stroming onder het kunstwerk door (grondwaterstroming)
c. de bescherming van de stabiliteit van het kunstwerk tegen de stroming van het af te voeren water.

a. krachtsoverdracht
Het gaat hierbij vooral om de krachten door het water op de afsluitmiddelen en ook op de onderbouw zelf uitgeoefend. Daarnaast zijn het eigen gewicht van de afsluitmiddelen en het eigen gewicht van de onderbouw

van belang. Denk daarbij aan de opwaartse waterdruk.
Eventueel kan bij afsluitmiddelen die in geopende toestand hoog boven water uitkomen de windbelasting een rol spelen.

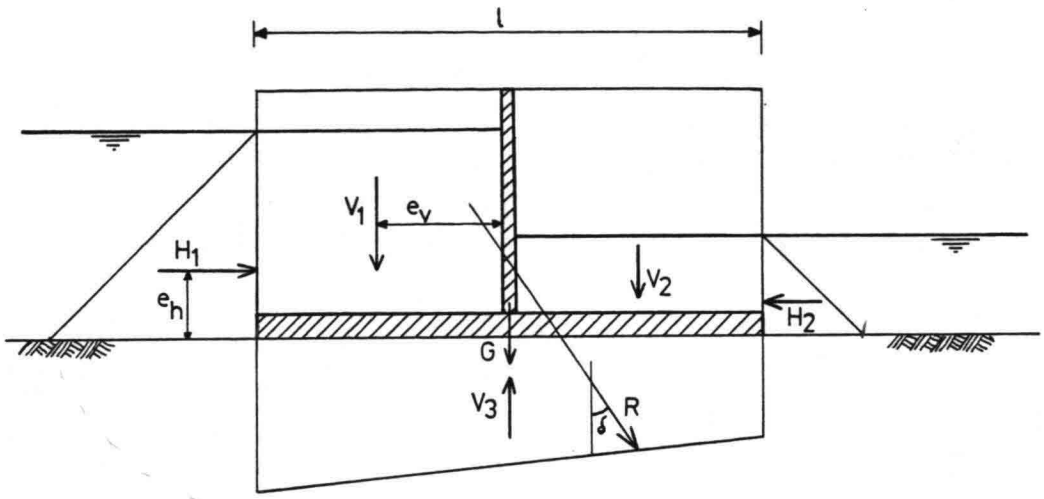


fig. 3.k.

In fig. 3.k. is:

H_1 - de horizontale waterdruk van het water in het bovenpand op het afsluitmiddel en de onderbouw

H_2 - de horizontale waterdruk van het water in het benedenpand op het afsluitmiddel en de onderbouw

V_1 - de vertikale waterdruk op de drempel aan de bovenstroomse kant

V_2 - de verticale waterdruk op de drempel aan de benedenstroomse kant

V_3 - de opwaartse waterdruk onder tegen de drempel

G - het eigen gewicht van het afsluitmiddel en van de onderbouw

R - de resultante van de genoemde horizontale en vertikale krachten.

De volgende criteria zijn nu van belang:

1. het kunstwerk mag niet <u>afschuiven</u>

De wrijving W tussen het kunstwerk en de ondergrond moet groter zijn dan de som van de horizontale krachten H ($= H_1 - H_2$). De wrijving wordt bepaald door het produkt van de wrijvingscoëfficiënt f en de som van de vertikale krachten V ($= G + V_1 + V_2 - V_3$)

$$H < W = f \cdot V$$

$$\frac{H}{V} < f = tg\,\varphi$$

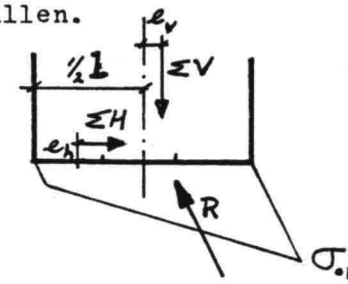
Dit betekent dat de hoek δ die de resultante R met de vertikaal maakt

kleiner moet zijn dan de wrijvingshoek tussen de onderbouw en de ondergrond, dus kleiner dan de inwendige wrijvingshoek van de ondergrond.

2. het kunstwerk mag niet kantelen
Dit houdt in dat de resultante R in ieder geval de onderbouw moet doorsnijden.

3. de toelaatbare korrelspanning mag niet worden overschreden. Uit de grondmechanica is bekend dat een gunstige vorm voor de korreldrukverdeling in de grond wordt verkregen door de resultante van de krachten binnen de kern van de funderingsgrondslag te laten vallen.
In formulevorm:

$$\sigma_{optr.} = \frac{\Sigma V}{b\ l} + \frac{\Sigma V \cdot e_v}{1/6\ b\ l^2} + \frac{\Sigma H \cdot e_h}{1/6\ b\ l^2} \leqslant \bar{\sigma}_{max}$$



Zou de optredende korrelspanning te groot worden dan kan men overwegen de lengte van de onderbouw te vergroten. b is de meewerkende breedte van het stuwlichaam. Overigens moet men bedenken dat bij deze beschouwingen is uitgegaan van een fundering op staal, terwijl ook een fundering op palen in aanmerking kan komen.

b. grondwaterstroming
Door het verschil in waterstand aan beide zijden van de stuw in gesloten stand zal er een grondwaterstroming ontstaan onder en achter het kunstwerk. Daardoor bestaat het gevaar dat bij het uittreden aan de benedenstroomse zijde van de stuw gronddeeltjes kunnen worden uitgespoeld.
Men spreekt dan van onder-, resp. achterloopsheid. De stabiliteit van de stuw kan in dat geval verloren gaan. Een methode om de onderloopsheid tegen te gaan is het aanbrengen van damwandschermen (zie ook collegedictaat f1).
Waar moet dit damwandscherm in geval van onderloopsheidgevaar worden aangebracht?
Aangenomen wordt dat de toelaatbare korrelspanning nergens de kans loopt te worden overschreden, zodat op staal gefundeerd kan worden. Stabiliteitsverlies kan dan optreden door afschuiving (criterium a). Uitgaande van een gegeven verval kan de situatie worden verbeterd door

ΣV zo groot mogelijk te maken. Dit kan bv. worden gerealiseerd door de opwaartse kracht zo klein mogelijk te maken, dus door het damwandscherm aan de bovenstroomse zijde van de onderbouw aan te brengen (zie fig. 3.1.).

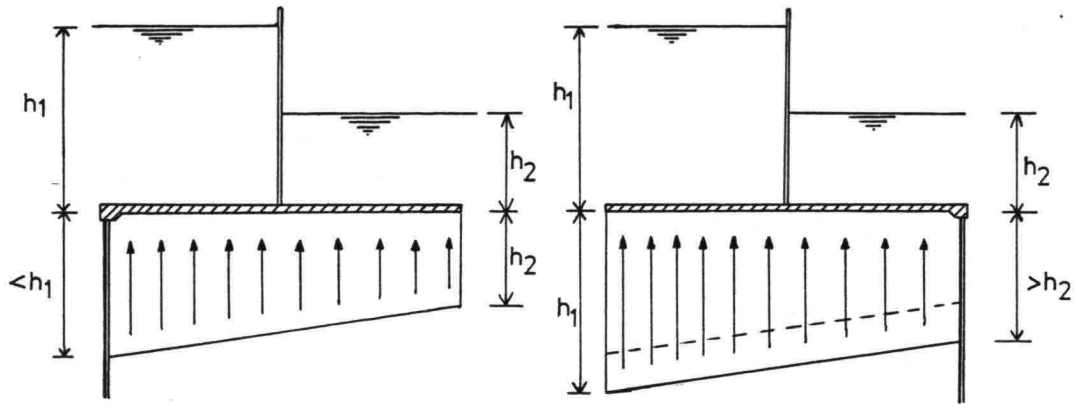


fig. 3.1.

In het algemeen wordt ook aan de benedenstroomse zijde van de stuw een kort damwandscherm geplaatst om de kans op uitspoelingsgaten onder het kunstwerk te verhinderen.
Een andere manier om ΣV te vergroten is het afsluitmiddel zoveel mogelijk naar de benedenstroomse zijde van de stuw te verplaatsen zodat de vertikale neerwaartse waterdruk zo groot mogelijk wordt.

c. bescherming tegen doorstromend water

Het bovenstroomse water bezit een aanzienlijke potentiële energie in vergelijking met het benedenstroomse water. Bij een afvoer door de stuw zal een gedeelte van die energie moeten worden omgezet in kinetische energie. Dit betekent dat de bodem en de oevers van de rivier direkt benedenstrooms van het stuwmiddel worden aangevallen. Als het verval groot is, zal er zelfs schietend water kunnen optreden. De overgang hiervan naar stromend water geschiedt in het algemeen onder energieverlies met een watersprong. Door deze watersprong zo dicht mogelijk bij het afsluitmiddel te laten plaatsvinden, wordt de optredende ontgronding beneden de stuw zoveel mogelijk beperkt.
Door een goede spreiding van de stroomrichting, bv. omhoog door aan het eind van de drempel een opstaande rand te maken, dus vorming van een woelbak (zie fig. 3.j.) of in zijdelingse richting (zie vizierstuw), kan achter de stuw met een open verdediging in de vorm van een filter worden volstaan.

Oplossingsprincipes voor de bovenbouw

De functies die het afsluitmiddel moet vervullen luiden kort samengevat:

1. waterkering, waarmee zowel de opname van de waterdrukken als de waterafdichting wordt bedoeld
2. beweegbaarheid
3. regeling van waterdoorlaat

Doordat aan verschillende functies moet worden voldaan, is het niet gemakkelijk om voor het vinden van oplossingsprincipes een ontwerpboom te gebruiken. Daarom wordt hier als hulpmiddel uitgegaan van een morfologische kaart. De verschillende aspecten van het ontwerp worden ieder voor zich bekeken en er worden mogelijke oplossingen voor aangedragen. Deze worden voor alle aspecten in kaart gebracht en alle mogelijke combinaties van oplossingen van die verschillende aspecten leveren de oplossingsprincipes voor het afsluitmiddel.
Als voorbeeld wordt hierna uitgegaan van een vijftal deelontwerpbomen die zijn gebaseerd op de functies van het afsluitmiddel. Uiteraard is dit maar een voorbeeld en kan ieder op zijn eigen wijze dit probleem benaderen.
Bij de krachtsoverdracht (het voornaamste facet van de waterkering) kan men kijken naar de volgende factoren:

- waar worden de krachten naar afgevoerd, dus bv. naar onder of naar boven of naar de zijkanten. Daarbij kan men eventueel nog weer onderscheid maken naar lijnoplegging of puntoplegging. Verder zijn natuurlijk allerlei combinaties mogelijk.
- de aard van het afsluitelement. Hiermee wordt bedoeld of men uitgaat van een vormvaste of van een vervormbare (bv. opblaasbare) constructie. Daarnaast is een soort tussenvorm mogelijk door de constructie te beschouwen als een samenstel van verschillende vormvaste elementen die onderling beweegbaar met elkaar zijn verbonden bv. door scharnieren.

Bij de beweegbaarheid kan men onderscheid maken naar:

- de bewegingsrichting. Hier wordt gekeken naar de mogelijkheid van bewegen van het afsluitmiddel in de zin van translatie, rotatie of een combinatie hiervan. Als de x-as in de stroomrichting wordt gekozen, dan zijn o.a. de volgende bewegingsrichtingen mogelijk:
  translatie in y-richting en in z-richting
  rotatie om x-as, y-as en z-as

rotatie om z-as + translatie in xy-richting

etc.

Verder zou men nog kunnen splitsen in een rotatie in het keervlak of een rotatie buiten het keervlak.

De bewegingsinrichting erbij betrekken lijkt in dit geval prematuur.

- het <u>aantal elementen</u>. Nauw verbonden met het voorgaande is de overweging de doorstroomopening af te sluiten met:

  één element

  meerdere elementen in y-richting

  meerdere elementen in z-richting

Tenslotte zou men de regeling van de waterdoorlaat kunnen splitsen met behulp van de vraag: <u>waar</u>?

Men zou dan kunnen onderscheiden:

boven het afsluitelement (bovenafvoer)

onder het element (onderafvoer)

openingen naast het element, bv. in pijler

combinaties als zowel onder- en bovenafvoer

etc.

Al deze mogelijkheden kan men rangschikken in een morfologische kaart.

	ASPECT	OPLOSSINGSPRINCIPE						
A	krachtsoverdracht waar?	1 onder	2 boven	3 zijkant	4 voor	5 achter	6 combinatie	
B	aard van het afsluitelement	1 vormvast	2 vervormbaar	3 samenstel				
C	bewegingsrichting	1 translatie in y-rg	2 translatie in z-rg	3 rotatie om x-as	4 rotatie om y-as	5 rotatie om z-as	6 combinatie	
D	aantal elementen	1 één	2 meerdere in x-rg	3 meerdere in y-rg	4 meerdere in z-rg			
E	doorlaatopening waar?	1 onder	2 boven	3 in/door	4 naast	5 combinatie		

Door uit elke rij een mogelijkheid te kiezen en die te combineren kunnen enkele duizenden oplossingen worden gevormd. Daarbij moet wel worden bedacht dat niet alle combinaties een zinvolle oplossing geven omdat de verschillende oplossingsaspecten met elkaar in tegenspraak kunnen zijn.

Om niet alle combinaties te hoeven uitwerken is het eerst geboden aan de hand van een aantal toetsingscriteria na te gaan, welke oplossingen in een bepaald geval met concrete randvoorwaarden in aanmerking komen. In de volgende paragraaf zullen enkele mogelijke toetsingscriteria worden genoemd en in een algemene beschouwing worden besproken. Tenslotte zullen dan in de daaropvolgende paragraaf voorbeelden worden gegeven van de meest voorkomende stuwtypen.

3.3.3. keuzebepaling van het type afsluitmiddel

De keuze van het meest geschikte afsluitmiddel is afhankelijk van een aantal kriteria. De voornaamste hiervan worden kort toegelicht.

a. kosten

De totale kosten van de verschillende mogelijke oplossingen moeten met elkaar worden vergeleken. Daaronder vallen niet alleen de aanlegkosten, maar ook de exploitatie- en de onderhoudskosten. Speciaal de beweegbare delen zullen aan slijtage onderhevig zijn en bewegingsinrichtingen en bediening ervan noodzakelijk maken. Het ligt dus voor de hand te proberen een zo eenvoudig mogelijke, vooral bedrijfszekere beweging van het afsluitmiddel te kiezen. Voor het onderhoud zal een afsluitmiddel dat in geopende stand gemakkelijk bereikbaar boven water komt, de voorkeur verdienen.

b. scheepvaarteisen

Deze zijn uitvoerig behandeld onder 3.3.1.c. Het komt erop neer dat een bepaald profiel van vrije ruimte voor de scheepvaart beschikbaar is en dat de stroomsnelheid door de stuw binnen aanvaardbare grenzen blijft.

c. opening en sluiting

In het algemeen zal de snelheid waarmee het afsluitmiddel open en dicht moet kunnen gaan en daarmee ook de duur van dit proces geen rol spelen bij de keuzebepaling. Wat wel belangrijk is, is de situatie bij het openen en sluiten. Zo zal het sluiten in stromend water geschieden. Bij het openen moet men ervan uitgaan, dat er nog een verval aanwezig kan zijn. Lang niet alle typen afsluitmiddelen kunnen in deze situaties goed functioneren.

d. grootte van het verval

Het is duidelijk dat de grootte van het verval de krachtsoverdracht beinvloed en daarmee de keuze van het afsluitmiddel.

e. grootte van de afvoer

De eisen die een goede waterafvoer stelt zijn uitvoerig aan de orde gekomen onder 3.3.1.b. De grootte van het benodigde doorstromingsprofiel, vooral bij zeer hoge afvoeren, en de toelaatbare stroomsnelheid zijn het belangrijkste.

Het toepassen van een aparte scheepvaartopening naast een aantal kleinere openingen voor de waterafvoer heeft als voordelen de mogelijkheid van een fijnregeling van de afvoer en de mogelijkheid telkens één opening te blok-

keren voor onderhoud. Ook de weigering van een bewegingsmechanisme heeft minder consequenties, vooropgesteld dat bij het ontwerp van de bodemverdediging rekening is gehouden met deze situatie. Een nadeel is echter dat de uniformiteit van de afsluitmiddelen wordt doorbroken, hetgeen bezwaren kan hebben bij vervanging en voor het onderhoud.
Wat betreft de kosten kan worden gesteld dat bij een kleine afstand tussen de pijlers de onderbouw relatief duur wordt en de bovenbouw relatief goedkoop, terwijl dit bij een grote afstand tussen de pijlers juist andersom ligt. Het is zeer goed mogelijk de optimale oplossing vast te stellen (gesommeerde kosten minimaal), doch vaak zullen scheepvaarteisen e.d. de breedten van de openingen bepalen.

In principe kan elke opening op twee manieren worden afgesloten:
a. door een aantal kleine elementen
b. door één groot element.
De eerste groep heeft het voordeel dat de kosten per strekkende meter opening onafhankelijk zijn van de totaal breedte. In tegenstelling met de tweede groep, indien tenminste in horizontale richting wordt overspannen, nemen de kosten dus niet progressief toe met een groter wordende openingswijdte. Daar staat echter een aantal duidelijke nadelen tegenover, zoals:
- tijdrovende openings- en sluitingsprocedure
- moeilijke inspectie en lastig onderhoud omdat de elementen of delen ervan zich in geopende stand meestal onder water bevinden
- kwetsbaar voor aanvaring door schepen of voor stoten door ijsschotsen
- grotere lekkage tussen de verschillende elementen
- kwetsbaar bij eventuele sedimentafzettingen in de geopende stand.

f. <u>sedimenttransport</u>
Vooral als de perioden waarin de stuw gesloten is langdurig zijn en er sprake is van veel sediment in de rivier, zullen de afzettingen bovenstroom van de stuw last kunnen veroorzaken voor met name de bewegende onderdelen, zoals het afsluitmiddel. Men kan in dat geval de regeling van de rivierwaterafvoer het best laten plaatsvinden door een <u>onderafvoer</u> bij het afsluitmiddel, zodat het bezonken sediment wordt weggevoerd door de stroming.

g. <u>transport van drijvend materiaal</u> als ijs en drijvend vuil.
Om te voorkomen dat bij de gesloten stand van de stuw het drijvend materiaal zich ophoopt aan de bovenstroomse zijde van de stuw, kan men voor het

doorlaten van het overtollige water gebruik maken van een bovenafvoer bij het afsluitmiddel. Er zijn dan geen aparte voorzieningen nodig voor het verwijderen van het drijvend vuil.

h. regeling van het bovenpeil

Onder f. en g. is de voorkeur uitgesproken voor in het ene geval onderafvoer en in het andere geval bovenafvoer. Er zal nu worden gekeken naar welke oplossing de voorkeur uitgaat bij de regeling van het bovenpeil en bij die van de waterafvoer.

1. bovenafvoer

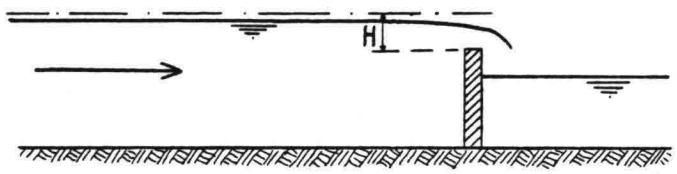


fig. 3.m. Volkomen overlaat

Bij een volkomen overlaat luidt de formule voor de afvoer Q (zie fig. 3.m.)

$$Q = m \cdot B \cdot 2/3\, H \sqrt{2\, g \cdot 1/3\, H}$$

of $Q = 1{,}7 \cdot m \cdot B \cdot H^{3/2}$

waarin m = afvoercoëfficiënt
B = de breedte van de stuw
H = de energiehoogte boven het afsluitmiddel.

$$Q :: H^{3/2}$$

Is er b.v. een variatie in de grootte van de afvoer van 10%, dan zal de variatie in de waterstand bovenstrooms van de stuw ca. 6% bedragen.

2. onderafvoer

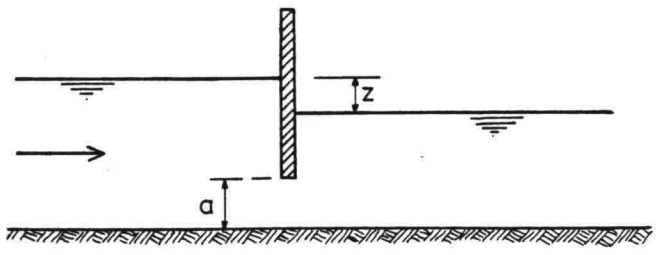


fig. 3.n.

Bij een onderafvoer met een vaste openingshoogte a luidt de formule voor de afvoer Q (zie fig. 3.n.):

$$Q = m \cdot B \cdot a \cdot \sqrt{2 g z}$$

waarin z het verval over het afsluitmiddel is.

$$Q :: z^{\frac{1}{2}}$$

Is hier eveneens een variatie in de grootte van de afvoer van 10%, dan zal in dit geval de variatie in het verval ca. 20% zijn. Daar komt nog bij dat bij een grotere Q de waterstand ook hoger wordt, zodat men kan zeggen dat de waterstand bovenstrooms van de stuw met meer dan 20% zal variëren. De conclusie kan zijn, dat bij een bepaalde verandering in de grootte van de afvoer de minste variatie in waterstand optreedt bij een bovenafvoer. Dit houdt in dat men de kleppen veel minder hoeft bij te stellen.

Aan de andere kant kan men stellen dat in het geval van onderafvoer, bij schommelingen in de waterstand de waterafvoer het minst verandert. Als het erom gaat de waterafvoer te beheersen, dan kan men het beste voor onderafvoer kiezen. Men hoeft dan niet vaak met schuiven te manipuleren.

Verder valt nog op te merken dat bij bovenafvoer tenminste bij een volkomen overlaat, de benedenwaterstand geen invloed heeft op het stuwpeil. Zo kunnen bij de aanwezigheid van getijinvloeden aan de benedenstroomse zijde van de stuw bij een onderafvoer bovenstrooms van de stuw waterstandsveranderingen doordringen.

Een ander belangrijk punt dat de beslissing van boven- of onderafvoer kan beïnvloeden, ligt in de constructie van de afsluitmiddelen. Om de waterstand bovenstrooms dezelfde te laten blijven, zal bij groter wordende afvoer het regelbare deel van het afsluitmiddel moeten zakken. Dit houdt in dat er permanent een bewegend deel van het afsluitmiddel onder water zit. Dit zou bezwaren kunnen geven door roesten of doordat er vuil (zand) in de constructie kan gaan zitten.

Kort samengevat:

voor peilbeheersing	- beste oplossing bovenafvoer
voor afvoerregulering	- beste oplossing onderafvoer
voor sedimenttransport	- beste oplossing onderafvoer
voor afvoer drijvend materiaal	- beste oplossing bovenafvoer

3.3.4. Voorbeelden van voorkomende stuwtypen

Er zal een hoofdindeling worden gemaakt naar:

I. afsluitmiddelen waarbij de belastingen door het water veroorzaakt rechtstreeks naar de drempel worden afgevoerd

II. afsluitmiddelen die de belasting door het water erop uitgeoefend naar de pijlers en de landhoofden overdragen.

I.a. klepstuw (fig. 3.0.)
uit de morfologische kaart de combinatie A1, B1, C4, D1, E2.

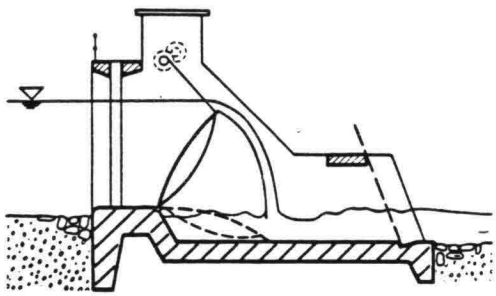


fig. 3.0. a

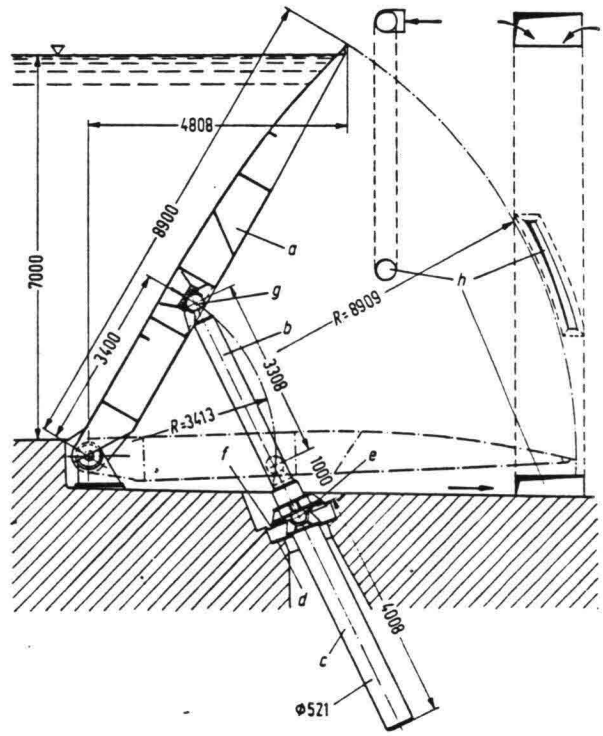


fig. 3.0. b

De constructie bestaat uit een wringstijve klep - vaak in doorsneevorm als een visbuik - die met scharnieren aan de drempel is verbonden. De klep kan worden bewogen met behulp van trekkabels en lieren (fig. 3.0. a) of door middel van duwpersen (fig. 3.0. b).
Het is een eenvoudige constructie, die wel als nadeel heeft, dat zij zich grotendeels onder water bevindt. Dit is een bezwaar voor onderhoudswerkzaamheden, vooral voor de aan slijtage onderhevige draaipunten.
De te keren hoogte van de klepstuw is beperkt, omdat het benodigde moment om de klep te laten bewegen evenredig is met de derde macht van de waterhoogte boven de stuwdrempel aan de bovenstroomse zijde, althans indien de benedenwaterstand onder deze drempel ligt (zie fig. 3.0. a).

Om het bewegingsmechanisme te ontlasten wordt veelal gebruik gemaakt van contragewichten. Ook kan men een tegenwerkend moment laten ontstaan met behulp van het bovenstroomse water. Deze laatste oplossing is o.a. toegepast bij stuwen in de Marne (zie fig. 3.0. c).

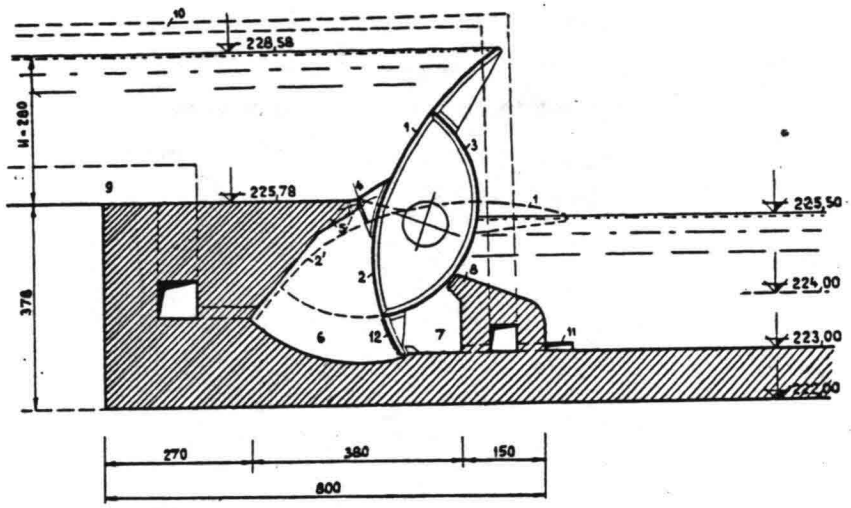


fig. 3.0. c

Een andere mogelijkheid is de doorstroomopening af te sluiten met een aantal kleine elementen. In de morfologische kaart A1, B1, C4, D3, E2.
Dit betekent, dat de af te sluiten breedte vrijwel onbeperkt is, waardoor deze methode veel is toegepast voor het afsluiten van de (brede) scheepvaartopeningen in stuwcomplexen. De meest toegepaste vorm is de Chanoine-Pascaud stuwklep (zie fig. 3.0. d).

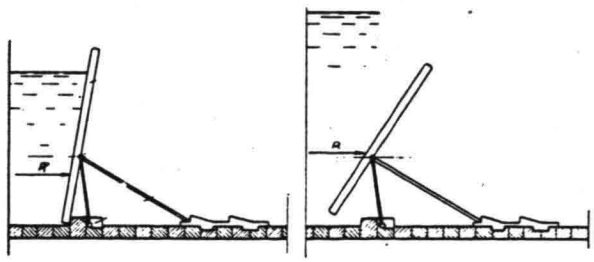


fig. 3.0. d

In de oorspronkelijke, nu niet meer gebruikte, vorm was het eigenlijke stuwlichaam (klep) scharnierend aan de bodem verbonden. In de modernere uitvoering is de klep door middel van een scharnier even onder het midden van de klephoogte aan een stangenstelsel (juk) bevestigd. Stijgt de bovenstroomse waterstand, dan schuift de resultante van de waterdruk omhoog totdat zij zich boven het klepscharnier bevindt. De klep gaat daardoor automatisch horizontaal liggen en zakt naar de drempel. Daalt later de waterspiegel weer, dan kan de klep niet uit zichzelf omhoog komen, maar zal vanaf een schip of een hulpbrug moeten worden opgetrokken.
Dit soort stuwen vindt men vooral in Frankrijk (Seine). In Rusland is met deze kleppenstuw een breedte van 80 m overspannen waarbij 40 elementen, elk 2 m breed, werden toegepast.

Een aantal nadelen van de Chanoine-klepstuw kunnen worden omzeild door over te gaan op de
I.b. dakstuw (fig. 3.p.)
zie morfologische kaart A6 (1-5), B3, C4, D2, E2.
In zijn eenvoudigste vorm bestaat de dakstuw uit een korte en een langere stuwklep. De kleppen zijn scharnierend verbonden met de drempel en vormen tezamen een driehoek (fig. 3.p. a).

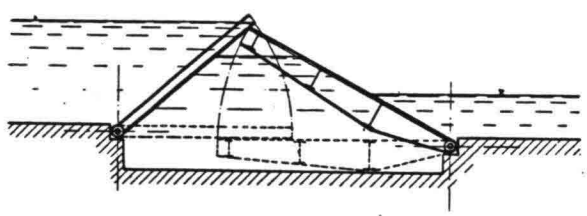


fig. 3.p. a

Door via riolen (in de pijlers, landhoofden of in de drempel) water te brengen naar of te onttrekken aan de driehoekige ruimte kan de stuw omhoog of omlaag worden bewogen.

Een verbeterde versie van de dakstuw is aangegeven in fig. 3.p. b.

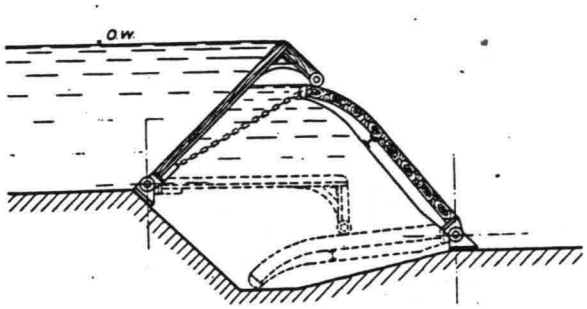


fig. 3.p. b

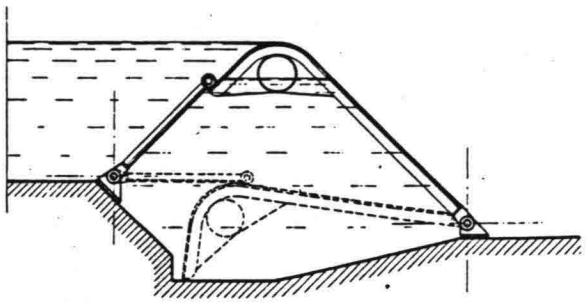


fig. 3.p. c

De stuwklep is aan de bovenzijde onder een rechte hoek in de stroomrichting afgebogen en rust met rollen op de steunklep, zodat de wrijving tussen de twee kleppen bij de beweging ervan sterk wordt verminderd.
De plaats van de voeg tussen de kleppen, namelijk aan de benedenstroomse zijde, heeft enige bezwaren. Zo zal de stuw naar beneden zakken indien er lekkage door de voeg optreedt. Bovendien is er gevaar voor ijsvorming of sedimentafzetting ter plaatse van de rollen. Daarom wordt tegenwoordig de voeg aan de bovenstroomse zijde van de stuw ontworpen (zie fig. 3.p. c).

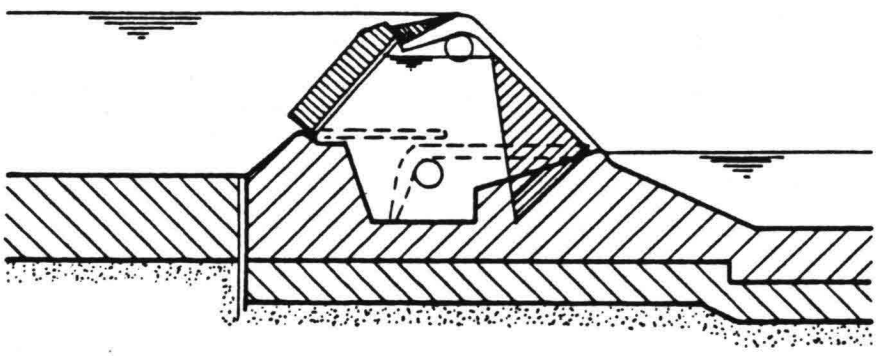


fig. 3.p. c

De dakstuw wordt vooral in Duitsland, Oostenrijk en Zwitserland toegepast. Meestal wordt de dakstuw niet gebruikt voor vervallen groter dan 7 m,

daar anders de kosten van de kleppen in de bodeminkassing te hoog zouden worden. De grootste toegepaste breedte ligt in de orde van 40 m.
Een probleem bij de dakstuw is de waterdichting t.p.v. de aansluiting van de kleppen aan de landhoofden en pijlers.

Een logisch vervolg op de dakstuw is de sectorstuw.

I.c. sectorstuw (fig. 3.q.)
Hierbij zijn de stuwklep en de steunklep door vakwerkliggers verbonden tot één stuwlichaam. Zie morfologische kaart A6 (1-5), B1, C4, D1, E2.

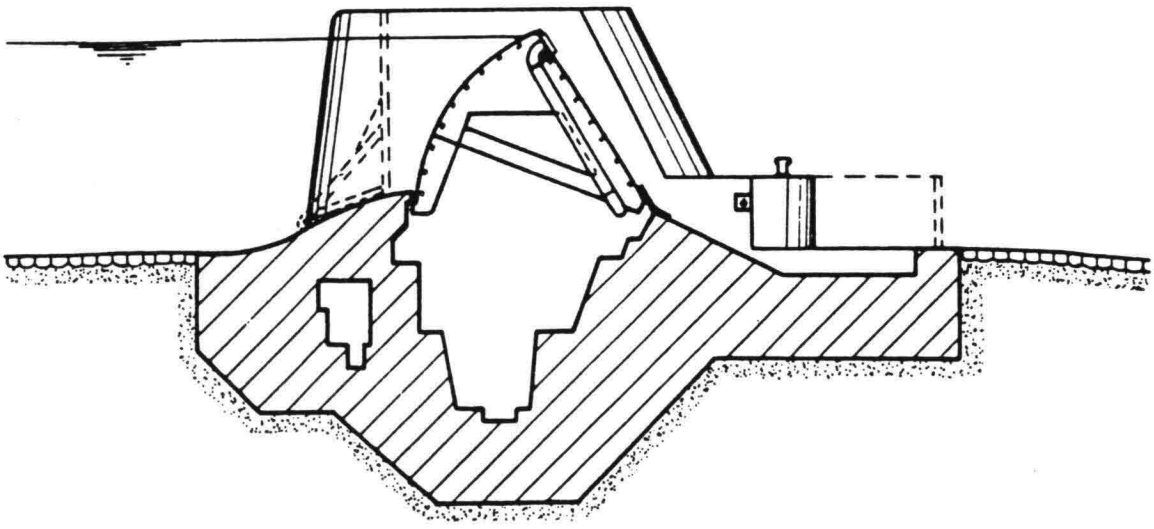


fig. 3.q

Het stuwlichaam is door middel van scharnieren aan de benedenstroomse zijde verbonden met de drempel. De sectorstuw wordt - evenals de dakstuw - bewogen door water via riolen (in de pijlers en drempel) te brengen naar of te onttrekken aan de ruimte onder het stuwlichaam.
Een nadeel van de sectorstuw is de omvangrijke inkassing in de drempel en de kans op sedimentafzetting in de diepe kas.
Een voordeel is dat de constructie zeer goed in het landschap ingepast kan worden. Zij is onder meer daarom toegepast bij de kanalisatie van de Moezel in Duitsland.

II. Bij de groep afsluitmiddelen die de belastingen door het water veroorzaakt naar de zijkanten afvoeren is de eenvoudigste:

II.a. schotbalkstuw

Zie morfologische kaart A3, B1, C2, D4, E2.

De stuwelementen worden gevormd door een aantal op elkaar gestapelde houten balken of, bij grotere overspanningen, stalen liggers. De elementen kunnen met behulp van een lierwerk worden geplaatst. Bij grotere waterkerende hoogten en bij bredere afsluitopeningen worden de elementen te zwaar om te hanteren. De schotbalkstuw vindt men in Nederland en elders in Europa vooral bij genormaliseerde beken.

Een nadeel is dat de regeling van de waterstand in trappen moet plaatsvinden.

Een logisch vervolg op de schotbalkstuw is het combineren van de liggers tot één plaat. Men krijgt dan een:

II.b. schuivenstuw (zie fig. 3.r.)

Zie morfologische kaart A3, B1, C2, D1, E2.

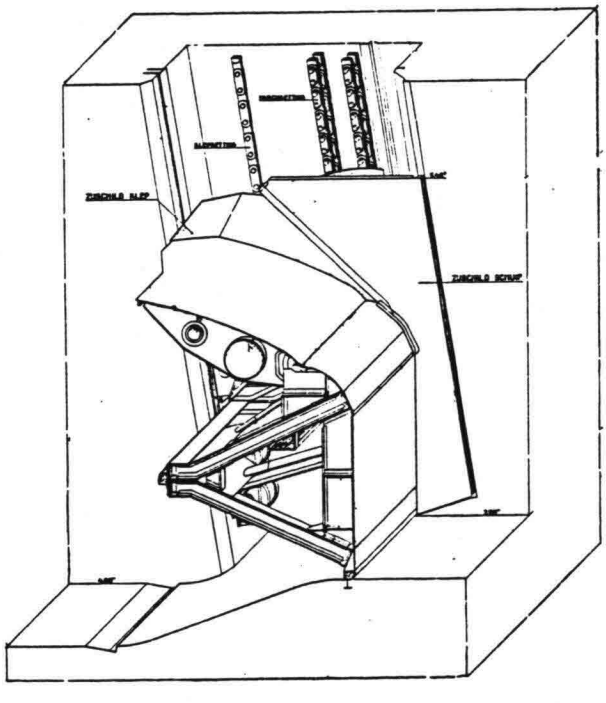


fig. 3.r.

Vooral bij grotere overspanningen kunnen de krachten door het water op het stuwlichaam uitgeoefend erg groot worden, zeker indien de schuif ook moet worden bewogen onder een verval of in stromend water.

Het gevolg daarvan is dat grote wrijvingskrachten bij de zijaanslagen optreden. In het algemeen zullen daarom de schuiven met wielstellen worden uitgerust. Om de hefkracht vooral bij het begin van beweging, als de wrijving het grootst is, te verminderen, wordt de rolbaan wel onder een helling aangebracht (zie fig. 3.r.). De constructie wordt daardoor wel ingewikkelder en dus duurder.

De wielschuif bestaat uit een stijf frame op wielen, waarop een waterkerend vlak in de vorm van een plaat is aangebracht. Om de waterstand te regelen zou men de schuif kunnen laten zakken in de stuwdrempel (indien bovenafvoer gewenst is), maar dan moet er geen of weinig sedimenttransport in de rivier optreden. Indien dit wel het geval is kan men bovenop de schuif een beweegbare klep aanbrengen, waarmee het waterpeil en de evt. ijsafvoer geregeld kunnen worden (zie fig. 3.r.).

Een voorbeeld van dit stuwtype is in Nederland te vinden bij de Maaskanalisatie o.a. bij de stuw bij Lith. Ook worden wel dubbele schuiven toegepast zoals bij de stuw van Sambeek. Zie fig. J1 op pag. 4.12.

Een andere manier om de belastingen naar de zijkanten af te voeren vindt men bij

II.c. segmentstuw (zie fig. 3.s.)

Uit de morfologische kaart A6 (3-5), B1, C4, D1, E5 (1-2).

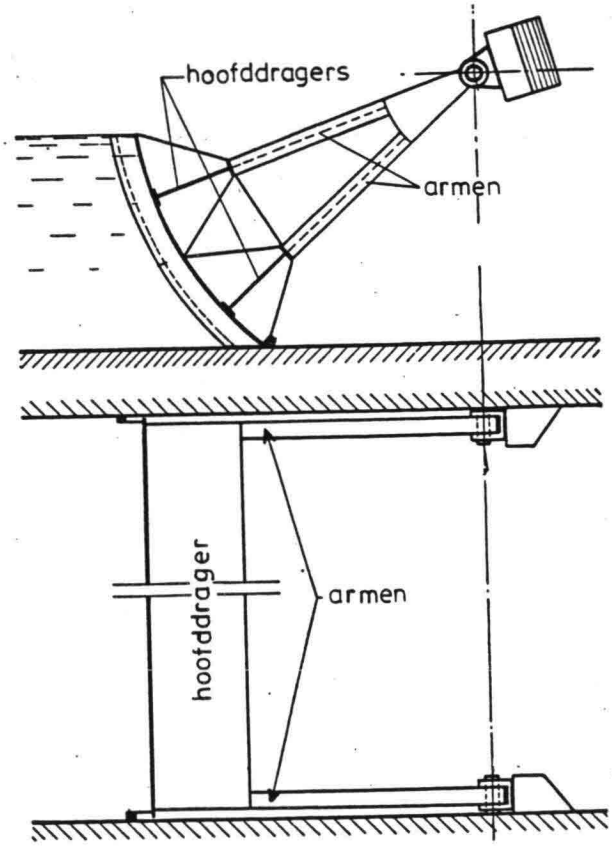


fig. 3.s. a

Een segmentstuw heeft een gebogen keervlak in de vorm van een cirkelsegment, ondersteund door een verstijvingsframe dat de waterdrukken via twee oplegarmen aan de zijkanten naar de scharnieren overbrengt. De resultante van de waterdruk gaat dus altijd door deze scharnieren heen. In geval van scheepvaart moeten de scharnieren en de armen in de pijlers en landhoofden zitten opgeborgen.
De segmentstuw kan, evenals de klepstuw, op een aantal manieren worden bewogen, bv. met een lierwerk of een hydraulische duwpers. De benodigde bewegingsenergie kan worden verminderd door contragewichten. Omdat de resultante van de waterdruk door het scharnier gaat, hoeft men alleen maar de tapwrijving te overwinnen en zijn ook geen wielstellen noodzakelijk. Meestal blijft de toepassing beperkt tot breedten van maximaal ca. 50 m.
Het draaipunt (scharnier) van de segmentstuw kan zowel aan de benedenstroomse als aan de bovenstroomse zijde van de stuw worden aangebracht. Met het oog op de stabiliteit van de pijlers is het gunstig indien de resultante zo laag mogelijk aangrijpt en zoveel mogelijk neerwaarts is gericht. Bovendien zal men in verband met het onderhoud van het draaipunt en de kans op vervuiling daarvan wensen dat het scharnier zich boven water bevindt. Alleen bij grote rivierafvoeren zal niet aan deze eis kunnen worden voldaan. Eén en ander houdt in dat men de draaipunten vaak aan de benedenstroomse zijde van de stuw aanbrengt.
In wezen kan men bij de segmentstuw zowel onder- als bovenafvoer realiseren. Bij bovenafvoer is het noodzakelijk dat de stuw in de drempel kan zakken. Dit is niet aantrekkelijk door de grote diepte van de inkassing en de kans op sedimentafzetting. Indien bovenafvoer toch gewenst is, kan men overwegen een klep op de segmentstuw aan te brengen (zie fig. 3.s. b).
Dergelijke segmentstuwen komen vooral voor in Frankrijk, o.a. bij de kanalisatie van de Rhône en de Seine.

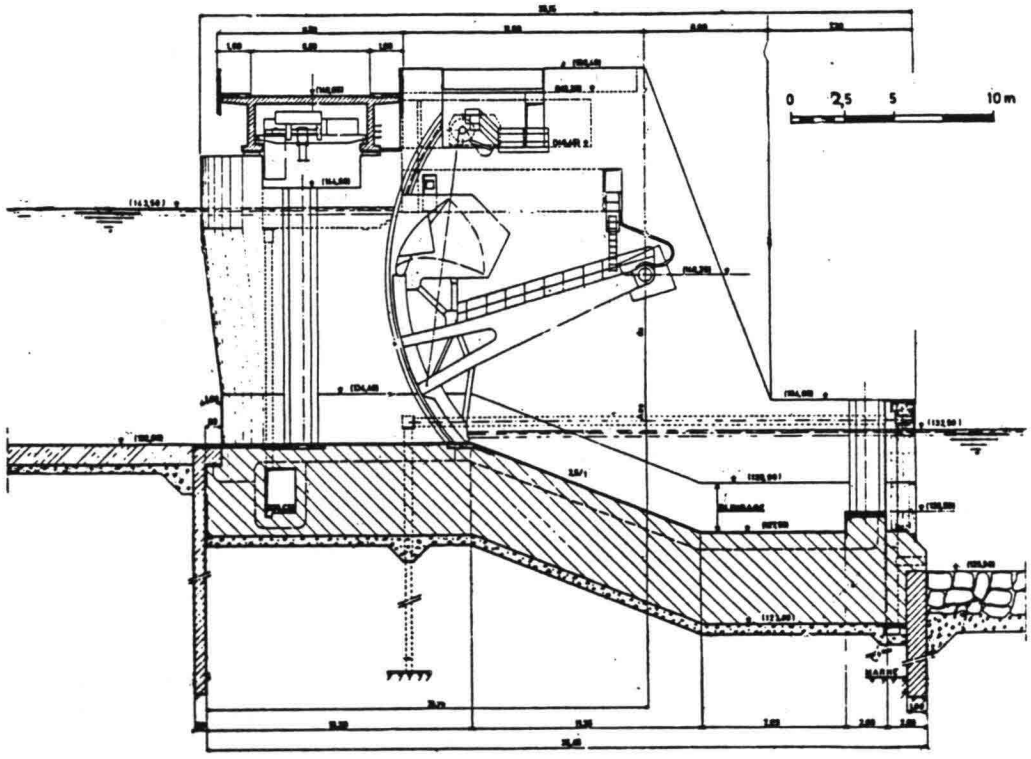


fig. 3.s. b

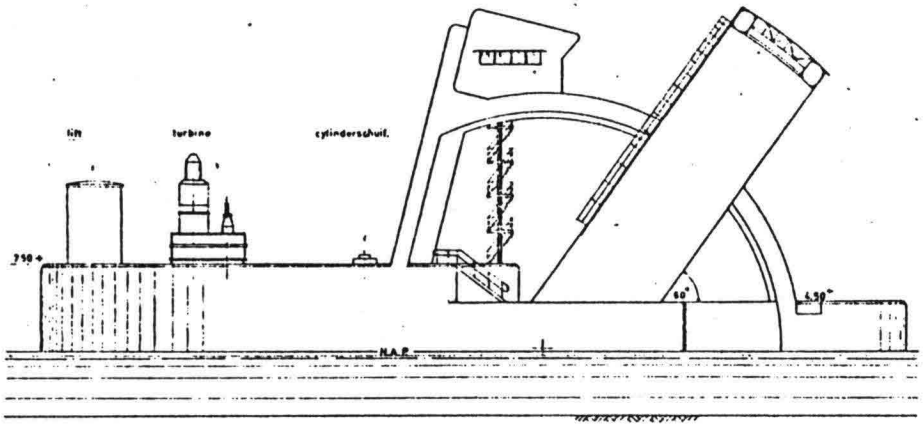
Tot slot nog een bijzonder type stuw dat in Nederland is ontwikkeld en toegepast bij de kanalisatie van de Neder Rijn.

II.d. vizierstuw (fig. 3.t.)

In de morfologische kaart A3, B1, C4, D1, E1.

De schuiven bij een vizierstuw zijn eigenlijk half-cirkelvormige segmentschuiven. Zij draaien evenals segmentschuiven om scharnieren in de pijlers en landhoofden. Ook de krachtsoverdracht geschiedt via de scharnieren. De schuiven hebben deze naam gekregen omdat zij doen denken aan het vizier van de helm van middeleeuwse ridders.
Doordat de draaipunten zich aan de bovenstroomse zijde van de halve cirkel bevinden, zijn de resulterende waterdrukken op de schuiven vanaf het cirkel-middelpunt gericht. De constructie wordt daardoor uitsluitend op trek belast en kan licht worden geconstrueerd.
Door een verticaal pianoscharnier in het midden van de schuif aan te brengen kan deze relatief eenvoudig worden gemonteerd, terwijl ongewenste spanningen door temperatuurswisselingen worden vermeden.
De schuiven worden bewogen door kabels die over de gebogen betonconstructie naar de machinekamer in de torens lopen (zie fig. 3.t.). De schuiven

ZIJAANZICHT MIDDENPIJLER



ZIJAANZICHT LANDHOOFD

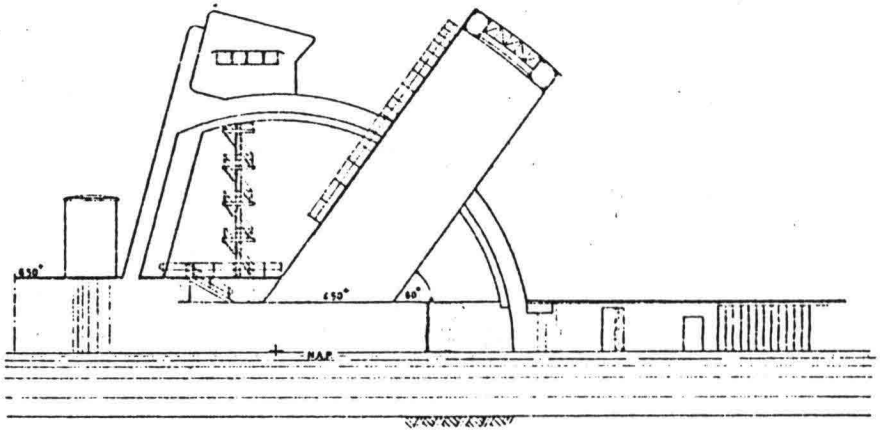
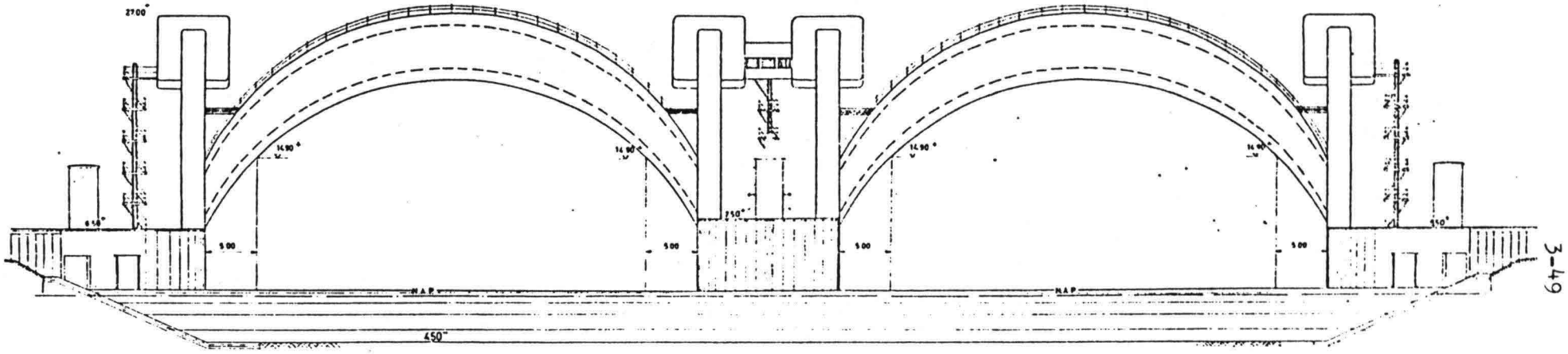


fig. 3.1.

VOORAANZICHT BOVENSTROOMS



behoeven slechts over een hoek van ca. 60° te worden geheven om de vereiste doorvaarthoogte voor de scheepvaart te bereiken.
Eén van de voordelen van de vizierschuif is dat het onder de schuif doorstromende water in de richting van de radialen gaat lopen, dus loodrecht op de half-cirkelvormige drempel. Er ontstaat dus een zeer gespreide afvoer, hetgeen aantrekkelijk is voor de bodemverdediging achter de stuw.
De breedte tussen de pijlers bedraagt ongeveer 50 m. Door de cirkelvorm en de relatief grote breedte wordt reeds bij een kleine hefbeweging (hoekverdraaiing) een grote afvoer bereikt. De geopende spleet mag niet te klein zijn i.v.m. ongewenste trillingen. Een fijnregeling van de afvoer wordt gerealiseerd door openingen in de pijlers.

Hoofdstuk 4 - SCHUIVEN

4.1. Hydraulische aspecten, algemeen

Schuiven dienen om naar wens water te keren of door te laten en vaak ook om gedurende langere tijd het debiet te regelen, bv. bij het vullen en ledigen van een schutsluis en bij een beweegbare stuw.

In kort bestek worden de voornaamste hydraulische aspecten behandeld, die het schuifontwerp bepalen.

Op de constructieve kant van de schuifontwerpen zelf wordt niet ingegaan. Voor een zeer uitvoerige behandeling zie lit. (1).

Uit de doelstelling van het gehele kunstwerk volgen de eisen, die aan de schuif zijn te stellen:

Afmetingen: doorvoercapaciteit, ijs, brokken vuil, bereikbaarheid i.v.m. onderhoud.

Onder- of bovenafvoer: indien constant peilregeling, dan liefst bovenafvoer ($\Delta H :: q^{2/3}$ dus ΔH weinig debietgevoelig, en bij volkomen afvoer ongevoelig voor benedenwaterstand (fig. D_1 en J_1).
Debietregeling, liefst onderafvoer met $q :: \sqrt{\Delta H}$ (fig. B_1 en B_2)
Ook selectief afzuigen, vanuit een gelaagde vloeistof, kan de keuze bepalen.

Maximaal verval: als de schuif in een riool staat dan vermindert het verval bij toenemend debiet; bij schutsluis neemt met de tijd en duc met het heffen, ook het totale verval af.

Golfbelasting: vooral zorgen de golfklappen te vermijden: geen koker met vrij wateroppervlak en met te laag plafond, geen horizontale liggers aan de zeezijde van de schuif zonder extra beplating, geen horizontale liggers waar overstorten water op kan komen.

Mate van afdichting: aan de afdichtende functie van schuiven wordt vaak te zware betekenis gehecht, dit leidt tot slijtage en beschadiging van rubber randen. Wel afdichting toepassen als er kans is dat zwevend vuil klemlopen van de schuif zal veroorzaken.

Glijd- of Wielschuif: wrijvingskracht moet overwonnen worden. Extra wrijvingsdemping is gunstig t.a.v. trillingen.

Toepassen van in de handel verkrijgbare afsluiters: deze zijn weinig toegankelijk en alleen te vervangen als ook een deel van de pijp demontabel is.

Gedeelde schuiven: bv. een klep scharnierend bovenop een hefschuif voor regelbaar bovenpeil bij lage afvoer. Met gedeelde schuiven vermijdt men hoge heftorens; nadeel bij gedeelde glijdschuiven is de extra kier of afdichting tussen de schuiven, want hier ontstaat trillingsgevaar door lekstroming (zie fig. J_1).

Schuifschachten: kunnen zelfs bij diepliggende riolen overstromend water geven. De vulling van de schacht wordt bepaald door aan- en afvoer via spleten, te lage waterstand in de schacht kan ongewenste luchtaanzuiging geven.
De waterstand in de schacht is in belangrijke mate bepalend voor de verticale belasting van rioolschuiven, zie lit. (8).

Factoren, die de schuifomstroming in belangrijke mate kunnen beïnvloeden

Schuif als deel van een systeem: riool met meerdere schachten geeft allerlei resonantiefrequenties (communicerende vaten systeem) die aangestoten kunnen worden (fig. K_1 en K_2). Ingesloten lucht is een verend element dat ook tezamen met het water, tot eigen slingeringen leidt.
Niet-permanentie: bij het sluiten van een schuif wordt het water afgeremd door de kracht, die de schuif extra op het water uitoefent, d.w.z. er ontstaat een extra drukverval met een extra hoge druk bovenstrooms (b.v. leidend tot het overlopen van een noodschuifschacht) en een extra lage druk aan de benedenstroomse zijde (leidend tot b.v. luchtaanzuigen en/of cavitatie, zie par. 4.3).

Analyse van het stroombeeld betekent bij alle schuifstanden nagaan hoe de waterstand in de schachten is, welk drukverval erbij hoort. Sliten moet bij de analyse betrokken worden, omdat de grootte en vorm van nauwe spleten belangrijk kan wijzigen.

Meerdere schuiven achter elkaar, b.v. als deze elkaars reserve zijn of omdat, als één schuif blijft hangen, de andere gesloten moet worden, geeft problemen bij de analyse als zij zo dicht achter elkaar staan dat de geknepen stroming nog niet over de doorsnede gespreid is bij de andere schuif. Getrapt verwijdende stroming geeft grotere afvoercoëfficient en lagere drukken (lucht aanzuigen, cavitatie).

Afdichtingen; de basisprincipes van inverende afdichtingen zijn òf een holle rubber balk die ingedrukt wordt, òf een slappe strip die gebogen wordt zodanig dat de waterdruk hem aandrukt, òf een door waterdruk op te pompen slang. De hoeken van de schuif vormen een apart probleem: discontinuïteit en ongelijke stijfheid van vulstukken. Slijtage treedt op bij bewegen van de schuif (behalve bij de loodrecht uit- of inverende rubber balk) omdat de strip of balk op afschuiving wordt belast. Om de slijtage te beperken worden wel tapse nissen of zoiets toegepast zodat na zekere hefafstand de strip of balk loskomt.
Een groot nadeel is dat dan smalle spleten ontstaan waarbij trillingen door de stroming kunnen worden opgewekt (zie fig. a t/m d, overgenomen uit lit. (6)).
Slijtage van afdichtingsstrippen kan worden vermeden door boven en onder ingedrukte profielen toe te passen en aan de zijkant rubberbalken
met ingevulcaniseerde glijdstrip zodanig dat ze blijven afdichten (functiescheiding van inveren en glijden). De vorm van afdichtingsranden is belangrijk in verband met trillingen; temeer omdat een lek in de buurt van een elastische rand extra aanleiding tot trillingen kan geven (zie lit. (6), hfdst. III).

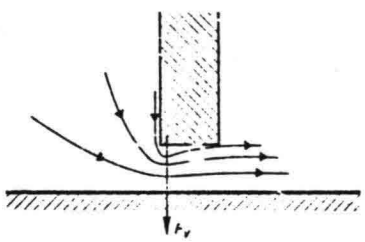


fig. a

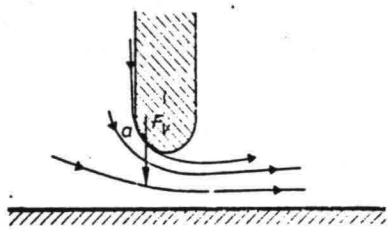


fig. b

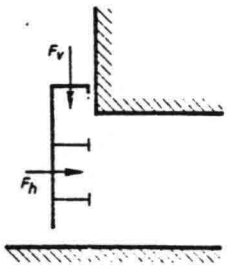


fig. c_1

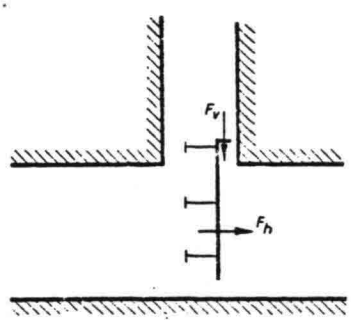


fig. c_2

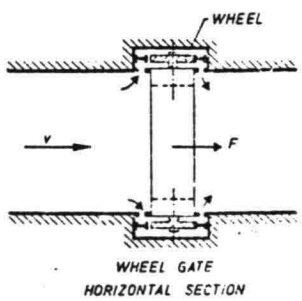
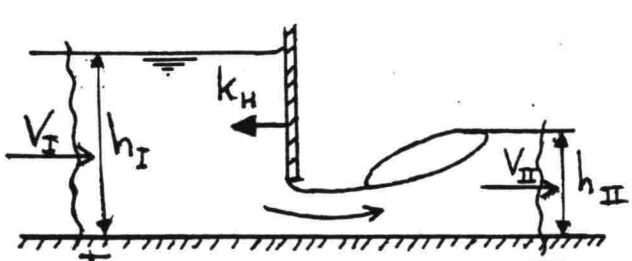


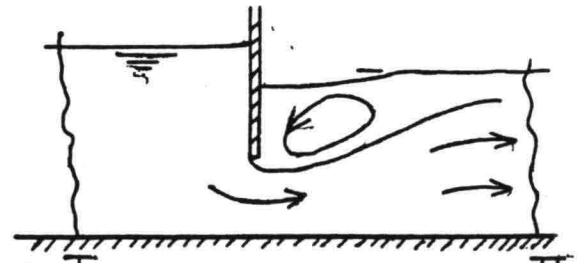
fig. d

4.2. Krachtenspel

4.2.1. Horizontale kracht en drukken rondom de schuif



volkomen afvoer



onvolkomen afvoer

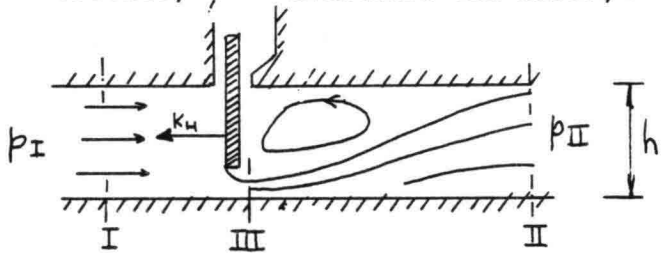
Impulsvergelijking

$\vec{F}\,dt = \Delta\,(m\,\vec{v}) = m\,(\Delta\,\vec{v}) = m\,(\vec{v}_{na} - \vec{v}_{voor})$ geeft:

$(\frac{1}{2}\,\rho\,g\,(h_I^2 - h_{II}^2)\,B - K_H)\,dt = (\rho\,Q\,(v_{II} - v_I))\,dt$, zodat

$$K_H = \tfrac{1}{2}\,\rho\,g\,(h_I^2 - h_{II}^2)\,B - \rho\,Q\,(v_{II} - v_I)$$

B = breedte, ρ = dichtheid van water, g = versnelling zwaartekracht.



In een gesloten leiding geldt iets dergelijks, echter nu is $v_I = v_{II} = v$ (mits II voldoende ver weg ligt).

De impulsvergelijking reduceert hierdoor tot

$\vec{F}\,dt = \Delta(m\,\vec{v}) = 0$, daar $\Delta\,\vec{v} = 0$.

Voor de krachten op de vloeistof tussen de doorsneden I en II moet derhalve gelden:

$((p_I - p_{II})\,h\,B - K_H)\,dt = 0$, zodat $K_H = (p_I - p_{II})\,h\,B$

Omdat tevens geldt

$$p_I - p_{II} = \tfrac{1}{2}\,\rho\,v^2\,\xi_s$$ (ξ_s = **verliescoëfficient schuif als functie van de hefhoogte**)

geldt dat:

$$K_H = \tfrac{1}{2}\,\rho\,v^2\,h\,B\,\xi_s$$

Het maximale drukverschil over de schuif is groter dan $p_I - p_{II}$, de lokale onderdruk volgt uit "Borda":

$\Delta E = (v_{contractie} - v)^2 / 2g$ terwijl tevens geldt $\Delta E = \xi_s\,v^2/2g$.

Δ E = energiehoogte-verschil

De druk is nu te berekenen als ξ_s gegeven is (hiermee is $v_{contractie}$ te berekenen en tussen I en III geldt de wet van Bernoulli)

$$\frac{p_I}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \frac{p_{III}}{\rho g} + \frac{v^2_{contr.}}{2g}$$

Het blijkt bij uitwerking dat geldt

$$(p_{II} - p_{III}) = \tfrac{1}{2} \rho v^2 \, 2\sqrt{\xi_s}$$

en dus

$$p_I - p_{III} = \tfrac{1}{2} \rho v^2 \, (\xi_s + 2\sqrt{\xi_s})$$

Voorzichtigheid is geboden:
"Carnot" volgt uit de impulsvgl. tussen III en II, aannemend dat het gehele debiet in III via de vena contracta horizontaal stroomt. maar er is ook (een soms aanmerkelijk) lekdebiet rondom de schuif, en dit debiet komt dan b.v. van boven en stroomt in eerste instantie recht naar beneden. De berekening geeft hierdoor iets te lage drukken in zône III.
Verder is de berekende horizontale kracht alleen voor dat deel van de schuif dat uitsteekt in het riool, de rest volgt uit een analyse van de stroming in de schuifschacht.

4.2.2. Niet-permanente stroming

Bij het openen of sluiten van een schuif ontstaat een niet-permanente stroming in een riool en de drukken vlak bij de schuif kunnen als Q(t) bekend is berekend worden, waarbij de traagheid van het water in het riool boven- en benedenstrooms van de schuif apart beschouwd moeten worden.
De druk p_{III} is van belang. Is deze lager dan atmosferisch, dan wordt lucht aangezogen, terwijl de combinatie van p_{III} en v_{III} een maat is voor cavitatie (zie par. 4.3: cavitatie).
De druk p_I moet, als er open schachten zijn (b.v. van een bovenstroomse noodschuif), geen overlopen van de schacht geven.
De drukken p_I en p_{III} zijn, tezamen met de spleetgrootten, bepalend voor de waterstand in de schuifschacht (ook de stroming die via de schuifsponning in- of uitstroomt doet mee!). De druk bij het rioolplafond direct bovenstrooms van de schuif is $(p_I + \tfrac{1}{2} \rho v^2)$.

4.2.3. Hefkrachten

Deze worden bepaald door het horizontale liggeroppervlak, de vorm van de onderrand en de vulling van de schacht (lit. (8)).
De wrijving is vooral van belang bij glijdschuiven en volgt uit de horizontale schuifbelasting.
De hefkracht is gering als er geen bovenbelasting is en de liggers voldoende hoog boven de gecontraheerde straal in de dekneer zitten. Bij een volkomen afvoersituatie komen de liggers in de lucht te zitten, dit is optimaal voor kleine hefkrachten en het voorkomen van trillingen.

4.2.4. Klapverschijnselen

Deze ontstaan als een bewegend wateroppervlak plat tegen een constructie aanslaat. Het water moet zich dan, afgezien van compressibiliteit, oneindig snel vertragen. Ook golfbewegingen in een gesloten hoek (b.v. bij een rioolschuif) geven klappen, ook al is hier vaak wat lucht ingesloten.
Er worden compressiegolven opgewekt, analoog als bij waterslag ($p = \rho \cdot c \cdot v$).
In de praktijk zijn drukken veel lager (5 à 10x) dan uit deze beschouwing volgt, doordat er lucht in het water zit (door golven of watersprong) of lucht wordt ingesloten.
Klapverschijnselen treden op bij golven, bij cavitatie en bij een watersprong in de buurt van een schuif, en deze verschijnselen moeten zoveel mogelijk worden vermeden (zie par. 1)
Ook bij het sluiten van een rioolschuif kunnen klappen ontstaan: bij het sluiten moet de waterkolom benedenstrooms worden afgeremd, de laagste druk ontstaat bij de schuif en hier verzamelt zich de lucht.
Nu kan het volgende verschijnsel optreden: door het doorschieten van het water ontstaat onderdruk en daardoor rekt de luchtbel uit. Bij het sluiten van de schuif wordt na een tijdje de kolom water door de onderdruk in de luchtbel afgeremd en komt terug.
Komt het water met een zekere snelheid weer in de buurt van de schuif dan kunnen grote drukstoten ontstaan die schade geven.
Ook zonder luchtaanzuigen kan, bij grotere vervallen, iets dergelijks ontstaan doordat cavitatie met een groot volume ontstaat (zie par. 4.3).
Bij schuiven met groot verval wordt, om zeer lage drukken en cavitatie te voorkomen, beluchting toegepast zodat een stabiele vrije waterspiegel kan ontstaan. De capaciteit van de beluchting moet groot genoeg zijn om het luchttransport door de waterstroming te compenseren (zie lit. (1)).

4.3. Cavitatie

Cavitatie, d.i. holtevorming in het water, treedt op als de plaatselijke, momentane druk zo laag is, dat koken van water ontstaat bij normale watertemperatuur. Maatgevend voor deze druk is als de dampdruk wordt onderschreden (t.o.v. atmosferische druk d.i. bij benadering 10 m waterkolom). Cavitatie geeft sterke dynamische verschijnselen (trillingen en/of klappen) als de bellen weer imploderen; materiaalerosie treedt op als de bellen ontstaan en imploderen vlak bij de wand (imploderen = instorten, inklappen).

Als maat voor het al dan niet optreden van cavitatie wordt het Thomagetal ingevoerd, te definiëren vanuit een referentiepunt waar de druk en de snelheid goed bekend zijn; in lit. (9) is het punt met de grootste contractie van de waterstraal, die de schuifopening passeert, genomen.

Noemen we deze grootheden p_o en v_o, dan zal de druk p in een willekeurig ander punt, dat een hoogte z lager ligt, zijn:

$$p = p_o - \alpha \tfrac{1}{2} \rho v_o^2 + \rho g z$$

Stel dat hier juist cavitatie optreedt ($p = p_v$ = dampdruk) dan is af te leiden

$$\alpha = \frac{(p_o - p_v + \rho g z)}{\tfrac{1}{2} \rho v_o^2}$$

wordt experimenteel in modellen of bij praktijksituaties vastgesteld door na te gaan bij welke combinatie van p_o en v_o het geluid door het begin van cavitatie verandert. Meestal is de term $\rho g z$ te verwaarlozen ten opzichte van de overige drukgradiënten, α gaat dan over in σ, het Thomagetal

$$\sigma = \frac{(p_o - p_v)}{\tfrac{1}{2} \rho v_o^2}$$

Is de situatie kritiek dan is $\sigma = \sigma_i$ (incipient cavitation)

Remedies tegen cavitatie zijn bijvoorbeeld:

- direct benedenstrooms van de schuif het riool verwijden om de lokale onderdruk achter de schuif te reduceren en om te voorkomen dat cavitatie de wand raakt.
- toepassen van een stalen bekleding op beton, uitwisselbare schuifrand toepassen
- glad afwerken van beton (onderdrukken van wandturbulentie)
- opvoeren van de druk door het riool dieper te leggen
- laten aanzuigen van lucht, liefst via kleine bellen (demping van schokgolven).

Nadere uitwerking van cavitatie-aspecten is in lit. (9) te vinden.

4.4. Trillingen door stroming

De ontwerpcriteria zijn te onderscheiden in:

1. Vormgeving zodanig maken dat geen teruggekoppelde (zichzelf versterkende) instabiele trillingen ontstaan (self-excitation).
2. Zorgen dat eigen frequenties van de schuif hoog liggen ten opzichte van frequenties die voorkomen in de turbulenties. Een belangrijk deel van de turbulentie ontstaat door de schuif zelf, omdat bij geknepen schuif een energieverlies ontstaat dat omgezet wordt in turbulentie.
3. Zorgen dat de stroming goed gedefinieerd is en er b.v. geen instabiele loslaatverschijnselen ontstaan (b.v. loslaten van stroming langs gekromd oppervlak); hierbij kan een klein effect zoals turbulentie in het aanstromende water of een kleine trilling het loslaatpunt sterk doen verschuiven waardoor een andere krachtwerking ontstaat. Dit laatste kan tot vrij sterke, zichzelf instandhoudende trillingen aanleiding geven (self-controlled vibrations).
   Ook een watersprong, die juist tegen de schuif aanligt, kan zo'n instabiliteit geven.
4. De onderdelen, waarin speling zit (glijd- en wielopleggingen, hefstang etc.), moeten voor alle hefhoogten in één richting worden belast om rammelen en daarbij optredende sterke teruggekoppelde trillingen te voorkomen.
5. **Aangezien de totale belasting groter is dan de statische component, en b vendien geldt dat $\bar{\sigma}_{dyn} < \bar{\sigma}_{stat}$ moet een extra veiligheid aanwezig zijn om dynamische krachtfluctuaties op te nemen; 20 à 30% van de statische krac ten (hor. en vert. krachten), die door het water worden uitgeoefend, blijkt meestal voldoende, mits de voorzorgen, genoemd onder 1 t/m 4, genomen zij**

Opmerkingen

ad 1: In lit. (6), hoofdstuk III staan een aantal voorbeelden van vormgevingen, die erg gevoelig zijn voor teruggekoppelde trillingen. Het is niet mogelijk al een aantal schuifontwerpen te geven die gegarandeerd trillingsvrij zijn. In enkele gevallen is het mogelijk een minimaal benodigde stijfheid als functie van het verval te berekenen. Toenemende stijfheid geeft extra veiligheid ten aanzien van trillingen. Een korte samenvatting van de theorie is in lit. (7) te vinden.
Het meest voorkomend zijn zelf-exciterende trillingen bij spleetstroming. Als de trilling een periodieke variatie van de spleetwijdte geeft dan varieert het debiet; het momentane verkleinen van de spleet geeft dus een debietafremming waardoor bovenstrooms het water wordt opgestuwd (druktoename) en benedenstrooms afgezogen (drukafname). Is de randvorm zodanig

dat er een zuigkracht is proportioneel met het verval dan ontstaat een zuigkracht die in fase en proportioneel is met de snelheid van trillen van de schuif. Vergelijken we dit bv. met het effect van een mechanische demper dan blijkt de laatste juist een kracht in tegenfase te geven; een kracht in fase doet de trilling juist opslingeren!
Zo bleek in het geval van de stuw te Sambeek, fig. J_1, de lekspleet zware trillingen te veroorzaken, die na aanbrengen van de afdichting (type rollende buis) verdwenen waren. Gevoelig zijn de randen in fig. a t/m d. Om verticale trillingen van de schuif en trillingen van de onderaanslag te verkleinen moet het aangrijpingsoppervlak van de kracht i.v.m. duidelijk gedefinieerd loslaatpunt zo klein mogelijk zijn, en worden zo scherp mogelijke randen toegepast. lit. (4) en (5).

ad 2: In lit.(2),(3) staan voor enkele gevallen dominante Strouhalgetallen gegeven ($S = f L/V$ met f = excitatiefrequentie, L een referentie lengte- of diktemaat, V een referentiesnelheid), waarmede excitatiefrequenties berekend kunnen worden. De resonantiefrequentie moet 3 à 10x hoger zijn dan de berekende excitatiefrequenties.

Het is van belang zich te realiseren dat bovenstaande argumenten ook gelden voor onderdelen van constructies en dat niet alleen de schuif in trilling kan raken, maar dat schachten etc. hun eigen resonantiefrequenties hebben, die bij opslingering een extra versterking geven van de dynamische belasting. Bufferschacht-frequentieberekeningen kunnen een indicatie geven hoever deze frequentie af ligt van de dominante turbulentiefrequenties.

Een bijzonder geval van trillingen doet zich vaak voor bij schuiven met overstortend water. Is de overstortende laag dik, dan wordt het luchtkussen leeggezogen en dit moet via beluchting voorkomen worden. Bij een dunne straal moet de straal bovendien door straalbrekers op de kruin gebroken worden (bv. V-vormige obstakels die een ruime doorsnijding van het watergordijn geven, op afstand van ca. 65% van de valhoogte). Indien dit niet gebeurt kan het systeem luchtkussen-straal zichzelf opslingeren, zie Appendix A uit lit. (6).
Een groot aantal voorbeelden van trillingen, die bij schuiven kunnen optreden, zijn vermeld in lit. (10).

4.5. IJsvorming

Aspecten zijn: tegenhouden van mogelijke ijsschotsen b.v. door een ketting van drijvende elementen, toepassen van te verwarmen strippen bij de afdichting, extra capaciteit hefwerk om een ijsgewicht mee te tillen.
Bij schuiven met groot verval, waar om reden van afstroming met vrije waterspiegel en/of cavitatie beluchting wordt toegepast, moeten de beluchtingspijpen vrij blijven van spat en regenwater om dichtvriezen te voorkomen.
Wat voor criteria voor ijsvorming, dynamische belasting door schotsen, breuksterkte enz. worden toegepast is sterk situatiegebonden.
In dit kader wordt hierop niet verder ingegaan.

4.6. Schotbalken

Hoewel bij noodkeringen, voorzover deze in stromend water gesloten moeten worden, dezelfde aspecten een rol spelen als bij schuiven, speelt bij schotbalken bovendien een rol dat de elementen zo gekozen zijn dat ze licht zijn en dat bij het laten zaken in stromend water gelijktijdig onder- en bovenstroming plaatsvindt. Een probleem vormt dan vaak het te kleine eigengewicht om te kunnen zakken en het weer loskomen van de bodem door statische drukopbouw aan de bodem (daarom de afdichting liefst bovenstrooms plaatsen). Naast het toepassen van een optimale vormgeving, waarmede de opwaartse krachten gereduceerd worden, kan bv. het gewicht vergroot worden door de onderste balk aan kabels te laten zakken terwijl er steeds balken bovenop bijgestapeld worden. Ook wordt wel een verzwaarde hulpbalk toegepast, waarbij de schotbalk onder water losgekoppeld wordt en waarbij de balk op de bodem of op zijn voorganger vergrendeld wordt.

Literatuur

1. Wickert, G. en Schmauszer, G. "Stahlwasserbau".
Springer Verlag 1971

2. Naudascher, E. "On the Role of Eddies in Flow Induced Vibrations".
10th IAHR congress. London 1963, paper 3.9

3. Naudascher, E., Kobus, H.E., Rao, R.R.R. "Hydrodynamic Analysis for High Head Leaf Gates".
Proc. A.S.C.E. Hydr. Div. 1964, HY 3, paper 3904

4. Petrikat, K. "Bestimmung der schwingungserregende Vertikalkräfte an Schlidichtungen von Hubschützen und Segmentwehrverschlüssen".
Mitteilungen Univ. Stuttgart Institut f. Wasserbau, no. 21, 1972, pp. 95 - 114.

5. Schmidgall. T. "Spillway Vibrations on Arkansas River Dams".
Proc. A.S.C.E., Hydr. Div. HY 1, 1972, paper 8676.

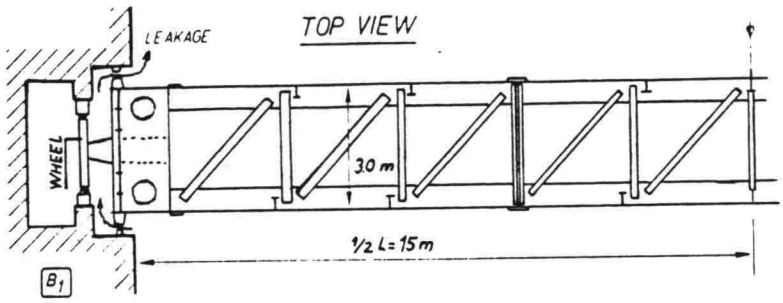
6. Kolkman, P.A. "Flow Induced Gate Vibrations"
Publ. 164, Waterloopkundig Laboratorium.

7. Kolkman, P.A. "Self-Exciting Gate Vibrations".
Publ. 186, Waterloopkundig Laboratorium.

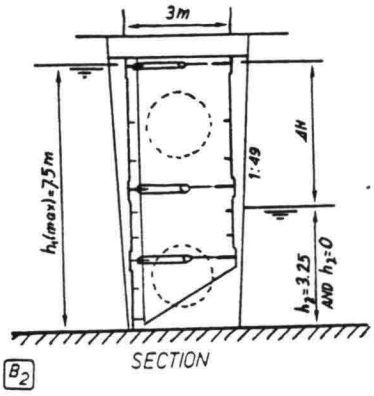
8. Kolkman, P.A. "Hefkrachten bij rioolschuiven", notitie 9 uit de serie "Hydraulica bij schutsluizen", vakgroep Waterbouwkunde.

9. Kolkman, P.A. "Cavitatie, algemene beschouwing" en "Cavitatie inceptiegetallen bij schuiven, voorwerpen, wand", notities 6 en 7 uit de serie "Hydraulica bij schutsluizen".

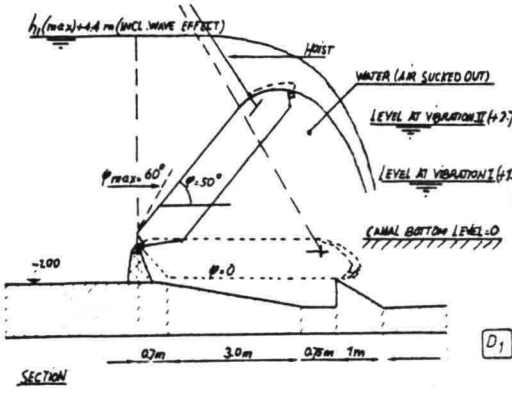
10. Kolkman, P.A. "Development of vibration-free gate design".
Publikatie 219 Waterloopkundig Laboratorium.



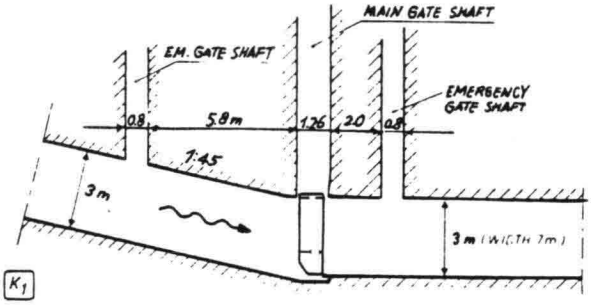
B1



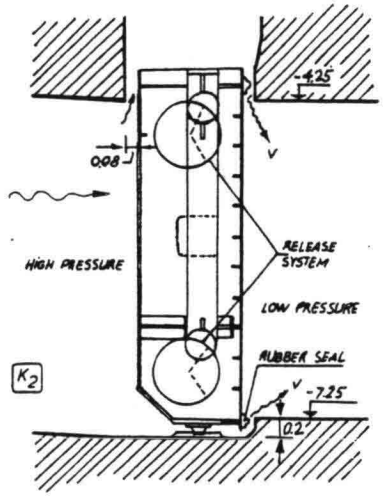
B2



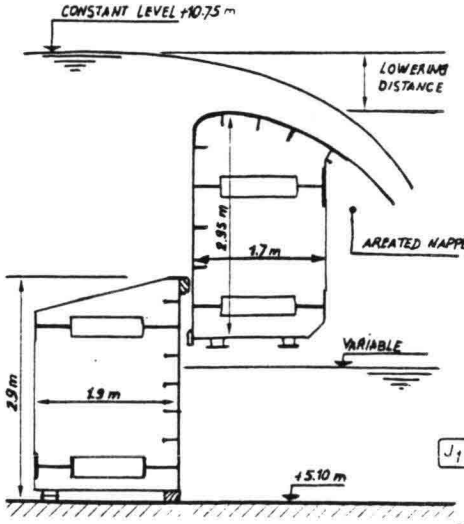
D1



K1



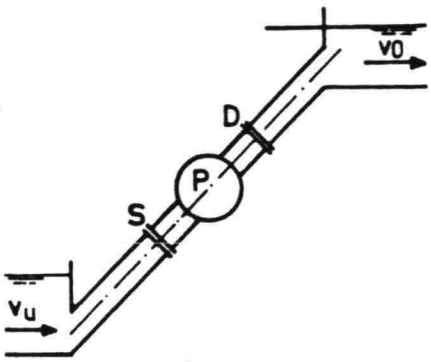
K2



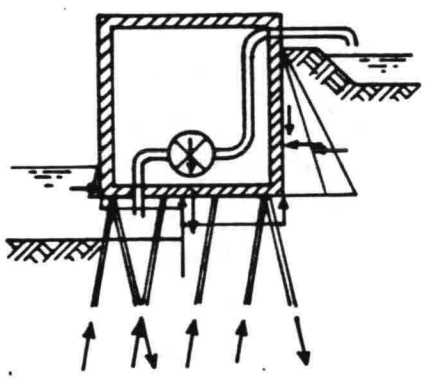
J1

hoofdstuk 5 - GEMALEN

1. Inleiding

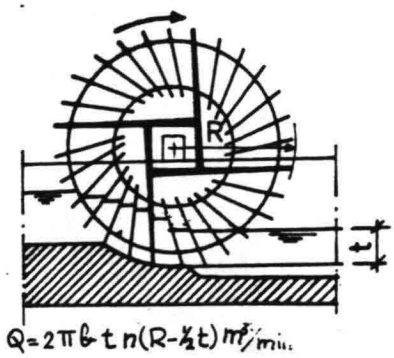


Een gemaal is een hydraulisch werktuig dat water omhoog maalt in vertikale zin, of water onder druk verplaatst in horizontale zin. Daarbij wordt mechanische energie overgedragen op het water, waardoor dit een hoger energieniveau krijgt: bij een werktuig met vrije waterspiegel zoals vijzel of scheprad, door het heffen van de watermassa, bij een pomp met gesloten huis door het opvoeren van de drukhoogte.
Het gemaal omvat een motor, die eventueel via een overbrenging pomp, vijzel of scheprad aandrijft, én de toe- en afvoerleiding van het water. Deze installatie staat op een fundering; een omhullende bescherming voor de installatie in de vorm van een gebouw wordt niet altijd aangebracht.
Andere benamingen voor gemaal zijn watermolen, pompstation, aanjaagstation.



Een gemaal verricht een functie in de waterbeheersing van laaggelegen gebieden, in de watertoevoer naar hooggelegen gebieden bv. voor landbouw of scheepvaart, in de watervoorziening voor huishouden en industrie, in de afvoer van rioolwater, soms bij het vullen en ledigen van ee schutsluis, en bij het vullen van spaarbekkens bv. voor energie-opslag. Daarnaast kent men tijdelijke functies bij de uitvoering van werken als drooghouden van bouwputten en opspuiten van terreinen.

2. Het opvoerwerktuig: scheprad, vijzel, pomp
(zie collegediktaat C.T. - Gezondheidstechniek "Energievoorziening, pompen en motoren" door ir. J.F. Duin.)

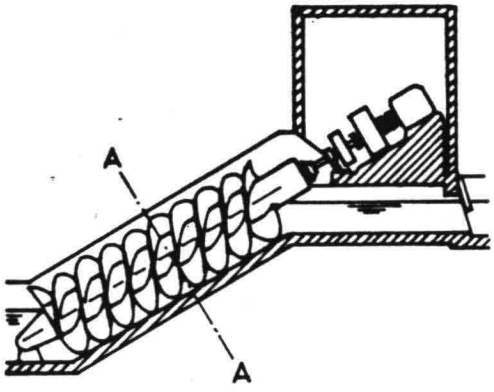


2.1. Scheprad (Engels: waterwheel)

Het opvoeren van het water met vrije waterspiegel in een scheprad komt in onze streken alleen nog in oude molens

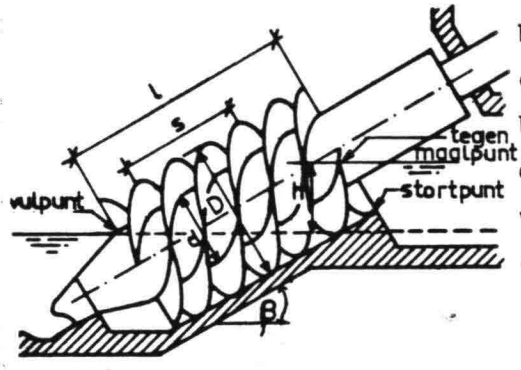
voor, het scheprad is in de loop der eeuwen verdrongen door de vijzel.
De bereikbare opvoerhoogte is slechts 1/5 à 1/6 van de raddiameter en de lage snelheid beperkt de capaciteit.

2.2. Vijzel (Engels: waterscrew)



dsn. A–A

De vijzel is een dikke as waarop 2 of 3 schroefgangen zijn bevestigd, ronddraaiend in een hellende goot, de opleider, die aan de onderzijde in het water rust. Het water wordt door de vijzel omhoog geschroefd en valt over het hoogste punt van de opleider, het stortpunt. Dit stortpunt is soms, eventueel automatisch, verstelbaar om de opvoerhoogte aan te passen aan de wisselende bovenwaterstand. De bovenwaterstand is het gunstigst wanneer deze ligt 0,1 à 0,15 D beneden het snijpunt van het hart van de as en het eind van de windingen, het zg. tegenmaalpunt. Als de bovenwaterstand boven het tegenmaalpunt komt gaat het water terugstromen, het debiet loopt snel terug. Het vulpunt aan de onderzijde ligt op het snijpunt van de bovenkant van de as en het einde van de windingen. Bij een benedenwaterstand onder het vulpunt daalt het debiet snel, een waterstand boven het vulpunt beinvloedt de capaciteit (het debiet) niet. De vijzel wordt tegenwoordig altijd in staal uitgevoerd, de opleider in staal of in beton. De opleider past onder sluitend om de vijzel en is van boven open, zodat het hele proces zichtbaar is en weinig kwetsbaar voor meegevoerd vuil. Een ander voordeel is dat een toe- en afvoerleiding waarin drukverliezen optreden, ontbreekt. Bij de vroegere tonmolen was de opleider geen vaste open goot, maar een meedraaiende gesloten buis.



h = statische opvoerhoogte
β = opstellingshoek (22–38°)
D = buitendiameter
d = balkdiameter (0,4 D)

De maximale opvoerhoogte is tot nu toe 8 à 10 m, de maximum capaciteit Q = 11 m^3/sec, de grootste vijzeldiameter 4,8 m, het nuttig effect of rendement 60 - 65%, **soms tot 75%. Dit rendement vermindert door lek tussen schroefgang en opleider, dus bij een grotere opvoerhoogte is ook een grotere diameter wenselijk.**

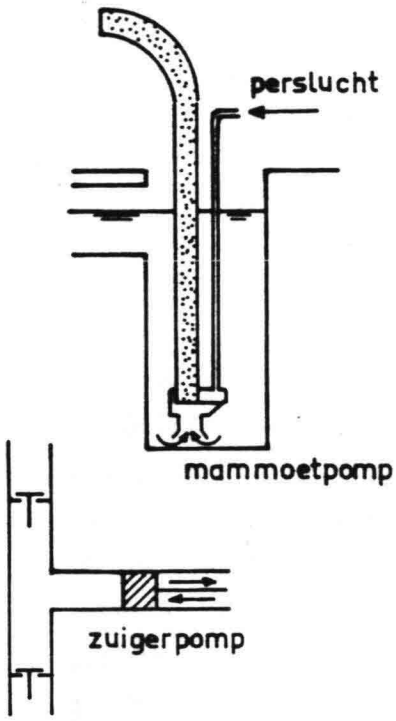
V. B. β=30° Capaciteit

diam. mm	l/s	m^3/uur
380	25	90
750	100	360
1000	200	720
1500	500	1800
2000	1000	3600

Men hanteert wel voor de capaciteit de formule
$Q = 1{,}1 \text{ à } 1{,}2\ A\ n\ D^3$ m^3/min.
n = omwentelingen per minuut (max. $\frac{50}{D^{2/3}}$), D = diam. vijzel in m.

Voor een balkdiameter d = 0,4 D en spoed S zijn voor A proefondervindelijk onderstaande waarden gevonden

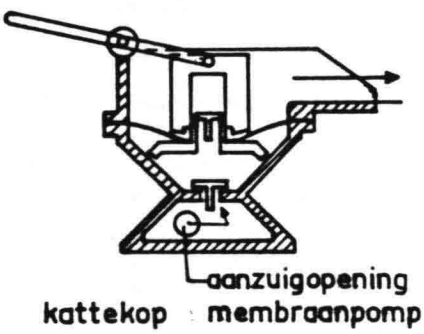
	$\beta = 22^\circ$		$\beta = 26^\circ$			$\beta = 30^\circ$	
S	1,0 D	1,2 D	0,8 D	1,0 D	1,2 D	0,8 D	1,0 D
A	0,304	0,329	0,248	0,276	0,281	0,228	0,236



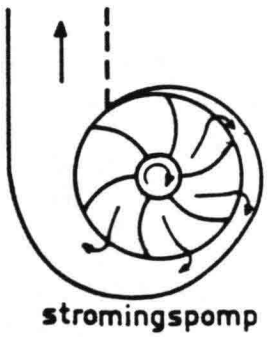
Als de bovenwaterstand boven het tegenmaalpunt stijgt, zal bij stilstaande vijzel het water terugstromen en de vijzel in omgekeerde richting laten draaien. Om dit te voorkomen brengt men aan de bovenzijde wachtdeuren aan, die terugstromen beletten.
De vijzel is met name geschikt bij nagenoeg vast binnen- en buitenpeil en niet al te grote opvoerhoogte en bij water verontreinigd door vast vuil. De vijzel is zeer robuust, behoeft geen reserve units en vraagt weinig onderhoud en toezicht.

2.3. Pomp

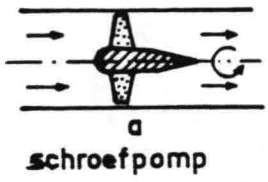
2.3.1. Algemeen



Bij de pompen onderscheidt men de stromingspompen, de verdringer - of positieve pompen en de pompen zonder bewegende delen als mammoetpomp en injectiepomp.
Bij de mammoetpomp wordt onderin de stijgbuis lucht geïnjecteerd, bij de injectiepomp wordt water onder druk geïnjecteerd in een venturi (verticaal; straalpomp).
Bij de verdringerpompen wordt water aangezogen in een aangroeiende ruimte en weggeperst uit een afnemende ruimte.
Verdringerpompen zijn zuiger-, plunjer-, membraan-, tandrad- en monopomp; deze zijn zelf-aanzuigend.

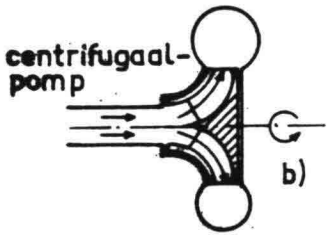


Bij de stromingspomp wordt de snelheid van het water door middel van een roterende waaier verhoogd, wat leidt tot een drukverhoging; deze pompen zijn niet zelf-aanzuigend.
Voor gemalen zijn **vooral stromingspompen** van belang.

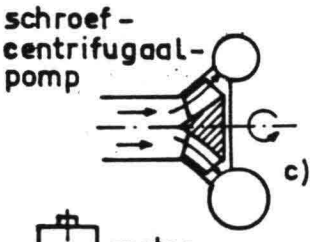


2.3.2. Stromingspompen

Er zijn drie soorten stromings- of rotatiepompen:
a. de schroefpomp (Du: axialp.; propeller- en Kaplanp. Eng. propeller of axialflow)

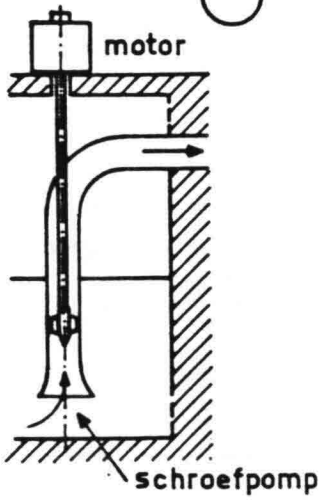


b. centrifugaalpomp (Du: radialp.; zentrifugalp., Eng.: centrifugal of radialflow)

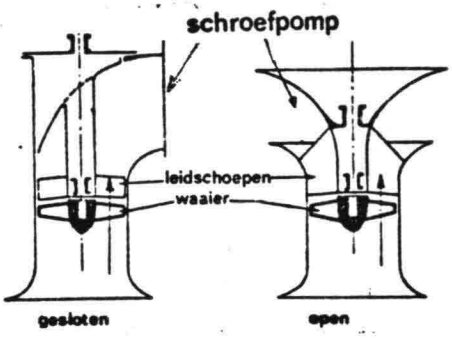


c. schroef-centrifugaalpomp (Du: diagonalp.; schraubenp. Eng.: screw of mixed flow)

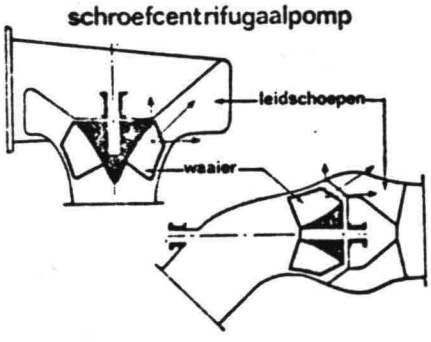
Bij de schroefpomp is de stroming axiaal in de richting van de waaieras gericht; bij de centrifugaalpomp verlaat het water de waaier in radiale richting; bij de schroef-centrifugaalpomp verlaat het water de waaier in een richting die een axiale en een radiale component heeft.



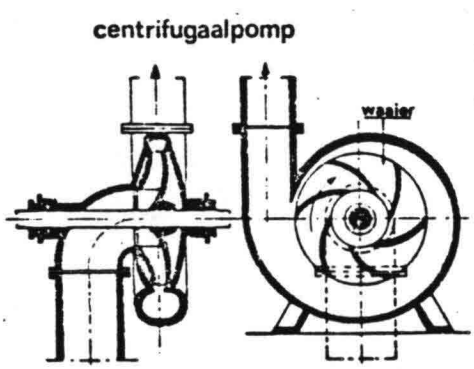
De <u>schroefpomp</u> heeft een open of een langere gesloten buis als pomphuis. De open pomp wordt niet veel gebruikt. De opvoerhoogte is maximaal 8 à 9m, het rendement 75%, soms hoger. De grootste schroefpompen hebben een capaciteit van 20m^3/sec bij een opvoerhoogte van 1,50 m. Het in serie plaatsen van twee of meer waaiers zoals bij de andere typen, is bij de schroefpomp niet gebruikelijk. Soms zijn de waaierbladen verstelbaar.

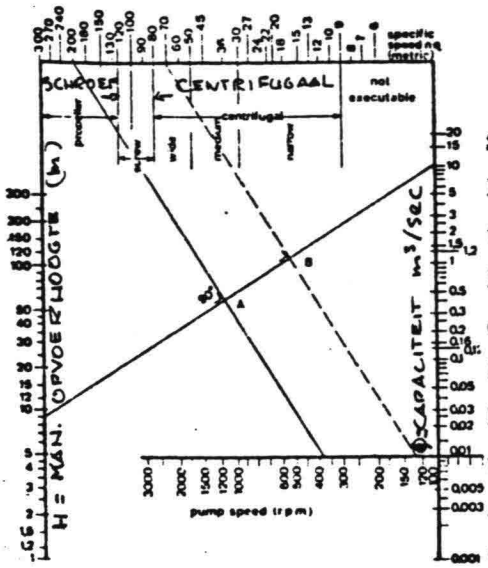


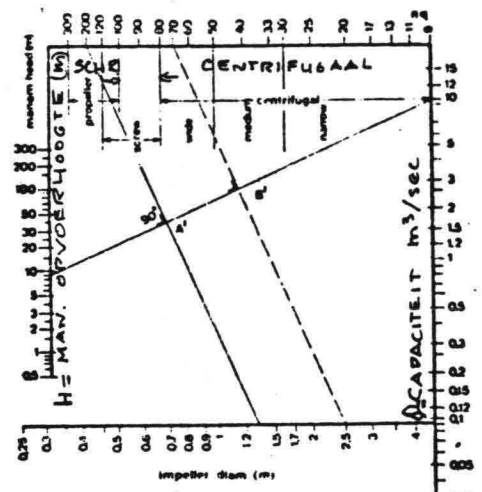
De <u>schroefcentrifugaalpomp</u> komt voor met slakkenhuis of met een buis als pomphuis. Het buistype wordt bij diepwelpompen wel toegepast met meerdere waaiers in serie in een lange buis, waardoor de diameter van de pomp klein kan blijven. De opvoerhoogte voor een pomp met één waaier is maximaal 20 à 25 m, het rendement 85%, de maximum capaciteit 8 m^3/sec.



De <u>centrifugaalpomp</u> heeft een slakkenhuis als pomphuis waarbij het water in het midden wordt ingevoerd en door de waaier radiaal tegen de buitenwand wordt gedreven waarna het naar de persbuis afstroomt. De centrifugaalpomp heeft een opvoerhoogte tot 70 - 80 m, een rendement van 85% en een maximum capaciteit van 6 m^3/sec. Door toepassing van meer waaiers in serie worden wel opvoerhoogten van 400 m bereikt en een capaciteit van 15 - 20 m^3/sec. Voor bijzondere toepassingen gebruikt men bijzondere waaiers, voor vuilwaterpompen wel met snijinrichting.







ZIE BIJLAGE 1 p. 5-20

Stromingspompen;bepaling van pomptype.

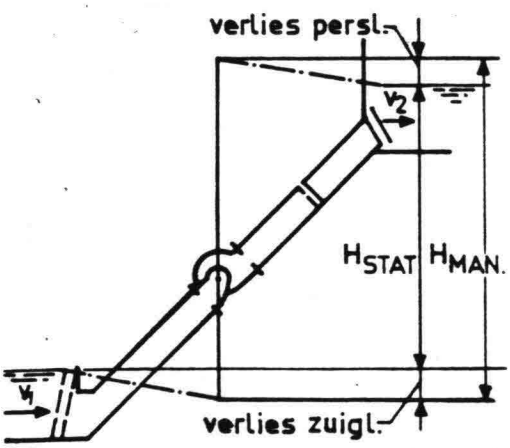
Een loodlijn op de verbindingslijn van H en Q geeft de bij een bepaalde specifieke snelheid behorend pomptype, toerental en vaaierdiameter.

Samenvattend:
De schroefpomp is het meest geschikt voor grote debieten en kleine opvoerhoogten.
De centrifugaalpomp is het meest geschikt voor kleine debieten en grote opvoerhoogten.
De schroef-centrifugaalpomp is het meest geschikt voor het tussenliggende gebied met gemiddeld debiet en gemiddelde opvoerhoogte.
Als een grote zuighoogte moeilijk te vermijden is, kan de schroef-centrifugaalpomp en vooral de centrifugaalpomp, die beide minder gevoelig zijn voor cavitatie, de voorkeur verdienen boven de schroefpomp.
Als deze rotatiepompen droog draaien, ontstaat schade omdat de lagers onvoldoende worden gekoeld. Bij de vijzel is droogdraaien niet bezwaarlijk.

De rotatiepompen zijn niet zelf-aanzuigend en moeten òf onder de laagste waterspiegel worden geplaatst òf vacuum worden gezogen om het pomphuis met water te vullen.
Aan de perszijde moet een terugslagklep voorkomen dat het water bij afgezette pomp gaat terugstromen. Hierdoor zou de pomp in omgekeerde richting gaan draaien en als een turbine gaan werken en wordt bovendien het vet uit de lagers gepompt.

3. De statische en de manometrische opvoerhoogte

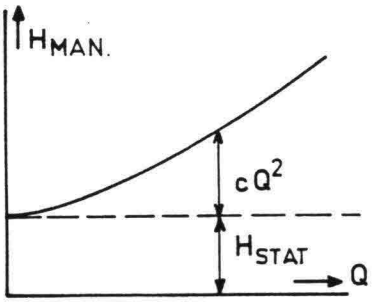
De drukverliezen in het pompsysteem zijn oorzaak, dat de manometrische opvoerhoogte die de pomp moet overwinnen, gelijk is aan de statische opvoerhoogte vermeerderd met de drukverliezen. De statische opvoerhoogte, dat is het verschil in waterpeil voor en achter het pompsysteem, is onafhankelijk van het totale drukverlies en van het verpompte debiet. De manometrische opvoerhoogte is het verschil gemeten door manometers direkt voor en achter de pomp.
Het drukverlies in de leiding is ongeveer evenredig met het kwadraat van het debiet. Het drukverlies aan



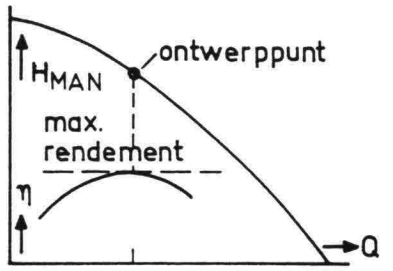
LEIDINGVERLIES $c' \frac{v^2}{2g} = cQ^2$

$H_{MAN} = H_{STAT} + cQ^2$

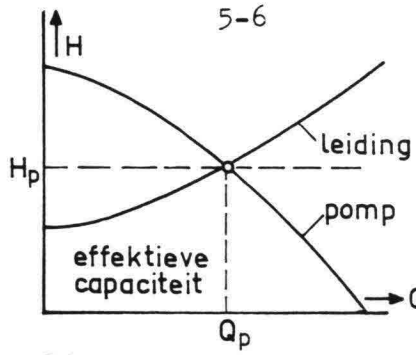
(KARAKTERISTIEK V.D. LEIDING EXCLUSIEF POMP)



KARAKTERISTIEK V.D. LEIDING
(ZONDER DE POMP)



KARAKTERISTIEK V.D. POMP
(KONSTANT TOERENTAL)



POMP-LEIDING KARAKTER

de zuigzijde ontstaat in het vuilrooster, de inlaat en de zuigpijp. Aan de perszijde ontstaat drukverlies in de persbuis, de schuifsponning en de uitlaat.

Omdat er drukverliezen in leiding en pomp zijn en ook de dampdruk van het water een rol speelt, zal de pomp bij vacuum trekken toch minder dan 1 ato (of 10,33 m waterkolom) opzuigen. Daarom is een marge ingevoerd bij de zuighoogte. Het verschil tussen de hoogteligging van de pompas en de beschikbare resterende zuighoogte is de beschikbare netto positieve zuighoogte (NPSH). Het gevaar van aantasting van de waaierbladen door cavitatie vraagt een deel van de aanwezige zuighoogte, die door de fabrikant wordt vastgesteld. Dit geeft de vereiste NPSH. De vereiste NPSH moet kleiner zijn dan de beschikbare NPSH. Bij een vijzel ontbreken de drukverliezen in de leiding.

Als we de statische opvoerhoogte kennen en de drukverliezen van een leidingsysteem bij een bepaald debiet, kunnen we de leidingkarakteristiek in een grafiek tekenen met de relatie tussen manometrische opvoerhoogte en capaciteit. Dit gebeurt door het drukverlies uit te zetten boven de statische opvoerhoogte. Als nu een pomp met een bepaalde karakteristiek hierin wordt getekend, zal deze pomp automatisch een opbrengst geven die constant blijft op het snijpunt van pomp- en leidinggrafiek. Hierin kan alleen verandering worden gebracht door een of beide karakteristieken te wijzigen, bv. door sneller draaien van de pomp of gedeeltelijk sluiten van een klep.

Bij de bepaling van het pomptype speelt een rol dat vele motoren een toerental hebben van 1400 t/min., wat bij gegeven debiet Q en opvoerhoogte H de pompkeuze bepaalt.

In de praktijk wordt het maximum rendement van een pomp vaak niet bereikt omdat Q en/of H variabel zijn. Een verbetering geeft dan een toerenregeling van de motor of bv. een schroefpomp waarvan de waaierhoek verstelbaar is. Het debiet Q is evenredig met de snelheid.

4. <u>De aandrijving en de overbrenging; appendages</u>

Voor de <u>aandrijving</u> wordt veelal een elektromotor toegepast, daarnaast komen ook de diesel- en benzinemotor voor, soms ook een dual-fuel motor

(naar keuze gas of olie). Alleen voor zeer grote vermogens past men stoom- of gasturbines toe. De stoommachine is verdwenen, ze vroeg veel mankracht. De windmolen heeft de laatste 60 jaar veel terrein verloren, maar krijgt nu weer meer aandacht.

Het vermogen N moet berekend worden voor de ongunstigste optredende situatie.

$$N = \frac{9{,}81 \times Q \times H \times \rho}{\eta} \text{ k N m/sec (KW)}$$

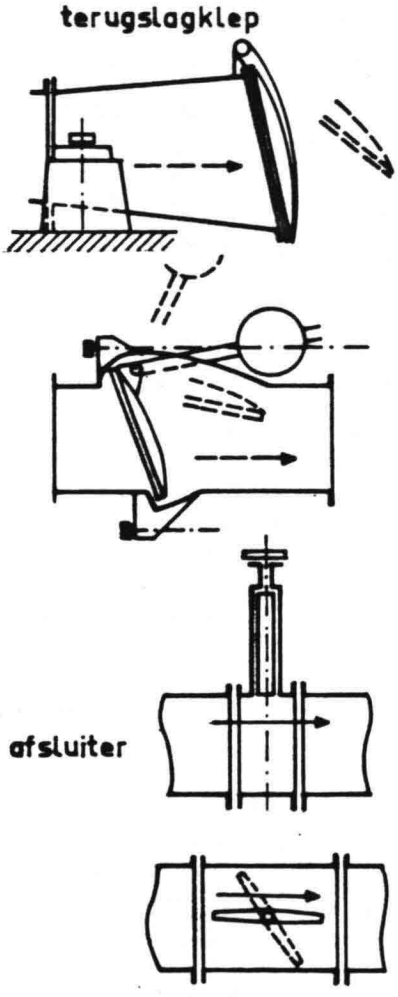
Q = capaciteit in m^3/sec.

H = manometrische opvoerhoogte in m

ρ = dichtheid water in kg/dm^3

η = rendement

Het door de motor te leveren vermogen ligt hoger met het oog op overbrengingsverliezen, klimaatomstandigheden en de wens om de motor op 85% à 90% van zijn maximum vermogen te laten functioneren.

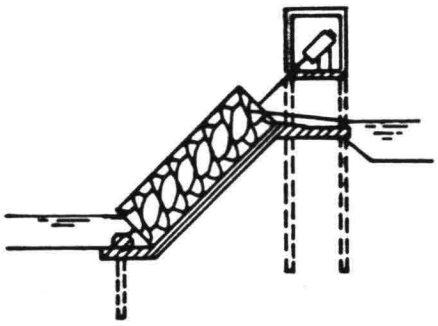


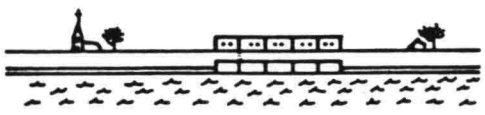
De <u>overbrenging</u> tussen motoras en pompas kent verschillende vormen. Het eenvoudigst is de direkte stijve verbinding. Een flexibele verbinding staat kleine afwijkingen toe in het uitlijnen van pomp en motor, maar is gevoelig voor trillingen. Daarnaast komen nog overbrengingen voor met tandwielkassen en met vloeistof-, wrijvings-, slip- of elektromechanische koppelingen.

Als <u>appendages</u> worden de terugslag- of keerklep ingebouwd en afsluiters of schuiven.

De <u>terugslagklep</u> voorkomt automatisch, dat het water terugstroomt door de stilgezette pomp en wordt in de persleiding achter de pomp gemonteerd. Hierdoor kan de pomp voor het in gebruik stellen ook worden ontlucht. Een terugslagklep moet zeer degelijk geconstrueerd zijn en direkt aan de funderingsvloer worden verankerd zodat er bij het dichtslaan van de klep geen krachten op de pomp worden uitgeoefend.

De <u>afsluiter</u> met schuif of klep, of soms deur(en), die met de hand, mechanisch of hydraulisch wordt gesloten heeft tot doel de pomp en leidinggedeelten te kunnen droogzetten voor onderhoud en reparatie.



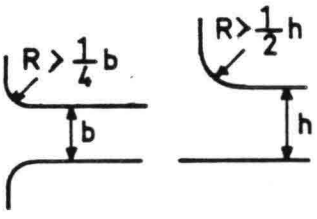


5. Pompgebouw en leidingen algemeen

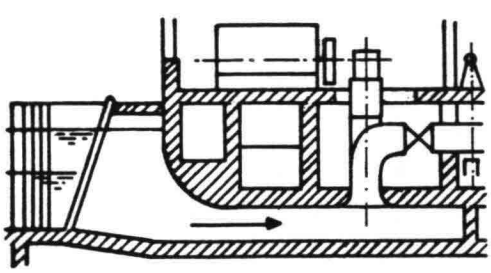
Een kleine installatie, bv. een klein vijzelgemaal, bestaat vaak uit niet meer dan de vijzel opgesteld in de open lucht, de motor met overbrenging ondergebracht in een stalen kast en een paar houten damwanden als keerwand en fundering. Rioolgemalen zijn veelal in een ondergrondse kelder ondergebracht en zijn bovengronds vaak niet zichtbaar.

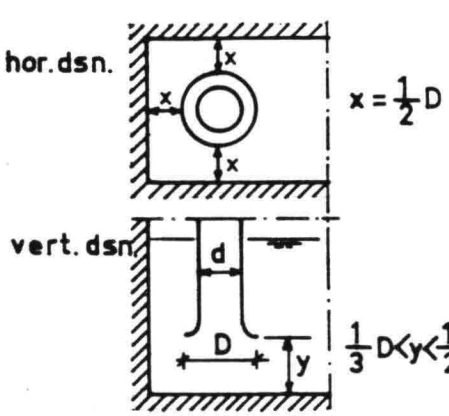
Van een gemaal voor een grote boezem daarentegen, gelegen op de grens van land en water bij een dijk kan het gebouw sterk domineren in het vlakke land en worden aan de vormgeving hiervan hoge eisen gesteld. Een pompstation voor een drinkwaterproduktiebedrijf is deel van een groter gebouwencomplex.

In het volgende zullen algemeen voorkomende aspecten worden behandeld.



De <u>toestroming van het water</u> naar het gemaal moet gelijkmatig zijn zonder bochten of hindernissen, zonder turbulenties en niet te snel. Elke vernauwing of verwijding van het instroomkanaal moet zeer geleidelijk verlopen. Rotatie moet worden vermeden, vooral bij een schroefpomp, evenals het aanzuigen van lucht (wervels). De instroomopening zelf moet geleidelijk verlopen met afrondingen op de hoeken; lage instroomverliezen met straal $R \geqslant \frac{1}{4}$ breedte b van de leiding bij tweezijdige afronding, bij eenzijdige afronding is $R \geqslant \frac{1}{2}$ b. Om turbulentie te voorkomen moet met het dubbele van deze waarden worden gerekend; de ellipsvorm voldoet het beste. Ook afrondingen in vertikale zin van de instroomkelder zijn nuttig, zeer effectief is het plaatsen van een plafond onder 45°.

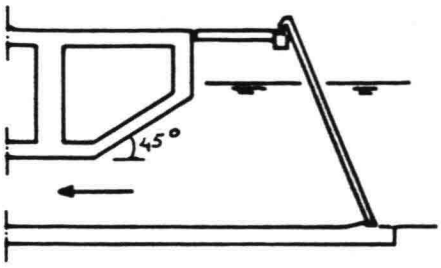




De zuigmond moet voldoende onder het laagst mogelijke waterpeil aan de zuigzijde worden geplaatst of worden uitgerust met een dak of drijvend schot boven de zuigmond om wervelbeweging met luchtaanzuiging te voorkomen. Een tussenwand onder de zuigbuis voorkomt werveling bij de instroming van de pomp, de instroombak wordt hierdoor symmetrisch in tweeën verdeeld. Om bouwkosten te sparen is er een streven de pomp aan de zuigzijde zo hoog mogelijk boven het waterniveau te plaatsen, wat dus een

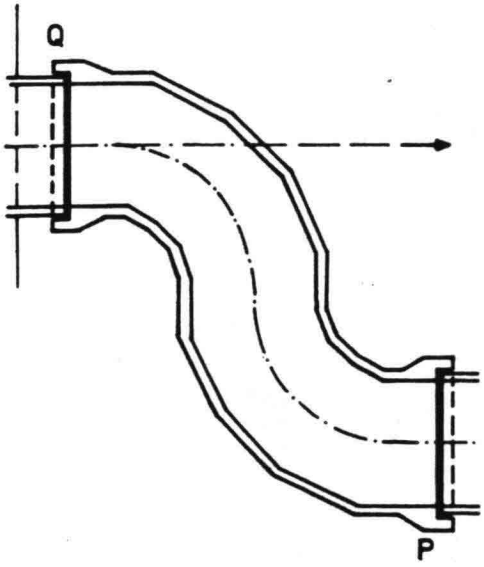
---

* Het waterloopkundig Laboratorium te Delft verricht modelonderzoek aan toestroming van pompen i.v.m. voorkomen van rotaties, turbulentie en luchtaanzuigen.



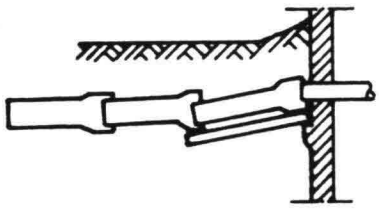
tegenstelling vormt met de bovengenoemde wens voor een plaatsing van de zuigmond voldoende ver onder het laagst mogelijke waterniveau en de eis om cavitatie bij de pomp te vermijden.
Als in het water vuil voorkomt, moet aan het begin van de toestroomopening een vuilrooster of krooshek worden geplaatst, dat met de hand of mechanisch regelmatig wordt schoongehouden. Het rooster moet voldoende sterk zijn om een verschil in waterstand te keren voor het geval er groot vuil, bv. een zeildoek, voor blijft zitten. Op een kroosbrug achter het krooshek kan het opgehaalde kroos en vuil uitzakken.

Aan de <u>uitstroming</u> worden minder zware eisen gesteld dan aan de instroming, wel moet aandacht worden besteed aan de mogelijkheid van aantasting door uitschuring van bodem en oevers aan de ontvangstzijde en eventuele hinder voor de scheepvaart. Behalve de bij appendages genoemde afsluiters aan de zuig- en perszijde voor het droogzetten, en de terugslagklep aan de perszijde om terugstromen van het water te beletten, wordt bij waterkeringen wel een extra afsluiter als zg. stormschuif toegepast uit een eis van veiligheid tegen overstroming.

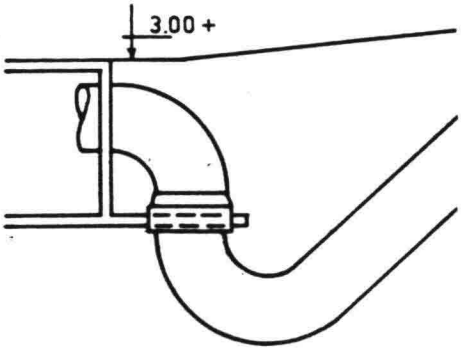


horizont. drsn.

Bij de <u>aansluiting van leidingen</u> aan het gemaal moet voor zuig- en persbuis gewaakt worden voor breuk t.p.v. de invoering van de leiding in het gebouw, voortvloeiend uit zettingsverschillen tussen gebouw en leiding. Dit klemt temeer als het gebouw op palen is gefundeerd en weinig zetting zal vertonen, maar de leiding op staal is gefundeerd, d.w.z. alle deformaties van de grond ondergaat. Vooral als de grond aan zetting onderhevig is door recente grondaanvullingen tengevolge van de bouw van het gemaal, of bv. door de ophoging van een dijk, moeten voorzieningen worden getroffen om leidingbreuk te voorkomen. Dit kan bv. door een speciaal overgangsstuk met elastische manchetten of een buislengte die bij de aansluiting aan het gebouw en aan

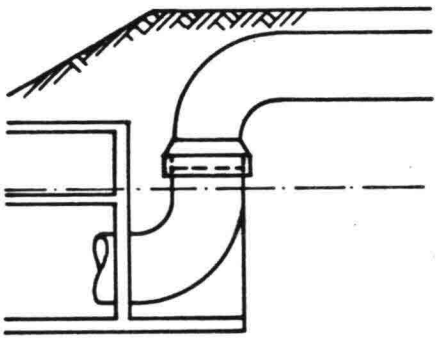


de andere zijde aan de leiding kan scharnieren.
Als ondersteuning kan een overgangsplaat dienen die aan de ene zijde vast wordt ondersteund door het gebouw en aan de andere zijde zakt met de grond.



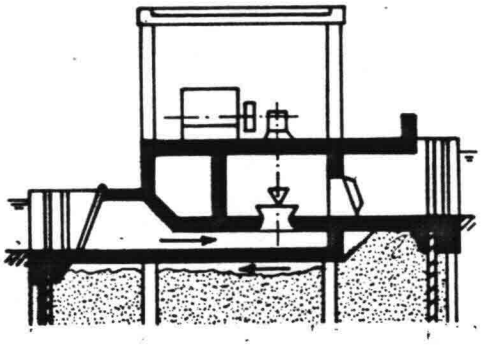
Als er grote zettingsverschillen worden verwacht past men ook wel een zwanehals toe, waarbij de leidingeinden in vertikale zin met vaar- en moereind in elkaar sluiten een vertikale verplaatsing ten opzichte van elkaar mogelijk is.

Bij een fundering van het gemaal op palen bestaat de mogelijkheid van het ontstaan van een holle ruimte onder de vloer door zetting van de grond. Dit vergt een zorgvuldige aansluiting aan het gebouw van de onderloopsheidsschermen, die dienen om de kwelweg te verlengen als het gemaal deel vormt van een waterkering.



vert.dsn.

Voor de funderingsberekening moet, behalve met het eigen gewicht van de installatie en het gebouw en transportbelastingen, soms ook met de dynamische belastingen door de installatie rekening worden gehouden.
Grote schroefpompen hebben een dynamische belasting van enkele tonnen (10^5 N). De dynamische belasting van schroef-centrifugaal, centrifugaal en kleine schroefpompen is veel geringer. Diesel- en gasmotoren geven een dynamische belasting, die van elektromotoren en gas- of stoomturbines is verwaarloosbaar. Om de hinder door trillingen te beperken kan bij een gemaal met een dieselmotor de fundering van de motor het beste los van de fundering van het gebouw worden gehouden. Ook de leidingen kunnen dynamische belastingen op het gebouw overbrengen, terugslagkleppen kunnen een stootbelasting geven.



Als voor een elektrisch gemaal elektriciteit van het hoogspanningsnet wordt betrokken, vraagt dit om een afzonderlijke traforuimte. De lengte van de toevoer-

kabel naar het gemaal wordt beïnvloed door de plaatskeuze. Als de elektriciteit wordt opgewekt door een dieselgenerator behoort deze in een afzonderlijk gebouw te worden ondergebracht met het oog op de geluidshinder.
De toegankelijkheid voor transport van de installatie, en bediening en onderhoud vraagt extra ruimte.
Voor montage en vervanging van pompen en motoren is een hijsinstallatie nodig, meestal in de vorm van een loopkraan.

6. Toepassingen

6.1. Waterbeheersing lage gebieden, bv. polders[1)]

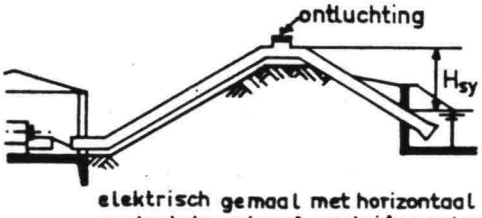
Het waterbezwaar van een polder kan bestaan uit het neerslagoverschot, kwelwater door dijken en uit de ondergrond, en schut- en lekwater van sluizen. Een natuurlijke wijze voor het verwijderen van dit water in een getijgebied is het te spuien via een uitlaatsluis tijdens laagwater.
Dit water moet kunstmatig worden verwijderd als het niet of onvoldoende op natuurlijke wijze kan worden afgevoerd. Een gemaal pompt dan het overtollige water op het buitenwater: de boezem, rivier of zeearm. Soms heeft een gemaal tevens een mogelijkheid om te spuien.
Een poldergemaal kan met vijzel, schroefpomp en schroefcentrifugaalpomp worden uitgerust. Voor een centrifugaalpomp zal het verval meestal te klein zijn. Bij wisselende opvoerhoogte en grote vermogens wordt wel een schroefpomp met regelbare waaier toegepast. Uit het oogpunt van bedrijfszekerheid past men wel twee pompen elk van de halve totale vereiste capaciteit toe; zo wordt bij grote polders met meer gemalen ook wel één dieselgemaal gebouwd als de overige gemalen elektrisch zijn.
Als de aansluiting op het elektriciteitsnet niet al te ver is verwijderd, wat nog beïnvloed kan worden door de plaatskeuze van het gemaal, zal men als regel een elektromotor toepassen.

Voor de plaatsing van het gemaal ten opzichte van de waterkering zijn mede bepalend de eisen van de beheerder van de waterkering en soms eisen t.a.v. landschappelijk schoon.

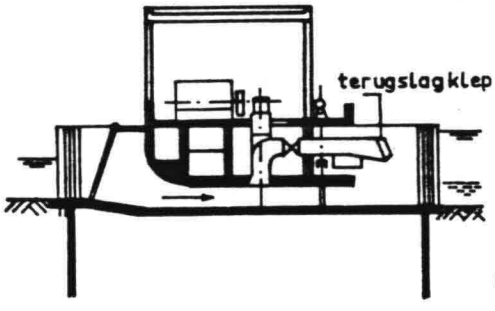
1) Zie: Technische Adviescommissie voor de waterkeringen:
-Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies in, op en nabij waterkeringen.
-idem voor vloeistofleidingen.
-idem voor gasleidingen.
Staatsuitgeverij.

elektrisch gemaal met horizontaal geplaatste schroefpomp

elektrische gemaal met horizontaal geplaatste schroefpomp, persleiding door de dijk



elektrisch gemaal met horizontaal geplaatste schroef-centrifugaalpomp persleiding over de dijk.



Een gemaal kan ten opzichte van de waterkering aan de zijde van het buitenwater, aan de zijde van het binnenwater of ín de waterkering worden geplaatst. De Technische Advies Commissie Waterkeringen schrijft voor dat bij voorkeur het gebouw geheel buiten het profiel van de waterkering moet vallen.

De leidingen,die het water toe- of afvoeren,kunnen door de waterkering lopen of eroverheen, waarbij door de hevelwerking opvoerhoogte kan worden teruggewonnen. In een persleiding moet behalve de terugslagklep een extra afsluitmiddel worden aangebracht dat in stromend water kan worden gesloten. Bij een hevelpersleiding met automatische vacuuminstallatie vervalt deze eis. Men geeft soms de voorkeur aan een zuigleiding door een waterkering boven een persleiding omdat in het laatste geval bij leidingbreuk of lekkage de schade aan de dijk ernstiger is. Het gemaal moet dan dus aan de buitenwaterzijde worden geplaatst. Bij een plaatsing aan de binnenwaterzijde kan de eis worden gesteld dat bij overstroming door dijkbreuk de motor niet onderloopt, òf door een hoge plaatsing òf door een waterdichte opstellingsruimte.

Vormt de constructie geheel of gedeeltelijk een deel van de waterkering, dan wordt onder- en achterloopsheid van de constructie vermeden door damwandschermen onder en naast de constructie, die bij detaillering van de aansluiting aan de constructie zorgvuldig ontworpen en uitgevoerd moeten worden. Ook bij zettingsverschillen tussen de constructie en het damwandscherm moet de aansluiting waterdicht blijven. De schermen moeten aan de bovenzijde tenminste reiken tot aan het ontwerppeil. Dit is de waterstand waarop waterkeringen moeten worden ontworpen. Dit peil is voor veel wateren officieel vastgelegd.

Aan de onderzijde zullen de schermen zo mogelijk reiken tot in een slecht doorlatende laag, of zo lang zijn dat de weerstand tegen kwel voldoende is om het meenemen van gronddeeltjes door de grondwaterstroming te

voorkomen. Hierbij moet rekening worden gehouden met de ongunstigste toestand wat het voorkomen van kieren tussen constructie en grond betreft en voor aanvullingsgrond met de grootst mogelijke waarde voor de doorlatendheid.

Bij een verhang i, en doorlatendheid van de grond k, is het debiet q per eenheid van oppervlak volgens Darcy

$q = k \cdot i$

Dit wordt bij benadering geschreven als

$v = \alpha k \frac{H}{L}$

waarin:

v = de werkelijke stroomsnelheid in de capillairen tussen de gronddeeltjes

k = de doorlatendheid van de grond

H = het verschil in waterstand ter weerszijden van de waterkering

L = de kwelweglengte

α = een coëfficient die met de wijdte van de capillairen verband houdt.

Als nu v een bepaalde waarde v_{cr} niet mag overschrijden, dan kan worden geschreven:

$$L = \frac{\alpha k H}{v_{cr}} \quad \text{of} \quad L = c_w \cdot H$$

Voor de verschillende cohesieloze grondsoorten kan een kritische toestand t.a.v. interne erosie worden bereikt als de co+ëfficient c_w daalt beneden de volgende waarden:

grondsoort	c_w
zeer fijn zand	8,5
fijn zand	7
middelfijn zand	6
grof zand	5
grind en steenstukken	4 - 2,5

Bij de vaststelling van de kwellengte L volgens bovenstaande tabel mogen de horizontale gedeelten maar voor 1/3 deel worden meegerekend. Hieruit volgt dus voor L:

$L = L_v + 1/3 \quad L_h$

waarin L_v de lengte voorstelt van de verticale kwelgedeelten en L_h de lengte van de horizontale kwelgedeelten. Als kwelweg kan in het algemeen de bovenste stroomlijn, die direkt langs en onder de constructie en de kwelschermen loopt, worden gekozen. Rekening moet worden gehouden met de mogelijkheid van een kortgesloten kwelweg, bv. bij twee of meer damwanden op korte afstand van elkaar en met de mogelijkheid van gapingen zoals bij een constructie op palen onder de vloer is te verwachten. In het laatste geval dient over dit gedeelte met $L_h = 0$ te worden gerekend.
De zakking van de grond ten opzichte van een op palen gefundeerde constructie geeft, behalve de kans op onderloopsheid en de belasting door negatieve kleef op de palen en de damwandschermen, ook horizontale gronddruk op de randpalen. De hiermee gepaard gaande doorbuiging van de randpalen kan schade aan de constructie geven.

Als de onderkant van een leiding in de waterkering nergens reikt tot boven het ontwerppeil, moet zij worden voorzien van één of meer kwelschermen, die waterdicht met de leiding dient te worden verbonden.

Waar het gebouw op het dijklichaam aansluit, zal veelal een overgang, bv. een vleugelwand in de vorm van een damwand, worden aangebracht. De detaillering van de aansluiting van deze damwand aan het gebouw moet het mogelijk maken dat de damwand vertikaal kan zetten ten opzichte van het gebouw, zonder dat de gronddichting verloren gaat.

De besturing van een gemaal zal zo mogelijk geheel automatisch, zonder direkt toezicht worden geregeld. De pompen slaan dan af en aan op commando van vlotters die de waterstanden meten, waarbij afwijkingen van de normale bedrijfssituatie tot uitschakeling

leiden. Via automatische telefoonkiezers wordt dan het personeel gewaarschuwd.

6.2. Watertoevoer hoge gebieden

Om hoger gelegen gronden ten behoeve van landbouw en scheepvaart van water te voorzien, maalt men dit met een gemaal op uit een lager gelegen boezem, kanaal of rivier. Evenals een poldergemaal zal een inlaatgemaal worden uitgerust met een vijzel, een schroefpomp of een schroef-centrifugaalpomp. De aandrijving geschiedt als regel door elektromotor of dieselmotor. Een inlaatgemaal is soms gesitueerd bij een schutsluis in een scheepvaartkanaal en kan bij voldoende capaciteit zowel voor voeding van het hoge kanaalpand dienen als voor de landbouw, die water onttrekt uit het kanaal. Soms bouwt men een gemaal met tweeledige functie: in het waterarme seizoen pompt men water uit de boezem náár het landbouwgebied, in het waterrijke seizoen pompt men in de andere richting overtollig water uit het gebied op de boezem.

Hoewel een waterscheiding tussen bv. een hoger en een lager kanaalpand een ander karakter heeft dan een dijk van een polder waar het overstromingsgevaar een rol speelt, zijn er bij de situering en constructie van een inlaatgemaal overeenkomstige aspecten als bij een poldergemaal.
Met het oog op onder- en achterloopsheid worden damwandschermen aangebracht. De detaillering van de aansluiting van de schermen aan het gebouw hangt samen met de funderingswijze: op staal of op palen.
De aansluiting van grondkerende damwanden of vleugelmuren en van leidingen aan het gebouw moet zettingsverschillen kunnen verdragen. Voor gebruik in ontwikkelingslanden worden t.b.v. irrigatie drijvende pompstations ontworpen. Deze worden elders geprefabriceerd en kunnen, als dit later door het verplaatsen van de rivier nodig blijkt, ook gemakkelijk worden verplaatst.

6.3. Vul- en ledigsysteem schutsluis

Behalve voor het terugbrengen van water op het hoge kanaalpand zoals genoemd in paragraaf 6.2, wordt bij

een schutsluis ook wel een gemaal geïnstalleerd ten behoeve van het vullen en ledigen. Met name is dit het geval bij een schutsluis die een scheiding vormt tussen zout en zoet water en waarbij men de uitwisseling van zout tegen zoet water wil tegengaan.
Met behulp van één of meer gemalen worden dan bufferbekkens op peil gehouden, vanwaaruit het zoute water wordt in- en uitgelaten, of men pompt het zoute water direkt uit de sluis naar het zoute pand terug. Een bufferbekken heeft als voordeel dat met een kleine pomp kan worden volstaan.

6.4. Spaarbekkens voor energie-opslag

Door de overcapaciteit van de elektriciteitsvoorziening in de stille nachturen te benutten voor energie-opslag, waaruit tijdens de piekuren overdag elektriciteit aan het net kan worden geleverd, hoeft de investering in elektrische centrales niet op de piekbelasting te worden afgestemd en wordt brandstof bespaard. In berggebieden worden daartoe hooggelegen spaarbekkens ingericht, waarin 's nachts water wordt opgepompt, dat tijdens de piekafname overdag terugstroomt naar een laaggelegen reservoir. Het vallende water drijft turbines aan die elektriciteit opwekken. Toepassing van omkeerbare pompturbines maakt het mogelijk de pomp die het water omhoog pompt, bij terugdraaien elektriciteit te laten leveren. Met pompturbines kan men thans een hoogteverschil tot 1450 m overwinnen. Eenzelfde doel heeft een vooronderzoek voor een ondergrondse pompaccumulatiecentrale (OPAC) bv. in Limburg, waarbij gebruik wordt gemaakt van één bovengronds waterbekken en twee ondergrondse waterreservoirs, één op een diepte van -600 meter en één op -1200 meter. Het ontwerp met een tussengelegen reservoir vloeit voort uit de toepassing van omkeerbare pompturbines van het type Francis, met een opvoer/valhoogte van 650 m. De beide ondergrondse reservoirs bestaan uit een stelsel van tunnels in het carboon; men denkt o.a.

Zie bijlage 2

aan de voormalige Beatrix-kolenmijn. De pompturbines staan opgesteld bij de ondergrondse reservoirs, de watermassa pendelt heen en weer tussen het bovengrondse reservoir en de beide ondergrondse reservoirs tijdens pompbedrijf en turbinebedrijf.

Zie bijlage 2

Voor de Markerwaard is het plan-**Lievense in onderzoek,** dat beoogt het water in de Markermeer 12 meter omhoog te brengen met behulp van windenergie en deze om te zetten in elektrische energie door het water terug te laten stromen door turbines. Gebruik als pompaccumulatiecentrale is ook mogelijk bij toepassing van pompturbines.
Een overeenkomstig project is denkbaar op een locatie in de Noordzee, waarvoor een zandeiland zou moeten worden gemaakt.

6.5. Drinkwatervoorziening; rioolwaterafvoer

Pompstations in de drinkwater- en industriewatervoorziening, zoals die voor het oppompen van grondwater uit diepe watervoerende lagen, inlaatpompstations voor oppervlaktewater en hogedrukpompstations voor de aanvoer in het leidingnet worden uitvoerig behandeld in het collegediktaat Gezondheidstechniek "Energievoorziening, pompen en motoren" door ir. J.F. Duin.
Een verschil met de eerder behandelde gemalen is het voorkomen van lange transportleidingen, waarin door de traagheid van het water drukgolven ontstaan bij plotselinge toe- of afname van de stroomsnelheid. Het gevaar van openbarsten of inklappen van zo'n leiding door waterslag wordt soms ontgaan door het inbouwen van een open stijgschacht, een gesloten windketel, een vacuum-ventiel of een vliegwiel op de pomp.
Rioolwaterpompstations worden ook in bovengenoemd collegediktaat uitvoerig behandeld.
Een tussengemaal pompt het water onderweg omhoog om een te diepe ligging van het hoofdriool, waarin het water onder invloed van de zwaartekracht afstroomt, te vermijden. Een eindgemaal brengt het rioolwater in de zuiveringsinstallatie of op het open water.

6.6. Koelwatervoorziening

Voor industriële processen en elektriciteitscentrales die veel (koel)water vragen bouwt men pompstations. Deze kunnen het water betrekken uit het oppervlaktewater, wat bij elektriciteitscentrales gebeurt, of uit het grondwater.

Opmerking

In het algemeen zal met een zekere hoeveelheid aan reservecapaciteit worden gerekend met het oog op onderhoud e.d.

Literatuur

J. Wijdieks
"Pomp, wie wat hoe"
WL-Intern extra (W.L. : WATERLOOPKUNDIG LAB. · DELFT)

J. Wijdieks
"Hydr. aspecten bij het ontwerpen van pompinstallaties"
WL-publ. 43 N

A. Quist, J. de Jong, G.A. Provoost, R.G. Boiten
"Transporteren van vloeistoffen pompen, meten en regelen"
WL-publ. 197 N

Bos, J. Wijdieks
"Landdrainage pumps"
WL/ILRI publ. in bewerking

I.E. Idel'cik
"Memento des pertes de charge"
Eyrolles edit., Paris 1960

A. Lencastre
"Manuel d'hydraulique generale"
Eyrolles edt., Paris 1969

J. Wijdieks
"Cavitatie in pompen, waterslag in leidingen, aanstromingscondities"
Stichting Post-academiale vorming Gezondheidstechniek cursus 1972-1973 - Gebruik van pompen in de watervoorziening

A. Nouwen
"Pompen 1"
Stam Technische Boeken

Lazarkiewicz Troskolanski
"Impeller pumps"
1965, Pergamon Press

A.H. de Vries
"Hydraulic aspects of cooling water systems for thermal power plants"
1974, WL-publ. B 6

A.L. Manuel
"Waterslag in drukleidingen"
WL-publ. 54 N

Nuhoff, Vreugdenhil, Wijdieks
"Compating technique for non-permanent flow in closed conduits"
1969, WL-publ. 68

Kloosterman, Kranenburg, De Vries, Wijdieks
"Niet-stationaire stromingsverschijnselen in transportleidingen voor vloeistoffen"
WL-publ. 109 A

J. Wijdieks
"Transport en opslag van vloeistoffen"
WL-publ. N

J. Wijdieks
"Wrijvingsverliezen en waterslag bij watertransportleidingen"
WL-publ. 142 N

A.J. Stepanoff
"Centrifugal and axial flow pumps"
John Wiley and Sons

M.J. Prossen
"The hydraulic design of pumps and intakes"
BARA publ., July 1977

J. Jansen, C.J.M. Rommens
"Krooshekreinigers"
Cultuurtechn. Tijdsch., 19 (1979)3, okt./nov., pp. 109-120

International Organization for Standardization
"Centrifugal, mixed flow and axial pumps - Code for acceptance tests - Class C.,"
Geneva, ISO, (1973), ISO 2548, 34 pp., 5 append.

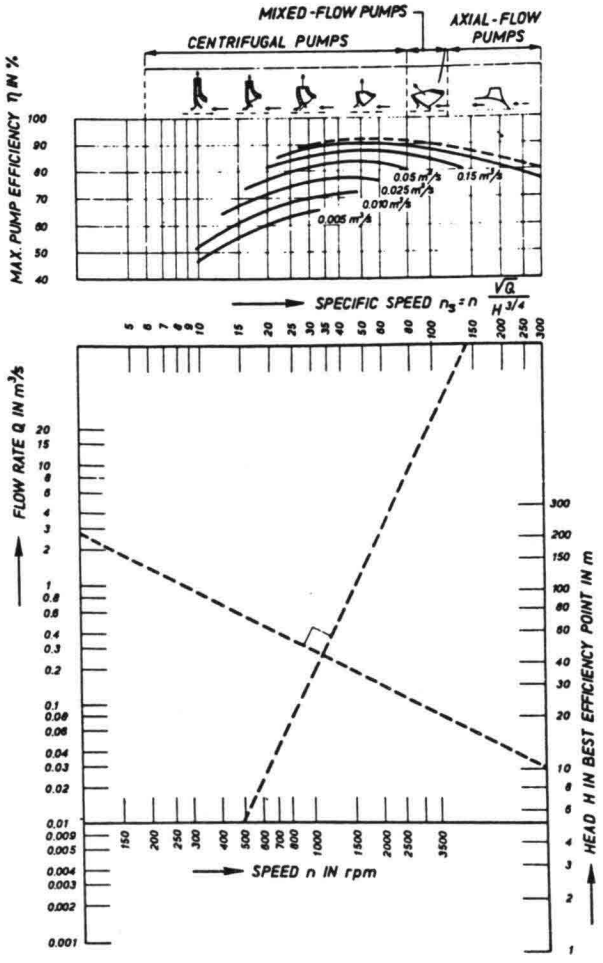


Fig. 3a: Nomogram for determining type of pump and efficiency.

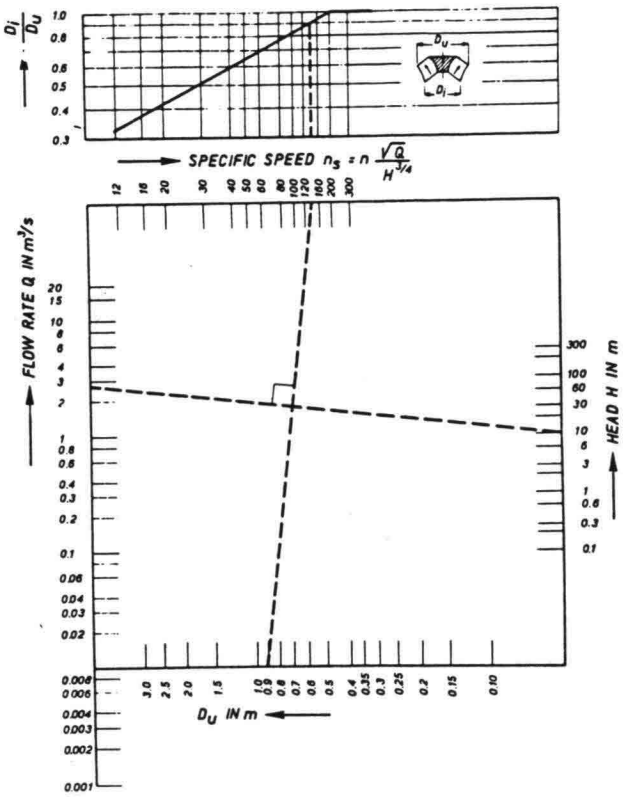


Fig. 3b: Nomogram for determining impeller size.

be characterized by the dimensionless specific speed n_s^1, *relating to the best efficiency point of the pump:*

$$n_s^1 = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}}$$

where:

n_s^1 = specific speed (dimensionless)
n = pump speed
Q = pump flow rate
g = acceleration due to gravity
H = manometric head

} all to be expressed in the same system of units

Unfortunately it has become usual in practice to introduce the non-dimensionless quantity specific speed:

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

where:

n_s = specific speed (dimensional)
n = speed of the pump in rpm
Q = flow rate of the pump in m³/s
H = manometric head in m.

(in Anglo-American countries n in rpm, Q in gallons per minute, H in feet)

When metric units are used, the limits of the various types of pumps are then as shown in Fig. 3a.

b. *Choice of pump*

For the choice of a pump it is necessary to know the flow rate and the manometric head (corresponds to static head plus losses in pipes). Now once the speed of the pump has been chosen, the specific speed and thus the type of pump are determined. With regard to this choice it should be remarked that at every specific speed a certain maximum pump efficiency (ratio between the pump delivery and the power supplied to the pump shaft) can be achieved; as Fig. 3a shows, this can increase to 90%. At the same time a higher specific speed leads to a smaller pump and cheaper motors, against which a reduction in the suction head to avoid cavitation (see inflow conditions) has to be accepted. Once the specific speed, and therefore the pump type is fixed, the pump best corresponding to this can be selected from the manufacturing programme. For large pumps (e.g. for dry docks) that lie outside the standard manufacturers' programmes, the pump design can in the first instance be derived by means of affinity laws from an existing pump with the same specific speed as the pump to be designed in accordance with:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2}\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{or} \quad \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_1}$$

where:

D_1 = diameter of the impeller in the existing pump
n_1 = speed of existing pump
H_1 = manometric head of existing pump
Q_1 = flow rate of existing pump
D_2 = diameter of impeller of pump to be designed
n_2 = speed of the pump to be designed
H_2 = manometric head of pump to be designed
Q_2 = flow rate of pump to be designed.

Valid for identical specific speeds of existing pump and pump to be designed

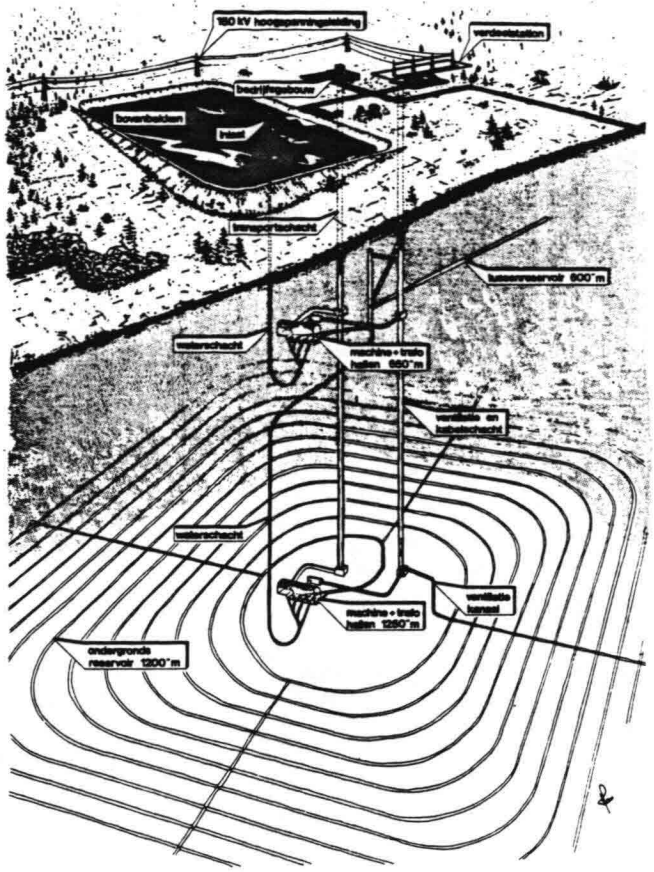
This leads to a nomogram as shown in Fig. 3b, which can serve as a guide for determining the size of pumps.

The power to be used is:

$$N = \frac{\rho g Q H}{\eta_{tot}}$$

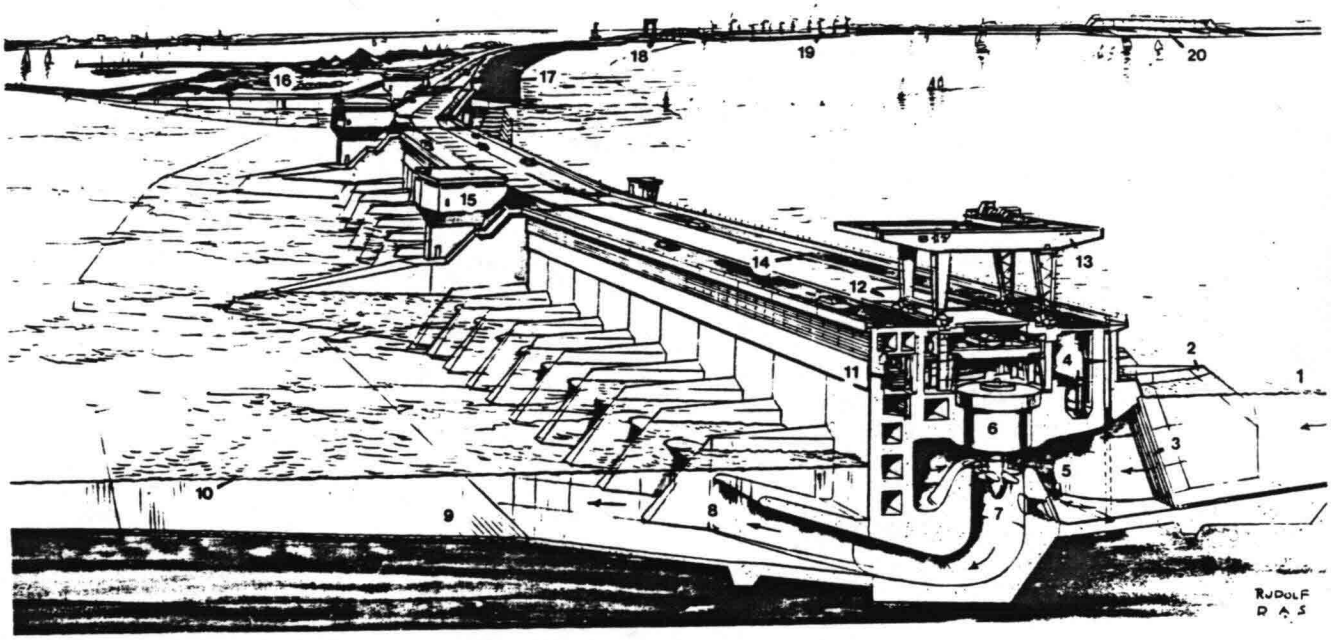
where:

N = power in watts
ρ = density of fluid in kg/m³
g = acceleration due to gravity in m/s² = 9.81 m/s²
Q = pump flow rate in m³/s
H = manometric head in m
η_{tot} = total efficiency (efficiency of pump and drive).



Impressie 800 MW O.P.A.C.

Het plan 'Lievense' voor de Markerwaard.



1 Waterpeil Markermeer circa twaalf meter boven NAP
2 IJssnijders op de inlaatpoorten
3 Grof vuil rooster
4 Hydraulisch bediende inlaatschuiven
5 Inlaatkanaal naar turbine
6 Generator gekoppeld aan turbine
7 Uitstroomkanaal direct na turbine nog rond
8 Rechthoekig, vergroot uitstroomkanaal
9 Bodembescherming
10 Waterpeil van randmeren ongeveer NAP
11 Transformatoren en hoogspanningsleidingen
12 Afneembare luiken boven turbine-generatorenhal
13 Verplaatsbare portaalkraan voor onderhoudswerk
14 Vier rijbanen over het waterkracht complex
15 Bedieningsruimten
16 Lang buitentalud van stuwmeerdijk met recreatie
17 Kort binnentalud bedekt met asfalt
18 Sluis of schepenlift voor kleine vaartuigen
19 Groep conventionele windmolens
20 Groep Darrieus-molens onder speciale overkapping

Het meren van VLCC's in Europoort

Hoe dat gaat
Opmerkingen
Vragen

door C.H.A. van Putten, havenloods in Europoort

Februari 1981

1. Inleiding

2. Manoeuvreereigenschappen
2.1. Op zee
2.2. In nauw vaarwater
2.3. In havenbekkens

3. Omstandigheden
3.1. Stroom, wind, seiches, zicht
3.2. De locatie
3.3. Effecten van configuraties

4. Plannen
4.1. Vaarplan
4.2. Aanlegplan
4.3. Meerplan

5. Assistentie van buitenaf
5.1. Bakens
5.2. Walradar

6. De toestand aan boord
6.1. Technische gegevens
6.2. Relatie gezagvoerder - loods
6.3. Crew-behaviour
6.4. Alternatieve plannen, risico's

7. Uitvoering der plannen.

1. Inleiding

Het meren van een VLCC is een lastig en gecompliceerd karwei omdat de daarbij optredende krachten zeer groot, variabel en soms onderling afhankelijk zijn.
De gedurende een 10-tal jaren opgedane ervaring in het hanteren van VLCC's zou, meer nog dan thans het geval is, door wetenschappelijk onderzoek ondersteund en verrijkt kunnen worden.
Bij grote schepen gaat het meren zeer langzaam; afmetingen en afstanden zijn groot. Hoe groter het schip hoe langzamer het meren verloopt. Processen zullen wellicht ooit zo langzaam gaan verlopen dat de menselijke zintuigen ontoereikend zijn om ze te kunnen volgen en te kunnen beoordelen.
Deze notitie heeft het oogmerk een globaal inzicht te geven in de dagelijkse praktijk van het binnenbrengen en het meren van VLCC's in Europoort en in de moeilijkheden die daarbij optreden.

Een tanker met een draagvermogen van meer dan 200.000 ton wordt hier een VLCC (Very Large Crude Carrier) genoemd.

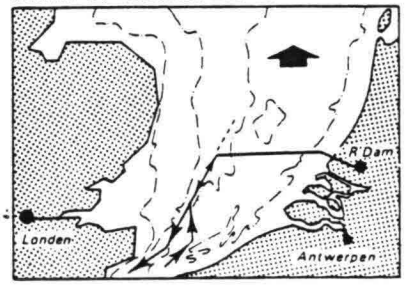
Overzicht van de afmetingen van in de vaart zijnde olietankers.

Tonnage (dwt)	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepgang (m)
20.000	170	22	9
50.000	220	30	12
100.000	250	40	15
200.000 (VLCC)	310	50	20
540.000 (VLCC)')	414	63	$28\frac{1}{2}$

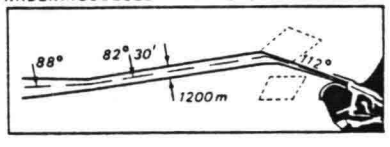
') ss "Batillus" (1976)

Slechts weinig havens zijn diep genoeg voor volbeladen VLCC's. Ook toegangswegen kunnen te ondiep zijn. Voor de mond van de Nieuwe Waterweg is de zee te ondiep. In de zeebodem is een geul gebaggerd waardoor Europoort bereikbaar is geworden voor schepen met een diepgang van 21 meter. Er bestaan plannen deze "Eurogeul" verder uit te diepen.
Voor volbeladen VLCC's zijn in Europoort 14 losplaatsen beschikbaar aan in het water uitgebouwde T-steigers en vingerpieren.

KANAAL EN NOORDZEE ROUTES



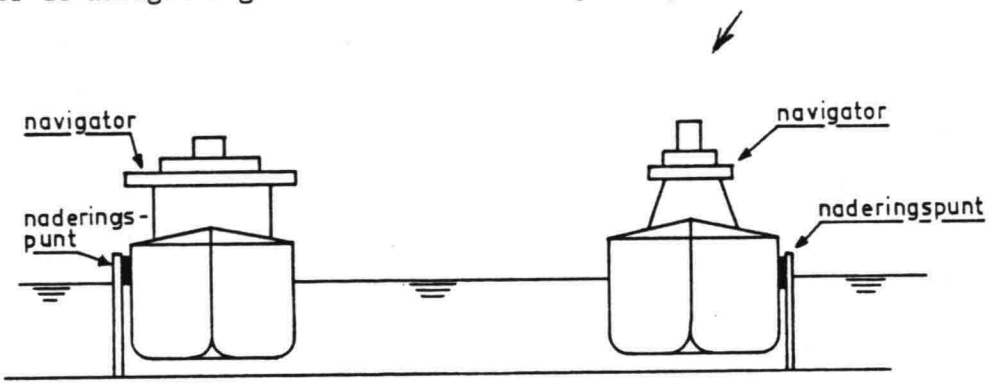
NADERINGSGEULEN ROTTERDAM



HAVENGEBIED GROTE TANKERS

De navigator verkrijgt de informatie voor zijn handelen langs zintuigelijke weg, maar niet alle informatie laat zich langs die weg vaststellen, er ontgaat hem dus informatie. De massa van een VLCC - anders dan bij een handslinger - laat zich niet zintuigelijk vaststellen. Van versnellingen wordt men niets gewaar, zelfs niet bij aan de grond lopen. Het bepalen van afstanden en kleine snelheden waarmee de ligplaats wordt genaderd levert eveneens moeilijkheden op. Binnen handbereik is een snelheid van enige cm/sec wel waar te nemen, maar de navigator bevindt zich op een VLCC doorgaans op tientallen of zelfs honderdtallen meters afstand van dat deel van het schip dat nog slechts enkele meters van de steiger is verwijderd.

En soms is de constructie van de brug zodanig dat de naderingspunten voor de navigator geheel niet te zien zijn, z.g. torenbruggen.



Niet waarneembaar is voorts welke krachten er worden uitgeoefend door het in beweging gebrachte omringende water, enz., enz.
Toch blijkt de mens in staat te zijn de nodige vaardigheid op te doen om zonder al te veel risico's deze grote en zware objecten te hanteren.

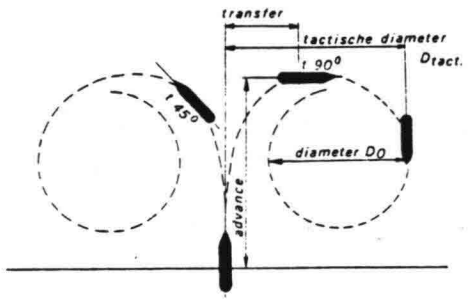
Vraag: Vereisen grotere schepen fijnere zintuigen? En zo ja, bij welke scheepsgrootte schieten de menselijke zintuigen tekort?

Het meren van schepen, ook van VLCC's is handwerk. Zintuigelijke waarneming en menselijk oordeel bepalen hoe en wanneer de verschillende middelen (schroef, roer, sleepboten, e.d.) zullen worden aangewend. Weliswaar hebben velen, waaronder grote oliemaatschappijen, onderzoekingen verricht naar scheepsgedrag maar daar is bij het meren van een VLCC in de praktijk niet zo erg veel van te merken. Door de schaalvergroting in de scheepsbouw zijn de objecten en middelen veranderd, dat wel, maar het meren van een VLCC verschilt in wezen niet van de manier waarop - lang geleden - de batavier zijn vlot naar de wal stuurde. 'Hoe hou ik het zaakje heel' is een nog immer actuele vraag waarop het antwoord telkens opnieuw en voor elk schip afzonderlijk moet worden gevonden.
Ook heden is de navigator niet in staat belangrijke grootheden als (naderings-)snelheid, arbeidsvermogen van beweging van het schip en het meestromende omringende water, de op dat moment beschikbare en noodzakelijk aan te wenden krachten, de effecten van het weer, enz. ter plaatse te kwantificeren. Deze grootheden werden en worden geschat.
De slagregen in zijn gezicht, het huilen van de wind, het onderling verschuiven van lichtpunten in de nacht en vooral zijn herinnering, zijn ervaring zijn de indicaties waaruit het handelen van de navigator voort-

spruit. Gezien de hedendaagse mogelijkheden om te meten, eigenlijk een primitieve werkwijze. Een primitiviteit die op zichzelf niet bijzonder of bezwaarlijk behoeft te worden genoemd als we bedenken dat er dagelijks vele handelingen plaatsvinden, autorijden e.d., zonder dat men zich rekenschap geeft van eventueel relevante, mechanische wetten.

2. Manoeuvreereigenschappen

Manoeuvreereigenschappen kunnen tot op zekere hoogte in een schip worden ingebouwd. Ze veranderen echter onder invloed van het weer (wind en golfslag) en bij verschillende beladingstoestanden (vol - leeg; koplast - stuurlast). Van de meeste schepen worden tijdens de nieuwbouw-proefvaarten op zee manoeuvreereigenschappen opgemeten, zoals: draaicirkel, advance, transfer, tactische diameter, rate of turn, crash-stop.
Opmeten van manoeuvreereigenschappen in ondiep water is niet gebruikelijk.



De gevonden karakteristieken gelden voor diep water en voor de beladingstoestand en voor de weersomstandigheden ten tijde van de metingen. Het is niet gebruikelijk bij het meren de manoeuvreerkarakteristieken te raadplegen; gesteld kan worden dat na te zijn vastgesteld er nooit meer naar gekeken wordt. Degeen die zich dagelijks bezighoudt met manoeuvreren in beperkte ruimte vindt er niets bruikbaars in.
Stelling. Een schip met vloeibare lading kan gemakkelijker worden gezwaaid dan een schip met vaste lading omdat het min of meer om de lading heendraait als een kopje om de thee.
Vraag. Is dat zo?

2.1. Op zee

Op zee wordt de kortste weg gezocht, rechte lijnen van kaap tot kaap. Onder normale, gunstige omstandigheden blijft het manoeuvreren op zee beperkt tot uitwijken voor andere scheepvaart, meestal een tijdelijke koersverlegging; daar komen geen manoeuvreerkarakteristieken aan te pas. Bij storm zijn de weersomstandigheden doorgaans dermate verschil-

lend van het weer-tijdens-de-metingen dat de karakteristieken niet meer kloppen. In noodsituaties zullen manoeuvreerkarakteristieken veelal in de kast blijven.
Praktische waarde hebben ze om aan te geven of een schip bijzondere, sterk van de verwachting afwijkende eigenschappen vertoont.

Op zee wordt bij de navigatie gerekend in mijlen en knopen, het schip is een punt op de kaart. In nauw vaarwater, in de Eurogeul, gaan de scheepsafmetingen een rol spelen; men denkt dan meer in termen van scheepslengten en honderden meters. In de haven wordt meer in scheepsbreedten en tientallen meters gedacht. Bij het meren uiteindelijk wordt gewerkt met meters en centimeters per seconde.

Bij een varend schip wordt niet alleen het schip maar voortdurend ook een grote hoeveelheid water verplaatst. Vaart het schip met een eenparige snelheid dan is er geen arbeid meer nodig om die snelheid te behouden. Het gehele machinevermogen gaat verloren aan het verplaatsen van water. De manoeuvreereigenschappen worden door dat verplaatste water niet aangetast. Het schip vindt steeds min of meer stilstaand water voor de boeg en laat turbulent water achter zich.

2.2. In nauw vaarwater

Indien we manoeuvreereigenschappen op ruim en diep water en bij mooi weer aanduiden met de term Primitieve Manoeuvreereigenschappen (PME) dan kan worden opgemerkt dat PME niet alleen door beladingstoestanden, weer en zeegang worden beïnvloed, maar ook door ondiepte, oever- en bodemconfiguratie van nauw vaarwater.

In beweging gebracht water kan niet zoals op zee vrijelijk stromen maar wordt tussen de smalle ruimte tussen schip en bodem of schip en oever doorgeperst; dat beïnvloed de PME.
Ondiepte veroorzaakt squat; oevers cushion-effect en zuiging.

Squat is kwantificeerbaar aan de hand van door o.a. de Nederlandse Waterstaat uitgegeven tabellen.

INZINKING (squat) op voorloodlijn (V_{LL})

VOORBEELD: 1 (GELIJKLASTIG)

DIEPGANG T = 62 ft
WATERDIEPTE D = 23 m
SNELHEID V_s = 10 kn

INZINKING voorloodlijn is dan 2,5 ft (zie tabel)

DIEPGANG IN FT	WATERDIEPTE IN M	INZINKING V_{LL} IN FT BIJ VAART IN KN					BEELCLEARANCE IN %
		6 kn	8 kn	10 kn	12 kn	14 kn	BIJ SNELHEID 0
42	14 - 18	1	1,5	2,5	3,5	4,5	9 - 40
42	18 - 23	1	1,5	2	3	4	40 - 80
42	23 - 30	0,5	1	1,5	2	3	80 - 134
52	18 - 22	1	1,5	2,5	3,5	4,5	14 - 39
52	22 - 28	1	1,5	2	3	4	39 - 77
52	28 - 30	0,5	1	1,5	2	3	77 - 89
57	20 - 24	1	1,5	2,5	3,5	4,5	15 - 38
57	24 - 30	1	1,5	2	3	4	38 - 59
62	21 - 26	1	1,5	2,5	3,5	4,5	11 - 38
62	26 - 30	1	1,5	2	3	4	38 - 59
65	23 - 28	1	1,5	2,5	3,5	4,5	16 - 41
65	28 - 30	1	1,5	2	3	4	41 - 52

VOORBEELD: 2 (SCHUIN)

DIEPGANG $T_{V_{LL}}$ = 62 ft, $T_{A_{LL}}$ = 60 ft | T_{gem} = 61 ft
WATERDIEPTE D = 23 m
SNELHEID V_s = 8 kn

INZINKING voorloodlijn volgens tabel 1,5 ft

vermeerderd met SCHUIN FAKTOR $\frac{62 - 60}{2}$ = 1 ft

Totale INZINKING voorloodlijn 1' + 1,5' = 2,5 ft

INZINKING (squat) op achterloodlijn (A_{LL}) in geval van stuurlast

opm: Voor gelijkvormige toestand is de V_{LL} maatgevend z.o.z.

DIEPGANG IN FT	WATERDIEPTE IN M	INZINKING A_{LL} IN FT BIJ VAART IN KN					BEELCLEARANCE IN %
		6 kn	8 kn	10 kn	12 kn	14 kn	BIJ SNELHEID 0
42	14 - 18	0.5	1	1.5	2	2.5	9 - 40
42	18 - 23	0.5	1	1	1.5	2	40 - 80
42	23 - 30	0.5	0.5	1	1	1.5	80 - 134
52	18 - 22	0.5	1	1.5	2	2.5	14 - 39
52	22 - 28	0.5	1	1	1.5	2	39 - 77
52	28 - 30	0.5	0.5	1	1	1.5	77 - 89
57	20 - 24	0.5	1	1.5	2	2.5	15 - 38
57	24 - 30	0.5	1	1	1.5	2	38 - 59
62	21 - 26	0.5	1	1.5	2	2.5	11 - 38
62	26 - 30	0.5	1	1	1.5	2	38 - 59
65	23 - 28	0.5	1	1.5	2	2.5	16 - 41
65	28 - 30	0.5	1	1	1.5	2	41 - 52

VOORBEELD: 3 (STUURLAST)

DIEPGANG $T_{V_{LL}}$ = 60 ft, $T_{A_{LL}}$ = 62 ft | T_{gem} = 61 ft
WATERDIEPTE D = 23 m
SNELHEID V_s = 8 kn

INZINKING achterloodlijn volgens tabel 1 ft

vermeerderd met STUURLAST FAKTOR $\frac{62 - 60}{2}$ = 1 ft

Totale INZINKING achterloodlijn 1' + 1' = 2 ft

Zeegang, met name laagfrequente golven veroorzaken bij een VLCC slinger- en stampbewegingen.
Laagfrequente golven zijn visueel niet vast te stellen. In Hoek van Holland is een meetsysteem aanwezig.
Hieraan kunnen geen praktische aanwijzingen worden ontleent, slechts indicatieve informatie. Zijn stamp- en slingerbewegingen eenmaal aan boord gemeten, dan kan diepgangsvermeerdering worden uitgerekend.
Deze slinger- en stampbewegingen zijn afhankelijk van de richting, amplitude en frequentie van de golven en van de koers, snelheid en eigen slingertijden van het schip.
Vraag: Zijn de eigen slinger- en stampbewegingen van een VLCC ook mede afhankelijk van de viscositeit (de temperatuur) van de lading?
Vraag: Achteroplopende deining kan de besturing van kleinere schepen ernstig bemoeilijken, dat is duidelijk waar te nemen. Doet datzelfde verschijnsel zich ook bij VLCC's voor, maar blijft dat onopgemerkt (of aan iets anders geweten) omdat het te langzaam verloopt, te lang-

zaam voor onze zintuigen?

In nauw vaarwater worden de PME voorts beïnvloed door de eventueel achteruitwerkende machine, de z.g. schroefslag.
Deze invloed is niet kwantificeerbaar.
Voorts ondervinden varende schepen cushion- en zuigingseffecten van elkaar en kunnen zij voor elkaar de wind onderscheppen. Ook dat heeft invloed op de PME. Tot op heden zijn ze niet kwantificeerbaar.
Een plaatselijk bekende navigator weet in min of meerdere mate waar en wanneer welke effecten plegen op te treden. Hij zal correctiemiddelen achter de hand houden en indien mogelijk die effecten voorkomen.
Bij dit laatste zijn tegenstrijdigheden mogelijk.
B.v. te grote (stroom)drifthoeken worden verkleind met meer snelheid; te veel zuiging wordt verminderd met minder snelheid.

2.3. In havenbekkens

Hier zijn de snelheden en daarmee de waterweerstanden dermate gering dat bij verplaatsing van een VLCC zijn massa een dominerende rol gaat spelen. Ook manoeuvreereigenschappen-uit-stilstand worden belangrijk.
Geringere keel-clearance veroorzaakt een grotere schroefslag bij achteruitwerkende machine.
Het roer verliest zijn effect als de machine is gestopt of achteruitwerkt, waarmee koersstabiliteit of koersinstabiliteit van het schip dan weer een factor wordt waarmee rekening gehouden moet worden.
Ligt het schip stil of vaart het achteruit en werken haar eigen voortstuwer en die van de sleepboten dan krijgen we waterturbulentie die weer op het schip inwerkt. In doodlopende havenbekkens kan ook opstuwing ontstaan, ook dat geeft een plaatselijke waterbeweging die effect op een schip kan hebben.
Er doen zich in Europoort enige verschijnselen voor die door opstuwing zouden kunnen worden veroorzaakt.
Opstuwing is soms wel waarneembaar maar dat helpt niet want het effect ervan is niet kwantificeerbaar.
Ook volgstromen, vooral dwarsscheepse, kunnen aanmerkelijk krachten op een schip uitoefenen.
In de praktijk treden al deze krachten tegelijkertijd op. Het schip beweegt onder invloed van de resultante ervan. De navigator zou de samenstellende krachten moeten kennen; onjuiste correctiepogingen zouden

averechts kunnen werken. Voor niet verklaarbare schadevaringen worden termen gebezigd als 'het schip liep uit zijn roer', hetgeen niets verklaart.
Al het arbeidsvermogen van beweging dat een schip bij het binnenvaren van een bekken in zich bergt zal, bij het stilleggen van het schip met behulp van de eigen schroef en de sleepboten, op het water worden overgebracht. Het water komt daardoor in beweging en het zal omdat de ruimte beperkt is, terugkaatsen tegen de oevers, weer tegen het schip botsen en daaraan weer energie teruggeven. Het totaal van de arbeid van eigen machine en sleepboten heeft waterbeweging tot gevolg maar ook weer een scheepsbeweging.
Voor de navigator is het de vraag: wanneer, hoeveel en in welke richting?

3. Omstandigheden

Hoewel op het eerste gezicht niet voor de hand liggend, kan de 'grootte' van een VLCC als 'omstandigheid' worden aangemerkt.
Het volgende moge dat verduidelijken.
Scheepsgedrag wordt d.m.v. modellen onderzocht.
Men stuit hier op de moeilijkheid dat een model niet tegelijkertijd geometrisch, kinematisch, dynamisch en energetisch gelijkvormig is te maken.
Met behulp van schaalwetten worden resultaten van proeven omgerekend tot waarden op werkelijke grootte.
Varende met een model hanteert men dan ook niet alleen een kleiner scheepje maar ook een andersoortig object, iets met andere manoeuvreereigenschappen. Dat geldt niet alleen voor een model t.o.v. het schip op ware grootte, maar ook voor een klein schip t.o.v. een VLCC. De navigator, die gewend is aan coasters, zal indien hij aan boord van een VLCC stapt een deel van zijn vakbekwaamheid over boord kunnen zetten. Niet omdat hij met een groter schip bezig is, maar omdat een VLCC een ander ding is, iets met andere manoeuvreereigenschappen.
Of anders gezegd: een VLCC ondervindt andere omstandigheden, relatief gezien bevindt de VLCC zich op een kleinere planeet.

Stelling: De grootte van een schip is een functie van zijn manoeuvreereigenschappen.
Vraag: Is dat wetenschappelijk te bewijzen en zo ja, kan dat uitmonden in practische aanwijzingen voor de navigator?

Opmerking: Het modelonderzoek van Esso, Grenoble, ondervond, omdat het in de buitenlucht plaats vondt, hinder van niet op schaal verkleinbare windsnelheden. Het effect van windkracht 5 op een model in Grenoble is misschien wel even groot als het effect van windkracht 20 (niet bestaanbaar) op een VLCC van ware grootte. Verduidelijkend kan hierbij zijn als men de windsnelheden in scheepsmodellengten/sec. gaat uitdrukken of in scheepslengten/sec.

Opmerking: Kleinere schepen gebruiken doorgaans per ton waterverplaatsing meer sleepboothulp dan grote.

3.1. Stroom, wind, seiches en zicht

Stroom op zee is een bekeken zaak. Al kent men de krachten niet, de effecten 'de stroomverzetting' worden met 'opsturen' ondervangen. Stroom kan het verhinderen dat grote schepen een haven binnenlopen terwijl kleinere geen hinder ondervinden. Bij de bouw van Europoort is daarmee rekening gehouden, de stromen zijn 'gestroomlijnd', toch beperkt de stroom de tijden van binnenkomst en uitvaart (Johanna Maersk).

Wind veroorzaakt drift. Daarvoor kan eveneens opgestuurd worden. Wind kan de manoeuvreereigenschappen van schepen ernstig aantasten, vooral bij lage scheepssnelheid. Loef- en lijgierigheid zijn beslist geen zaken die uitsluitend bij zeilschepen van belang zijn. Een groot schip kan alleen al t.g.v. snelheidsverandering van loefgierig tot lijgierig worden en omgekeerd.
Vraag: Is dat te bewijzen?
De kracht van de wind op een schip wordt doorgaans geschat. Sommige loodsen gebruiken de formule:

$$p = 0{,}075\ v^2$$

waarin p = de druk van de wind in kgf/m^2
en v = de windsnelheid in m/sec.
De formule is door sommigen in een tabel uitgewerkt.
Stroom en wind kunnen een 'padbreedte' veroorzaken die te groot kan zijn om nauwtes te passeren.

Seiches. Snelle veranderingen in meteorologische omstandigheden veroorzaken veelvuldig storingen in de normale getijdbewegingen. (Zie Driemaandelijks Bericht Deltawerken, augustus 1965, nr. 33).
Dikwijls verlopen ze opvallend regelmatig, ze worden dan bui-oscilaties of seiches genoemd. Ieder bekken dat aan één zijde in open verbinding staat met de zee zal in zijn mond optredende verstoringen van getijbewegingen in min of meerdere mate versterken.
In Europoort is op 4 en 5 november 1961 een karakteristiek geval van seiches gemeten. De oscilatieperiode bedroeg 40 minuten, de amplitude 7 à 8 dm.,de hiermede gepaardgaande horizontale waterbewegingen veranderde iedere 20 minuten van richting. Deze stromingen zijn hinderlijk voor de scheepvaart. Seiches zijn niet visueel waarneembaar,

wel meetbaar en wellicht voorspelbaar. Zou een seiches-waarschuwingsysteem een waardevol onderdeel van de havenuitrusting van Europoort zijn? Ten tijde van de metingen in 1961 was Europoort nog niet voltooid, het bekken heeft nu een andere vorm. Zijn er sinds de voltooiing seiches voorgekomen? 'Deltawerken' deelt mede dat ze 'regelmatig' voorkomen. Zouden seiches oorzaak geweest kunnen zijn van scheepsongevallen, steigeraanvaringen, aan de grond lopen, near-missers?
Hoe is de situatie nu? Soms komt een VLCC terecht op een plaats die niet was voorzien. Verkeerd geschat? Seiches?
Zicht beïnvloedt niet de manoeuvreerbaarheid maar de waarnemingen van de navigator. Een zicht van 50 m. en een scheepslengte van 400 m. zijn bestaanbaar.
Een hedendaagse scheepsradar is wel geschikt om een VLCC 'in de buurt' van de steiger te brengen maar niet om hem te meren.

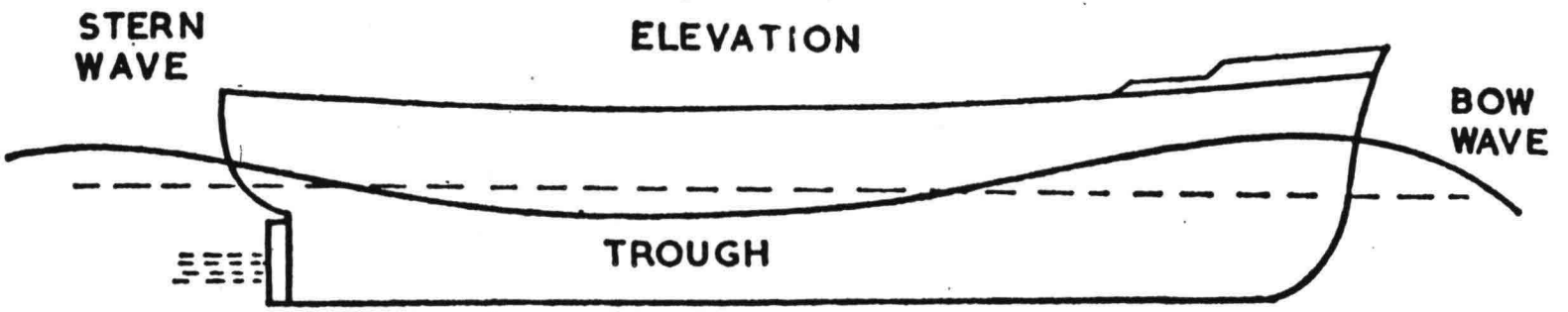
3.2. De locatie

Zonder plaatselijke bekendheid is het praktisch onmogelijk en in ieder geval onveilig een VLCC Europoort binnen en op zijn plaats te brengen. Men bedient zich daarom van loodsen die er overdag zowel als 's nachts de weg weten, weten waar ondiepten zijn, waar stromen lopen, waar configuratie effecten kunnen optreden. Zij kennen de sleepboten, hun mogelijkheden en beperktheden, de gebruiken en de termen voor allerlei aanduidingen, de communicatiekanalen, kortom de gehele gang van zaken. Het schip komt als het ware binnen een verwerkingssysteem waarin de zoveelste patiënt wordt geschoren. Loodsen hebben ook kijk op de plaatselijke weersomstandigheden.
In 1976 kwamen 530 VLCC's met een diepgang van meer dan 57 voet naar Europoort.
In plaats van een beschrijving van de locatie te geven wordt verwezen naar bestaande kaarten.

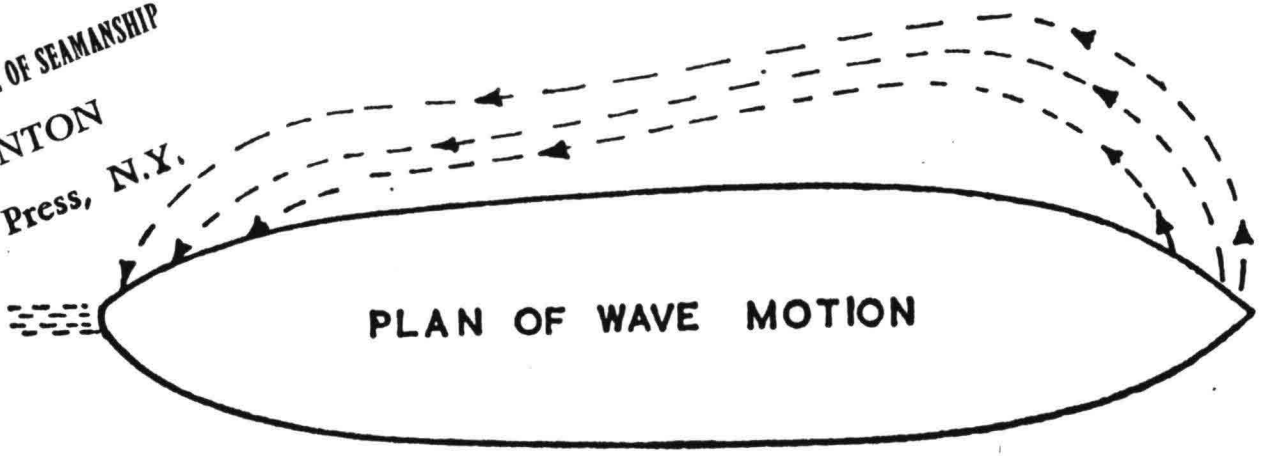
3.3. Effecten van configuraties

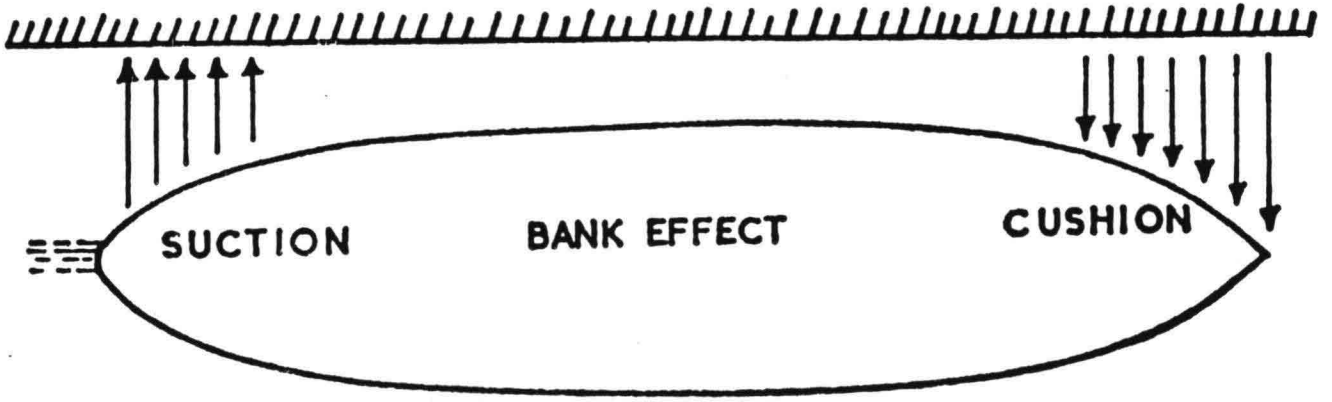
Varende schepen veroorzaken golfbewegingen in het water, een boeggolf, een trog achter de midscheeps en een hekgolf. De boeg- en hekgolf vertonen ten opzichten van de ongestoorde waterstand een verhoging, de trog een verlaging. Vaart men langs een oever dan worden de effecten aan die zijde verstrekt. De hekgolf oefent geen invloed op het schip uit.

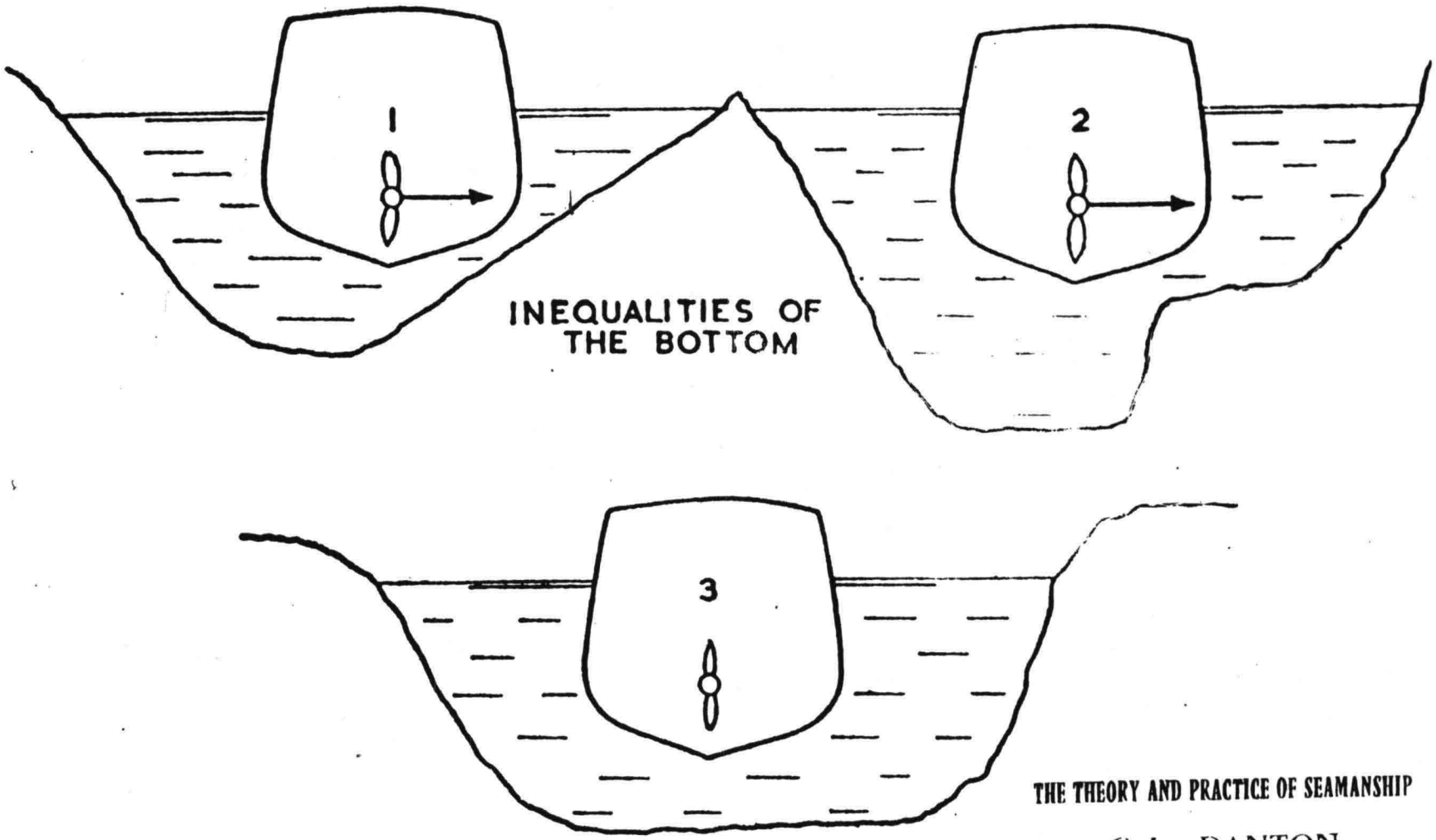
De hogere waterstand bij de boeg dringt het voorschip van de wal af, de lagere waterstand van de trog trekt het achterschip naar de wal toe. Het vertoont dan de neiging van de wal weg te lopen. Meer snelheid vergroot die neiging evenals een kleinere afstand schip - oever. Vaart men op gelijke afstand tussen twee oevers dan heffen de effecten elkaar op. Zijn de afstanden ongelijk dan vertoont het schip de neiging naar de verste oever te lopen. Indien varende in een kanaal een bekken wordt gepasseerd vallen aan die zijde de effecten weg, ook dan vertoont het schip de neiging van haar koers weg te lopen. Ook als de bodem niet vlak ligt en bij plaatselijke ondiepten treden deze effecten op.
De navigator, de loods, heeft wel geleerd bij welke snelheden oever- en bodemeffecten kunnen optreden; dat ze ook zó sterk kunnen zijn dat strandingen niet meer voorkomen kunnen worden. Hij zal daarom trachten zó langzaam te varen dat er geen effecten optreden. Kleine effecten worden door de roerganger bijgestuurd. Het is nooit met zekerheid bekend of de kleine koersafwijkingen die de roerganger staat bij te sturen het gevolg zijn van configuratie-effecten of van iets anders, wind, een niet bedoelde ruk van een sleepboot of een stuurfout van de roerganger zelf. Door het veelvoudig gebruik van de "automatische piloot" zijn er nog maar weinig schepelingen die kunnen sturen.
Soms worden configuratie-effecten benut, aangewend om scheepsbewegingen te bewerkstelligen.



THE THEORY AND PRACTICE OF SEAMANSHIP
G. L. DANTON
St-Martin's Press, N.Y.







THE THEORY AND PRACTICE OF SEAMANSHIP

G. L. DANTON

St Martin's Press, N.Y.

- 14b -

4. De plannen

Het vaarplan, het aanlegplan en het meerplan worden niet aan boord gemaakt maar aan de wal door de loodsdiensten c.q. door de voor de beloodsing aangewezen loodsen. Bij VLCC's wordt bij de plannen geen rekening gehouden met de aard der lading.
Soms worden de plannen met de scheepsleiding besproken. Meestal wordt aan de loods - ongezien zijn plannen - de navigatie overgelaten.

4.1. Het vaarplan

Het vaarplan omvat het tracé van het rendez-vous op zee, 50 km uit de kust waar de zeeloods per helicopter aan boord komt tot aan de haven. Voor het maken van dat plan bestaan van overheidswege uitgegeven instructies. Niet de scheepsleiding maar de loodsen moeten deze instructies opvolgen. Deze instructies regelen in hoofdzaak het overleg dat tussen de betrokken loodsdiensten en loodsen moet plaatsvinden ter vaststelling van de tijd van binnenkomst en indien er meer dan een schip over een tij moet binnenlopen de volgorde van binnenkomst. Een voorliggend schip moet zijn rondgezwaaid en uit het vaarwater verdwenen voordat een volgend schip dat punt passeert.
Indien de diepgang van een VLCC zo groot is dat slechts bij hoogste getijwaterstand ondiepten kunnen worden gepasseerd, wordt de vloedgolf benut om achtereenvolgens de verschillende ondiepten te 'nemen'. Voor elk schip wordt dan een 'tijdpoortenplan' gemaakt, dat aangeeft op welke tijden het schip de diverse ondiepten moet passeren; op die tijden zijn voor die punten de waterdiepten bekend.
Bij meerdere schepen wordt een 'plan van binnenkomst' opgemaakt waarin de afspraken over onderlinge afstanden en passeerpunten e.d. Hierbij kunnen zowel in- als uitgaande schepen betrokken zijn.
Voor onvoorziene omstandigheden is er een noodankergebied. Overigens, een VLCC die eenmaal in de Geul zit, kan moeilijk of in het geheel niet terug, HET KOMT DÓÓR;

4.2. Het aanlegplan

In Rotterdam en in sommige andere havens is het aanleggen van schepen de taak van een gewezen zeeman die niets anders meer doet dan aanleggen, een z.g. havenloods. Hij moet het aanlegplan maken. Het omvat hoe

het havenbekken zal worden 'aangelopen', waar het schip zal worden stilgelegd en gezwaaid en hoe de steiger zal worden 'aangelopen'. Hij bestelt - daartoe door de scheepsagent schriftelijk gemachtigd - naar smaak en omstandigheden sleepboten ter assistentie en geeft deze instructies over hoe en waar ze zullen worden ingezet.
Het aanlegplan omvat slechts zeer globaal de manoeuvres. De eigen machine en de sleepboten worden naar behoefte aangewend om zo goed mogelijk een vooraf bepaald tracé te volgen. De effecten van de aangewende krachten zijn niet exact te voorspellen. Het is een navigator of een havenloods niet gegeven een identieke manoeuvre op precies dezelfde wijze te herhalen. Zijn ervaring stelt hem in staat met een redelijke mate van zekerheid te anticiperen op de scheepsbewegingen onder invloed van de aangewende krachten en - niet te vergeten - de storende elementen: weer en configuratie.
Een aanlegplan is dus slechts een globaal plan. Veelal zal naar omstandigheden moeten worden gehandeld. Bij een VLCC is dan een rijke ervaring een voorwaarde.
Het aanlegplan wordt niet op schrift gesteld, de loods heeft doorgaans 30 minuten om het te bedenken, veelvuldig wordt het met collega's besproken.
De sleepboten in Europoort zijn uitgerust met 'Voith' voortstuwers; de beting staat geheel achterop. In vergelijking met schroefsleepboten biedt dat vele voordelen maar ook nadelen.
De machines van 1200, 1800 en 3000 pk. leveren ruwweg trekkrachten van 12, 18 en 30 Tf. De behoefte aan sleepbootassistentie blijkt van loods tot loods te verschillen. Onderstaande formule geeft ongeveer de gehanteerde normen:

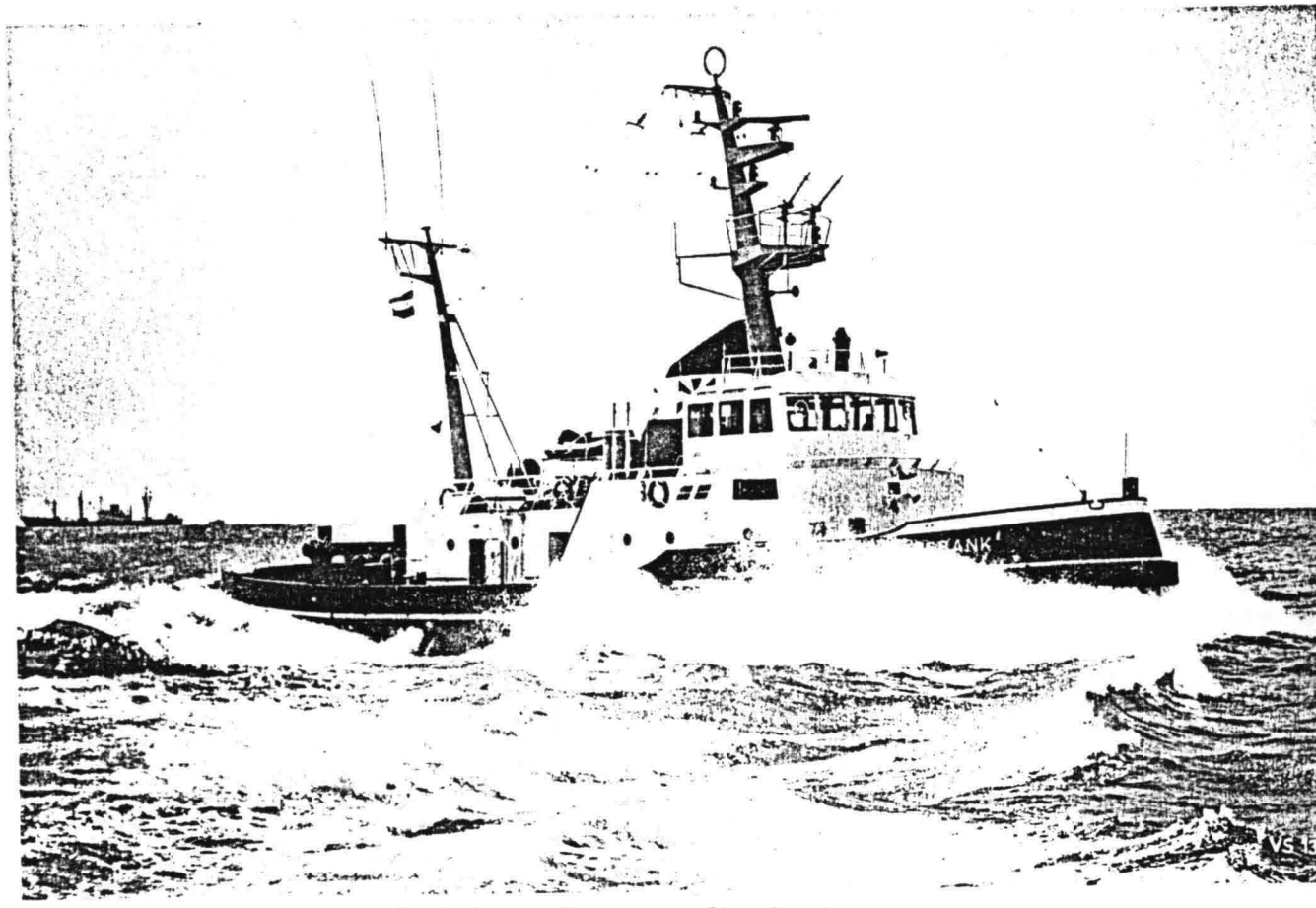
$$s = 0{,}0003\ D$$

waarin s = de gezamenlijke trekkracht van de assisterende sleepboten in Tf en D = displacement, de waterverplaatsing van de VLCC.
Bij bijzondere omstandigheden wordt de sleepbootassistentie aangepast.
Type en vermogen van de sleepboten zijn mede bepalend voor het aanlegplan.
Vraag: Is sleepbootbulp afhankelijk van visuele vermogens? Moet het effect van aangewende sleepbootkracht in een bepaalde mate zichtbaar zijn om het te kunnen beoordelen? Zou een fijnere waarneming - van snelheden en hoeksnelheden - dan waartoe het menselijk oog in

3,400-hp Voith Ship Handling and Salvage Tractor "Indusbank"

VOITH

1966 e

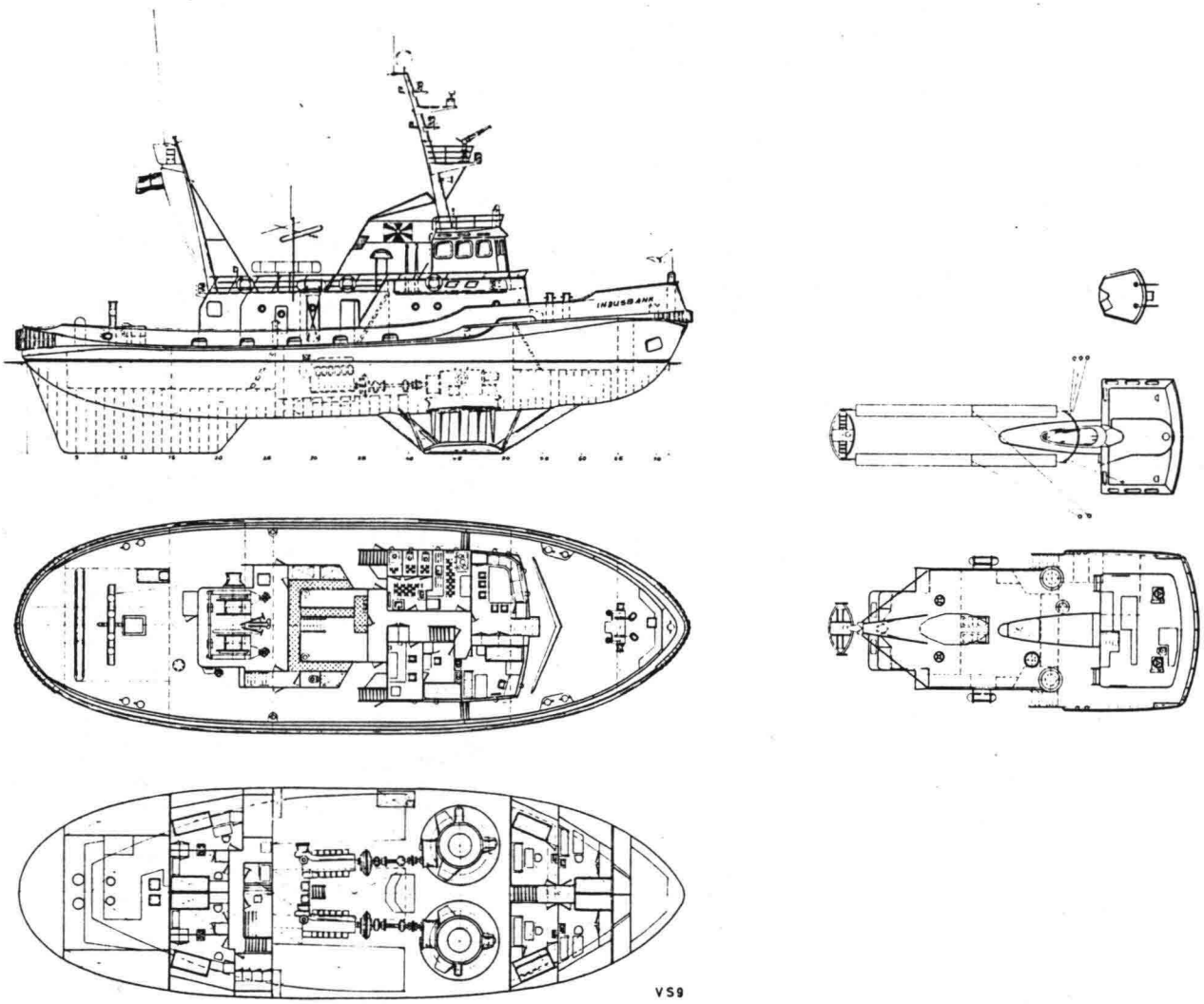


The first of two 3,400-hp tractors of N. V. Nieuwe Rotterdamse Sleepdienst

Principal dimensions:	length overall	35.64 m	(117′)
	length at CWL	33.50 m	(110′)
	beam moulded	11.00 m	(36′1″)
	depth	3.80 m	(12′6″)
	maximum draught	4.90 m	(16′1″)
	displacement	about 650 tons	
Drive:	engines: Werkspoor type RUB 215 x 12, each 1,700 hp, 1000 rpm propulsion: 2 Voith-Schneider Propellers, size 32 G II/200 shafting: Voith turbo coupling – rigid shaft – bow toothed coupling		
Trial results:	static bollard pull	36.5 tons	
	free-running speed	about 13 knots	
Class:	Inspection by "Bureau Veritas"		
Builders:	N. V. Scheepswerven v/h H H. Bodewes, Millingen/Netherlands		
Owners:	N. V. Nieuwe Rotterdamse Sleepdienst, Rotterdam		

J. M. Voith GmbH · D-7920 Heidenheim · Germany

Ship Technical Division



General Arrangement Plan

Printed by Voith 2. 70 1000

staat is, kunnen leiden tot minder sleepboothulp, geringere aanlegsnelheid, lichtere (en dus goedkopere) steigers?

Slechts bij de oudste steigers in Europoort liggen de schepen direct tegen de steigers aan. Bij de nieuwere liggen ze tegen vrijstaande, zelfdragende palenstelsels. Er zijn verschillende soorten fenders in gebruik, voornamelijk grote rubber pijpen en z.g. Raykinfenders. De vrijstaande stalen palenstelsels vangen zelf de schok op. Zwaartekrachtfenders en drijvende fenders vinden in Europoort geen toepassing. De plaatselijke loodsen weten wel 'wat de fenders kunnen hebben' maar hoe groot de absorbtiecapaciteit uitgedrukt in tonmeters is, is onbekend. En waarom zouden zij ook? Het arbeidsvermogen van beweging van het schip op het moment waarop de fender wordt geraakt is evenmin bekend. Op andere momenten kent men het arbeidsvermogen van het schip trouwens evenmin.
Vraag: Zouden vuistregels hier uitkomst kunnen bieden?
Welke naderingssnelheid nog toelaatbaar is heeft iedere loods door - hopelijk niet al te veel - schade en schande moeten ondervinden. Maar daarmede is de zaak voor een volgende meering niet opgelost.
De opgedane ervaring geldt slechts voor een bepaald schip met een bepaalde massa en een bepaalde volgstroom, een bepaalde naderingssnelheid, bepaalde sleepbootkracht, een bepaald steiger, een bepaalde winddruk, een bepaalde waterturbulentie en een bepaalde wateropstuwing. Maar of alle factoren meespeelden is niet bekend.
In de opgedane ervaring zitten nog al wat ongewisse factoren.
Sommige steigers zijn uitgerust met een naar de waterkant uitstekende stok (onbereikbaar voor het schip) met afstandsmerken. Om de stok heen zit een losse ring die wordt verschoven door het indrukken van de fender. Veert de fender terug, dan blijft de ring achter. Achteraf kan worden afgelezen hoeveel absorbtiecapaciteit van de fender werd gebruikt.
Tesamen met de herinnering van de naderingssnelheid en de grootte van het schip is dit een aanwijzing voor een volgende meering aan diezelfde steiger.
Een simpel en effectief leermiddel.
Andere steigers zijn uitgerust met z.g. naderingsapparatuur. Op snel opeenvolgende momenten wordt d.m.v. onderwatertrillingen de afstand tussen steiger en schip gemeten. Een rekenapparaat rekent de naderingssnelheid uit. De apparatuur is ingesteld op een denkbeeldig schip met een bepaalde massa. Indien dat denkbeeldige schip een bepaalde na-

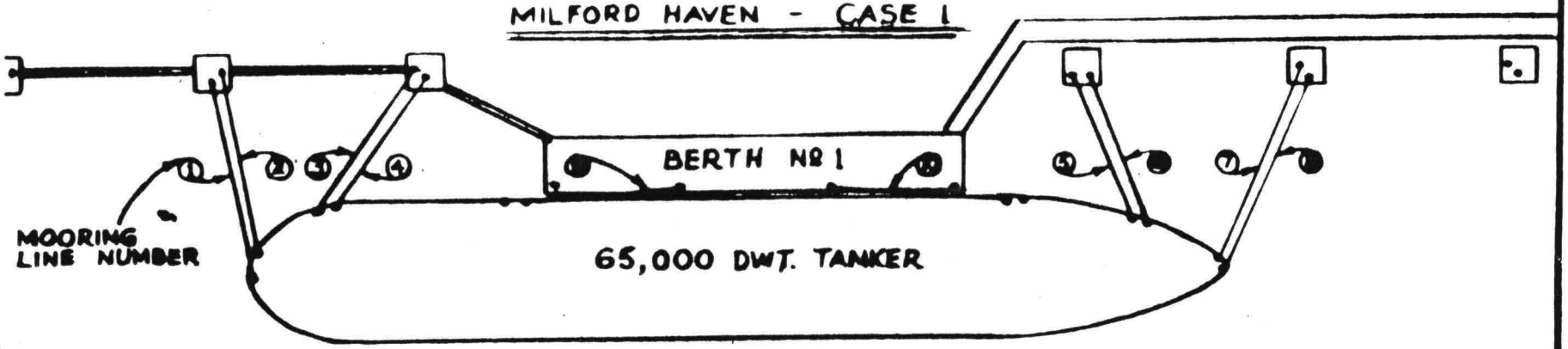
deringssnelheid zou overschrijden en tegen de steiger botsen zou de absorbtiecapaciteit van de fenders worden overschreden. Er gaat dan aan de wal een rode lamp branden hetgeen wil zeggen: het denkbeeldige schip zal schade aanrichten, de naderingssnelheid moet worden verminderd.
Niet alle problemen zijn hiermede de wereld uit.
B.v. onveilige naderingssnelheden worden berekend met de massa van een 'denkbeeldig' schip. Steigereigenaren voelen er niets voor om voor elk schip afzonderlijk de massa van dat schip in de apparatuur in te voeren. Indien zij daarbij een fout zouden maken, zou in geval van schade daaruit voor hen een schade-aansprakelijkheid kunnen voortvloeien.
Andere problemen die niet door naderingsapparatuur zijn opgelost zijn: op welke afstand moet hoeveel kracht worden aangewend om een te grote naderingssnelheid tot gedoogbare te reduceren, wanneer zal die benodigde (sleepboot)kracht worden voorzien en besteld, hoe groot is op dat moment de wind- of stroomdruk, hoe groot is de massa van het schip en volgstroom tesamen, hoe groot is het rendementsverlies van aan te wenden krachten?

4.3. Het meerplan

Dit bevat de manier waarop het schip met trossen aan de wal wordt vastgemaakt. De trossen hebben een breeksterkte van enige tientallen tonnen. Zowel stalen als kunstvezeltrossen zijn in gebruik, hun 'rek' is zeer verschillend. Dat schepen loswaaien komt niet doordat de gezamenlijke trekkracht van de trossen onvoldoende is maar doordat de trossen niet gelijkelijk dragen, ze breken een voor een.
Vraag: Hoe zouden trossen op een praktisch hanteerbare wijze gelijkdragend kunnen worden vastgezet?

Normaal kunnen schepen voor-, achter- en dwarstrossen en 'springen' uitgeven. Eventueel aanwezige 'tension-winches' worden in Europoort niet gebruikt omdat daarmee de schepen niet voldoende op hun plaats kunnen worden gehouden. En dat is nodig daar de aansluitpijpen van de losinstallaties aan de wal slechts een rijkwijdte van enige meters hebben.

MILFORD HAVEN - CASE 1



LOAD IN MOORING LINE Nº →	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
FOR:	— LINE LOAD IN TONS —									
[1] 60 KNOT HEAD WIND	0	0	5.5	6.0	0	0	6.5	7.0	18.5	0
[2] 60 KNOT OFFSHORE WIND - 45° OFF BOW	14.5	14.5	18.5	18.0	29.5	30.0	24.5	24.0	6.0	0.5
[3] 60 KNOT OFFSHORE BEAM WIND	32.0	32.0	28.5	27.0	40.5	41.0	25.5	25.0	0	11.5
[4] 60 KNOT OFFSHORE WIND - 45° OFF STERN	31.0	31.0	17.0	16.0	28.0	27.5	8.0	7.5	0	22.0
[5] 60 KNOT STERN WIND	4.5	4.0	0	0	4.0	3.5	0	0	0	23.5

NOTES :

SHOWN ABOVE IS A GOOD MOORING ARRANGEMENT FOR THE 65,000 DWT. TANKER AT MILFORD HAVEN. THE ARRANGEMENT IS FAIRLY SYMMETRICAL AND THE BREAST LINES ARE WELL ORIENTED. ALL LINES ARE 1 7/8 WIRES. THIS ARRANGEMENT RESULTS IN AN EVEN DISTRIBUTION OF THE WIND FORCES AMONG THE HAWSERS.

ESSO RESEARCH AND ENGINEERING CO.
ESSO ENGINEERING
P.O. BOX 101 - FLORHAM PARK, N. J. - 07932

OCT. 10, 1966

EXAMPLE Nº 1

MILFORD HAVEN

CASE 1

JWL/JDC. NO SK-23312-1

5. Assistentie van buitenaf

Ondanks de geringe vrijheid van handelen van de scheepsleiding bij het binnenlopen van een haven is de algemeen aanvaarde en wettelijke conceptie nog steeds dat het schip onder eigen verantwoordelijkheid naar zijn plaats wordt gebracht, zelfs indien het niet over eigen voortstuwingsmiddelen beschikt. Verlening van materiële zowel als immateriële assistentie al of niet verplicht gekocht - geschiedt onder aansprakelijkheid van de scheepseigenaar.

5.1. Bakens

Europoort is goed van bakens en lichten-lijnen voorzien. Ten behoeve van de VLCC's, die de Eurogeul bevaren, zijn aan wal zenders opgesteld en worden de zeeloodsen met meetapparatuur toegerust zodat voortdurend en met een grote mate van nauwkeurigheid de plaats van het schip kan worden bepaald (Brown Box).

5.2. Walrader

Met aan de wal opgestelde Radarapparatuur worden scheepsbewegingen door menselijke waarneming gevolgd. De waarnemers staan per radio-telefonie in verbinding met de loodsen. Zij verstrekken gegevens over positie en vaart van het eigen schip en andere schepen. Zij helpen bij het anticiperen-op-korte-termijn op verkeerssituaties.

6. De toestand aan boord

De bemanning van een VLCC (en van vele andere schepen) beschikken doorgaans niet over voldoende plaatselijke bekendheid met de daarop geënte specifieke vaardigheden om het eigen schip in een haven te brengen. B.v.: Vaargeulen, stromen, taalgebruik, kennis van wetten en gebruiken, communicatiemiddelen, beschikbare assistentie, enz. De scheepseigenaar kan op dat punt ook moeilijk eisen stellen aan zijn personeel, als hij het schip van hot naar her stuurt. Trouwens de benodigde know-how is overal ter plaatse verkrijgbaar en het kopen van die know-how is bijna overal door de plaatselijke overheid dwingend voorgeschreven. Bovendien maken VLCC's slechts enkele reizen per jaar en hebben zeelieden tegenwoordig goede verlofregelingen. Bemanningen maken slechts enkele malen per jaar mee dat hun VLCC ergens een haven binnenloopt en dat is niet voldoende om in het manoeuvreren vaardigheid te verkrijgen of te behouden.
Voor een VLCC met bestemming Europoort begint het loodsmansvaarwater reeds 50 km. uit de kust. Daar is een rendez-vous gebied waar de zeeloodsen per helicopter aan boord worden gebracht; per helicopter omdat de loodsboot te langdurig van zijn station afwezig zou zijn en andere schepen zouden moeten wachten.

6.1. Technische gegevens

Aan boord stellen de loodsen zich op de hoogte van de voor hen belangrijke gegevens van het schip, zij zijn van huis gegaan met een scheepsnaam, een diepgang en enige plannen, maar nu informeren ze naar de vaarsnelheid bij de verschillende telegraafstanden (soms ook bridge-control), of de schroef door een turbine dan wel een verbrandingsmotor wordt aangedreven, of er misschien twee schroeven zijn of twee roeren. Ze willen de diepgang weten en de kop- of stuurlast. Ze moeten even wennen aan het radarbeeld en weten waar de radiotelefonieapparatuur te vinden is. De meegebrachte radionavigatieapparatuur moet worden aangesloten en afgesteld (Tussendoor moeten de quarantaine formaliteiten en ander zulk soort zaken worden geregeld). De tocht door de Eurogeul wordt aangevangen op de tijd in het vaarplan aangegeven. Er is voortdurend radiocontact met de wal. Voor een VLCC, die eenmaal de Eurogeul is ingegaan, is er geen terugweg. Er kan niet geankerd worden. Ten behoeve van de "geulscheepvaart" is dicht onder de kust een noodankergebied ingericht. Is een geulschip daar eenmaal voorbij dan moet het trachten binnen te lopen.
Het staken van de loodsdienst voor Hoek van Holland t.g.v. weersomstandighe-

den betekent niet meer dan dat schepen op zee niet van een loods voorzien kunnen worden; ze lopen dan ook niet binnen.
Slechts bij hoge uitzondering maken weersomstandigheden het onmogelijk dat schepen met een loods aan boord niet kunnen binnenlopen, dat geldt ook voor een VLCC. Indien slecht weer echter gepaard gaat met deining en lange-periode-golven en de VLCC gaat slingeren en/of stampen, dan kunnen diep-gangsvermeerderingen optreden die het binnenlopen beletten.
In de mond van Europoort komt de havenloods aan boord. Voor hem is vooral het maximum achteruit vermogen van de VLCC van belang. 30 omw./min duidt op een gering achteruitvermogen, 50 is goed en 70 is opperbest, het wordt slechts bij motorschepen en die zijn er niet veel, aangetroffen.
De machine vermogens per ton geven aanzienlijke verschillen te zien.

Machinevermogens van olietankers (Lloyds Register)			Bijbehorende achteruit-vermogens volgens opgave aan boord		
dwt	pk	pk/ton	%	pk/ton	
1.000	1.000	1,00	100	1,00	motor
20.000	7.500	0,37	50	0,19	turbine
50.000	16.000	0,31	50	0,16	turbine
100.000	25.000	0,25	40	0,10	turbine
200.000	30.000	0,15	40	0,06	turbine
300.000	36.000	0,12	30	0,04	turbine
540.000	63.000	0,12	30	0,04	turbine

Het effect van een achteruitwerkende schroef wordt voorts nadelig be-invloed door de vorm van de schroef, die in de eerste plaats is ontwor-pen om bij vooruitdraaien effectief te zijn.
Het uitvallen van de machine - en dat komt nog vrij vaak voor - kan zeer ernstige gevolgen hebben. Bij het manoeuvreren wordt er in die zin re-kening mee gehouden dat bij afstoppen en zwaaien bij voorkeur van steigers en andere schepen afgedraaid wordt: "liever de dijk in". Europoort is in dit opzicht een veilige haven omdat oevers en de bodem zanderig zijn en niet rotsachtig zoals in sommige andere havens.
Loodsen informeren elkaar uitvoerig over hun belevenissen. Op de loodspos-ten vindt een belangrijk stuk ervaringsoverdracht plaats.

6.2. De relatie gezagvoerder - loods

Deze relatie is voornamelijk van vriendschappelijke aard. De zee en het beroep scheppen nu eenmaal banden. Bij frequent bezoek gaat men elkaar kennen.
Pas in de tweede plaats komt de formele relatie. De kapitein is en blijft de baas op zijn schip, ook in een haven. De loods krijgt van hem de navigatie toevertrouwd. Als overheidsdienaar is de loods voorts gebonden aan wetten en regels.

6.3. Crew-behaviour

Crew-behaviour vertoond zeer grote diversiteit. De loods zal terdege rekening moeten houden met de wijze waarop de orders worden uitgevoerd. Een VLCC is een eigen wereldje, met een bemanning waarvan de landsaard het handelen in hoge mate beïnvloed, elke scheepvaartmaatschappij heeft zo zijn eigen gedragsregels en een klein mensengemeenschap die langdurig in afzondering leeft krijgt haar eigen normen. Loodsen moeten er op verdacht zijn dat orders niet of slechts ten dele worden uitgevoerd.

6.4. Alternatieve plannen, in te calculeren risico's

Te veel om op te noemen zijn de redenen waardoor plannen gewijzigd moeten worden. Hoewel een rubricering van weinig nut is kunnen zij worden onderverdeeld in:
Redenen van buitenaf die aan boord niet beoordeeld worden (ligplaats veranderd)
Redenen van buitenaf die wel aan boord beoordeeld worden (opstekende storm)
Redenen door de toestand aan boord (de machine kan niet achteruitslaan)

7. Uitvoering van de plannen

Het criterium van een "geulvaart" is het volgen van een vastgestelde vaarroute en het volgens een tijdschema passeren van bepaalde punten van die route. De instrumenten zijn de voortstuwer van het schip, (practisch uitsluitend vooruitdraaiend), radionaviagatieapparatuur (Decca, Brown Box), lichtenlijnen, Radar, radiotelefonie, walrader, klok en kompas.
Storende elementen zijn stroom, wind, mist en andere scheepvaart.
De handelingen hoofdzakelijk schatten en corrigeren van stroomverzet en drift, extrapoleren van snelheid en het aanpassen van de snelheid aan het tijdschema.
(Met excuses aan de zeeloodsen voor onvolledigheid en eventuele onjuistheden - steller dezes).

In de haven, als de havenloods het schip heeft overgenomen, zijn er wat andere werk-onderdelen te onderscheiden. Er is geen tijdschema meer te volgen, stroom is er practisch niet (op enkele geprononceerde uitzonderingen na), er wordt niet meer op Decca of Brown Box genavigeerd, het kompas komt er nog maar nauwelijks aan te pas, er zijn geen geleidelichten, squat is niet meer te verwachten, de scheepssnelheid is tot 5 à 3 knopen gereduceerd en zal op de ligplaats tot 0 dalen. Nieuwe zaken zijn: het havenbekken en de steiger, andere gemeerd liggende schepen die door zuiging van hun trossen kunnen breken, oeverzuiging en -cushion, fenders ieder met zijn eigen absorptiecapaciteit, de massa van de VLCC, sleepboten en de ratio-telefoniecommunicatie met hen, de meertrossen en de scheepslieren, roeiers (met motorvletten en radio-telefoniecommunicatie en de jetty-man ook al met radio-telefonie.
Soms is er naderingsapparatuur aan de wal of zijn er bewegingsindicatoren (Doppler) aan boord.
De elementen weer en crew-behaviour zijn belangrijker, soms dominant geworden. Dwarsscheepse volgstroom is een ongewisse factor, welke aanwezigheid slechts kan worden vermoed, niet gedetecteerd of gekwantificeerd. Opstuwing eveneens.

Het is gebruikelijk dat zeeschepen met de kop naar zee, of naar de havenuitgang, worden gemeerd om bij calamiteiten een vluchtkans te hebben. Bij binnenkomst moeten ze daartoe worden gezwaaid en achteruit naar de ligplaats gebracht. Een VLCC kan in Europoort niet overal zwaaien, slechts op enkele plaatsen in de z.g. zwaaikommen. Er is er één voor elk havenbekken. De zwaaikommen hebben een diameter van ca. 600 meter. Indien een VLCC met zijn draaipunt in het midden van de zwaaikom tot stilstand zou worden gebracht, is er

ruimte genoeg over. Dat behoort echter practisch tot de onmogelijkheden, omdat noch het zwaaikommiddelpunt is aangegeven, noch het draaipunt van het schip bekend is.
Bij het afstoppen met de eigen machine veroorzaakt de schroefrotatie een zwaaibeweging, de schroefslag. Dat gebeurt met zoveel kracht dat de sleepboten bijna nooit die beweging kunnen elimineren. Daarom wordt die zwaaineiging, waar mogelijk, benut. De mate van zwaaien kan slechts worden geschat. Als de vaart over de voorsteven eruit is, wil dat geenszins zeggen dat de dwarsscheepse beweging eveneens 0 is.
Integendeel, een deel van de vaart over de voorsteven is omgezet in een dwarsscheepse beweging. Bij de kleine bewegingen,die het schip nu nog heeft, is de waterweerstand in alle richtingen ongeveer even groot, het kan dus alle kanten uit. Stopweg en dwarsdrift kunnen niet worden gekwantificeerd, ze worden geschat. Er moet zó worden gemikt dat het schip zo ongeveer door het midden van de zwaaikom drijft en in een dusdanige positie komt te liggen dat vandaar uit begonnen kan worden achteruit naar de steiger te varen.
Hierbij wordt voor de besturing van de VLCC in de eerste plaats van de sleepboten gebruik gemaakt, voornamelijk de vóórsleepboten, die daartoe naar beide zijde gericht gereed liggen, terwijl ze zich door het water laten slepen. Het eigen roer heeft bij achteruitgaande beweging weinig effect. Slechts indien de sleepboten niet in staat zijn de VLCC op koers te houden, c.q. niet in staat zijn de koers te veranderen, worden schroef en roer gebruikt. De achtersleepboten en de eigen machine worden gebruikt om vaart over de achtersteven te verkrijgen. Vraag: Waarom lopen loodsen heen en weer op de brug? Is dat omdat zij met hun oogpupillen,afstand van 7 cm grote afstanden onvoldoende nauwkeurig kunnen zien? Trachten zij - onbewust - met dat lopen hun paralax t.o.v. object te vergroten, zoals ook sommige vogels dat doen? De sleepboten krijgen hun opdrachten per radio-telefonie (VHF). Hoe dichter het schip bij de steiger komt, hoe geringer de vaart dient te zijn. De machine wordt gereed gehouden om - mocht het schip om welke reden dan ook naar de steiger toe gaan lopen - een aanvaring met de steiger te voorkomen. De orders "vol vooruit" en "roer aan boord" blijven tot noodsituaties beperkt. Andere schepen kunnen erdoor van hun trossen breken, sleepboten kunnen weggespoeld, roeiersboten kunnen kapseizen,er kan grote waterturbulentie ontstaan en ook wateropstuwing tegen een glooiing, die zonder mankeren terugkomt en het schip een duw geeft. Op machine manoeuvres moet ruim worden geanticipeerd,vooral bij turbines duurt het geruime tijd eer de machine datgene levert wat wordt verlangd. Indien het schip tot stilstand komt op een afstand van één tot een halve scheepsbreedte van de steiger en als het omringende water niet wild is geworden, kan dit deel van de manoeuvre als "geslaagd" worden aangemerkt.

Het weer duurt intussen voort.
In deze positie aangeland worden veelal de sleepboten aan de landzijde (de "binnekant") losgegooid, en nadat zij hun sleeptrossen binnen boord hebben gehieuwd, worden zij naar de "buitenkant" van het schip gedirigeerd, om het schip naar de steiger te duwen. Voorkomen moet worden dat daarbij zoveel snelheid (arbeidsvermogen van beweging) (en volgstroom?) ontstaat dat steiger en/of schip schade oplopen. Te grote naderingssnelheden worden met de "buitensleepboten" gecorrigeerd. Het een zowel als het ander is een kwestie van schatten, er wordt niet gekwantificeerd. Het gebruik van eventueel aanwezige naderingsapparatuur heeft, zoals hiervoor vermeld, slechts betrekkelijke waarde.
Getracht wordt alle fenders tegelijk te raken. Intussen zijn roeiers bezig meertrossen naar de wal te varen. Zij begeven zich daarbij tussen wal en schip. Voor hun veiligheid moet worden gewaakt. Nauw radiocontact met de loods is van groot belang, vooral als de VLCC is uitgerust met een torenbrug en de loods hen niet kan zien. Ligt het schip voor de wal, dan moet het worden verschoven totdat de "manyfould" recht tegenover de losarmen van de steiger komt. De reikwijdte van moderne lospijpen is gering. De jetty-man geeft hiervoor aanwijzingen per VHF aan de loods. Tot op een halve meter nauwkeurig moet het schip op zijn plaats worden gebracht. Met hieuwen op de trossen lukt dat niet. De eigen machine en de sleepboten moeten daaraan te pas komen. Een beweging van enige cm/sec heeft weer een stopweg van meters tot gevolg. Ook al omdat de machine laat reageert op de telegraaf. Deze bewegingen zijn zó gering dat ze van de brug af nauwelijks of in het geheel niet waarneembaar zijn. Alleen de jetty-man die op de steiger dicht bij de scheepshuid staat kan het goed zien. Hij informeert de loods nauwkeurig. Veelal loopt de VLCC zijn plaats een paar maal voorbij, dan vooruit, dan achteruit. Een waar geduldwerkje.
Ligt het schip eindelijk op zijn plaats dan worden de overige trossen uitgegegeven en vastgezet, totaal 14 of 18.
De machine kan worden afbesteld en de sleepboten bedankt.

Het in de haven afgelegde traject, het zwaaien en het aanleggen vertoont veelal één vloeiende lijn. Het neemt twee à drie uur in beslag. Het afmeren daarna nog eens een uur.

Serie: Collegenotities

Collegenotitie 1
februari 1981
13 bladzijden
4 figuren

Notitie ten behoeve van college f9A over de invloed van de traagheid van het water op afmeerkrachten

door P.A. Kolkman

Klassieke berekening botskracht

Kinetische energie aankomende massa (schip) m_s

$$E_k = \tfrac{1}{2}\, m_s\, V_s^2$$

Relatie (afmeer)kracht en versnelling

$$\ddot{y} = F/m_s$$

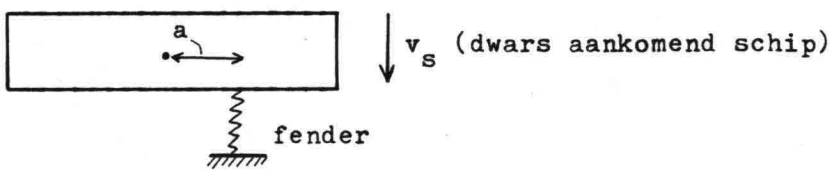
(F = kracht, $\ddot{y} = d^2y/dt^2$)

Opgenomen maximale potentiële energie (fender) bij lineair gedrag

$$E_p = \tfrac{1}{2}\, k\, Y_{max}$$ (k = veerstijfheid)

Y_{max} is te berekenen door te stellen $E_p = E_k$

Excentrisch afmeren tankers etc. (VLCC)



Fenderkracht te ontbinden in centrische kracht F en moment M = a F.

Verzetten: $\ddot{y} = F/m_s$

Gieren: $\ddot{\varphi} = M/I_{polair} = a\, F/I_s$

Bij homogene massaverdeling $I_s = \frac{1}{12} L^2\, m_s$

Verplaatsing botspunt $\ddot{y}_b = \ddot{y} + a\,\ddot{\varphi} = F/m_s + a^2\, F/I_s$

Ofwel:

$$\ddot{y}_b = F/m_r \quad \text{met } m_r = m_s \left\{ I_s/(I_s + a^2\, m_s) \right\}$$

De botskracht Y_{max} is nu weer te berekenen uit

$$E_p = \tfrac{1}{2}\, m_s\, V_s^2\, c_e \text{ , met } c_e = I_s/(I_s + a^2\, m_s)$$

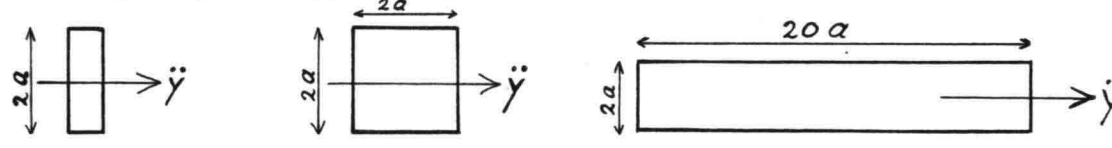
c_e = excentriciteitscoëfficient.

Invloed traagheid van het water bij snelle stoot

m_s en I_s moeten door traagheidsfactoren van het water vermeerderd worden met m_w en I_w (toegevoegde watermassa resp. toegevoegd polair traagheidsmoment).
Bij hoogfrequente trilling of snelle botsing zijn m_w en I_w frequentie- of botsduur-onafhankelijk en te berekenen met de potentiaal stroming theorie (bv. elektrisch analogon).
Dit volgt uit Navier-Stokes vgl.:

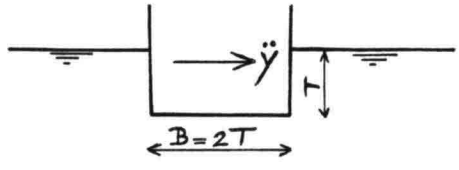
$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} - \rho\, v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - \rho\, v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \text{ etc.}$$

Bij kleine ∂t domineert de $\rho . \partial v/\partial t$ term en zijn de $v_x . \partial v_x/\partial x$ termen alsmede de viskeuze ter te verwaarlozen.
De stroming is dan rotatievrij.
Bij oneindig lange strippen is gevonden



$m_w = \rho\, \pi a^2 L$ $\qquad$ $1{,}51\, \rho\, \pi a^2 L$ $\qquad$ $2{,}23\, \rho\, \pi a^2 L$

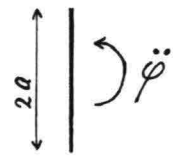
En als een strip het vrije wateroppervlak snijdt:



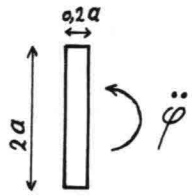
$m_w = 0{,}25\, \rho\, \pi\, T^2 L = 0{,}4\, m_s$
ofwel $c_m = (m_s + m_w)/m_s = 1{,}4.$

Door de invloed van de bodem (beperkte waterdiepte) wordt c_m groter, geen gegevens beschikbaar.

Bij rotatie:



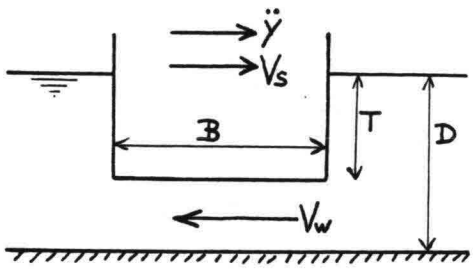
$I_w = 0{,}125\ \pi \rho\ a^4\ L$



$I_w = 0{,}147\ \pi \rho\ a^4\ L$

<u>Invloed traagheid bij extreem trage botsing</u>

Bij kleine keel-clearance en trage botsing volgt een bovengrens van m_w door opeenvolgende momenten van een quasi-stationaire stroming te beschouwen.



$$V_w = \left\{ T/(D - T) \right\} V_s$$

$$\ddot{y}_{water} = \left\{ T/(D - T) \right\} \ddot{y}_s$$

Drukverschil nodig om water af te remmen

$$\Delta p = \rho\ B\ \ddot{y}_w$$

Indien drukverdeling hydrostatisch is dan werkt op het schip:

$$F = \Delta p\ T = \rho\ B\ T\ \ddot{y}_w = \left\{ \rho\ B\ T^2/(D - T) \right\}\ \ddot{y}_s$$

Dus

$$m_w = F/\ddot{y}_s = \left\{ T/(D - T) \right\}\ \rho\ B\ T = \left\{ T/(D - T) \right\}\ m_s$$

Ofwel:

$$c_m = 1 + T/(D - T)$$

De botskracht is nu te berekenen uit:

$$E_p = \tfrac{1}{2}\ m_s\ V_s^2\ c_e\ c_m$$

Dit is de formule van Saurin. Deze voert nog een reductiefactor (orde 0,9) in vanwege elasticiteit van het schip.

Omdat met name bij afmeren van VLCC's de botsing traag is, min of meer centrisch wordt afgemeerd en T/(D - T) vaak groot is (tot 10x) is gevonden dat c_m van groot belang is en hiernaar is de laatste jaren veel onderzoek gedaan.

Methode NSP (Van Oortmerssen)

Dit is gebaseerd op 3-dimensionale potentiaaltheorie, inclusief golfuitstraling. Voor één willekeurige puntbron met sterkte p in ondiep water is bekend de oplossing (stromingsveld, drukveld, golfstraling) als de stroming stationair is, maar ook als de stroming periodiek pulserend is. Oplossing is complex (drukken in - en uit fase met debiet).
Nu wordt het scheepsoppervlak belegd met n bronnen met sterkte p_k
Elke bron p_k geeft door het i^e veld een waterstroming q_{ik}.
Beweegt het schip met snelheid $\dot{y}$ of $\dot{\varphi}$ dan moet er fysisch gezien een hoeveelheid water worden verdrongen

$$q_i = \Sigma\, q_{il} + \ldots + q_{ik} + \ldots + q_{in} \equiv$$

(verticale projectie van ΔA_i) x $\dot{y}_i$

(ΔA_i is het stukje scheepsoppervlak waarop bron i ligt).
Nu zijn er n voorwaarden voor q_i en daaruit kunnen de n bronsterkten p_k worden berekend.
Nu is de totaalkracht te berekenen die het water op het schip uitoefent. Deze is een functie van ω en gevonden wordt een overdrachtsfunctie in het frequentiedomein. In de praktijk wordt deze functie bepaald voor schip plus water.
Nu is de volgende methodiek mogelijk:
Stel de excitatie van het schip is een eenheidsimpuls:
Deze is te transformeren in het frequentiedomein met behulp van Fourier transformatie. Hierop kan door vermenigvuldigen met de overdrachtsfunctie de Fourier-transform van de scheepsresponsie worden bepaald.
Door terugtransformatie kan de responsie in het tijdsdomein gevonden worden van de responsie op een eenheidsimpuls.
Nu kan een complete botsingsberekening (ook bij niet-lineaire fender) worden uitgevoerd door per tijdstap dt de extra veerindrukking te bepalen, dit geeft de veerkracht en uit de nu bekende responsie van het schip wordt de veerindrukking in het volgende tijdstapje bepaald (convolutie - of Duhamel integraal).

Bij het NSP wordt overigens gewerkt met een variant van de Fouriertransform (krachtverloop benodigd om aan het schip een eenheidsversnelling te geven).
De NSP-methode is nogal bewerkelijk omdat de gehele scheepsvorm in het rekenprogramma moet worden ingevoerd, ook een eventuele wand (kademuur).

Methode THD (Fontijn, Lab. v. Vloeistofmechanica)

Dit is een vereenvoudigde aanpak waarbij de dwarsversnelling, die de grootste bijdrage aan m_w geeft, afzonderlijk wordt bekeken (2-dimensionale potentiaalstroming).
Ook zijn er oscillatieproeven gedaan met een tot bak geschematiseerd schip (dwarstranslatie en gieren).
Resultaten:
- contrôle op lineariteit (oscillatie-amplitude gevarieerd)
- m_w in "richting verzetten" klopt globaal met theorie (zie fig. 1)
- bij gieren I_w onafhankelijk van ω

Door weer met de Fouriertransform te werken kan naar keuze de theoretische, empirische of een gemengde overdrachtsfunctie worden gebruikt om de responsie op de eenheidsimpuls te bepalen uit de terugtransformatie.

Aanpak vakgroep Waterbouwkunde (Kolkman/Middendorp)

Naar aanleiding van de experimentele resultaten van Fontijn is een vereenvoudigde theorie toegepast die voor de verzetrichting uitgaat van de lange-golftheorie. Deze oplossing wordt verderop behandeld.
Voor de rotatie is de gevonden I_w gecontroleerd met die van de lange strip.

$$I_w = 0{,}125\ \pi \rho\, a^2/L$$

met 2a = lengte schip en L = scheepsdiepte (zie fig. 1 en 2 voor de mate van overeenkomst).
Het voordeel van deze aanpak is dat met de uitkomst direkt de botsingsvergelijking van het centrisch of excentrisch botsende schip kan worden ingevoerd bij botsing tegen een lineaire veer.
Een niet-lineaire veer kan behandeld worden door de veer in te delen in lineaire delen met verschillende stijfheid.
De resultaten zijn met botsproeven geverifieerd. Voor constructies in

open water geeft dit bevredigende resultaten (fig. 3 en 4). Voor de gesloten kademuur geeft de open-water theorie veilige resultaten.

Toepassing

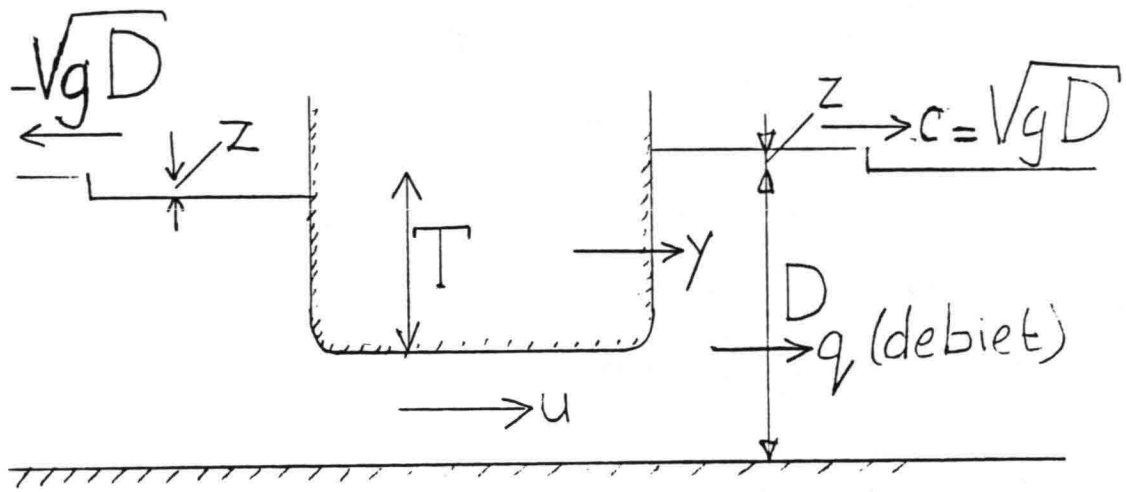
De berekeningen kunnen in eerste instantie worden gebruikt om de fenderconstructie te berekenen.
Aanvaarsnelheden 0,1 à 0,2 m/s worden in de praktijk toegepast. Bij een bestaande constructie kan de toelaatbare naderingssnelheid van het schip bepaald worden (Rotterdam kent een signalering die de werkelijke snelheid aan de loods kenbaar maakt).
Bij een gesloten kademuur verliest het schip, mits precies overdwars wordt aangevaren, vanzelf zijn snelheid.

De lange-golftheorie wordt in het volgende nader uitgewerkt.

Berekening van horizontale dynamische krachten bij versnellen in dwarsrichting

Uitgegaan wordt van een lang schip waarbij kopeffecten te verwaarlozen zijn (dus 2 dimensionale stroming en golfuitstraling). Door alleen beweging in het laagfrequentiegebied te beschouwen (bij periodiek oscilleren $\omega < 0{,}65\sqrt{g/D}$ *), bij stootbelasting $T_{max.kracht} > \frac{\pi}{1{,}3}\sqrt{D/g}$) is de langegolftheorie geldig. Kenmerk: hydrostatische drukverdeling en geringe verticale versnelling van waterdeeltjes. Er kan nu zelfs gesproken worden van ééndimensionale stroming en golfuitstraling.
Verder wordt er van uitgegaan dat de golven klein zijn ten opzichte van de waterdiepte. De loopsnelheid van een lange golf wordt nu alleen door de waterdiepte bepaald en er geldt $c = \sqrt{gh}$. Bovendien geldt $u \ll \sqrt{gh}$.

*) Bij deze ω is de drukfluctuatie aan de bodem (bij periodiek oscilleren) ca. 20% afwijkend van die aan het oppervlak, de loopsnelheid van de golf wijkt ca. 12% van die bij de lange golf af.



Dwarsdoorsnede schip

Notatie: $\dot{y} = dy/dt$, $\ddot{y} = d^2y/dt^2$ etc.

Translatiegolfdebiet q. geeft een translatiegolf z;

$$q = \dot{y}\,T + u\,(D - T) = z\,\sqrt{g\,D} \qquad (1)$$

De kolom water onder het schip versnelt door het drukverschil tussen links en rechts. De wrijving wordt verwaarloosd, evenals de uittreeverliezen. Dit mag omdat bij kleine snelheden de kwadratische weerstandstermen verwaarloosbaar zijn. In de berekening zou rekentechnisch een lineaire wrijving ingevoerd kunnen worden. Fysisch is een lineaire weerstand ook plausibel als nl. de snelheid gesuperponeerd gedacht wordt op een initiële snelheid die door het naar de fender toevaren ontstaat. De in te voeren waarde is echter arbitrair en zal weinig invloed hebben op het resultaat.

$$2\,\rho\,g\,z = -\,\rho\,B\,\dot{u} \quad \text{ofwel}$$

$$2\,z = -\,\frac{B}{g}\,\dot{u} \qquad (2)$$

Het schip ondervindt in Y-richting bij de aangenomen hydrostatische drukverdeling een kracht per eenheid van lengte

$$F_w/L = -\,2\,\rho\,g\,z\,T \qquad (3)$$

Door met (2) u te elimineren ontstaat uit differentiëren van (1):

$$\ddot{y}\,T - \frac{2\,g\,z}{B}(D - T) - \dot{z}\,\sqrt{g\,D} = 0$$

Met (3) kan nu z vervangen worden door F_w:

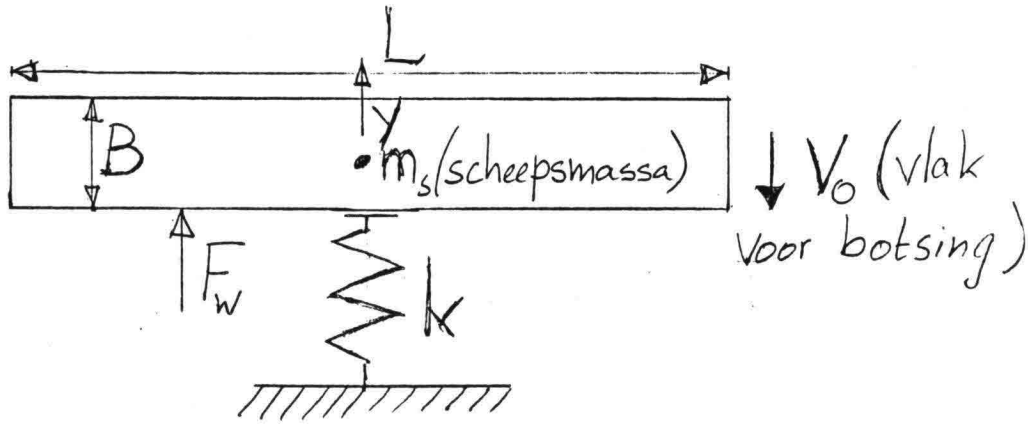
$$\ddot{y}\,T + \frac{2\,g\,(D - T)}{B}\,\frac{F_w/L}{2\rho\,g\,T} + \frac{\sqrt{g\,D}\,\dot{F}_w/L}{2\rho\,g\,T} = 0$$

ofwel

$$2\rho\,g\,T^2\,L\,\ddot{y} + \frac{2\,g\,(D - T)}{B}\,F_w + \sqrt{g\,D}\,\dot{F}_w = 0 \qquad (4)$$

3. De vergelijkingen van de fenderinvering bij centrisch botsen in dwarsrichting

De aannamen die gedaan zijn, nl. dat stromingsverliezen klein zijn, de watersnelheden klein zijn ten opzichte van $\sqrt{gh}$ en de golfkrachten die op het schip werken maatgevend zijn maken dat bij het afremmen van een bewegend schip dezelfde krachten ontstaan als bij het versnellen van een stilliggend schip. Hiervan is door Middendorp in het deelverslag bij prof. Schönfeld (5) gebruik gemaakt.
Verder wordt aangenomen dat het schip als een rechthoekige bak is te beschouwen. Ook de iscillatieproeven door Fontijn (1) en de botsproeven door Hospers (3) en Middendorp (4) uitgevoerd zijn met een rechthoekige bak gedaan. Bij grote tankers en carriers (VLCC's) en ook bij binnenschepen zal dit de waarheid redelijk benaderen, bij container- en oorlogsschepen is dit minder het geval.



De veer wordt lineair verondersteld:

$$F = - k\, y \qquad (5)$$

(bij begin botsing geldt $y = 0$)

$$F + F_w = m_s \ddot{y} \qquad (6)$$

Uit (5) en (6) is F en F_w te elimineren

$$F_w = m_s \ddot{y} - F = m_s \ddot{y} + k\, y \qquad (7)$$

Voeren we (7) in in (4) dan krijgen we

$$2\rho\, g\, T^2\, L\, \ddot{y} + \frac{2g\,(D-T)}{B}(m_s\ddot{y} + ky) + \sqrt{g\,D}\,(m_s\dot{\ddot{y}} + k\,\dot{y}) = 0$$

ofwel (met invoering van $\rho\, L\, T\, B = m_s$)

$$\sqrt{g\,D}\, m_s \dot{\ddot{y}} + \frac{2\,g\,D\,m_s}{B}\ddot{y} + \sqrt{g\,D}\,k\,\dot{y} + \frac{2\,g\,(D-T)}{B}\,k\,y = 0 \qquad (8)$$

De oplossing van een vergelijking

$$\alpha_1 \dot{\ddot{y}} + \alpha_2 \ddot{y} + \alpha_3 \dot{y} + \alpha_4 y = 0$$

heeft het karakter

$$Y_1\, c^{p_1 t} + Y_2\, c^{p_2 t} + Y_3\, c^{p_3 t}$$

waarbij p volgt uit de vergelijking

$$\alpha_1 p^3 + \alpha_2 p^2 + \alpha_3 p + \alpha_4 = 0$$

De bijbehorende beginvoorwaarden ($t = 0$) zijn:

$$y = 0, \quad \dot{y} = - v_o, \quad \ddot{y} = 0$$

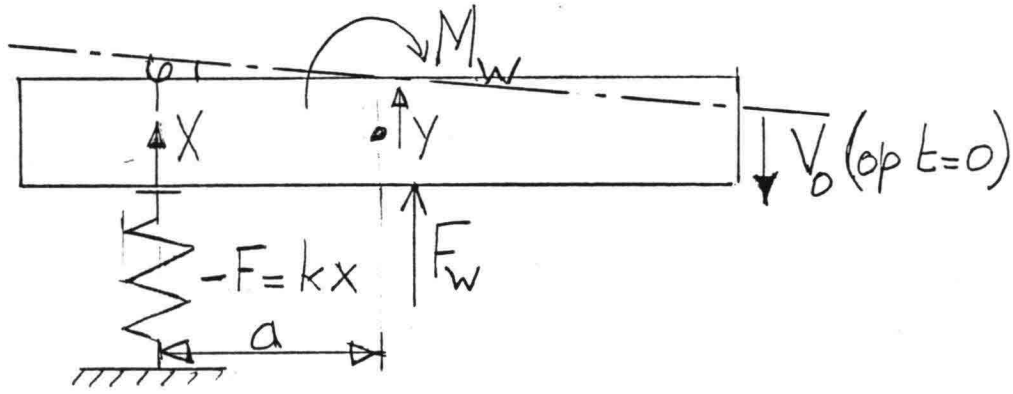
Hieruit volgen Y_1, Y_2 en Y_3.

De oplossing zelf wordt hier niet behandeld, maar is in par. 6 gegeven.

In fig. 4 zijn enige resultaten gegeven van gemeten en berekende waarden bij centrisch botsen (overgenomen uit het verslag van Middendorp).
Een botsing tegen een niet-lineaire veer kan overigens, door steeds een beperkt Y-gebied te beschouwen, met deze methode ook berekend worden.
Steeds worden de eindwaarden van y, $\dot{y}$ en $\ddot{y}$ ingevoerd als beginwaarde in het volgende Y-gebied.

De vergelijkingen van de fenderinvering bij excentrisch botsen

Een aanname die gemaakt wordt is dat de hoekverdraaiing tijdens de botsing gering is. Dit blijkt verantwoord te zijn, maar het kan aan het eind van een berekening worden geverifieerd. Er zou anders sprake zijn van niet-lineaire effecten, die weer klein zijn door de geringe aanvaarsnelheden. Ook wordt ervan uitgegaan dat er geen wrijving is en dat de hoekverdraaiing tot het moment van maximale botskracht zo gering is dat dit de krachtwerking en traagheid van het schip niet beïnvloedt.



Nemen we nu het toegevoegd polair massatraagheidsmoment I_w dan geldt

$$M_w = - I_w \ddot{\varphi} \qquad (9)$$

Zoals reeds is opgemerkt is de vereenvoudiging die wordt ingevoerd een toegevoegd polair massatraagheidsmoment dat constant is over het frequentiegebied (fig. 2). De demping wordt weggelaten omdat deze niet tot een constante is te schematiseren.
Voor translerende beweging in dwarsrichting was reeds gevonden

$$2 \rho g T^2 L \ddot{y} + \frac{2 g (D-T)}{B} F_w + \sqrt{g D}\, \dot{F}_w = 0 \qquad (4)$$

$$F = - k x \qquad (10)$$

$$F + F_w = m_s \ddot{y} \qquad (11)$$

$$x = y + a \varphi \qquad (12)$$

$$a F + M_w = I_s \ddot{\varphi} \qquad (13)$$

Hieruit zijn F, F_w, M_w, y en φ te elimineren.

Uit (13) volgt door (9) in te voeren:

$$a F - I_w \ddot{\varphi} = I_s \ddot{\varphi}$$

ofwel

$$a\,F = (I_s + I_w)\,\ddot{\varphi} \tag{14}$$

Invoeren van (10) geeft

$$\ddot{\varphi} = \frac{-a\,k}{I_s + I_w}\,x \tag{15}$$

(11) leidt tot

$$F_w = m_s\,\ddot{y} - F$$

tezamen met (12) en (10) geeft dit

$$F_w = m_s\,(\ddot{x} - a\,\ddot{\varphi}) + k\,x \tag{16}$$

met (15) gecombineerd is dit

$$F_w = m_s\,\ddot{x} + a\,m_s\,\frac{a\,k}{I_s + I_w}\,x + k\,x =$$

$$= m_s\,\ddot{x} + \left(\frac{a^2\,m_s}{I_s + I_w} + 1\right) k\,x = 0 \tag{17}$$

Invullen in (4) en invoeren van de grootheid

$$k' = k\left(1 + \frac{a^2\,m_s}{I'}\right) \tag{18}$$

(k^1 = gereduceerde veerstijfheid)

met

$$I' = I_s + I_w \tag{19}$$

en met eliminatie van $\ddot{y}$ via (12) en (15)

$$\ddot{y} = \ddot{x} - a\ddot{\varphi} = \ddot{x} + \frac{a^2\,k}{I_s + I_w}$$

vinden we uit (4)

$$2\rho g T^2\,L\left(\ddot{x} + \frac{a^2\,k}{I_s + I_w}\,x\right) + \frac{2\,g\,(D-T)}{B}\left(m_s\,\ddot{x} + k'\,x\right) +$$

$$+ \sqrt{g\,D}\,\left(m_s\,\dot{x} + k'\,\dot{x}\right) = 0 \tag{20}$$

Met invoering van $k = k' \dfrac{I_s + I_w}{I_s + I_w + a^2 m_s}$

en met invoering van $\rho L B T = m_s$ resulteert dit in:

$$\sqrt{g D}\, m_s \dddot{x} + \frac{2 g D}{B} m_s \ddot{x} + \sqrt{g D}\, k' \dot{x} + \frac{2 g (D-T)}{B} \left\{ 1 + \frac{T a^2 m_s}{(D-T)(I' + a^2 m_s)} \right\} k' x = 0 \qquad (21)$$

Deze vergelijking is nagenoeg gelijk aan (8) en kan op dezelfde wijze worden opgelost.

Oplossing van de derde orde differentiaalvergelijking

- Reduceer de vergelijking

$\alpha_1 \dddot{y} + \alpha_2 \ddot{y} + \alpha_3 \dot{y} + \alpha_4 y = 0$ tot

$\dddot{y} + A \ddot{y} + B \dot{y} + C y = 0$, en bereken A, B en C.

- Bereken de hulpgrootheden $Q = (3B - A^2)/9$;

$R = (9AB - 27C - 2A^3)/54$; $S = \sqrt[3]{R + \sqrt{Q^3 + R^2}}$ en

$T = \sqrt[3]{R - \sqrt{Q^3 + R^2}}$

- Bepaal of $Q^3 + R^2$ groter of kleiner dan nul is; is dit < 0 dan blijkt, voor die gevallen die zijn uitgewerkt, dat de beweging superkritisch gedempt is en asymptotisch naar nul gaat zonder een nuldoorgang.
- Indien $(Q^3 + R^2) > 0$ dan is de oplossing

$$y = Y_o e^{-qt} + M e^{-ct} \cos(d \cdot t - \varphi)$$

met

$q = 1/3\, A - (S + T)$

$c = 1/3\, A + \frac{1}{2}(S + T)$

$d = \frac{1}{2}\sqrt{3}(S - T)$

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{-q^2 + c^2 - d^2}{2\,c\,d}$$

Uit de beginvoorwaarden volgt

$$M = -V_o / \left\{ (q - c) \cos\varphi + d \sin\varphi \right\}$$

$$Y_o = -M \cos\varphi$$

Hierin is V_o de aanvaarsnelheid in de richting van de invering.

- Indien $(Q^3 + R^2) < 0$ dan is de oplossing

$$y = Y_1 e^{p_1 t} + Y_2 e^{p_2 t} + Y_3 e^{p_3 t}$$

met

$$p_1 = 2a \cos\varphi - 1/3\,A$$

$$p_2 = -a \cos\varphi - 1/3\,A - \sqrt{3}\,a \sin\varphi$$

$$p_3 = -a \cos\varphi - 1/3\,A + \sqrt{3}\,a \sin\varphi$$

met

$$a = (-Q)^{\frac{1}{2}}$$

$$3\varphi = \text{arc cos } (R/(-Q)^{3/2})$$

en uit de beginvoorwaarden volgt:

$$Y_2 = \frac{(p_1^2 - p_3^2)\,V_o}{(p_2 - p_1)(p_3^2 - p_1^2) - p_1(p_1^2 - p_2^2) + p_3(p_1^2 - p_2^2)}$$

$$Y_1 = -Y_2 \left\{ 1 + \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_3^2 - p_1^2} \right\}$$

$$Y_3 = -Y_1 - Y_2$$

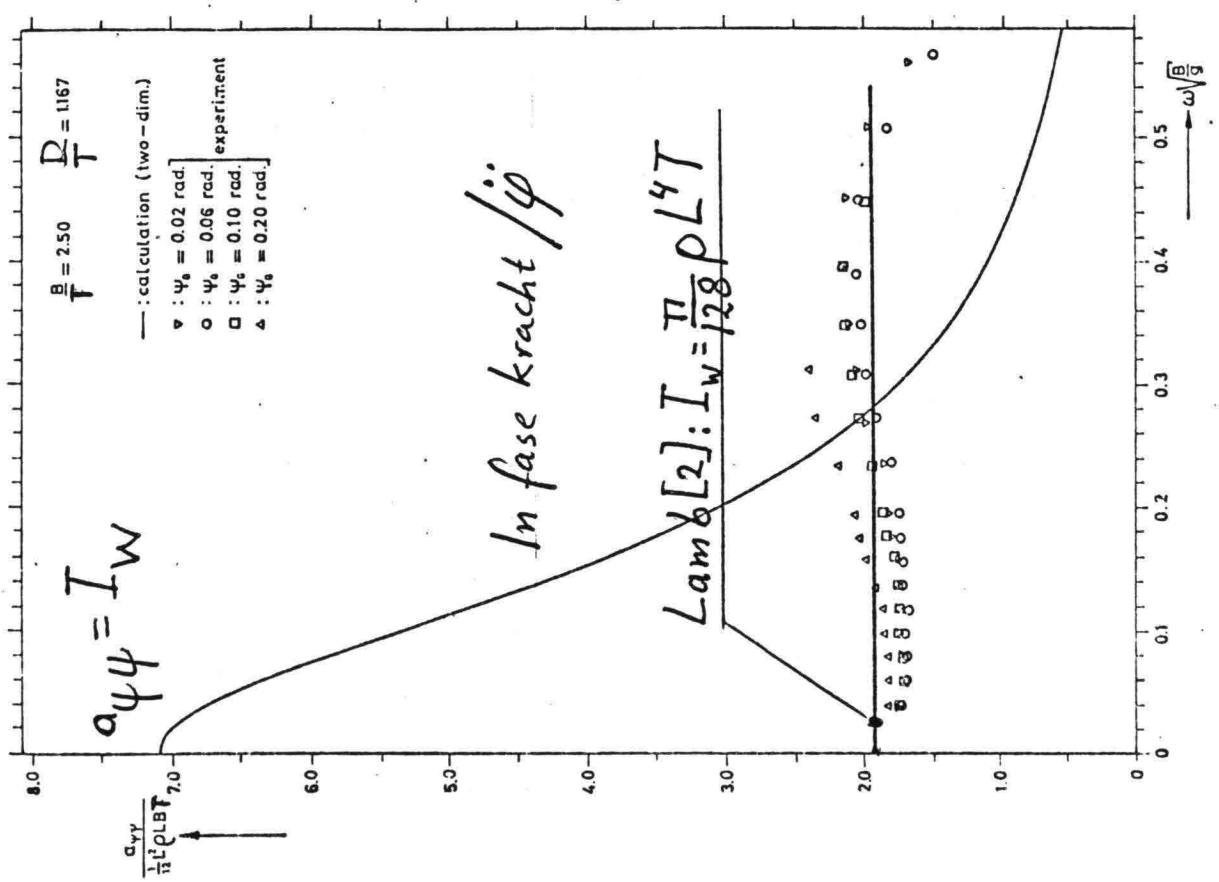
RESULTATEN OSCILLATIEPROEVEN

oscillatie in dwarsrichting

Fig. 1

RESULTATEN OSCILLATIEPROEVEN

roterende oscillatie om vert. as



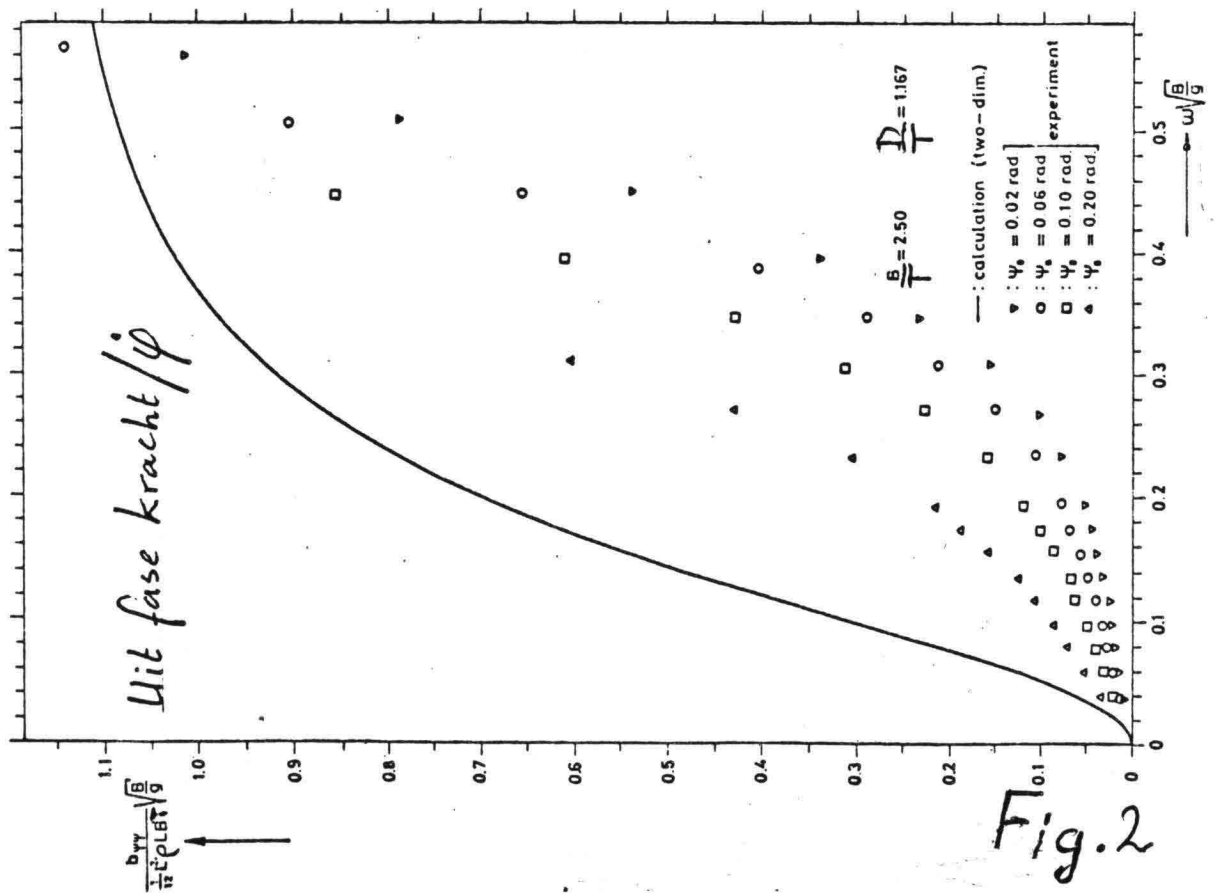
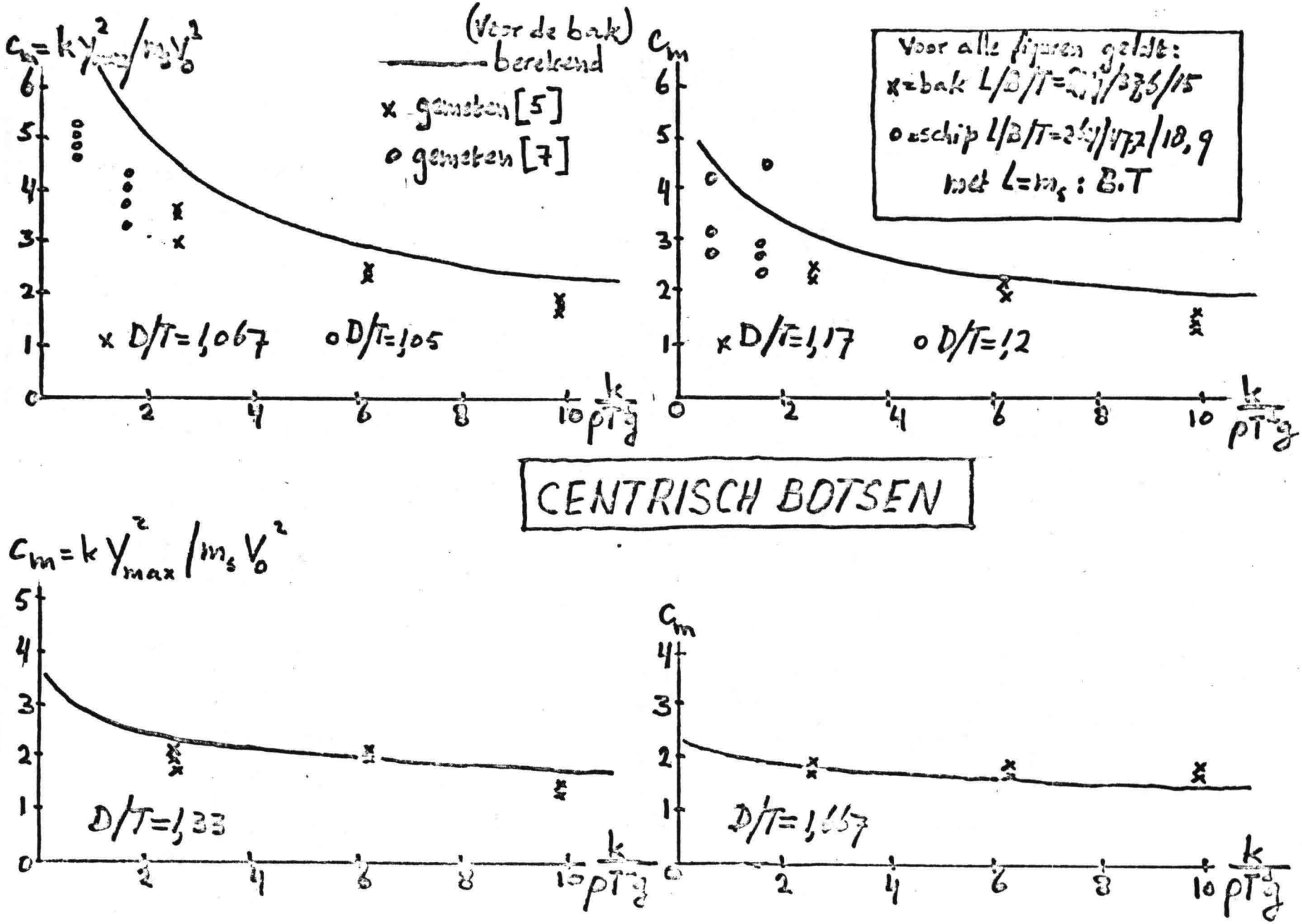


fig.18— Yaw damping moment coefficient

Fig.2



$c_m = k Y_{max}^2 / m_s V_0^2$
(Voor de bak)
berekend
x gemeten [5]
o gemeten [7]
x D/T=1,067
o D/T=1,05
c_m
Voor alle figuren geldt:
x=bak L/B/T=
o=schip L/B/T=
met L=m_s : B.T
x D/T=1,17
o D/T=1,2
$\frac{k}{\rho T g}$
CENTRISCH BOTSEN
$c_m = k Y_{max}^2 / m_s V_0^2$
D/T=1,33
D/T=1,667

Fig. 3

EXCENTRISH BOTSEN

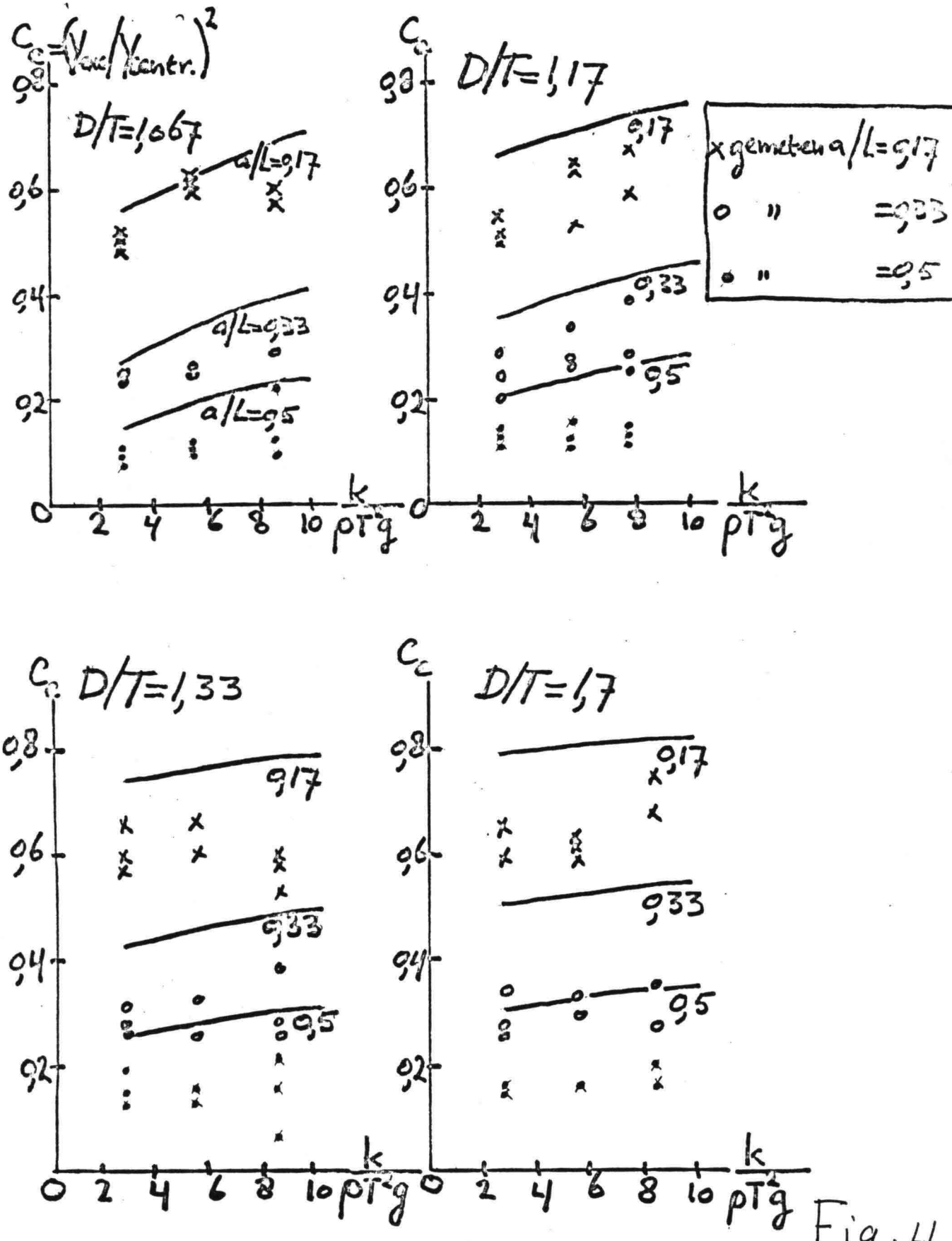
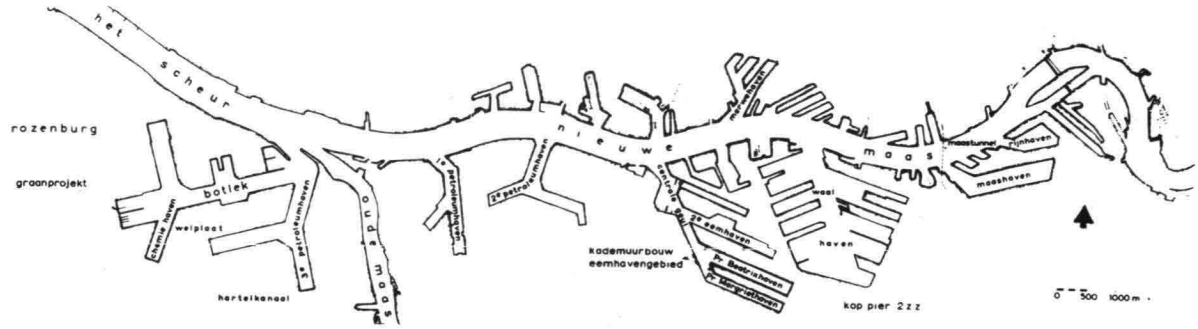
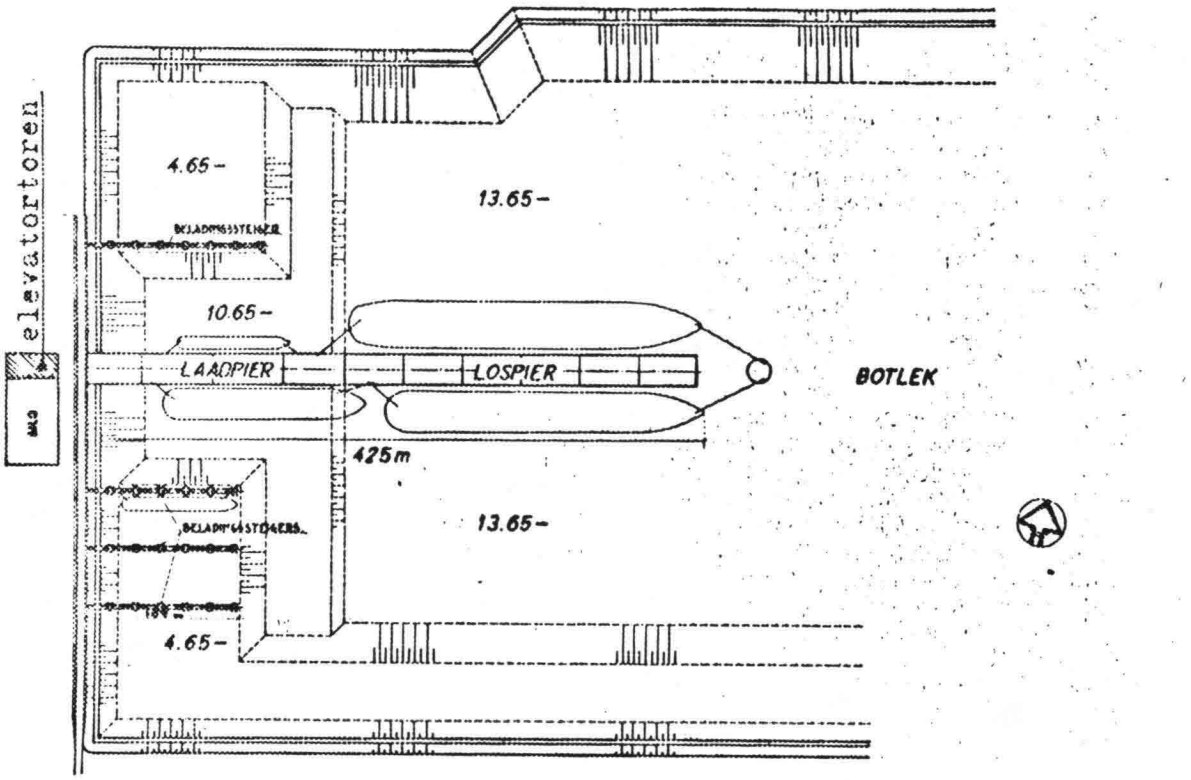


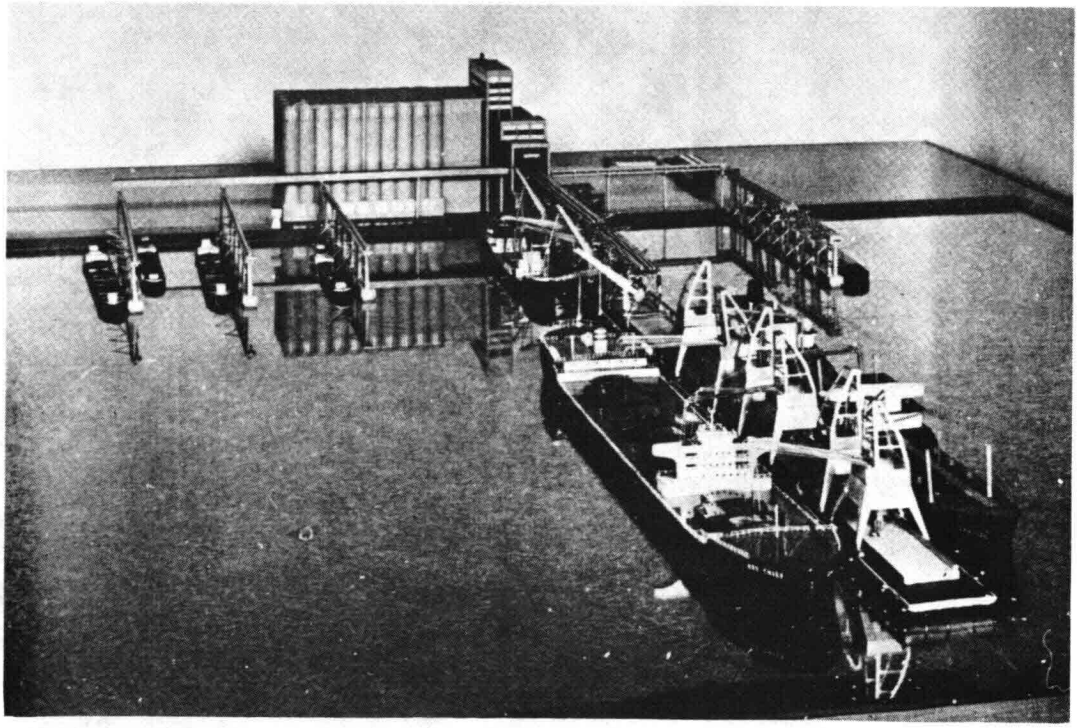
Fig. 4

STEIGER VOOR GRAANOVERSLAG IN HET BOTLEKGEBIED TE ROTTERDAM.

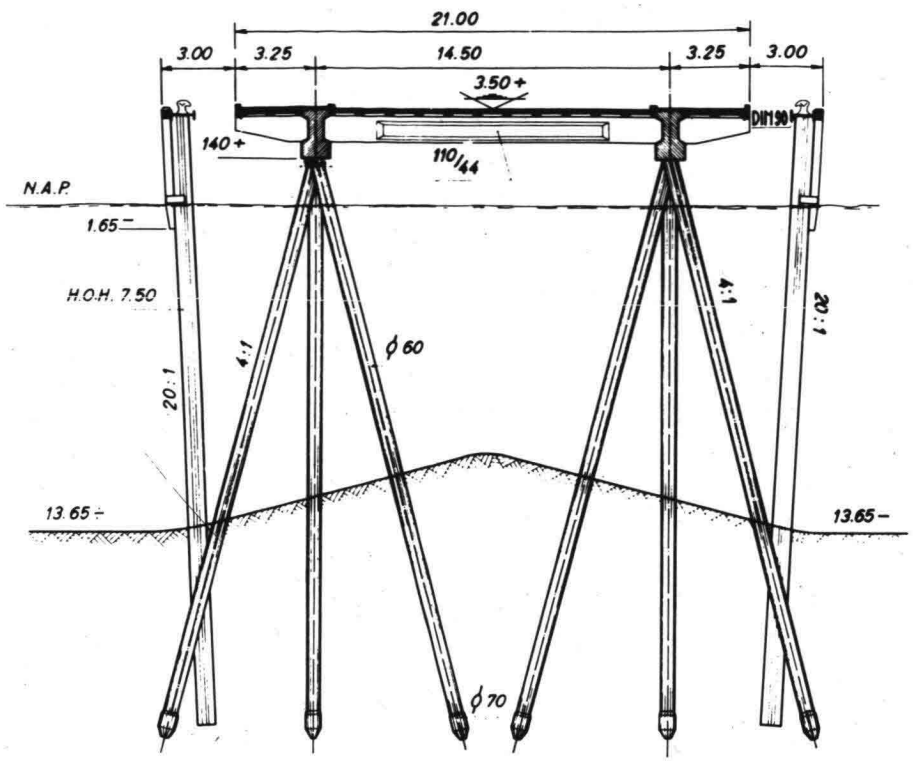
overzichtskaart havengebied



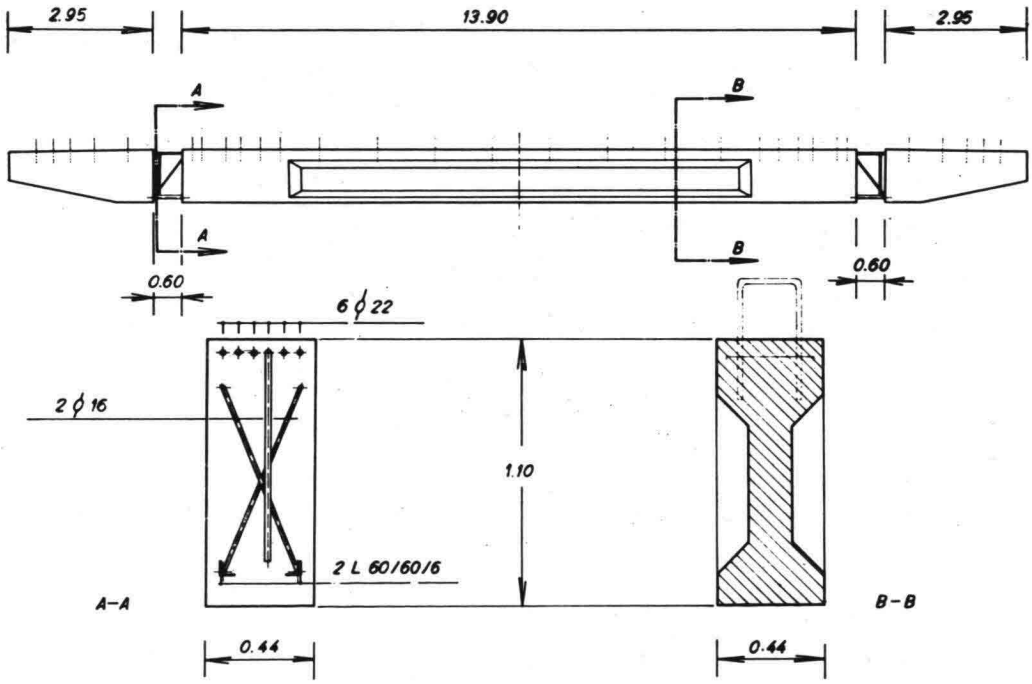




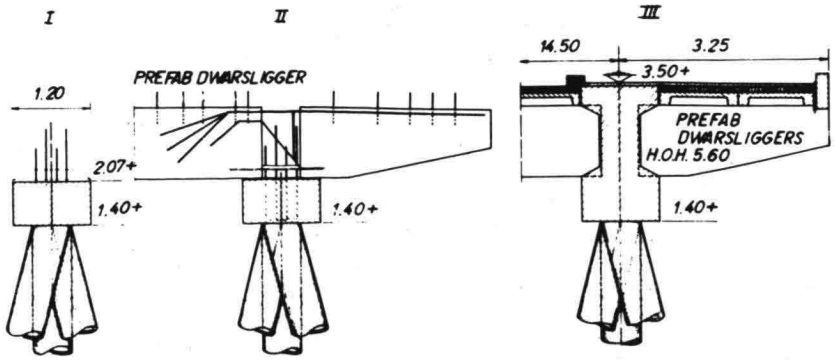
STEIGER VOOR GRAANOVERSLAG IN HET BOTLEKGEBIED TE ROTTERDAM.



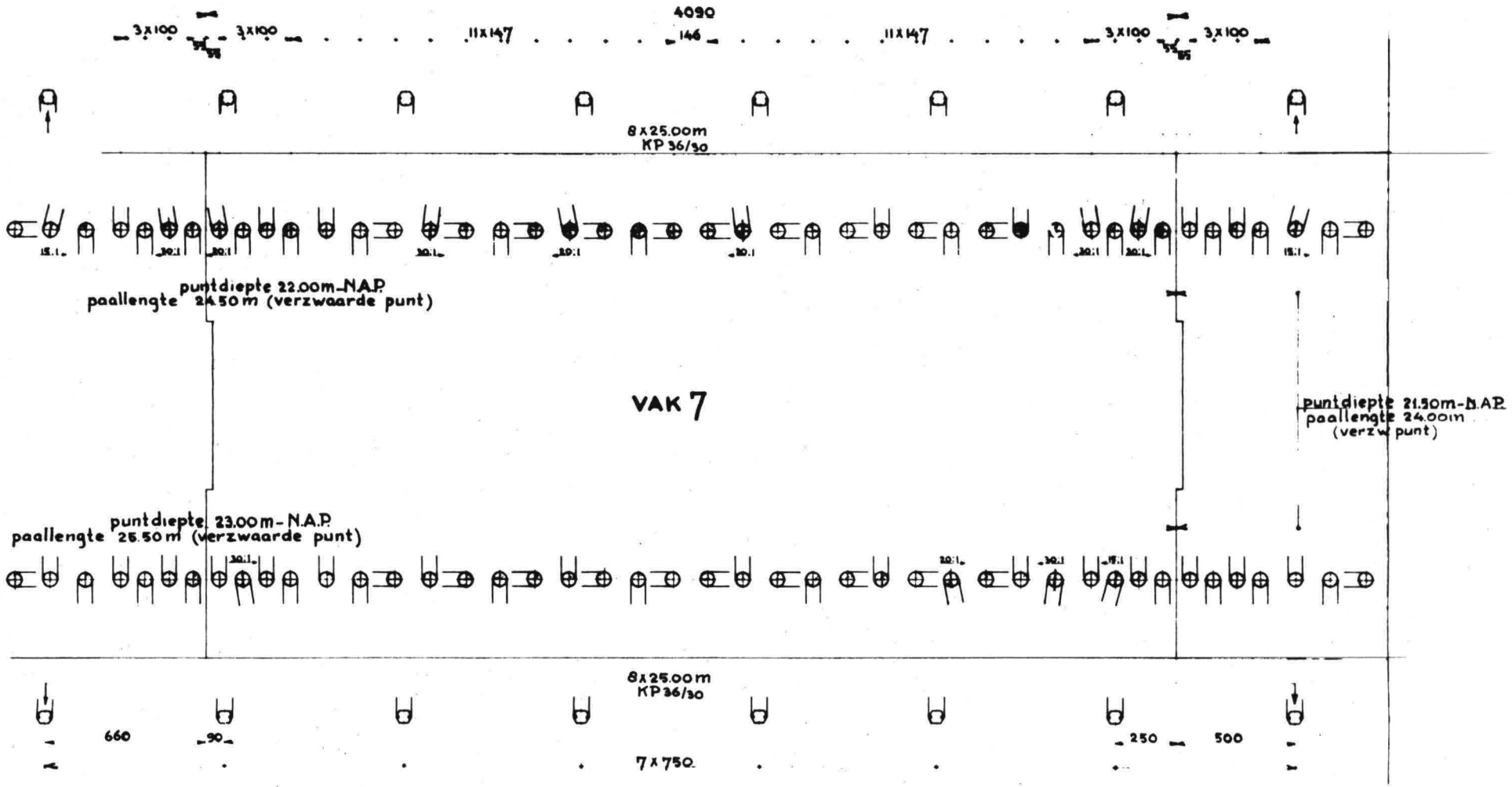
Dwarsdoorsnede van de lospier.



Aanzicht en doorsneden van de prefab. dwarsligger.



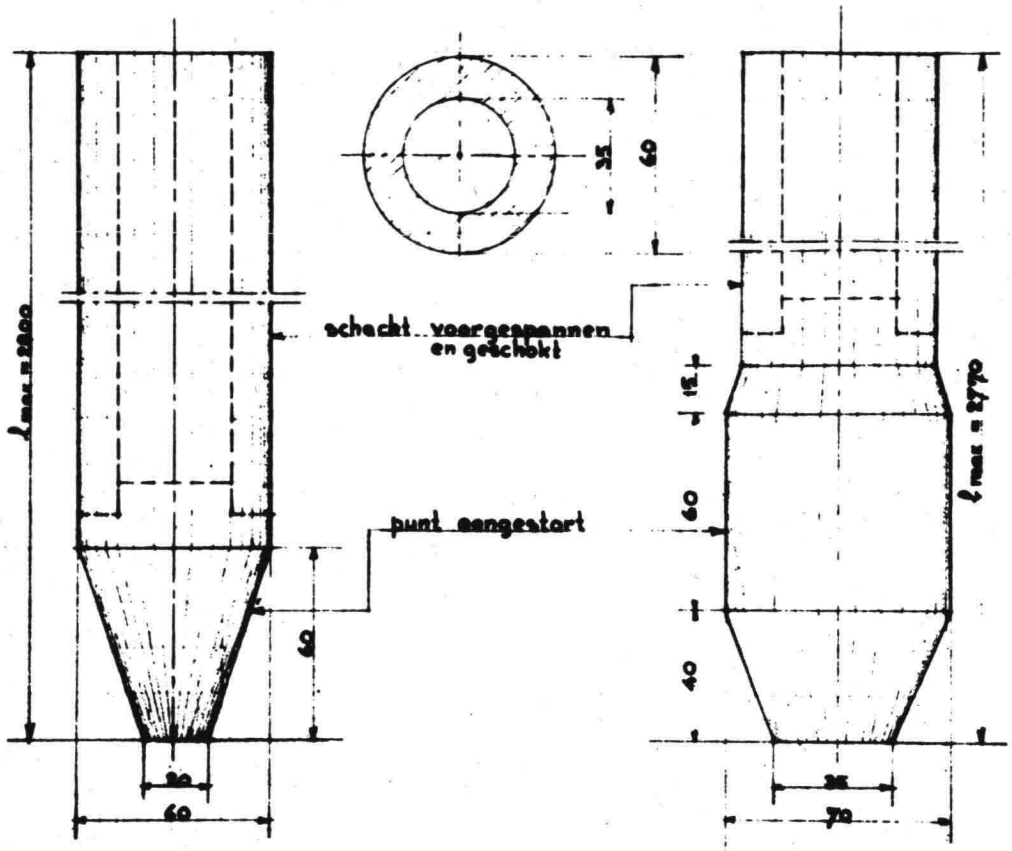
Fasen van uitvoering.



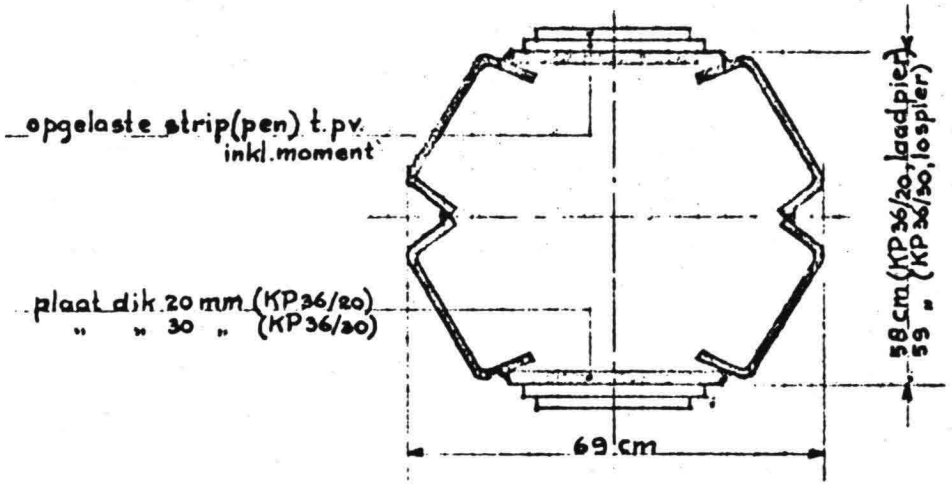
GED. PALENPLAN

STEIGER VOOR GRAANOVERSLAG IN HET BOTLEKGEBIED TE ROTTERDAM.

STEIGER VOOR GRAANOVERSLAG IN HET BOTLEKGEBIED TE ROTTERDAM.



Detail holle ronde voorgespannen betonnen paal zonder en met verzwaarde punt.



Doorsnede van een remmingpaal.

STEIGER OP HET EILAND ST. MAARTEN.

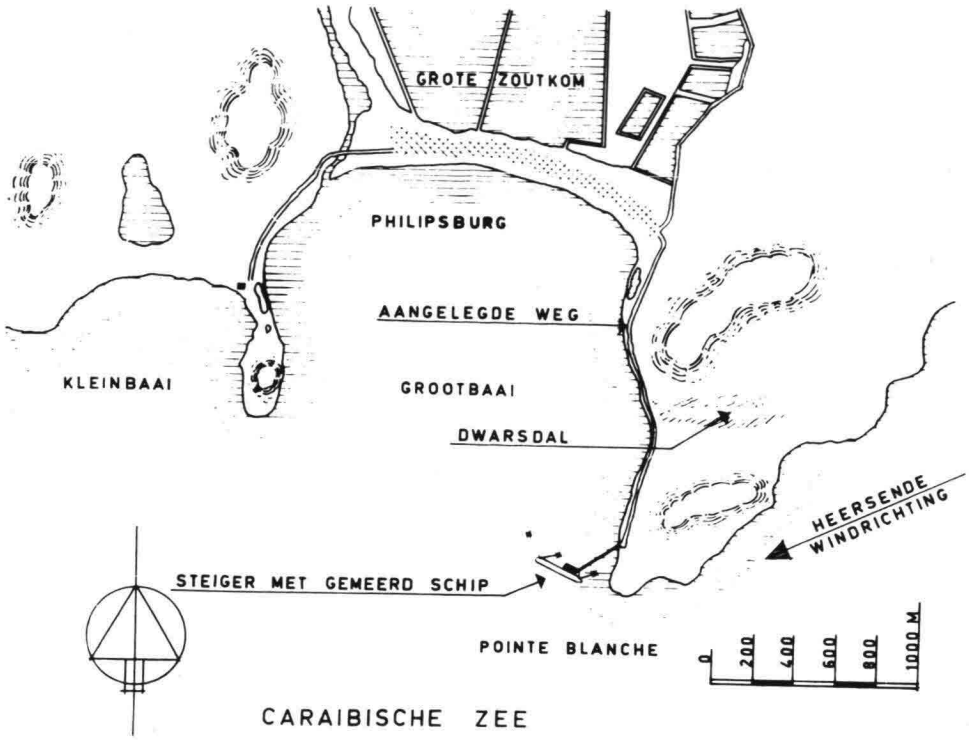
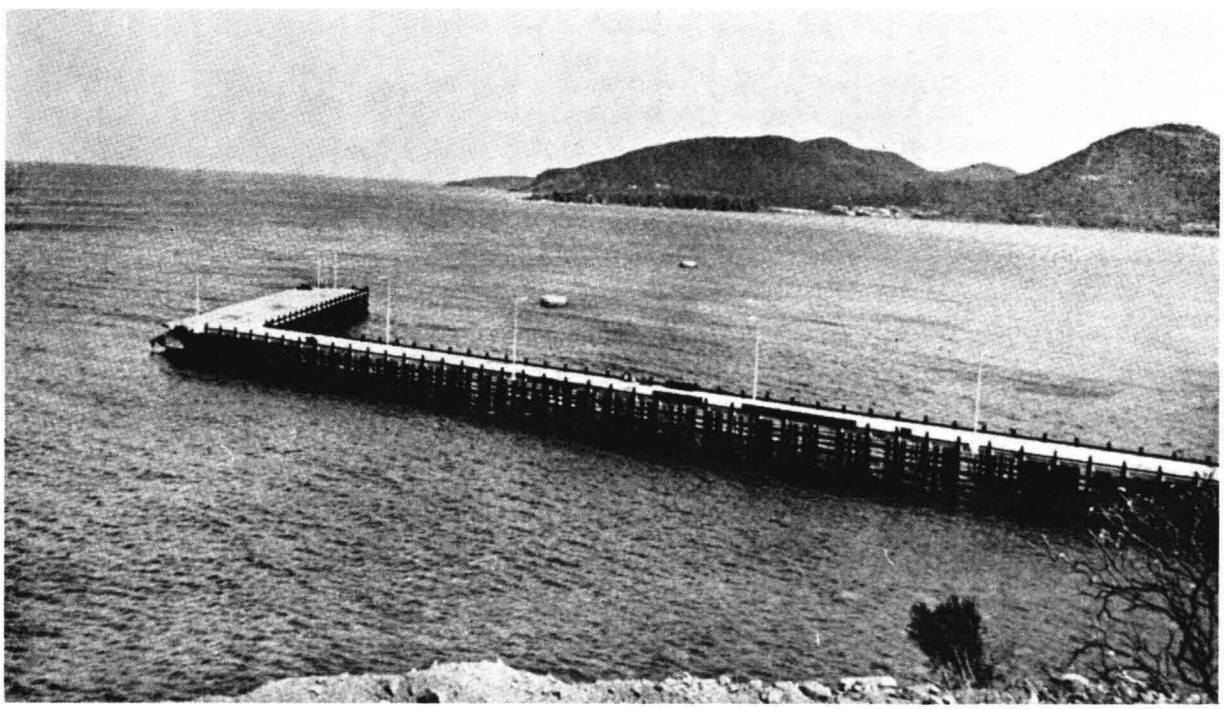


Fig. 1. Situatie Grootbaai op St. Maarten.



ig. 2b. Overzicht voltooide steiger. *Foto: Regerings-voorlichtingsdienst der Nederlandse Antillen.*

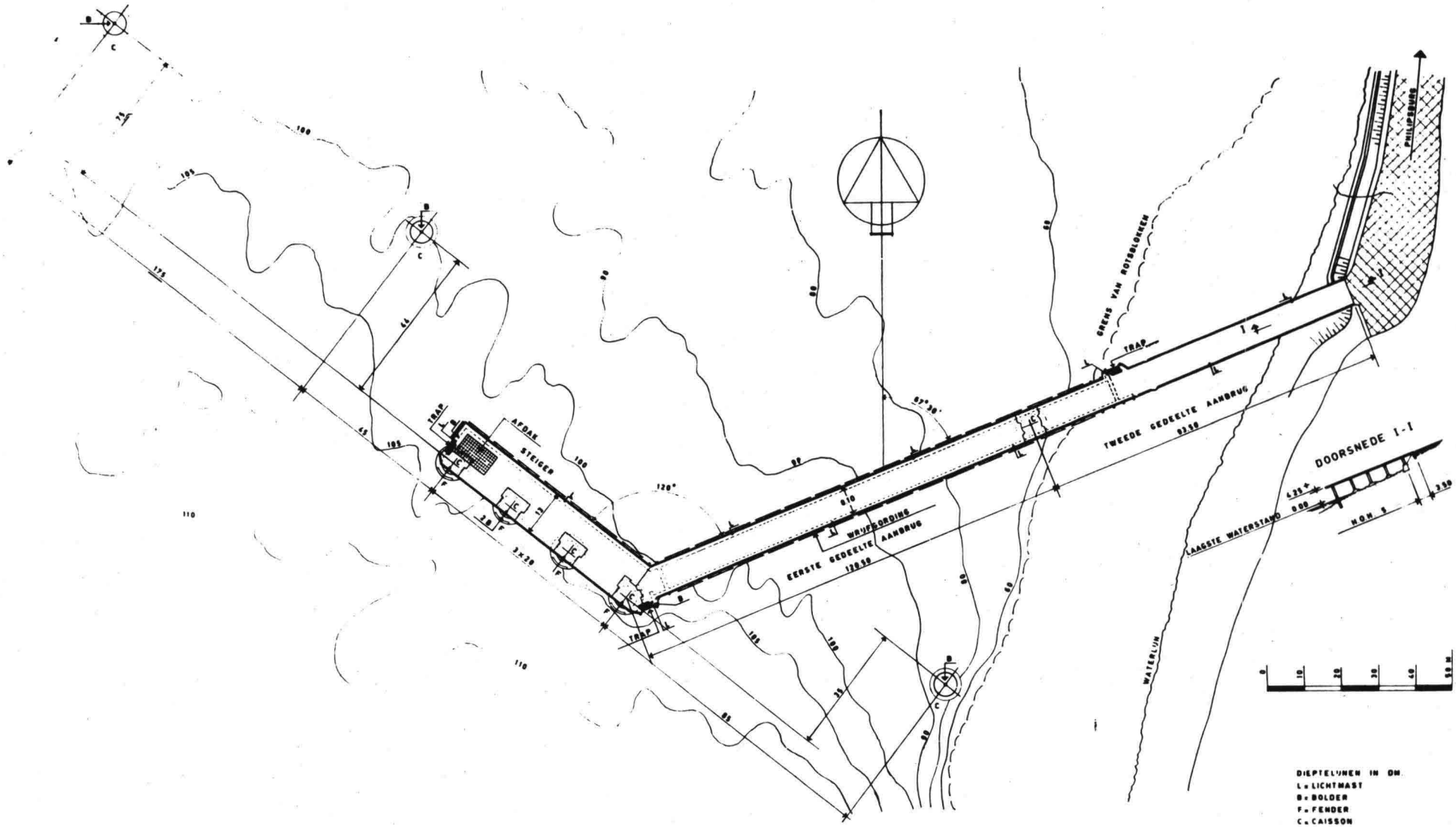
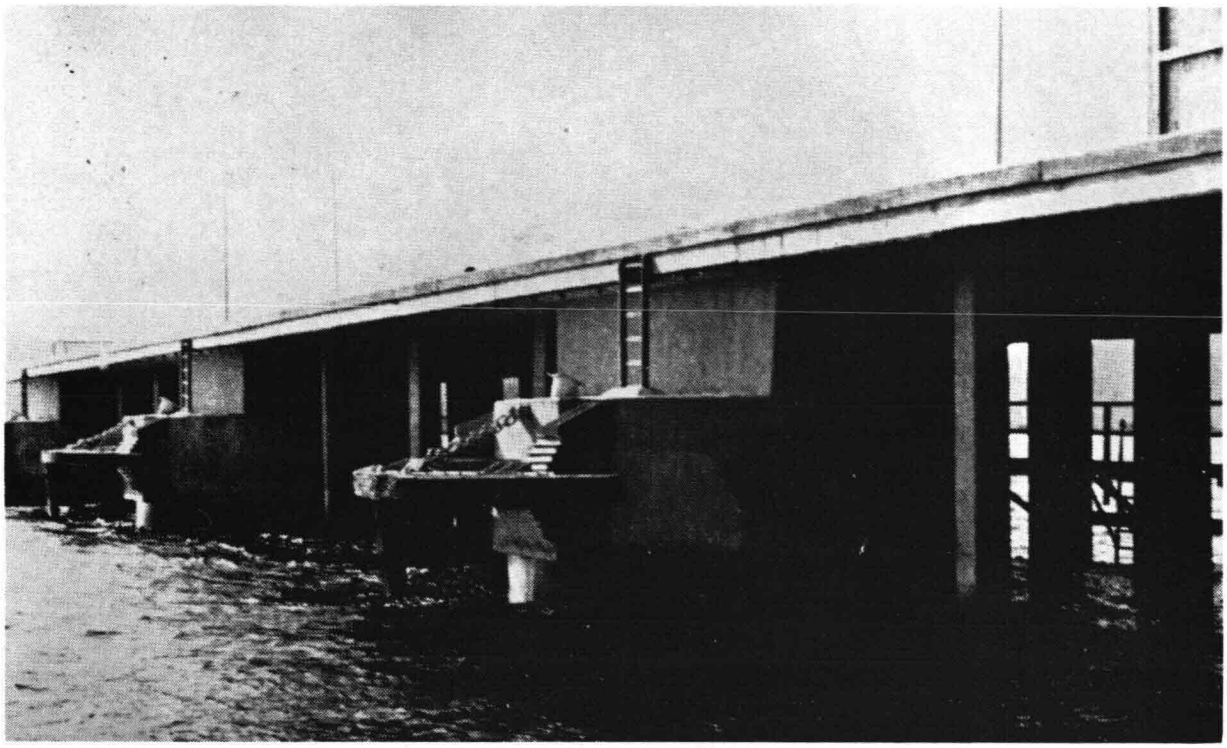


Fig. 2a. Overzicht van de steiger op St. Maarten. Zie voor dwarsdoorsneden van de aanbrug en van de eigenlijke steiger de figuren 3 en 4.

STEIGER OP HET EILAND ST. MAARTEN.



Front van de steiger met Raykinfenders.

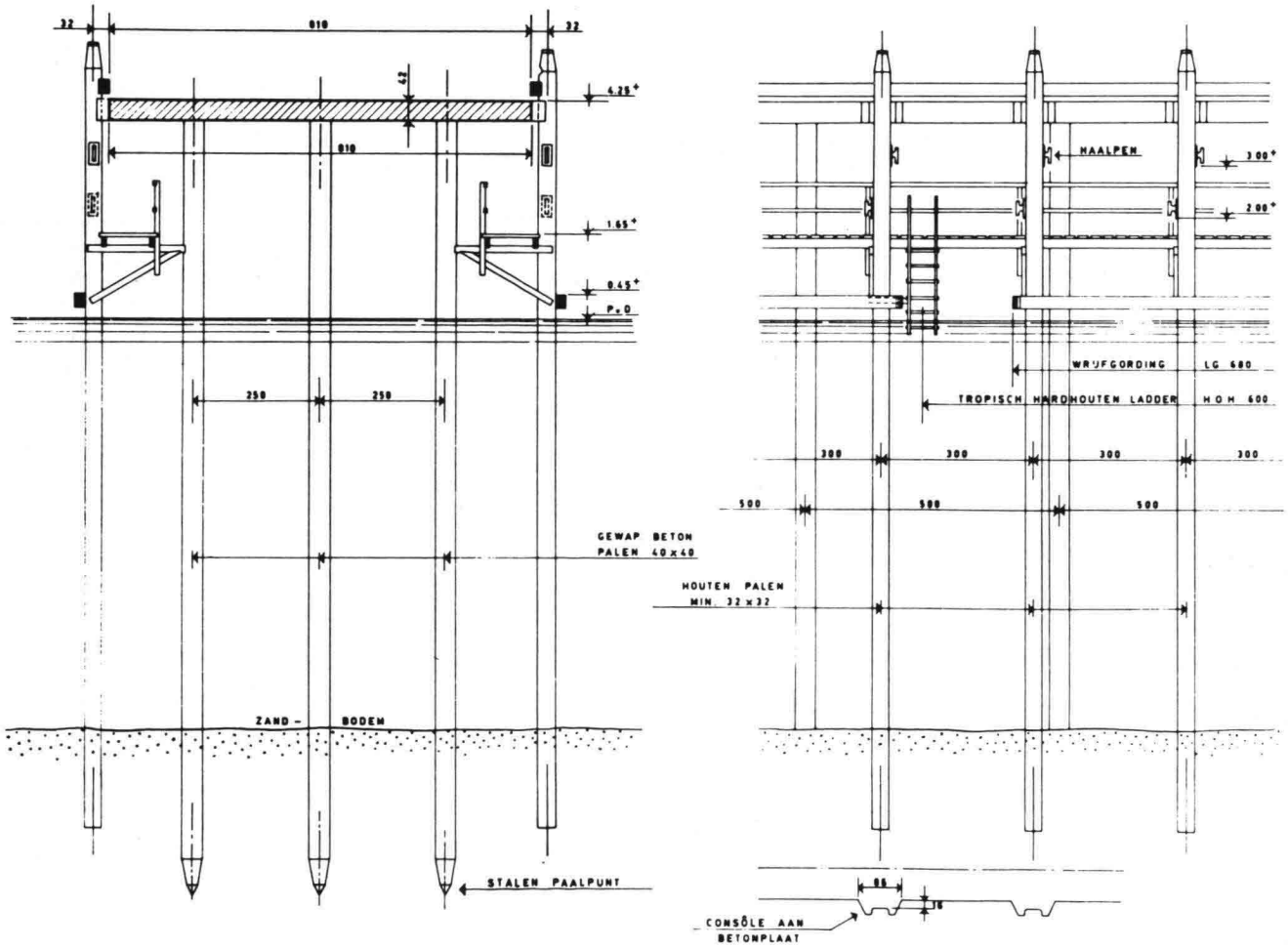


Fig. 3. Dwarsdoorsnede en gedeeltelijk aanzicht van de aanbrug.

STEIGER OP HET EILAND ST. MAARTEN.

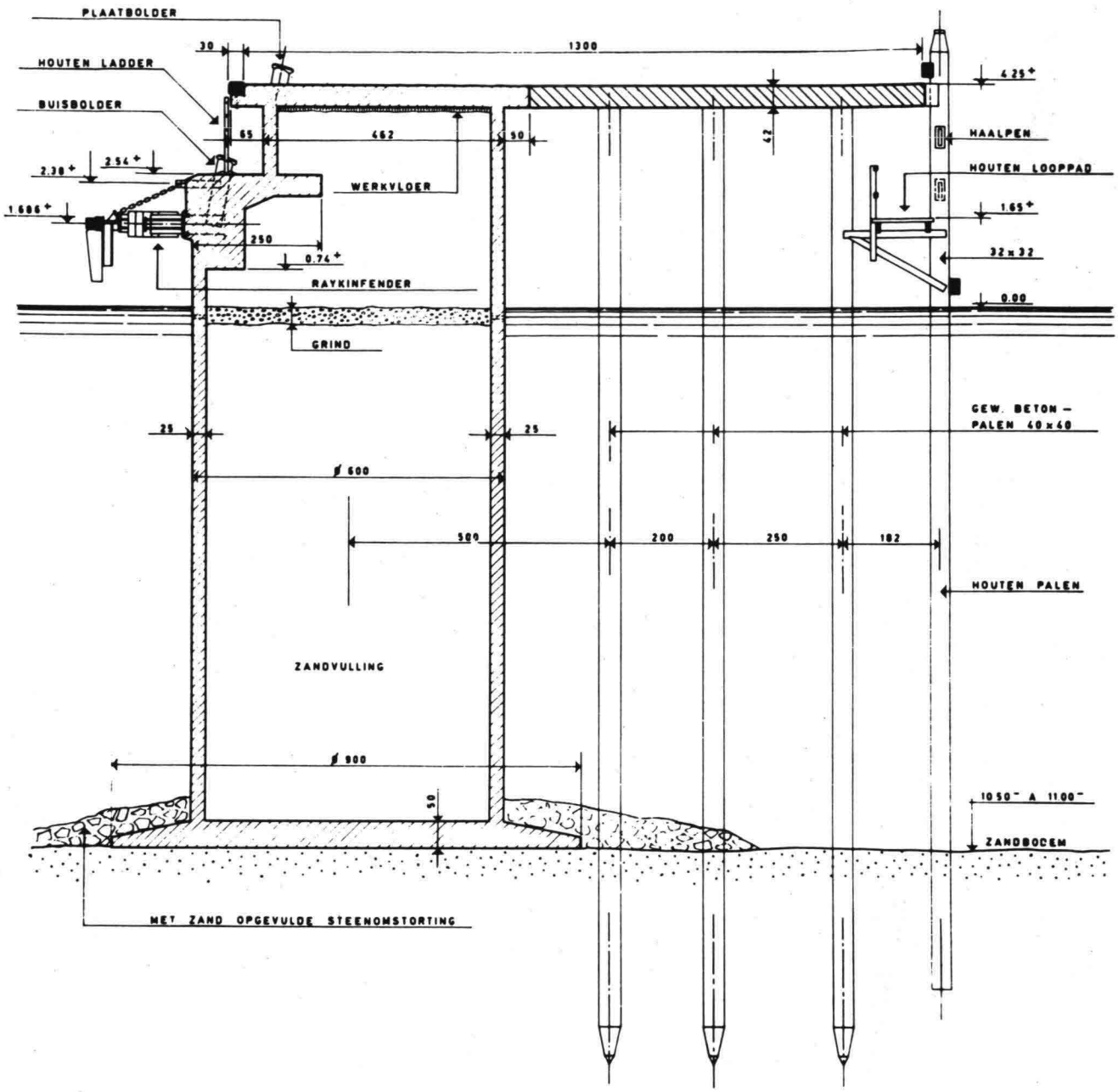


Fig. 4. Dwarsdoorsnede van de eigenlijke steiger. Zie voor fenderconstructie figuur 6.

STEIGER OP HET EILAND ST. MAARTEN.

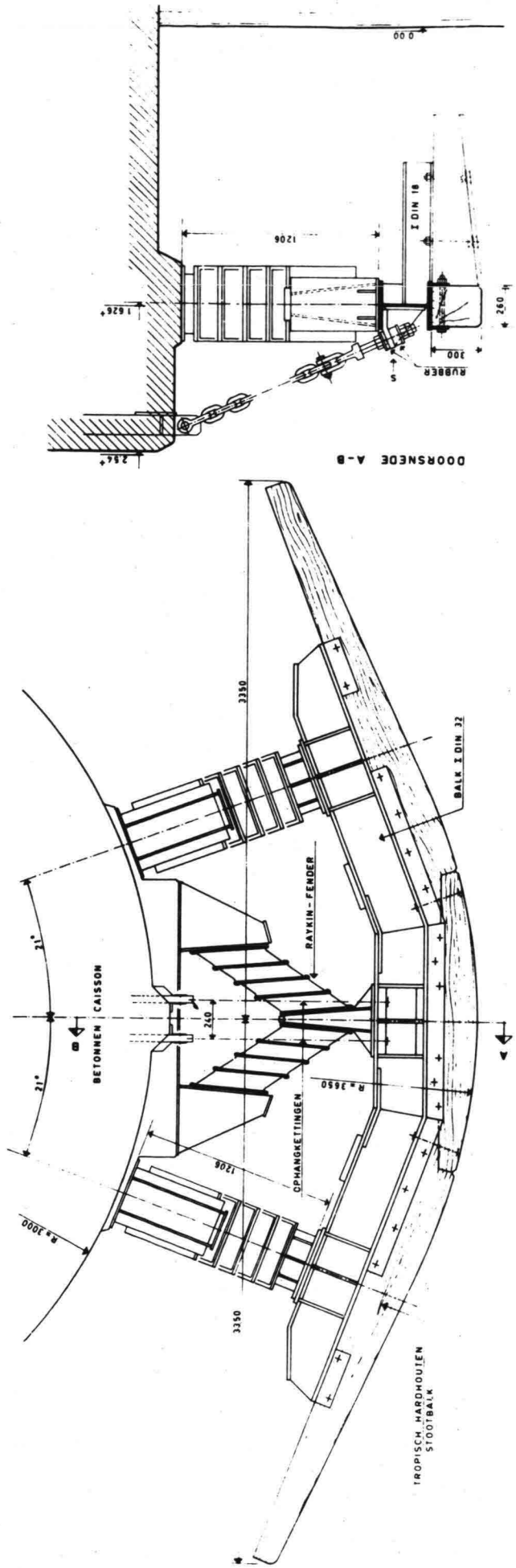


Fig. 6. Fenderconstructie.

STEIGER IN DE WESTERSCHELDE TE TERNEUZEN

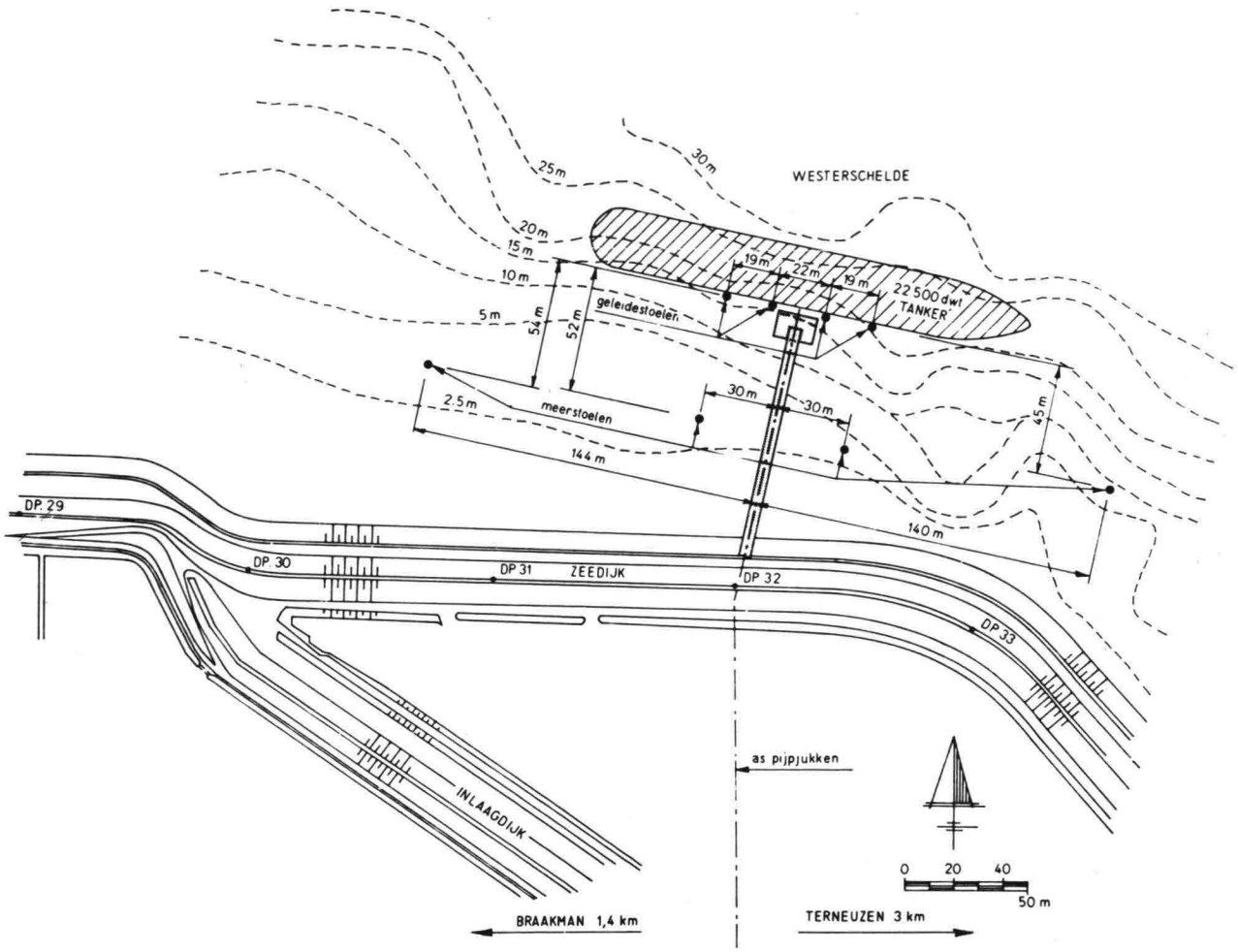
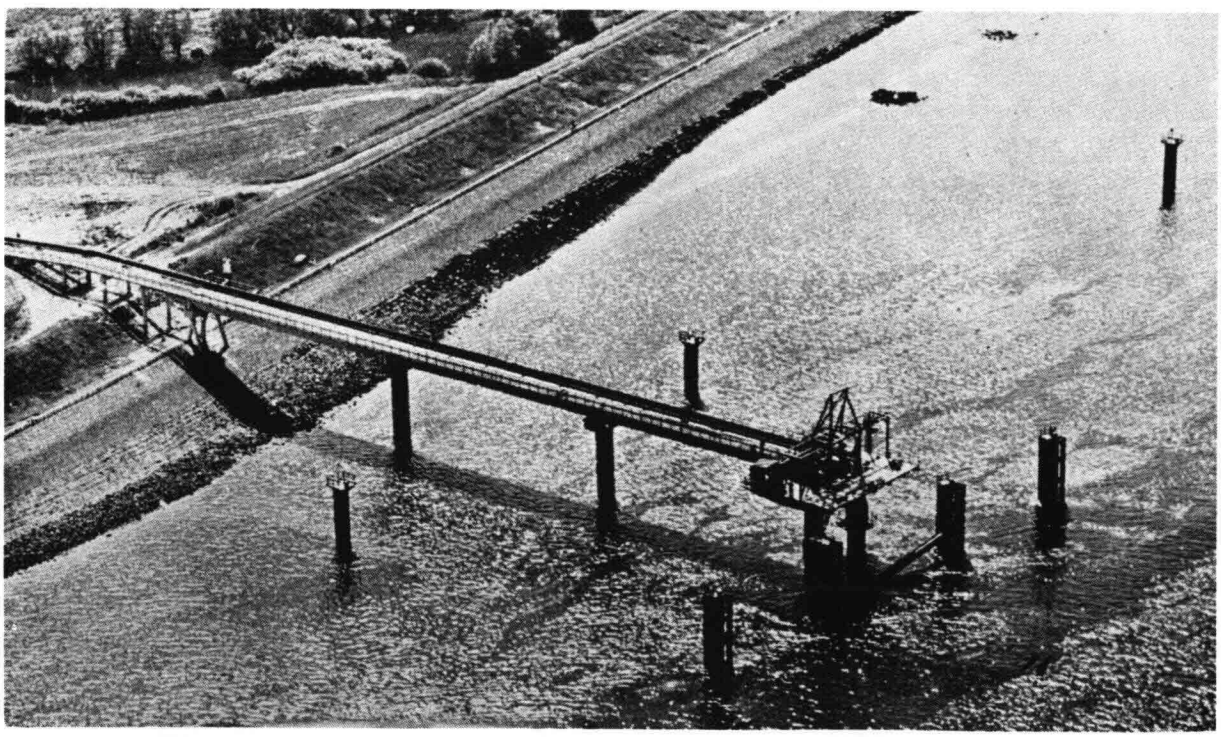


Fig. 1. Situatie steiger van 'Dow Chemical Internationaal N.V.' te Terneuzen.



Het 'front' van de steiger met geleidestoelen en remmingwerk.

STEIGER IN DE WESTERSCHELDE TE TERNEUZEN.

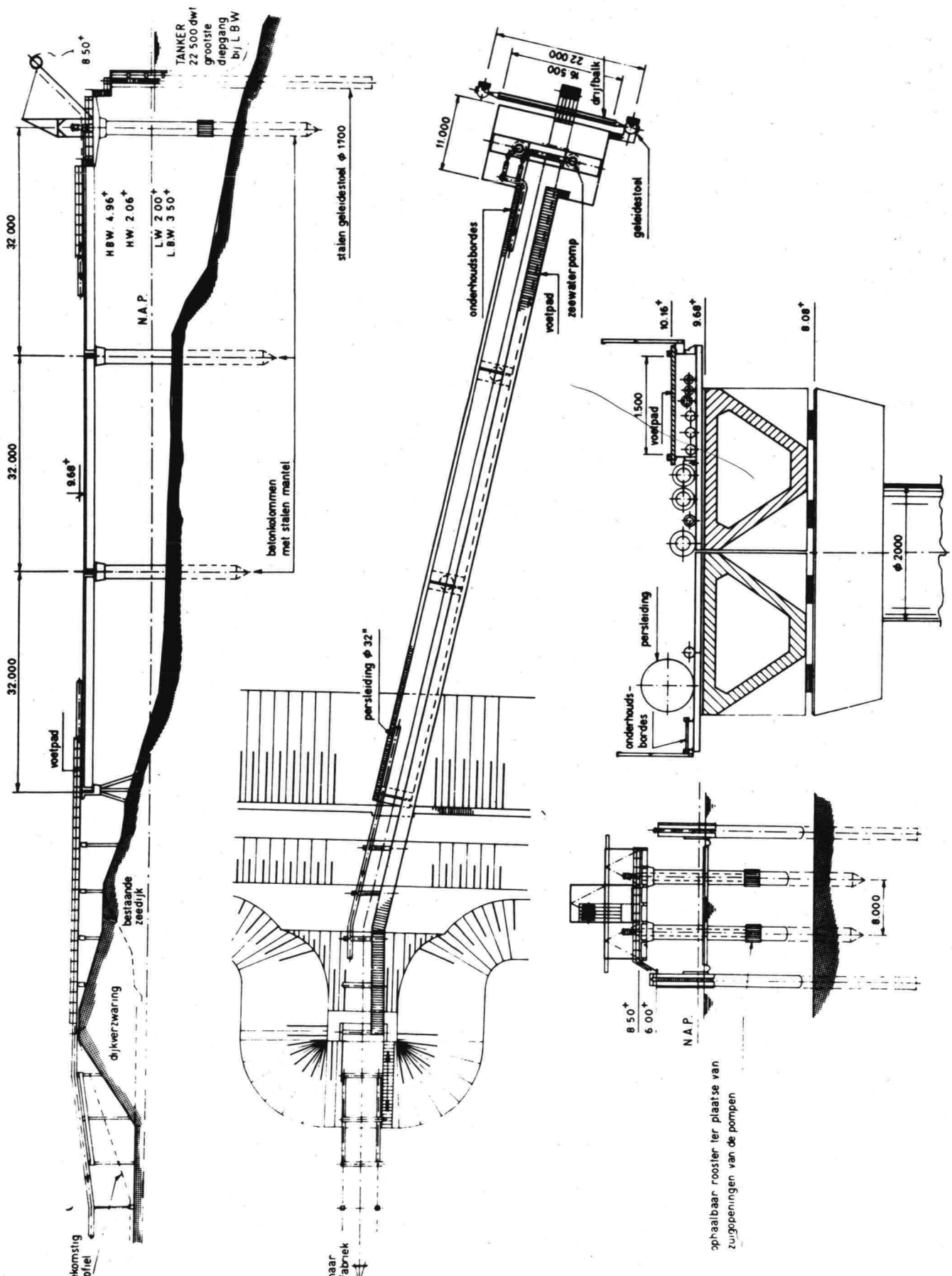
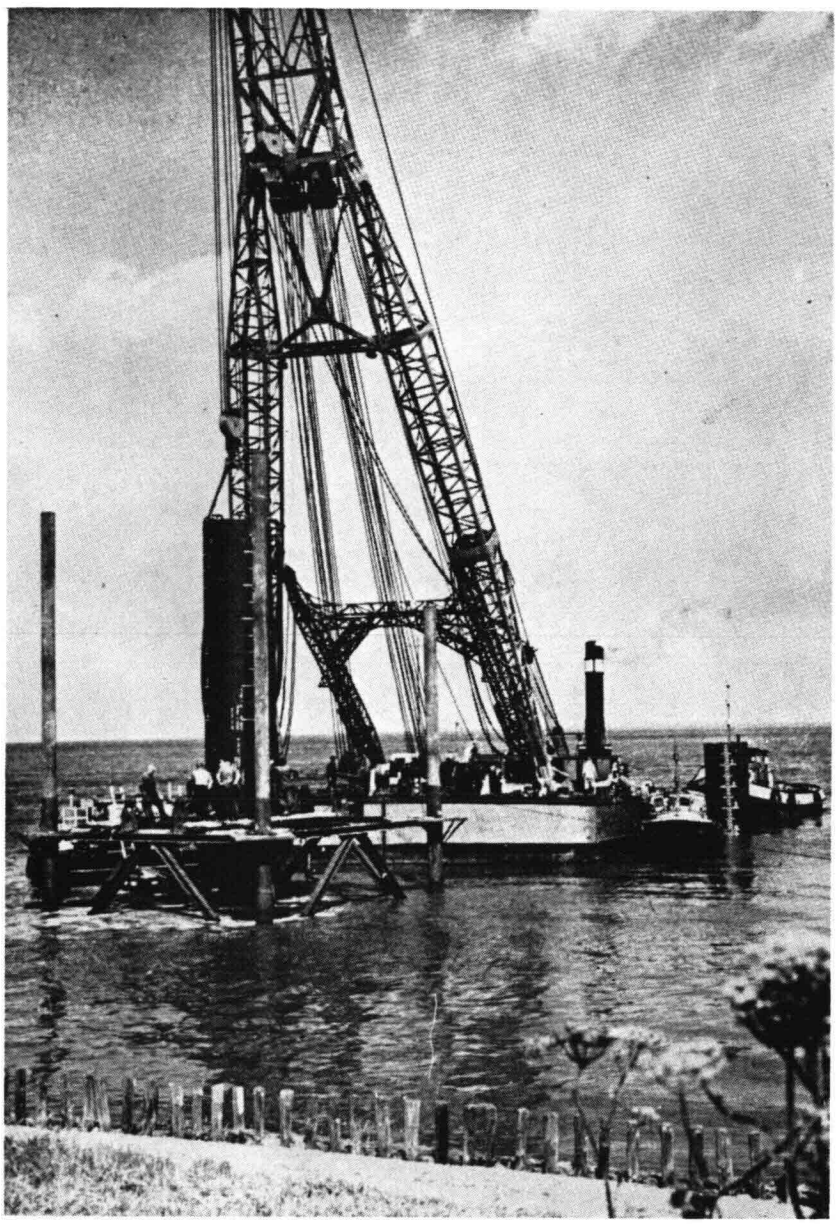
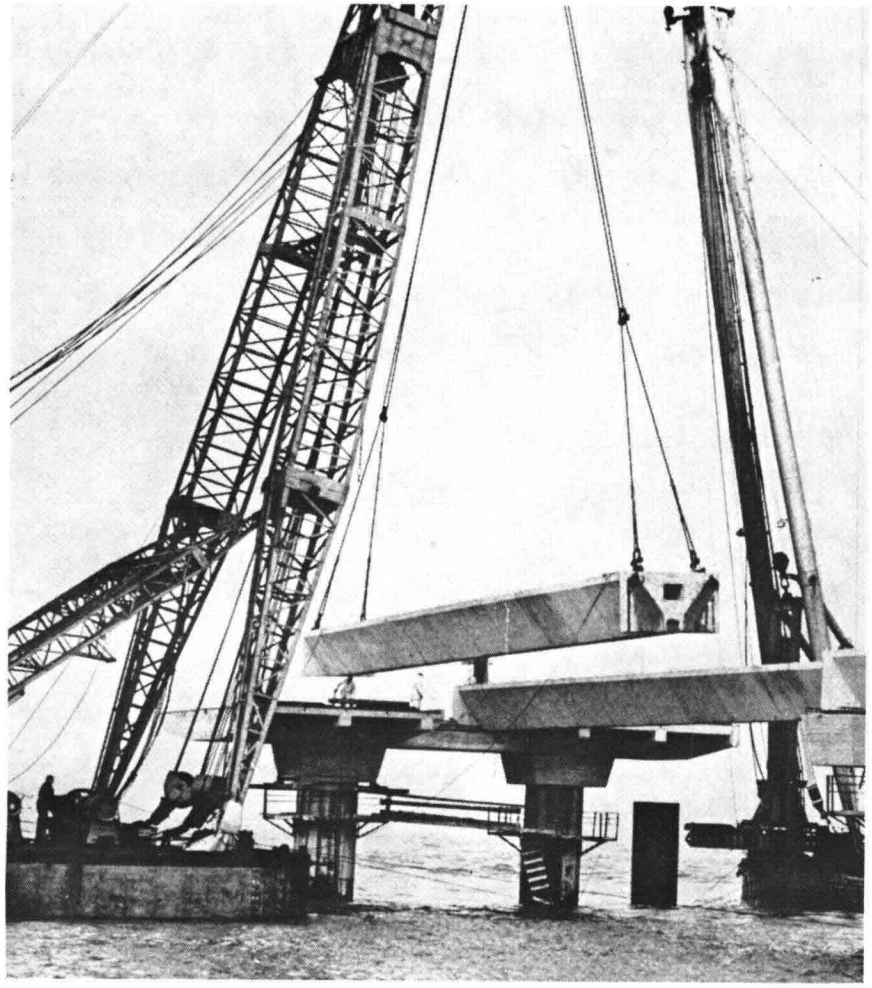


Fig. 2. Boven-, zij- en vooraanzicht, alsmede een dwarsdoorsnede der steiger.

STEIGER IN DE WESTERSCHELDE TE TERNEUZEN.

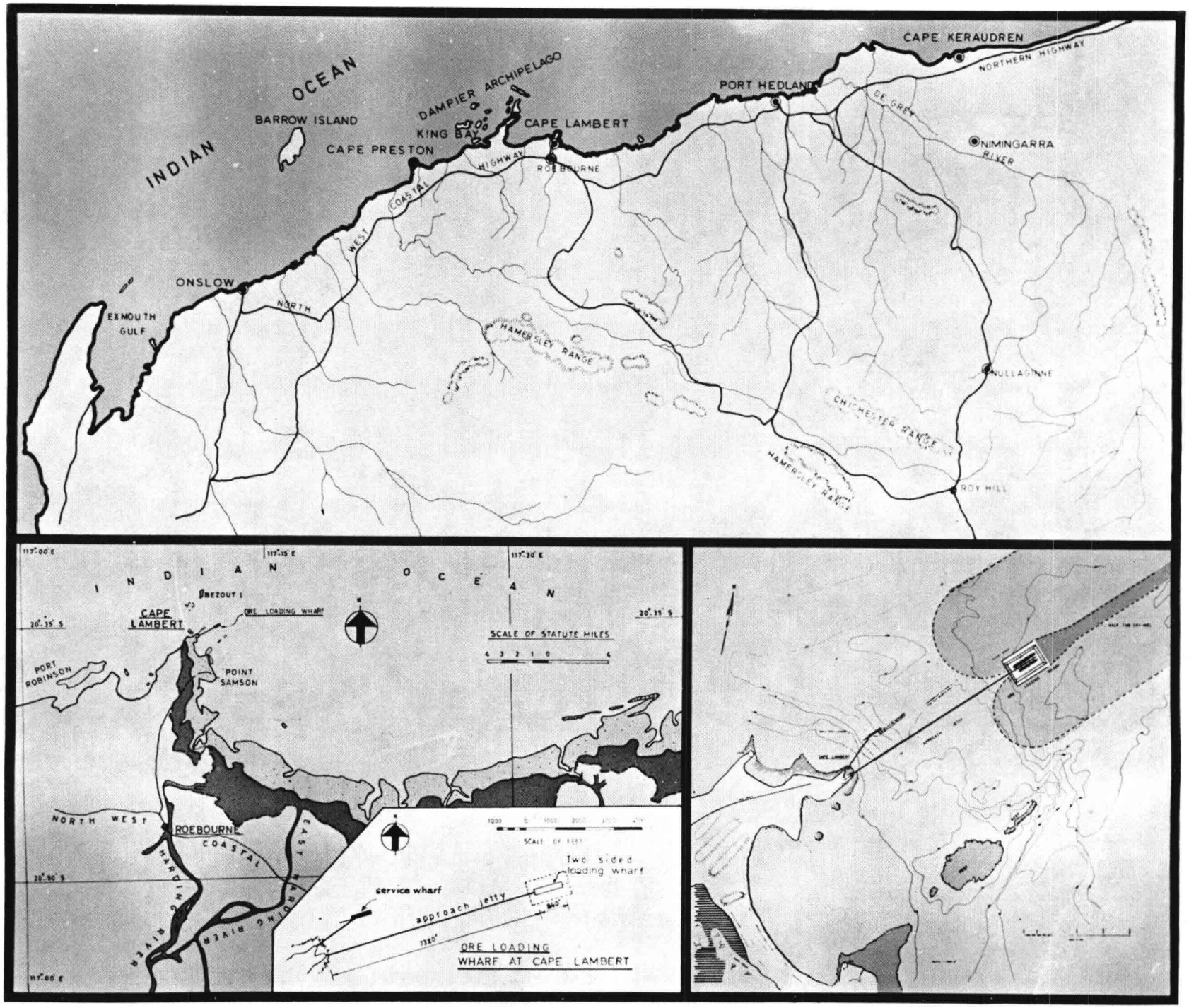


Het op diepte spuiten van een buispaal.

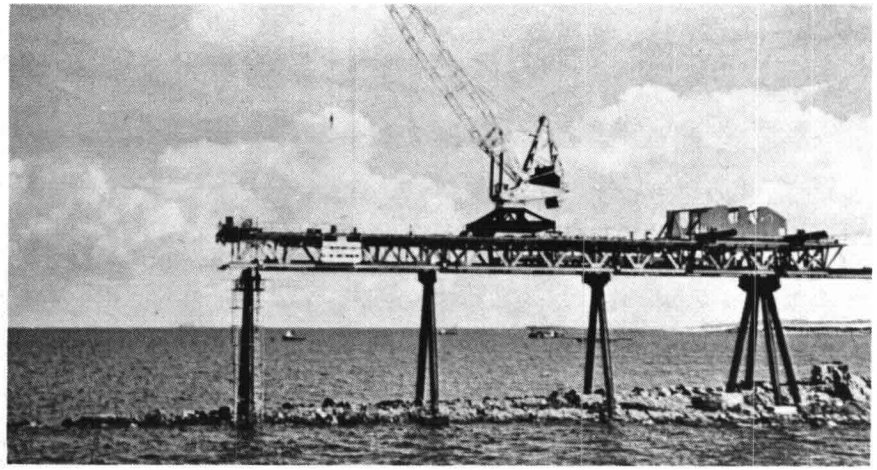


Plaatsen der spanbetonbalken, lengte 32 m.

STEIGER IN DE WESTERSCHELDE TE TERNEUZEN.



ORE LOADING WHARF AT CAPE LAMBERT, AUSTRALIA.

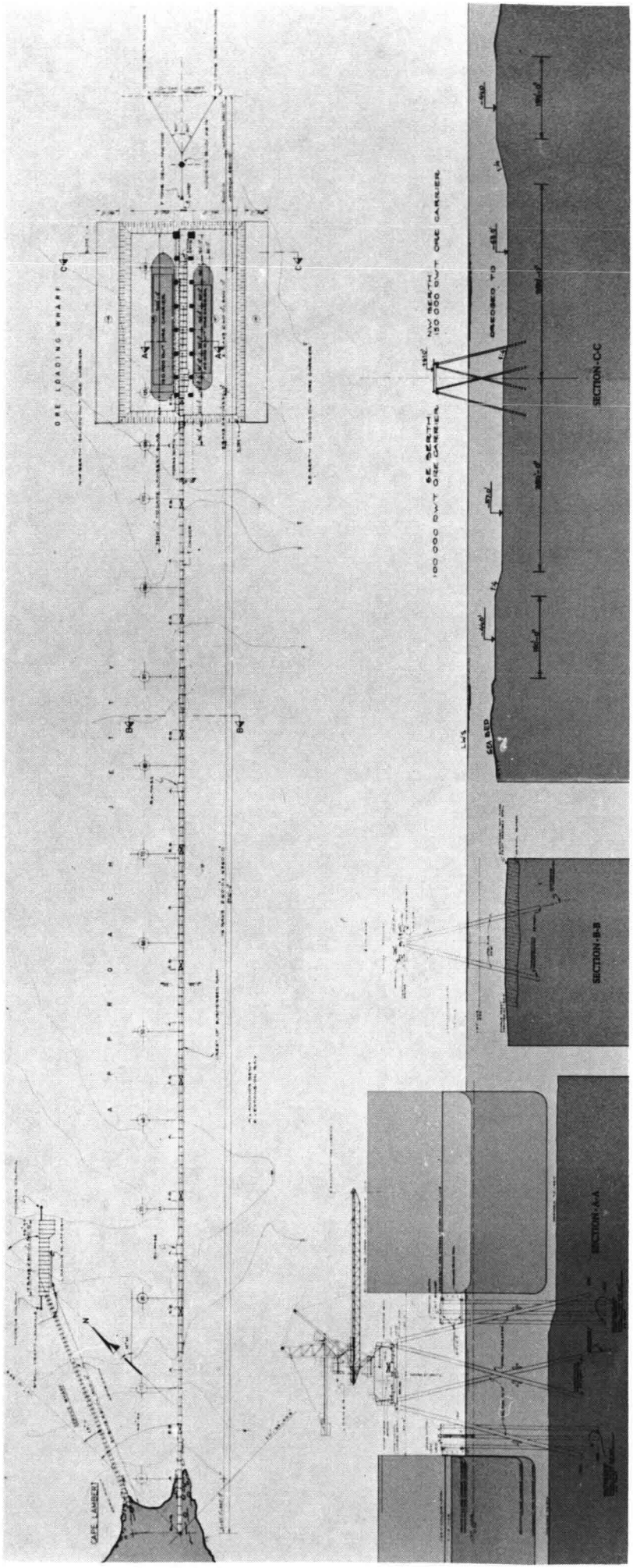


Top and side: The construction bridge rolled into launching position over the shore end of the approach leg, ready to receive its spud-frame and draw-works

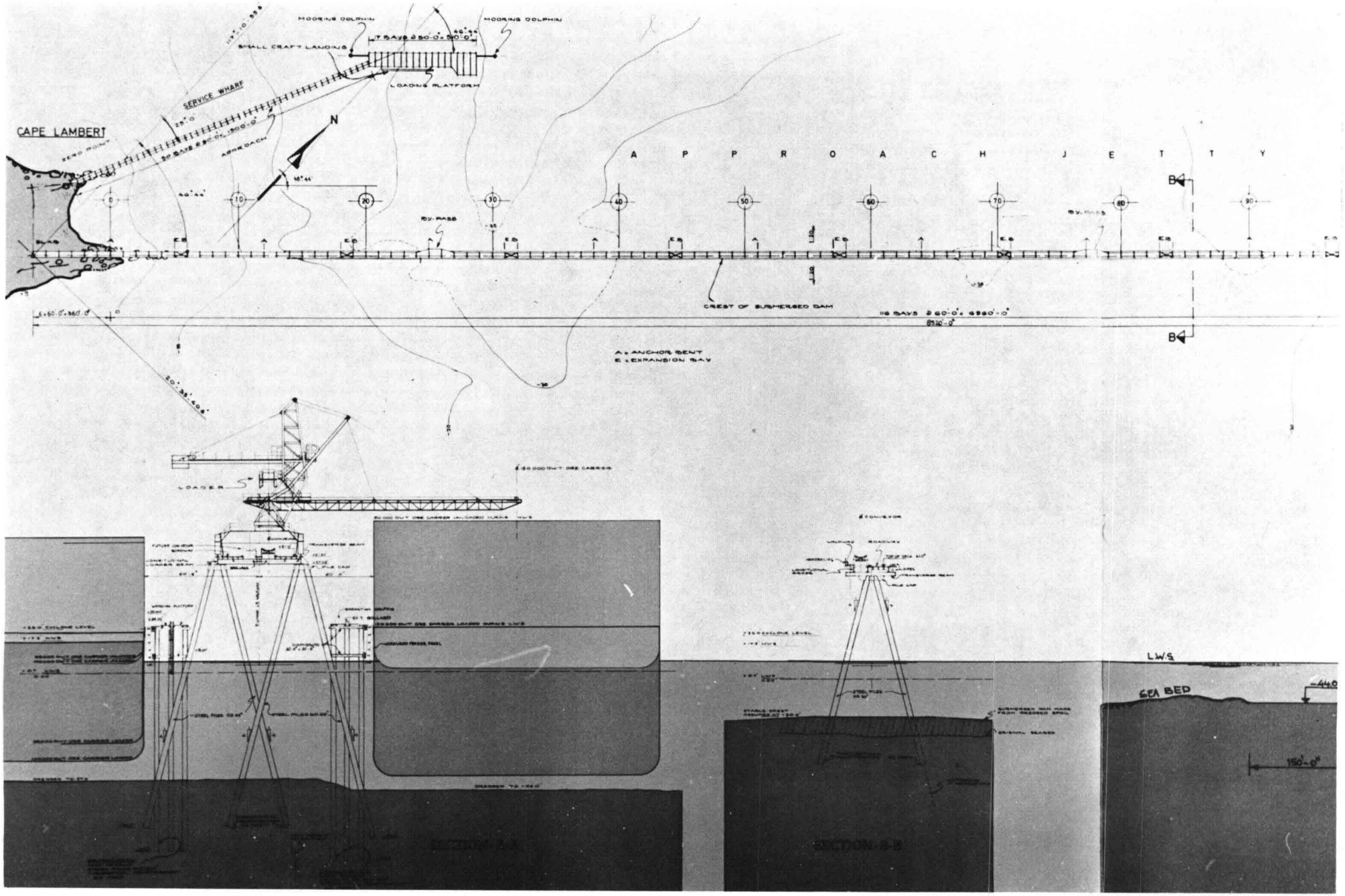
Below: Aerial view of the service wharf

ORE LOADING WHARF AT CAPE LAMBERT, AUSTRALIA.

ORE LOADING WHARF AT CAPE LAMBERT, AUSTRALIA.



50244



ORE LOADING WHARF AT CAPE LAMBERT, AUSTRALIA.