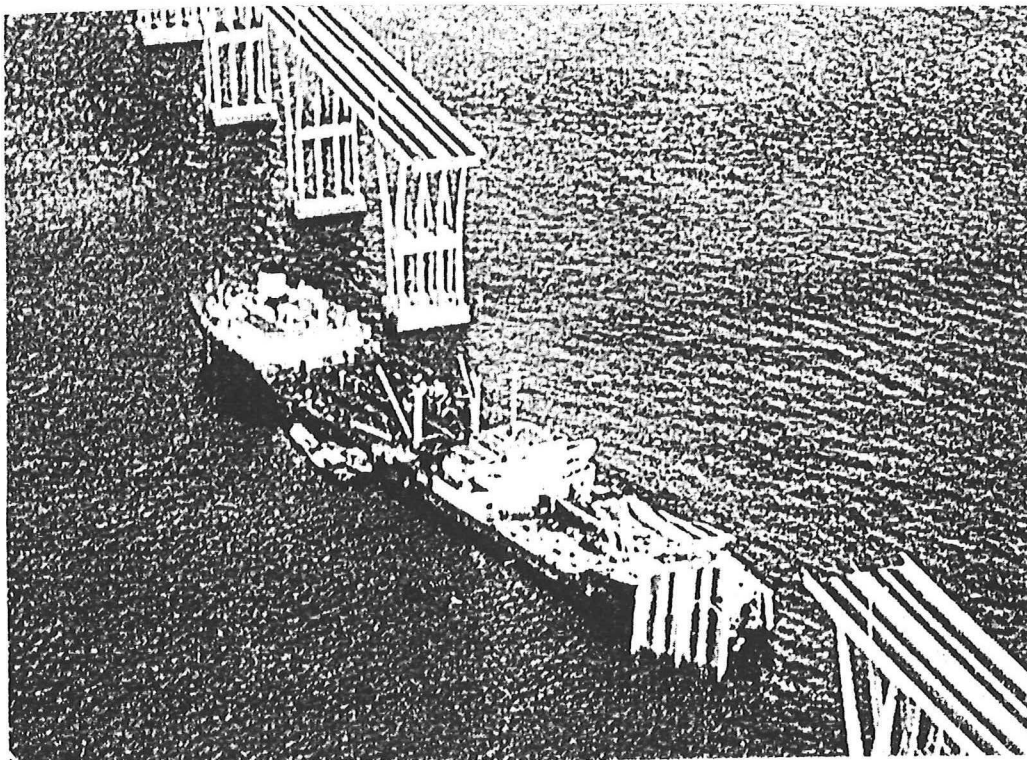


Eindrapport



Aanvaring van waterbouwkundige constructies

D.C. van Zanten
augustus 1996

Prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling
Prof.dr.ir. A. Verruijt
dr.ir. H.A. Dieterman
ir. K.G. Bezuyen


TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek

Voorwoord

Ter afsluiting van mijn studie aan de T.U. Delft, faculteit der Civiele Techniek is dit afstudeerrapport opgesteld. Het afstudeerrapport bestaat uit twee delen: nl. een literatuurstudie en een eindrapport.

Tijdens mijn stage-periode bij het Ingenieursbureau van Gemeentewerken Rotterdam werd ik op een mogelijk afstudeeronderwerp geattendeerd. Het betrof het onderwerp "aanvaring van waterbouwkundige constructies". In overleg met Prof.drs.ir. J.K. Vrijling en ir. K.G. Bezuyen van de sectie Waterbouwkunde werd dit mijn definitieve afstudeeronderwerp.

Gedurende het afstuderen hebben ook Prof.dr.ir. A. Verruijt en dr.ir. H.A. Dieterman zitting genomen in de afstudeercommissie. De afstudeercommissie bestaat uit:

Prof.drs.ir. J.K. Vrijling,
Prof.dr.ir. A. Verruijt,
dr.ir. H.A. Dieterman,
ir. K.G. Bezuijen.

Ik wil de commissieleden bedanken voor de aanwijzingen en tips die zij mij gegeven hebben gedurende mijn afstuderen.

Hellevoetsluis,
augustus 1996.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
1. Inleiding	3
2. Probleemstelling	7
3. Doelstelling	9
4. Aanvaring onder een variabele hoek tegen een oneindig stijve constructie	11
4.1. Schematisering	11
4.2. Botsing tegen een oneindig stijve constructie: impulsmodel	12
4.2.1. Traagheden schip	16
4.2.2. Vrijheidsgraden schip	17
4.2.3. Resultaat impulsmodel	20
4.3. Botsing tegen een oneindig stijve constructie: tijdsmodel	22
4.4. Botsing tegen een oneindig stijve constructie: conclusie	26
5. Schematisering aanvaring brugpijler	29
5.1. Onderdelen van een brugconstructie	29
5.2. Schematisering aanvaring tot een massa-veersysteem	29
5.3. Schematisering pijler	31
6. Vereenvoudigde dynamische interactie schip - constructie	35
6.1. Inleiding	35
6.2. Twee massa-veersysteem	36
6.2.1. Bepaling 'stijfheid pijler'	36
6.2.2. Uitwerking twee massa-veersysteem	37
7. Dynamische interactie schip - constructie	41
7.1. Schematisering van de pijler tot een star lichaam	41
7.2. Schematisering van het water rondom de pijler	42
7.3. Schematisering van het schip	45

7.4. Schematisering van de grond onder de pijler	48
7.4.1. Eigenschappen grond	48
7.4.2. Beddingsconstanten	49
7.4.3. Meewerkende grond	50
7.4.4. Dynamische stijfheid grond	52
7.5. Dynamica, handberekening	56
7.5.1. Afleiding bewegingsvergelijking	56
7.5.2. Voorbeeld	59
7.6. Dynamica, computerberekening	63
7.6.1. Controle handberekening	63
7.6.2. Bepaling kenmerken grond	67
7.6.2.1. Bepaling kenmerken grond statisch	67
7.6.2.2. Bepaling kenmerken grond dynamisch	71
7.6.3. Botsing leidt tot afschuiven	75
7.6.4. Invloed bovenbelasting	78
7.7. Conclusie	88
8. Schematisering van een onderdeel van de pijler	89
8.1. Schematisering en voorstel berekeningsmethode	89
8.2. Pons	93
8.3. Vergroten ponscapaciteit	95
9. Beïnvloeding van de aanvaring	97
9.1. Aanvaringskans	97
9.2. Aanvaringsbelasting	98
10. Conclusies en aanbeveling	103
11. Literatuurlijst	105

Samenvatting

In dit rapport wordt een aanvaring van een waterbouwkundige constructie beschreven; met name de interactie tussen een schip en een waterbouwkundige constructie.

In eerste instantie wordt uitgegaan van een oneindig stijve constructie, van waaruit een benaderingsmethode wordt gegeven om een scheve aanvaring om te zetten in een frontale aanvaring met wrijving langs de wand van de constructie.

Daarna is via een eenvoudig interactie-model bekeken hoe groot de energie-opname van de constructie is t.o.v. de energie-opname door het schip. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de energieopname van de aangevaren constructie klein is, zodat in dit perspectief de constructie als oneindig stijf beschouwd mag worden.

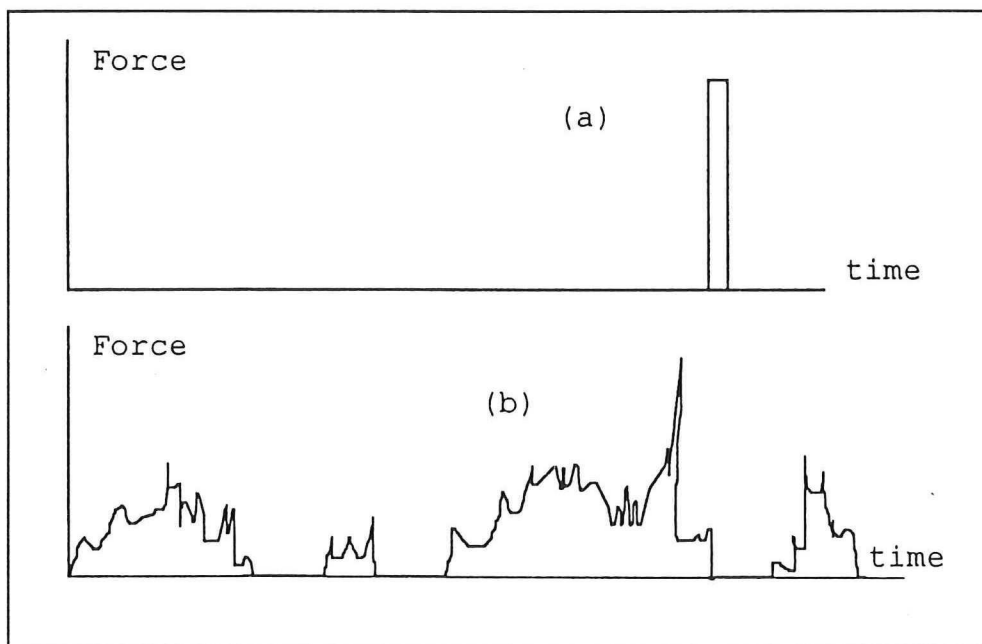
Vervolgens wordt via een ander interactie-model bekeken hoe groot de verplaatsingen van de aangevaren constructie bij de aanvaring zijn. Hieruit komt voort dat de belangrijkste parameter de dynamische stijfheid van de grond is en dat de verplaatsingen afhankelijk van het type vervoer over de brug, wegverkeer danwel treinverkeer, de verplaatsingen aanvaardbaar (wegverkeer) of te groot (treinverkeer) zijn.

Ten slotte wordt een eerste aanzet gegeven om de betonconstructie te berekenen en is de belangrijkste aanbeveling om tot een richtlijn te komen waarin de snelheden en de kracht-
vervormingsdiagrammen van de verschillende scheepstypen zijn gegeven.

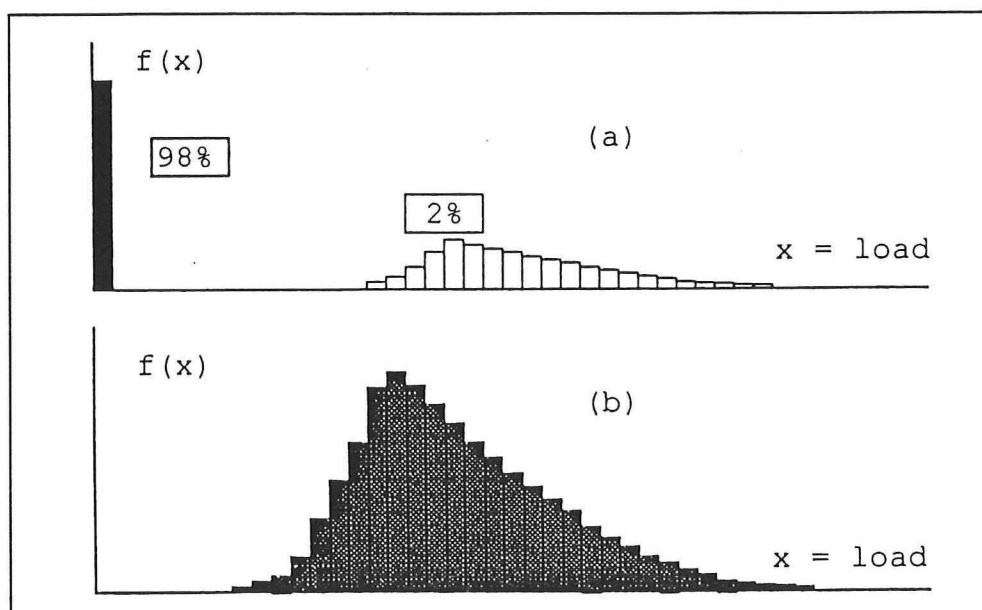
1. Inleiding

Bij het ontwerp van een constructie dient men, naast de permanente en variabele belastingen, ook rekening te houden met ongeval-belastingen. In deze laatste categorie hoort een aanvaring van een schip met een waterbouwkundige constructie.

Een ongeval-belasting verschilt zeer van een variabele belasting. De variabele belasting is tijdens de gehele levensduur van de constructie aanwezig en zal wellicht een aantal keren gedurende de levensduur van de constructie een grote waarde bereiken. Een ongeval-belasting daarentegen zal wellicht nooit optreden en als deze wel optreedt is het slechts gedurende seconden of minuten. De kracht-tijdverdeling (afb. 1) en de kansverdeling (afb. 2) zijn voor een veranderlijke belasting en een ongeval-belasting dan ook zeer verschillend.



Afb. 1: Kracht-tijdverdeling voor a) ongeval-belasting b) variabele belasting



Afb. 2: Kansverdeling voor a) ongeval-belasting b) variabele belasting

Deze verschillende soorten belastingen resulteren in verschillende ontwerpstrategieën. Bij een veranderlijke belasting dient altijd rekening gehouden te worden met een zekere waarde van de belasting. Bij een ongeval-belasting kan ervoor gekozen worden deze niet in het ontwerp te betrekken, omdat de kans op dit ongeval te verwaarlozen is.

Ontwerpstrategieën voor een ongeval-belasting:

- geen maatregelen, de kans op een ongeval-belasting is te verwaarlozen;
- preventieve maatregelen, verkleining van de kans op een ongeval-belasting;
- beschermende maatregelen, de gevolgen van een ongeval-belasting worden verkleind;
- 'parallel-systeem', bij een ongeval-belasting bezwijken onderdelen van de constructie, maar de constructie blijft stabiel;
- elk onderdeel wordt zo sterk gemaakt dat het een ongeval-belasting aankan.

Bij het analyseren van een ongeval-belasting zijn twee facetten zeer belangrijk:

1. De kans op een ongeval-belasting.
2. De waarde van de ongeval-belasting (b.v. in de vorm van een kansverdeling) en de opname van de ongeval-belasting.

Ad 1. Aanvaringskans

Enkele factoren die invloed hebben op de aanvaringskans zijn:

- zicht,
- wind,
- stroming,
- type schip,
- aanwezigheid loods,
- fitheid schipper.

Dat de fitheid van de schipper een factor is bleek tijdens een recente controle-actie (7-9 mei 1996) van het Korps Landelijke Politiediensten onder de Nederlandse binnenvaartschippers. 60% van hen bleek in overtreding te zijn of te zijn geweest. Het boek met de vaartijden was niet correct ingevuld of men stond te lang achter het roer (één schipper stond al 27 uur achter het roer, waar een maximum is toegestaan van 16 uur).

Ad 2. Opname aanvaringsbelasting door de civiele constructie

Wanneer een aanvaring plaatsvindt, rijzen de volgende vragen:

- Hoe reageert de civiele constructie als geheel, m.a.w. blijft de constructie stabiel?
- Hoe reageren de onderdelen van deze civiele constructie, m.a.w. bezwijken enkele onderdelen of kunnen zij de aanvaringsbelasting weerstaan?
- Welke interactie is er tussen het schip en de civiele constructie?

De facetten aanvaringskans en belastingopname worden betrokken in het aanvaringsrisicomodel. Dit ziet er in vereenvoudigde vorm als volgt uit:

$$F = \sum N_i \cdot P_{c,i} \cdot \sum P_{G,i,k} \cdot P_{F,i,k}$$

Hierbij is:

- F = aantal aanvaringen per jaar waarbij de constructie bezwijkt,
- N_i = aantal schepen van een bepaalde klasse (i),
- $P_{c,i}$ = oorzakelijke kans,
- $P_{G,i,k}$ = geometrische kans,
- $P_{F,i,k}$ = kans dat bij een botsing de constructie bezwijkt.

De aanvaringskans komt hierin voor via $P_{c,i}$ en $\sum P_{G,i,k}$, de aanvaringsbelasting en de belastingopname via $P_{F,i,k}$.

De grote onbekende is $P_{c,i}$ te meer omdat deze van vele factoren afhankelijk is, ondermeer van bovenstaande zoals zicht, fitheid etc.

Een aanvaring is een niet-gewenste interactie tussen een schip en een civiele constructie. Tegenover een aanvaring staat een gewenste interactie tussen een schip en een civiele constructie. Een gewenste interactie is het aanmeren van een schip aan een steiger. Met nadruk dient gezegd te worden dat deze twee vormen van interactie zeer verschillend zijn. Ten eerste de wenselijkheid van de interactie tussen schip en civiele constructie. Ten tweede neemt bij een aanvaring het schip het grootste deel van de kinetische energie op, terwijl bij een aanmering de steiger het merendeel van de kinetische energie opneemt.

In dit rapport wordt alleen een aanvaring (niet-gewenste interactie) van binnenvaartschepen tegen een waterbouwkundige constructie behandeld.

2. Probleemstelling

Bij het berekenen van een waterbouwkundige constructie wordt een aanvaring tussen een schip en deze waterbouwkundige constructie in het algemeen op de volgende manier benaderd:

- beschouw deze constructie als oneindig stijf,
- bekijk welke kracht vanuit het schip op de constructie komt,
- zet deze belasting als een statische last op de constructie,
- bekijk nu de verplaatsingen van de constructie bij deze statische last (de constructie wordt nu niet meer als oneindig stijf beschouwd).

Dit is een statische beschrijving van een aanvaring. Deze niet-gewenste interactie geeft echter een dynamische belasting. In dit rapport wordt de aanvaring van een waterbouwkundige constructie dynamisch beschreven.

3. Doelstelling

Uitgaande van de in hoofdstuk 2 geformuleerde probleemstelling zal de niet-gewenste interactie op drie manieren worden beschreven:

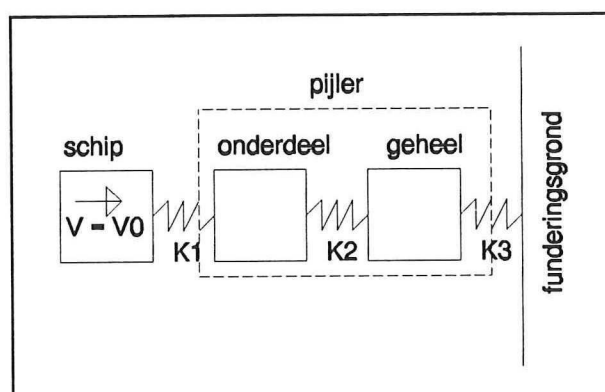
1. Aanvaring tegen een oneindig stijve constructie.
2. Interactie tussen schip <----> constructie (pijler).
3. Interactie tussen schip <----> onderdeel van de constructie.

Schematisch wordt dit weergegeven in afbeelding 3.

Ad 1. De aangevaren constructie wordt niet in beschouwing genomen (stijfheid $K_2 = \infty$ en stijfheid $K_3 = \infty$).

Ad 2. Er is sprake van een 'black-box model'. De interne krachtsafdracht wordt niet bekeken (stijfheid $K_2 = \infty$).

Ad 3. Een onderdeel van de pijler wordt bekeken. Dit onderdeel wordt 'geïsoleerd' van de rest van de pijler bekeken (stijfheid $k_3 = \infty$).



Afb. 3: Schematische weergave doelstelling

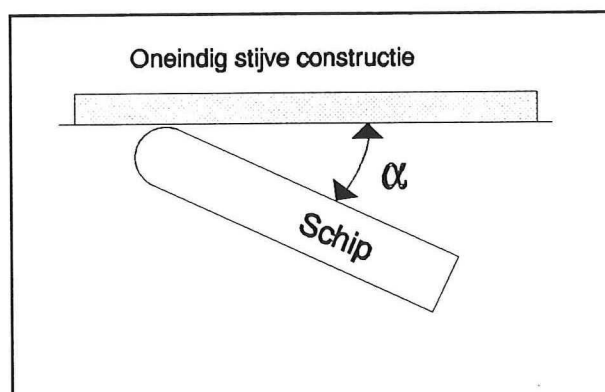
4. Aanvaring onder een variabele hoek tegen een oneindig stijve constructie

4.1. Schematisering

Een aanvaring tegen een constructie is een interactie tussen het schip en de aangevaren constructie (b.v. een pijler). Om deze interactie te beschrijven wordt het probleem in eerste instantie vereenvoudigd.

Veronderstelling: de aangevaren constructie is oneindig stijf.

Deze veronderstelling houdt in dat de constructie geen energie opneemt.



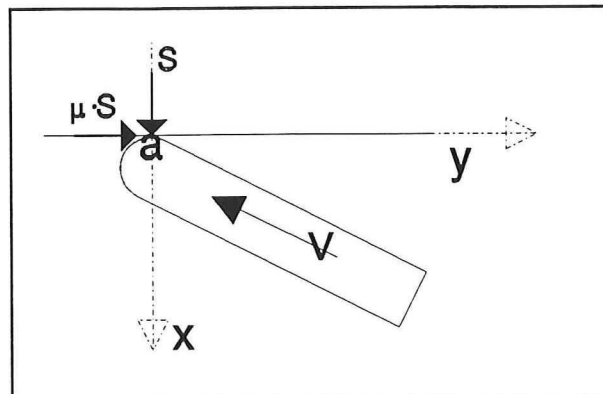
Afb. 4: Aanvaring onder een hoek α

Bij een aanvaring van een schip met een constructie kan de hoek van aanvaring (α) variëren tussen 0° en 180° . De hoeveelheid energie die bij het botsen door het schip wordt opgenomen is sterk afhankelijk van deze hoek.

Dit hoofdstuk heeft als doel te bekijken hoe de energieopname, door kreuken van de scheepswand, varieert als functie van de aanvaringshoek α t.o.v. de kinetische energie van het schip.

$$\eta_{\text{kreuken scheepswand}}(\alpha) = \frac{E_{\text{kreuken scheepswand}}(\alpha)}{E_{\text{kinetisch schip}}}$$

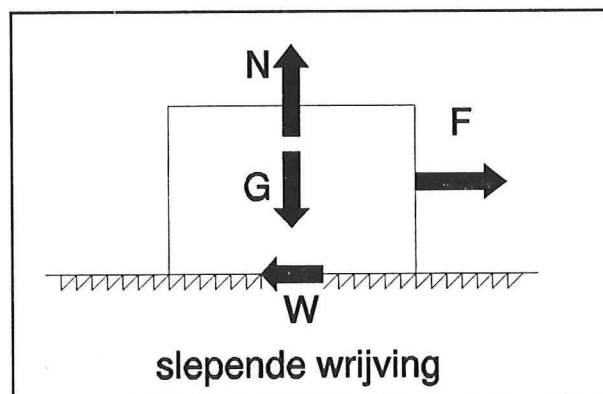
4.2. Botsing tegen een oneindig stijve constructie: impulsmodel



Afb. 5: Impulsmodel

De botsing van het schip tegen de oneindig stijve constructie is tijdsafhankelijk. Om de hoeveelheid energie die bij botsen door het schip wordt opgenomen te weten te komen, wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van een impulsmodel. De botsing wordt dan niet tijdsafhankelijk bekeken.

In dit eenvoudige model van de botsing zijn er twee stoten, te weten één in x-richting en één in y-richting (afb. 5). De stoot in x-richting stelt het kreuken van het schip voor. De stoot in y-richting het schampen van het schip langs de wand van de constructie. Zowel het schampen van het schip langs de wand als het kreuken van het schip heeft in werkelijkheid een tijdsafhankelijk karakter. Het schampen van het schip kan dan ook vergeleken worden met slepende wrijving.



Afb. 6: Slepende wrijving

Hiervoor geldt:

$$W_{\max} = \mu \cdot N$$

De kracht N is de reactiekracht van de wand op het schip die optreedt door kreuken van het schip. De kracht W is de wrijvingskracht die optreedt door schampen van het schip langs de wand.

Van de overeenkomst tussen het schampen van het schip langs de wand en de slepende wrijving wordt gebruik gemaakt om het impulsmodel enigszins te vereenvoudigen.

Analoog aan de slepende wrijving (het betreft hier krachten) wordt gesteld:

$$S_y = \mu \cdot S_x \quad (\text{het betreft hier stoten}).$$

Hierbij is μ een wrijvingsfactor. Deze is afhankelijk van de materialen die langs elkaar schampen.

staal - beton : $\mu = 0.35$

staal - hout : $\mu = 0.65$

De botsing tussen het schip en de wand is volgens het impulsmodel afgelopen wanneer de snelheid van 'punt a van het schip' (afb. 5) in x-richting groter of gelijk is aan nul:

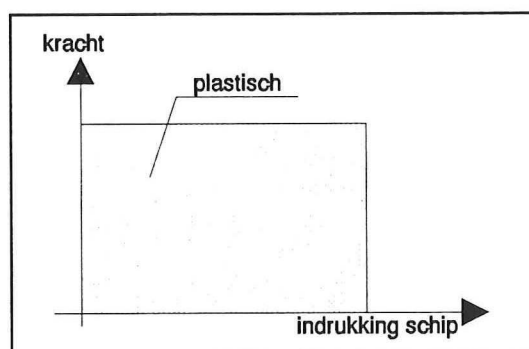
$$V_{a,x\text{-richting}} \geq 0.$$

N.B. De wand waartegen gebotst wordt dient echter wel lang genoeg te zijn, anders wordt de botsing bepaald door de lengte van de wand in y-richting.

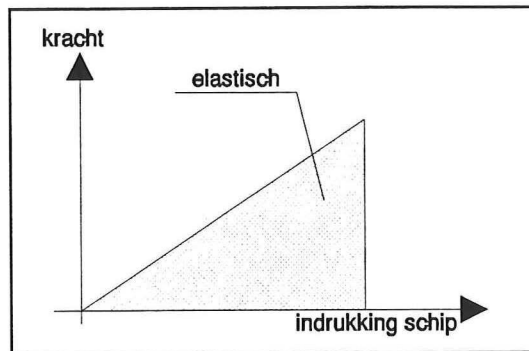
Doel:

Bepaal een stoot S , waarbij de snelheid van punt a van het schip in x-richting nul wordt.

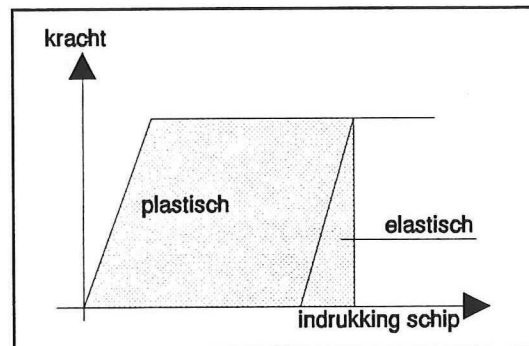
De achterliggende gedachte bij deze eis is dat wanneer de botsing tijdsafhankelijk wordt bekeken op het tijdstip waarvoor geldt $V_{a,x\text{-richting}} = 0$ de meeste energie door het schip is vernietigd (plastische vervorming), ofwel is opgeslagen als potentiële energie (elastische vervorming) danwel beide. De hoeveelheid elastisch opgeslagen energie wordt nadien teruggegeven aan het schip in de vorm van kinetische energie.



Afb. 7: Plastische energieopname door het schip

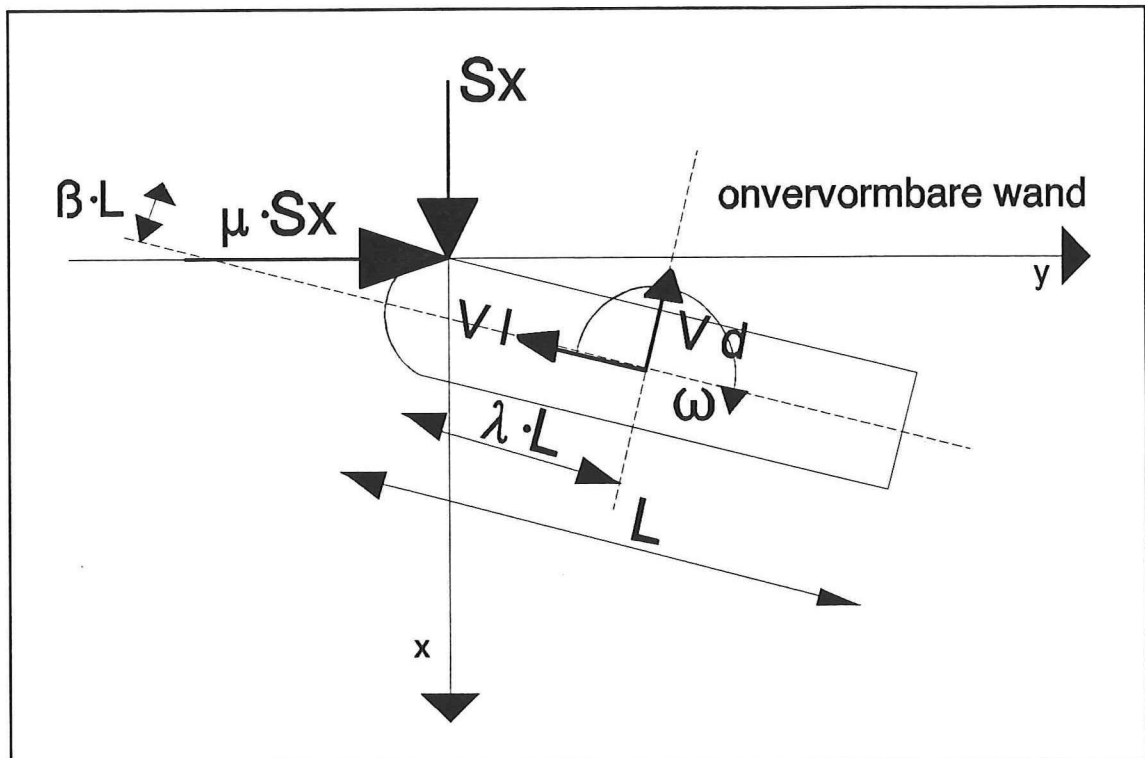


Afb. 8: Elastische energieopname door het schip



Afb. 9: Elasto-plastische energieopname door het schip

Het impulsmodel ziet er als volgt uit:



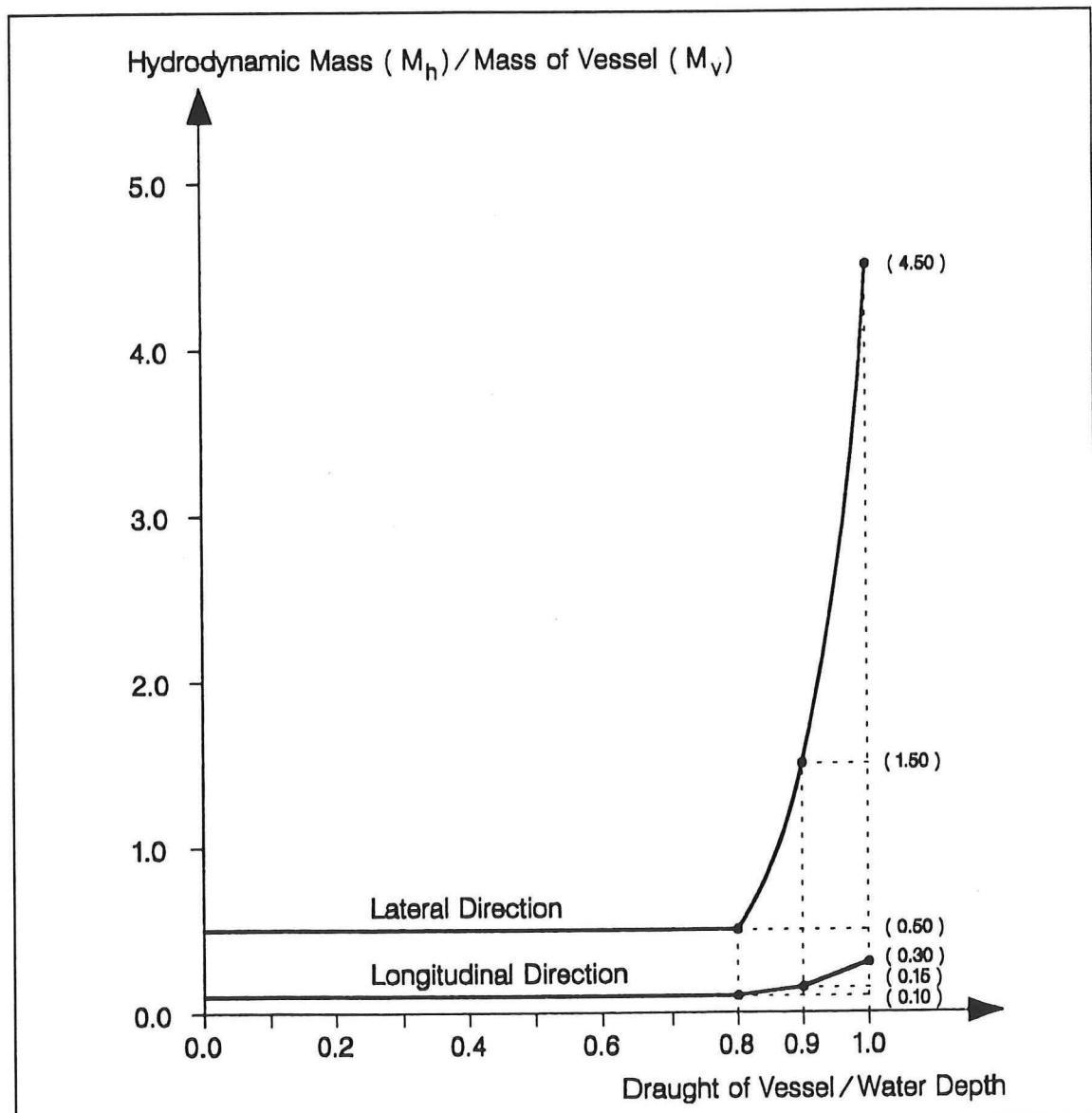
Afb. 10: Impulsmodel

Hierbij is:

- λL : afstand aanvaringszone tot breedte-as schip,
- βL : afstand aanvaringszone tot lengte-as schip,
- S_x : stoot in x-richting,
- V_L : snelheid in langsrichting,
- V_d : snelheid in dwarsrichting,
- ω : rotatiesnelheid,
- μ : wrijvingsfactor.

4.2.1. Traagheden schip

Bij het impulsmodel behoren translatie- en rotatietraagheden van het schip. Hierbij hebben we te maken met de hydrodynamische massa van het schip. Deze is afhankelijk van de bewegingsrichting van het schip.

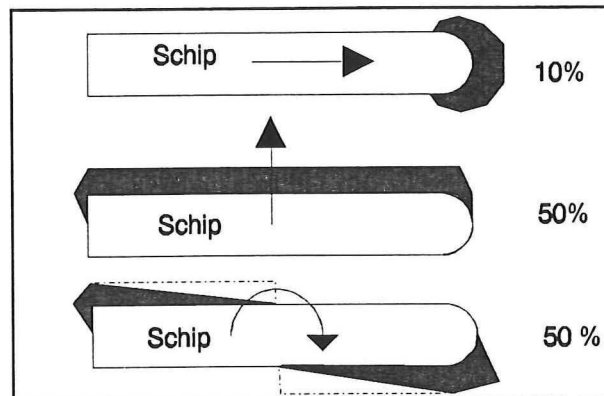


Afb. 11: Hydrodynamische massa

Uit de grafiek (afb. 11) volgt voor waterdieptes groter dan 1,25 x diepgang schip:

Hydrodynamische massa (M_h) / Massa schip (M_s):

langs beweging: 10%
dwars beweging: 50%



Afb. 12: Hydrodynamische massa voor verschillende bewegingen

Een grove indicatie voor de hydrodynamische massa voor rotatie is dat deze ongeveer de helft is van de hydrodynamische massa voor een dwarsbeweging. Dit zou een hydrodynamische massa van 25% t.o.v. de massa van het schip betekenen. Aangezien hierover geen informatie beschikbaar was, is gekozen voor een waarde voor de hydrodynamische massa voor rotatie die gelijk is aan de waarde van een dwarsbeweging.

Keuze hydrodynamische massa voor rotatie : 50%

4.2.2. Vrijheidsgraden schip

Het schip heeft drie vrijheidsgraden, te weten:

- translatie in langsrichting,
- translatie in dwarsrichting,
- rotatie.

Voor elk van deze vrijheidsgraden kan de impulsbalans worden opgesteld:

langsrichting:

$$\Delta v_l = (-S_x \cdot \sin \alpha - \mu \cdot S_x \cdot \cos \alpha) / 1.1 \text{ m}$$

dwarsrichting:

$$\Delta v_d = (-S_x \cdot \cos \alpha + \mu \cdot S_x \cdot \sin \alpha) / 1.5 \text{ m}$$

rotatie:

$$\Delta \omega = S_x \cdot (-\lambda \cdot \cos \alpha + \mu \cdot \lambda \cdot \sin \alpha + \beta \cdot \sin \alpha + \mu \cdot \beta \cdot \cos \alpha) / (1.5 \text{ m} \cdot \tau^2 \cdot I)$$

Waarin τ een traagheidsstraal-factor is (traagheidsstraal = $\tau \cdot l$, met l = lengte schip).

Randvoorwaarde:

$$\begin{aligned}
 V_{a,x\text{-richting}} &= 0 \\
 &= -v_0 \cdot \sin \alpha - \Delta v_1 \cdot \sin \alpha - \Delta v_d \cdot \cos \alpha \\
 &\quad - \omega \cdot (\sqrt{(\lambda l)^2 + (\beta l)^2}) \cdot \cos(\alpha + \tan^{-1}(\beta l / \lambda l)) = 0
 \end{aligned}$$

Beperking van dit model:

De snelheid van het schip ter plaatse van punt a in y-richting dient ≤ 0 te blijven. Wanneer het impulsmodel een waarde voor de snelheid aangeeft > 0 , wil dit zeggen dat de boeg van het schip, volgens het impulsmodel, in de richting van de positieve y-as beweegt (afb. 10).

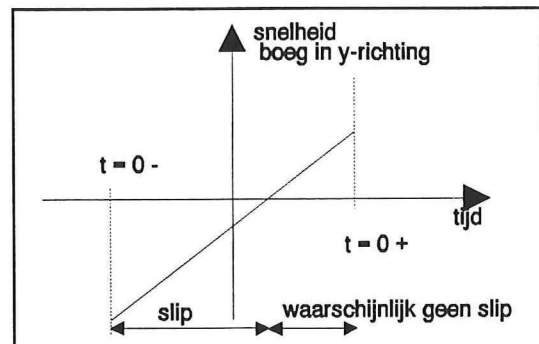
De snelheid van de boeg in y-richting neemt dan toe van een negatieve waarde (slip in negatieve y-richting) naar een positieve waarde (slip in positieve y-richting).

Dit betekent dat wanneer met deze gegevens de botsing tijdsafhankelijk wordt benaderd de boeg eerst in negatieve y-richting beweegt tot de boeg tot stilstand komt, waarna de boeg in positieve y-richting beweegt.

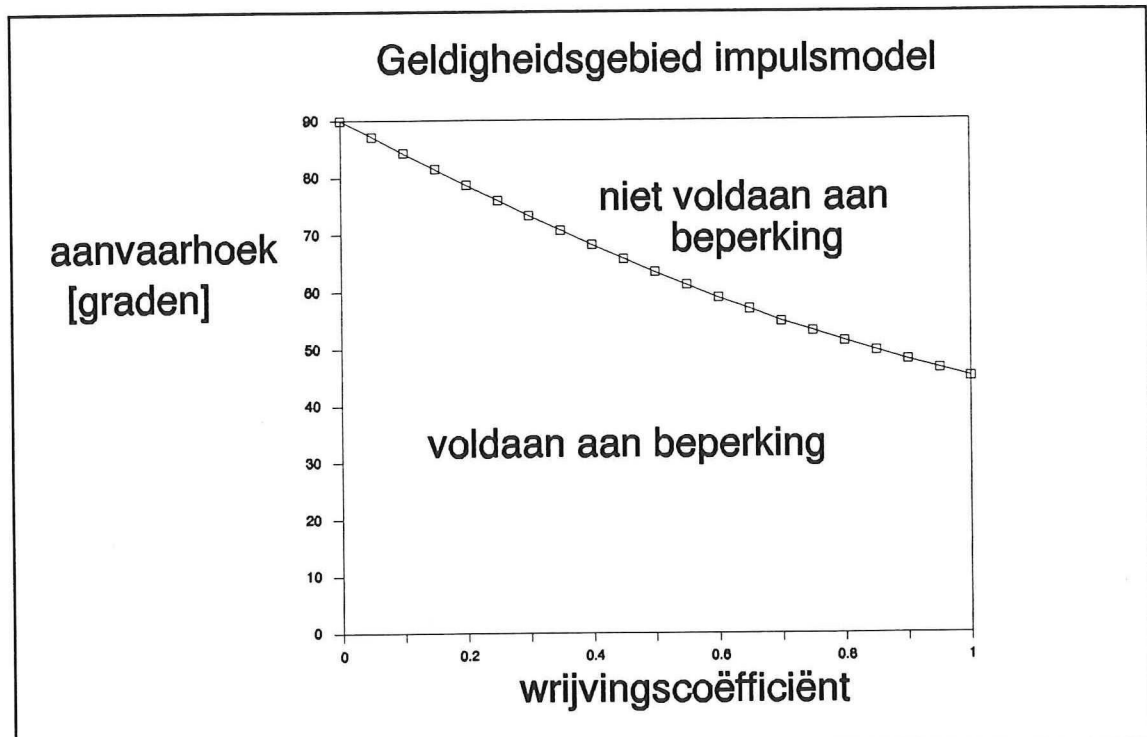
Dit is niet in overeenstemming met de verwachting van wat er in werkelijkheid gebeurt. Verwacht wordt dat wanneer de boeg in y-richting tot stilstand komt deze niet meer zal bewegen, omdat voor verschuiven een kracht nodig is die de wrijvingsweerstand kan overwinnen.

Wanneer met deze beperking geen rekening gehouden wordt, wordt de impuls in y-richting overschat. Dit levert een te kleine waarde voor S_x op. Dit houdt in dat het schampen wordt overschat en de indrukking van het schip onderschat.

De koppeling tussen S_y en S_x is niet meer geldig, $S_y \neq \mu \cdot S_x$



Afb. 14: Geen slip meer als de snelheid groter dan nul wordt



Afb. 14: Geldigheidsgebied van het model van een botsing d.m.v. een impulsmodel

Uit deze grafiek blijkt dat het geldigheidsgebied van het impulsmodel afhankelijk is van de hoek van aanvaring en de aanwezige wrijvingsfactor.

Voor een hoek van 90° wordt S_x wel goed berekend. De reden hiervoor is dat de stoot in y-richting (S_y) bij een hoek van 90° geen invloed heeft op de snelheidscomponent in x-richting. Voor hoeken die iets kleiner zijn dan 90° is deze invloed ook nog zeer klein.

Voor hoeken die net buiten het gebied vallen waar voldaan wordt aan de beperking van het model, geeft dit model een goede benadering, omdat de stoot in y-richting iets te groot is waardoor $V_{a,y\text{-richting}} > 0$, maar wel bijna nul.

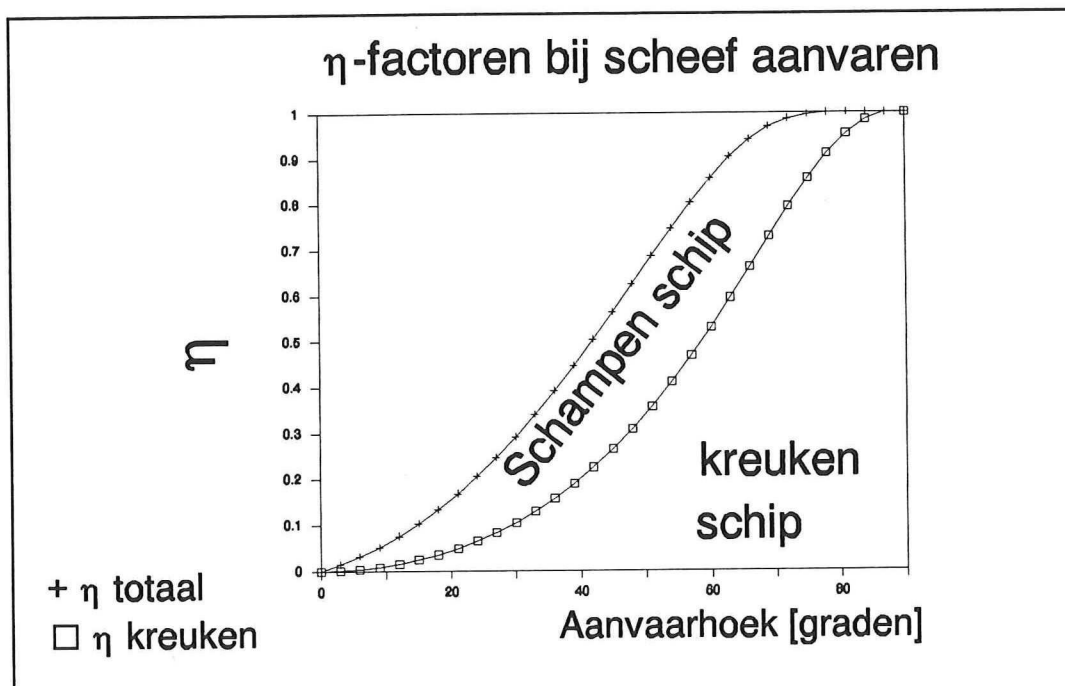
4.2.3. Resultaat impulsmodel

Voor $\beta = 0$ [schip heeft geen breedte], $\mu = 0.35$ [wrijvingsfactor tussen beton (pijler) en staal (schip)] en $\tau = 0.28$ [traagheidsstraal-factor] wordt de grafiek in afb. 15 verkregen.

Hierbij is van de volgende benadering uitgegaan:

- uit het impulsmodel volgt een S_x ,
 - de snelheid voor het botsen ($t = 0^-$) is $V_{A,x-richting} = V_0 \cdot \sin \alpha$,
 - de snelheid na het botsen ($t = 0^+$) is $V_{A,x-richting} = 0$,
 - de gemiddelde snelheid ($t=0$) is $(V_0 \cdot \sin \alpha + 0) / 2$,
 - de hoeveelheid arbeid verricht in x-richting = $S_x \cdot \frac{1}{2} \cdot V_0 \cdot \sin \alpha$,
 - hiervoor is $S_x \cdot \frac{1}{2} \cdot V_0 \cdot \sin \alpha$ energie nodig,
 - $\eta = \text{Energie}_{\text{kreuken schip}} / \text{Energie}_{\text{schip voor botsen}}$,
 - $\text{energie}_{\text{schip voor botsen}} = 1.1 \cdot 0,5 \cdot m \cdot v^2$,
- Hierbij is:
- m = massa schip,
 - v = snelheid schip in vaarrichting.

N.B voor het schampen is uitgegaan van dezelfde benadering: $E = S_y \cdot V_{\text{gemiddeld}}$



Afb. 15: η-factoren bij een scheve aanvaring

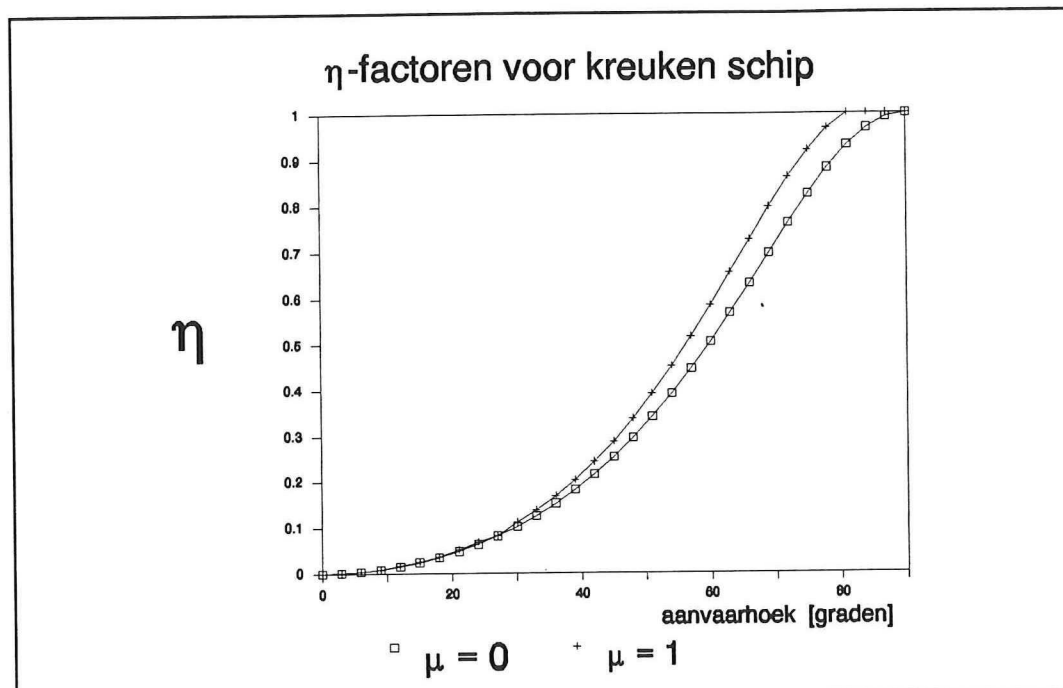
Deze grafiek (afb. 15) geeft de hoeveelheid energie weer t.o.v. de kinetische energie van het schip die bij botsen verbruikt wordt door schampen van het schip langs de wand en de energie die verbruikt/gebruikt (zie afb. 7,8,9) wordt door kreuken van de scheepswand. Zo dient bij een aanvaringshoek van 40° 20% van de kinetische energie ($1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$) van het schip verbruikt/gebruikt te worden voor het kreuken van de scheepswand.

$$E_{\text{opname, schip}} = \eta_{\text{kreuk, schip}} \cdot E_{\text{kin.}}$$

$$\text{Met: } E_{\text{kin.}} = 1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

De wrijvingsfactor kan variëren en daarom is het interessant te weten of er grote verschillen zijn tussen de energieopname door indrukking van het schip bij verschillende wrijvingsfactoren van de wand.

Afb. 16 geeft de η -factoren voor het kreuken van de scheepswand weer als functie van de aanvaringshoek voor 2 waarden van de wrijvingsfactor μ , te weten $\mu=0$ en $\mu=1$.



Afb. 16 : η -waarden voor $\mu=0$ en $\mu=1$

Conclusie:

Met behulp van het impulsmodel kan een schatting gemaakt worden van de hoeveelheid energie die bij een aanvaring onder een variabele hoek tegen een oneindig stijve constructie d.m.v. kreuken van de scheepswand opgenomen wordt.

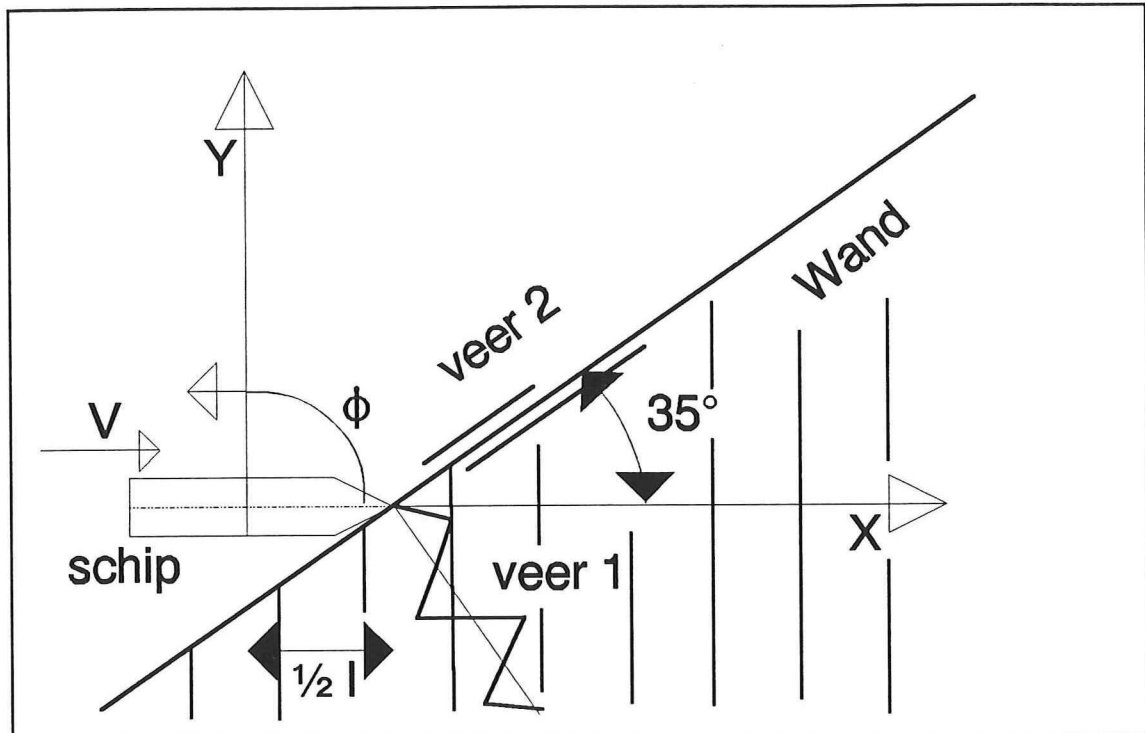
$$E_{\text{opname, kreuken scheepswand}} = \eta_{\text{kreuk, schip}} \cdot E_{\text{kin.}}$$

Met: $E_{\text{kin.}} = 1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

De hoeveelheid energie die door kreuken van de scheepswand opgenomen wordt is enigszins afhankelijk van de wrijvingsfactor tussen het schip en de civiele constructie. Bij aanvaringen onder hoeken kleiner dan 40° is het verschil gering (Bij waarden van de wrijvingsfactor tussen nul en één).

4.3. Botsing tegen een oneindig stijve constructie: tijdsmodel

Het impulsmodel impliceert een botsingsduur van 'nul' seconden. Dit is niet juist. Met behulp van het dynamisch rekenmodel Tilly kan de botsing tijdsafhankelijk worden beschreven. In deze paragraaf wordt het impulsmodel voor één hoek ($\alpha=35^\circ$) gecontroleerd.



Afb. 17: Schematisering scheve aanvaring d.m.v. een tijdsmodel

De schematisering bestaat uit:

- schip met lengte L en snelheid V
- 2 veren (afb. 17):
 - veer 1 geeft het kracht-ervormingsdiagram van het schip voor een hoek van 35° aan,
 - veer 2 geeft het schampen aan van het schip langs de wand.

Voor dit voorbeeld worden de gegevens gebruikt die bij het ontwerp van de Willemsbrug te Rotterdam zijn gebruikt.

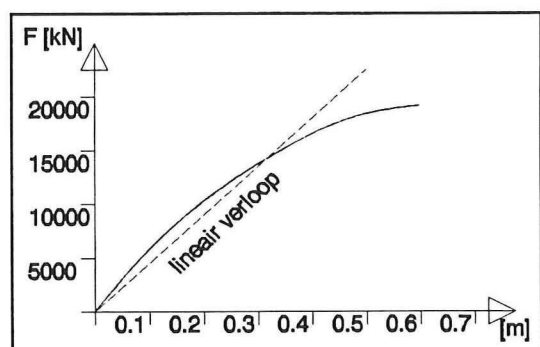
Keuze schip:

Zandschip van de firma Oosterwijk ($m_{\text{schip}} = 5000$ ton)

Kenmerken schip en veren

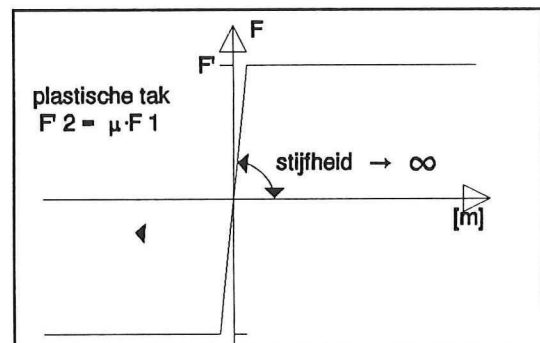
- Lengte schip ≈ 100 m.
- Massa schip = 5000 ton.
- Massa schip in x-richting = 1.1 m = 5500 ton.
(10% hydr. massa)
- Massa schip in y-richting = 1.5 m = 7500 ton.
(50% hydr. massa)
- Rotatietraagheid schip = $6.25 \cdot 10^9$ kg·m²
[$(\tau \cdot l)^2 \cdot 1.5 \text{ m} = 1/12 \cdot 100^2 \cdot 1.5 \cdot 10^6$]
De traagheidsstraal is: $\sqrt{(1/12 \cdot l^2)} = 0.28 l$.

Veer 1 is het kracht-vertormingsdiagram van het zandschip bij een hoek van 35°. Het verloop van het kracht-vertormingsdiagram is niet-lineair (afb. 18). Voor het gemak wordt dit verloop lineair gemaakt. Hierdoor wordt een lineaire veer verkregen met een stijfheid k van $5.5 \cdot 10^7$ N/m (afb. 18).



Afb. 18: Kracht-weg-diagram van het schip voor een hoek van 35°

Veer 2 geeft het schampen aan van het schip langs de wand. Voor deze veer geldt dat deze een plastische tak heeft met de waarde F' die bepaald wordt door de kracht in veer 1. Dit geschiedt volgens de verhouding: $F'_2 = \mu \cdot F_1$. Hierin is μ een wrijvingsfactor. De stijfheid van de elastische tak van veer 2 nadert naar een oneindige waarde (afb. 19).



Afb. 19: Aangenomen veereigenschappen van veer 2

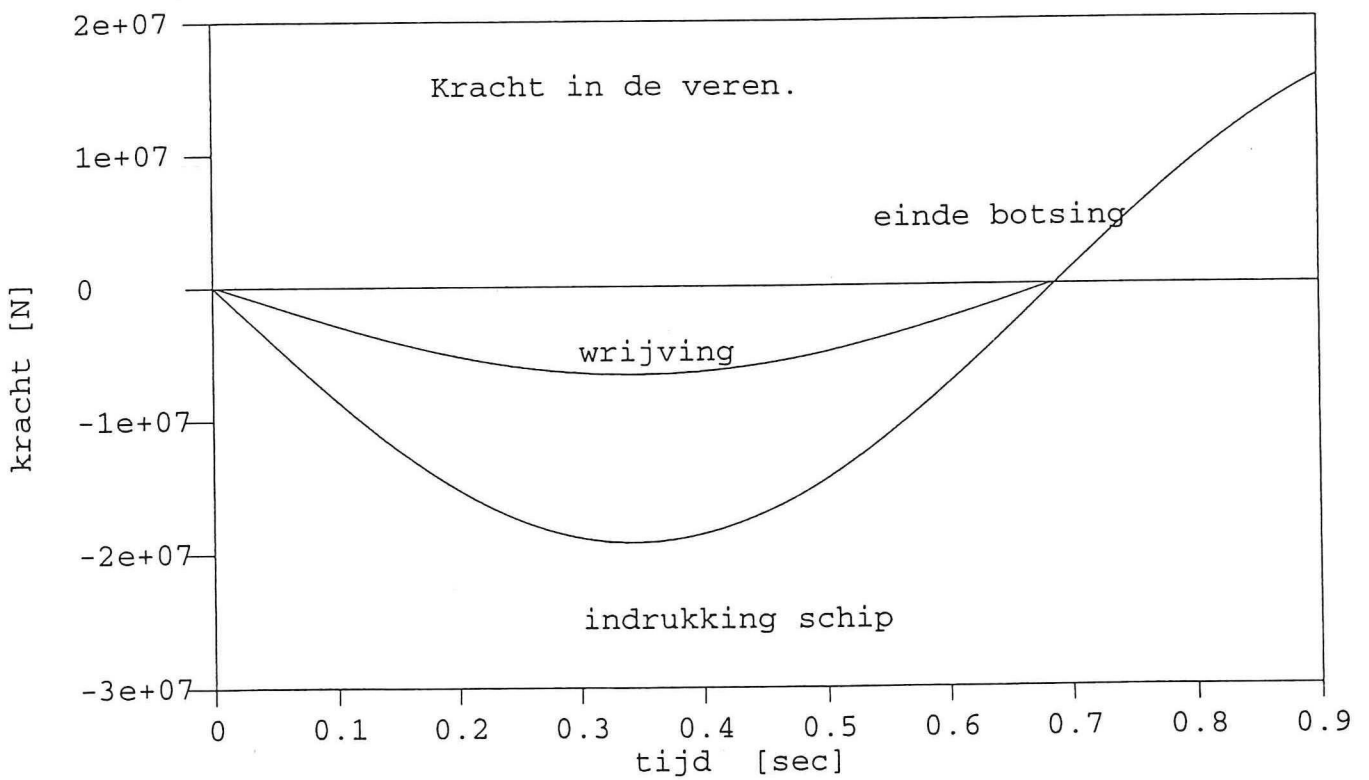
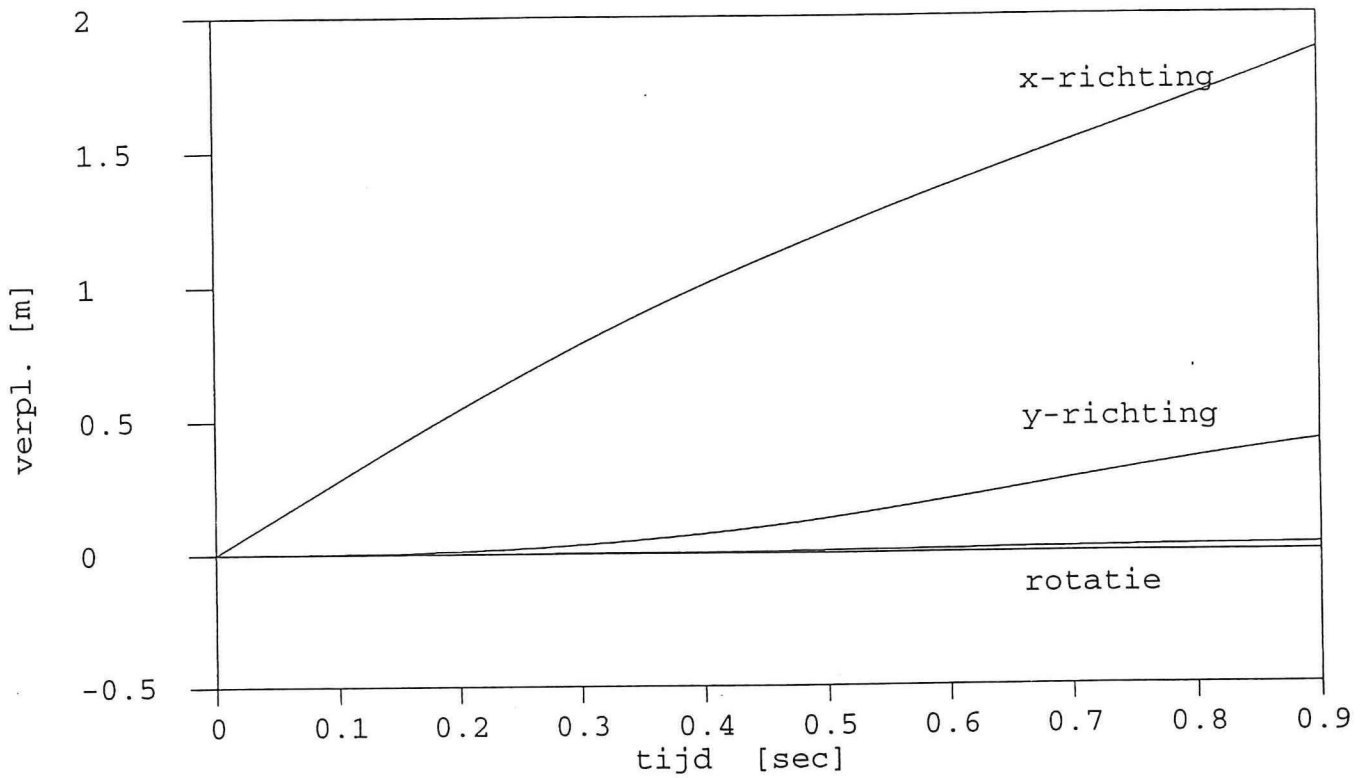
Keuze μ

Neem $\mu = 0.35$ (wrijvingsfactor tussen beton en staal).

Beginvoorwaarde:

Snelheid schip in x-richting = 2.78 m/s (10 km/uur).

Verplaatsingen massacentrum schip.



Nevenstaande grafiek geeft aan dat de maximale kracht in veer 1 19000 kN is ($t=0.34$ sec.). Op dit moment is in veer 1: $F^2/2 \cdot k$ aan potentiële energie opgeslagen.

$$\text{Potentiële energie} = (19 \cdot 10^6)^2 / (2 \cdot 5.5 \cdot 10^7) = 3.28 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Het schip had voor de botsing een hoeveelheid kinetische energie ($E_{\text{kin.}} = 1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$).

$$\text{Kinetische energie} = 1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 2.78^2 = 2.1 \cdot 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

De opgeslagen hoeveelheid potentiële energie in veer 1 (indrukking van het schip) uitgedrukt in de hoeveelheid kinetische energie van het schip voor het botsen is dan:
 $3.28 / 21.3 = 0.15$ (15%).

Hieruit volgt een waarde voor η van 0.15

Uit de helling van het kracht-tijdsverloop van veer 1 is de snelheid loodrecht op de wand te bepalen.

Voor een veer geldt de constitutieve relatie $F(t) = k \cdot u(t)$

Hieruit volgt:

$$F'(t) = k \cdot u'(t)$$

$$F'(0) = k \cdot u'(0) = k \cdot v(0)$$

De grafiek op de vorige bladzijde geeft voor de helling op tijdstip $t=0$ sec. een waarde van: $-3 \cdot 10^7 / 0.34 = -8.7 \cdot 10^7 \text{ N/s}$

$$\text{De snelheid } v = -8.7 \cdot 10^7 / 5.5 \cdot 10^7 = -1.59 \text{ m/s}$$

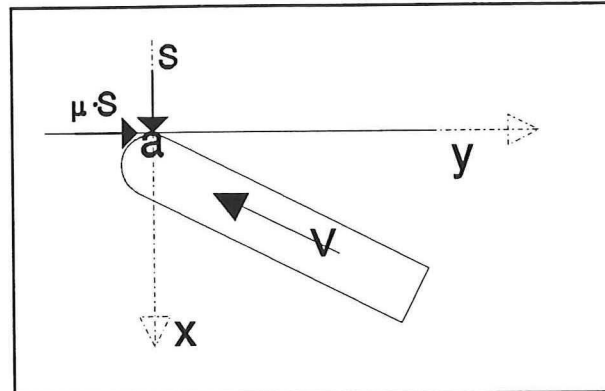
De snelheid op $t=0^-$ (net voor de botsing) in de richting van de normaal van de wand is:
 $v \cdot \sin \alpha = -2.78 \cdot \sin 35^\circ = -1.59 \text{ m/s}$.

Vergelijking tussen het Impulsmodel en het Tijdsmodel

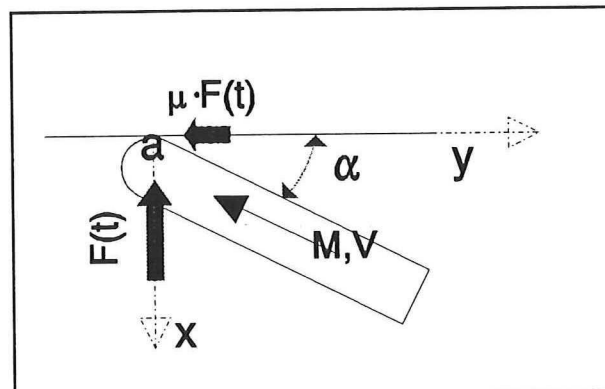
Bij een aanvaring onder een hoek van 35° en een wrijvingsfactor van 0.35 (wrijving tussen beton en staal) geeft zowel het impulsmodel (afb. 15) als het tijdsmodel een waarde voor η van 0.15

4.4. Botsing tegen een oneindig stijve constructie: conclusie

Met behulp van het impulsmodel is het voor de combinatie van een aanvaring onder een hoek van 35° en een wrijvingsfactor van 0.35 mogelijk om toch tijdsafhankelijk te rekenen zonder een tijdsmodel te gebruiken.



Afb. 20: Impulsmodel



Afb. 21: Dynamisch rekenen via het impulsmodel

Dit kan door, gebruik makend van het impulsmodel, een scheve aanvaring om te zetten naar een loodrechte aanvaring $F(t)$ en een wrijving langs de wand: $\mu \cdot F(t)$

Voor het beschrijven van deze loodrechte aanvaring $F(t)$ wordt gebruik gemaakt van een 1-massa-veersysteem, waarbij:

- de massa $(1.1 \cdot \eta \cdot m) / \sin^2 \alpha$ is.

Hierbij is:

- m = massa schip,
- η = resultaat van het impulsmodel (afb. 15),
- α = aanvaringshoek,
- v = snelheid schip in vaarrichting.

- de veer het kracht-ervormingsdiagram van het schip onder een hoek α weergeeft.

Dit levert de volgende benaderingsmethode:

Keuze hoek van aanvaring α .



Keuze wrijvingsfactor μ .



Impulsmodel.



Resultaat = η .



massa = $(1.1 \cdot \eta \cdot m) / \sin^2 \alpha$.



snelheid = $v \cdot \sin \alpha$.



kracht-ervormingsdiagram van het schip bij een hoek α .



1-massa-veer-systeem.

5. Schematisering aanvaring brugpijler

5.1. Onderdelen van een brugconstructie

Bij een brug kan men de volgende onderdelen onderscheiden:

1. Onderbouw.
2. Bovenbouw.
3. Opleggingen.

Ad 1. Onderbouw

Hiermee wordt de constructie bedoeld tussen de brugopleggingen en de grond onder de fundering.

Ad 2. Bovenbouw

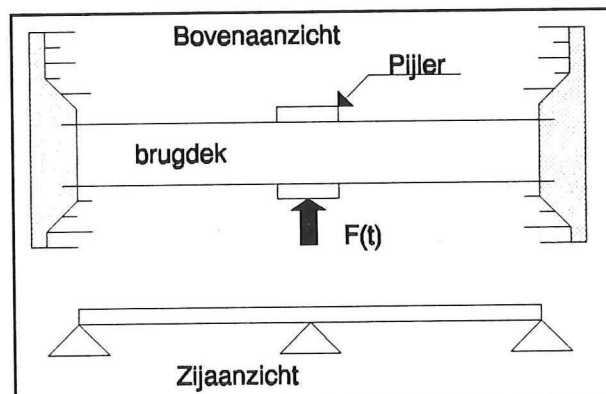
Hiermee wordt de constructie boven de opleggingen bedoeld.

Ad 3. Opleggingen

Hiermee wordt de constructie tussen de onder- en bovenbouw bedoeld. De functie van de opleggingen is de krachten uit de bovenbouw in de onderbouw te leiden, die ze op haar beurt naar de grond onder de fundering afvoert.

5.2. Schematisering aanvaring tot een massa-veersysteem

Bij de schematisering van een frontale aanvaring van de onderbouw (pijler) van de brug tot een massa-veersysteem wordt uitgegaan van de eenvoudige situatie van afb. 22. In deze afbeelding is een brug weergegeven waarbij het brugdek opgelegd is op drie steunpunten. Twee hiervan zijn niet direct onder invloed van een aanvaring, ze bevinden zich in de oever. Het middensteunpunt bevindt zich in de waterweg en kan aangevaren worden.



Afb. 22: Situatieschets frontale aanvaring pijler

Onderdelen massa-veersysteem

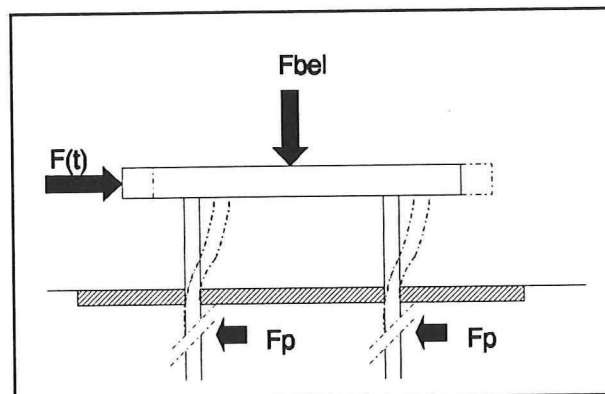
Schip

Bij een aanvaring botst het schip met een massa M_s en een snelheid V_s tegen de pijler. De 'veerstijfheid' van het schip wordt bepaald door het kracht-ervormingsdiagram bij een frontale aanvaring.

Onderbouw

Een pijler op staal ondervindt weerstand tegen zowel rotatie als translatie (horizontaal en verticaal) door de stijfheid van de grond bij indrukken en afschuiven. De pijler wordt geschematiseerd tot een blok met een massa en een rotatietraagheid. Aan het blok worden veren gekoppeld die de weerstand van de pijler tegen rotatie en translatie aangeven.

Voor een pijler op palen wordt aangenomen dat bij een horizontale belasting de pijler alleen horizontaal verplaatst (afb. 23). Deze pijler wordt geschematiseerd tot een blok met een massa waaraan een veer is gekoppeld die de weerstand van de pijler tegen horizontale translatie aangeeft.



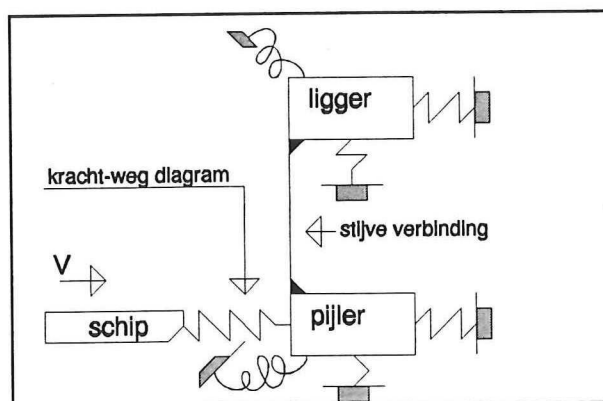
Afb. 23: Pijler op palen verplaatst zich slechts horizontaal

Bovenbouw

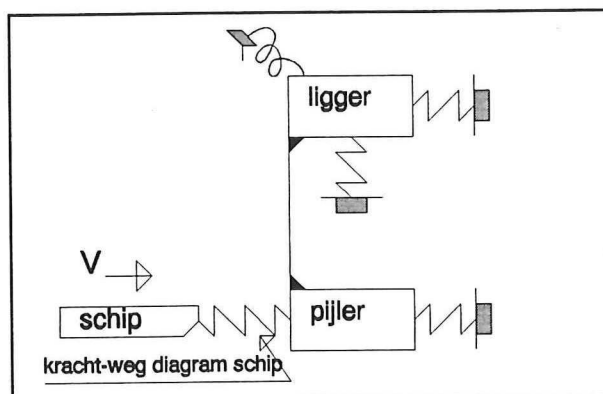
De ligger wordt geschematiseerd tot een 'blok' met een massa M_{blok} en een rotatietraagheid I_{blok} met hieraan gekoppeld veren die de weerstand van de ligger boven de pijler tegen translatie en rotatie aangeven.

Wanneer aangenomen wordt dat de ligger op de landhoofden niet vrij is opgelegd kan het gedeelte van de ligger boven de pijler slechts verplaatsen door uitbuigen van de ligger. Een rotatie ondergaan, kan alleen door torsie van de ligger.

Aangenomen wordt dat de ligger (bovenbouw) stijf is verbonden met de onderbouw (pijler). Hieruit volgen de schematiseringen van afb. 24 en afb. 25.



Afb. 24: Schematisering pijler-ligger voor een pijler op staal

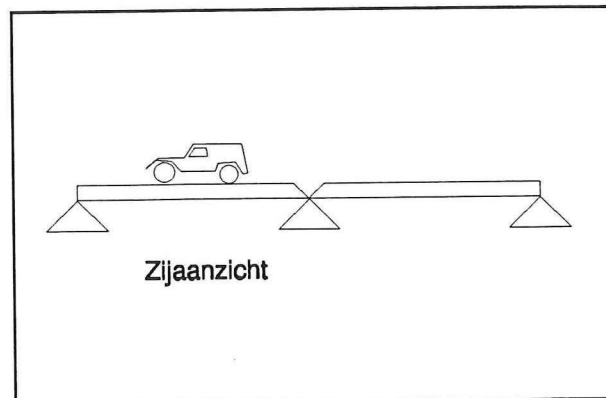


Afb. 25: Schematisering pijler-ligger voor een pijler op palen

5.3. Schematisering pijler

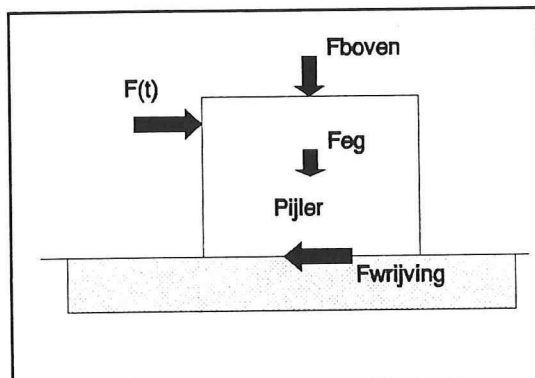
In § 5.2 is uitgegaan van een ligger die doorloopt over het middensteunpunt. Bij vele bruggen is dit niet het geval en is er sprake van een brug waarbij elk brugdeel is opgelegd op twee steunpunten (afb. 26). Dit verandert de schematisering van de aanvaring.

De weerstand van het gedeelte van de ligger boven de pijler tegen translatie is nu afhankelijk van de manier waarop de ligger is opgelegd op de pijler. Wanneer aangenomen wordt dat de ligger wrijvingsloos is opgelegd hoeft de traagheid van de ligger tegen een horizontale verplaatsing niet meegenomen te worden. Dit is een conservatieve benadering. De traagheid van het blok in verticale richting wordt niet meegenomen omdat verwacht wordt dat bij een aanvaring de onderbouw vooral zal kantelen en mindere mate verticaal zal verplaatsen.

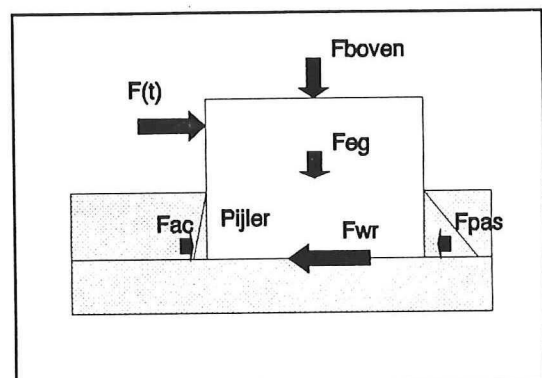


Afb. 26: Vereenvoudigde schematisatie

Het model wordt hierdoor vereenvoudigd, omdat voor de schematisering van de bovenbouw slechts de neerwaartse belasting (F_{boven}) nodig is. Dit wordt weergegeven in de afbeeldingen 27 en 28. In afbeelding 27 wordt een fundering op staal en in afbeelding 28 een verdiepte fundering op staal weergegeven.



Afb. 27: Situatieschets pijler op homogene halfruimte



Afb. 28: Situatieschets ingebedde pijler

Aanname:

De stijfheid van de grondlagen naast de pijler (afb. 28) is gering zodat voor deze pijler niet met een inklemming rekening gehouden hoeft te worden. De pijler kan dan geschematiseerd worden zoals in afbeelding 27.

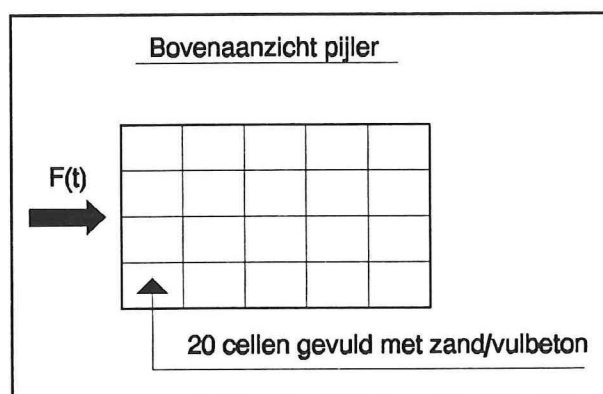
Met de schematisering in afbeelding 27 kunnen verschillende pijler-typen bekeken worden:

- pijler op een verbeterde fundering,
- pijler welke ingebed is en omgeven door slappe (klei) lagen,
- pijler die net op de bodem is geplaatst en nog afgebouwd dient te worden, voordat deze pneumatisch op diepte wordt gebracht (caisson).

Aanname:

De pijler zelf kan geschematiseerd worden tot een star blok.

Dit betekent dat de pijler zelf geen vervormingsenergie opneemt. Hetgeen wederom een conservatieve benadering is. Bij de aanname van de schematisering van de pijler tot een star blok wordt gedacht aan een pijler die opgebouwd is als een 'honingraat' met wanden en vloeren (afb. 29). De wanden van de cellen mogen niet bezwijken, omdat dit energieopname zou betekenen.



Afb. 29: Opengewerkt bovenaanzicht pijler

6. Vereenvoudigde dynamische interactie schip - constructie

6.1. Inleiding

In hoofdstuk 4 is uitgegaan van een aanvaring van een schip tegen een oneindig stijve constructie. Met deze aanname kan een benaderingsmethode ontwikkeld worden om een scheve aanvaring om te zetten naar een loodrechte aanvaring met een wrijving langs de wand.

De constructie kan echter nooit oneindig stijf zijn.

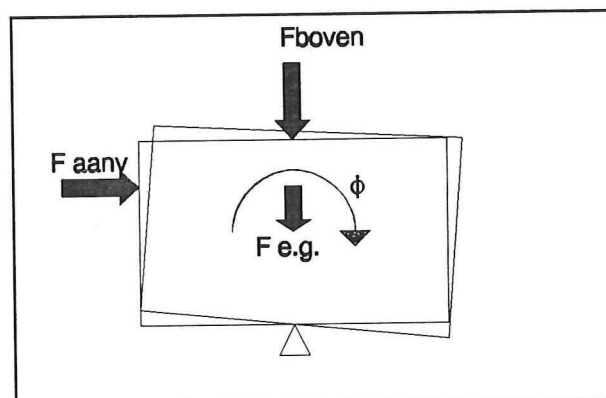
De vraag is nu of de energie-opname door de constructie van dien aard is dat een substantiële reductie optreedt van de energie-opname door het schip en dientengevolge, afhankelijk van het kracht-vernimmingsdiagram van het schip, een reductie van de aanvaringskracht.

Dit zou kunnen betekenen dat de omzetting van een scheve aanvaring naar een loodrechte aanvaring met wrijving langs de wand volgens het model met een aangevaren constructie die als oneindig stijf beschouwd wordt niet bruikbaar is.

De interactie van een schip en een constructie is zeer afhankelijk van het soort schip en de aangevaren constructie. In dit hoofdstuk gaat het erom te verifiëren of het schip inderdaad het grootste gedeelte van de kinetische energie opneemt.

De bedoeling van het onderstaande is dynamisch te rekenen met de stijfheid van het schip, de massa van het schip, de stijfheid van de pijler en de massa van de pijler.

De pijler wordt geschematiseerd tot een star blok op een vlakke bedding (De schematisering uit afb. 27). De stijfheid van de pijler wordt geheel uit de ondergrond verkregen. De pijler kan kantelen en afschuiven. De verwachting is dat kantelen het belangrijkste mechanisme zal zijn (afb. 30).



Afb. 30: Rotatie om het hart van de vloerplaat

6.2. Twee massa-veersysteem

6.2.1. Bepaling 'stijfheid pijler'

Voor het bepalen van de stijfheid van de pijler wordt een statische analyse uitgevoerd, zodat ook het eigen gewicht van de pijler en de bovenbelasting meegenomen worden in de stijfheid van de pijler (reductie stijfheid!).

Om de stijfheid te berekenen geven we de pijler een rotatie ϕ . Er moet nu een momentenevenwicht zijn. Dit evenwicht wordt bekeken om het hart van de voetplaat van de pijler.

Aandraaiend moment na een rotatie ϕ :

- bovenbelasting,
- eigen gewicht,
- aanvaringskracht.

Tegenwerkend moment na een rotatie ϕ :

- grond.

De variabelen in de evenwichtscontrole zijn:

- F = aanvaarkracht,
- Q = bovenbelasting, grijpt aan op de bovenkant van de pijler,
- G = gewicht pijler,
- y = aangrijphoogte kracht F,
(aanvaringshoogte t.o.v. de vloerplaat)
- H = hoogte pijler,
- z = hoogte massacentrum pijler,
- ϕ = rotatie pijler,
- k = beddingsconstante grond [N/m³],
- L = lengte pijler,
- B = breedte pijler.

Er geldt dan het volgende momentenevenwicht:

$$F \cdot y + Q \cdot H \cdot \phi + G \cdot z \cdot \phi = \frac{1}{12} \cdot \phi \cdot k \cdot B \cdot L^3$$

$$F = \frac{\frac{1}{12} \cdot \phi \cdot k \cdot B \cdot L^3 - G \cdot z \cdot \phi - Q \cdot H \cdot \phi}{y}$$

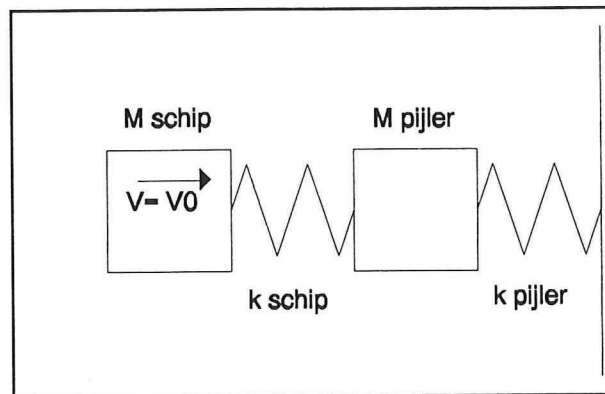
Ter hoogte van de aanvaringszone geldt: $F_{aanv} = k_{pijler} \cdot u$
(Hierbij is u de horizontale verplaatsing van de pijler ter plaatse van de aanvaringskracht)

u kan geschreven worden als functie van ϕ : $u = \phi \cdot y$

Substitutie hiervan in bovenstaande formule geeft de volgende uitdrukking voor de stijfheid van de pijler:

$$k_{pijler} = \frac{\frac{1}{12} \cdot k \cdot B \cdot L^3 - G \cdot z - Q \cdot H}{y^2}$$

6.2.2. Uitwerking twee massa-veersysteem



Afb. 31: twee massa-veersysteem

De dynamische vergelijking van een twee-massaveersysteem is:

$$M \cdot x'' + K \cdot x = 0$$

Hierbij is:

$$M = \begin{vmatrix} \text{massa schip} & 0 \\ 0 & \text{massa pijler} \end{vmatrix}$$

$$K = \begin{vmatrix} k \text{ schip} & -k \text{ schip} \\ -k \text{ schip} & k \text{ schip} + k \text{ pijler} \end{vmatrix}$$

$$x = \begin{vmatrix} \text{verplaatsing schip} \\ \text{verplaatsing pijler} \end{vmatrix}$$

- x'' zijn de versnellingen van de twee verplaatsingen.
- met k wordt de stijfheid bedoeld.

De randvoorwaarde voor $t = 0$ sec.: $v_{\text{schip}} = \text{aanvaringsnelheid}$.

De berekening is uitgevoerd voor verschillende lengten van de pijler. Door de lengte van de pijler te variëren verandert de massa en de stijfheid van de pijler.

Voor het schip is het zandschip gekozen dat gebruikt is bij het ontwerp van de Willemsbrug te Rotterdam.

Ingevoerde gegevens:

Betreffende de pijler:

- breedte pijler = 8 meter,
- hoogte pijler = 20 meter,
- hoogte massacentrum = 10 meter,
- aanvaringshoogte = 20 meter,
- lengte pijler = variabel = 1 t/m 50 meter.

Spanningen op het grondvlak:

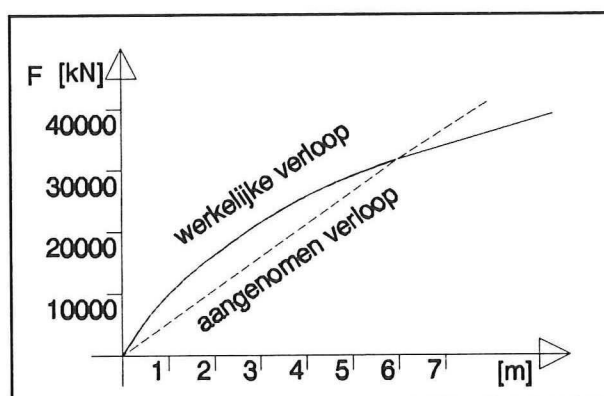
- eigen gewicht = 200 kN/m²,
- bovenbelasting = 50 kN/m².

Betreffende de grond:

- beddingsconstante = $1 \cdot 10^7$ N/m³
(Deze waarde geldt voor zand).

Betreffende het schip:

- Massa schip = 5000 ton ,
- Stijfheid schip = $5.33 \cdot 10^6$ N/m,
- Snelheid schip = 2.78 m/s.



Afb. 32: Kracht-weg diagram van het zandschip bij een frontale aanvaring

Pijler oneindig stijf, geen energie opname

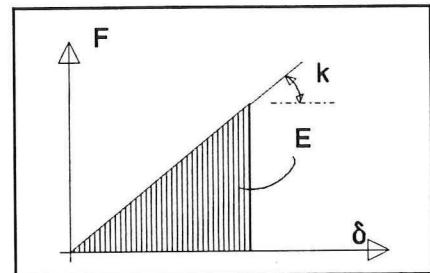
Als we aannemen dat de pijler geen energie opneemt, geldt voor de aanvaringskracht F de volgende stelling:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta^2$$

$$\delta = \sqrt{\frac{m}{k} \cdot v^2} \quad \text{-----} \rightarrow F = k \cdot \delta = \sqrt{m \cdot k \cdot v^2}$$

Hierbij is:

- m = massa schip,
- v = snelheid schip,
- k = stijfheid schip,
- δ = indrukking schip,
- E = hoeveelheid kinetische energie van het schip voor de botsing.

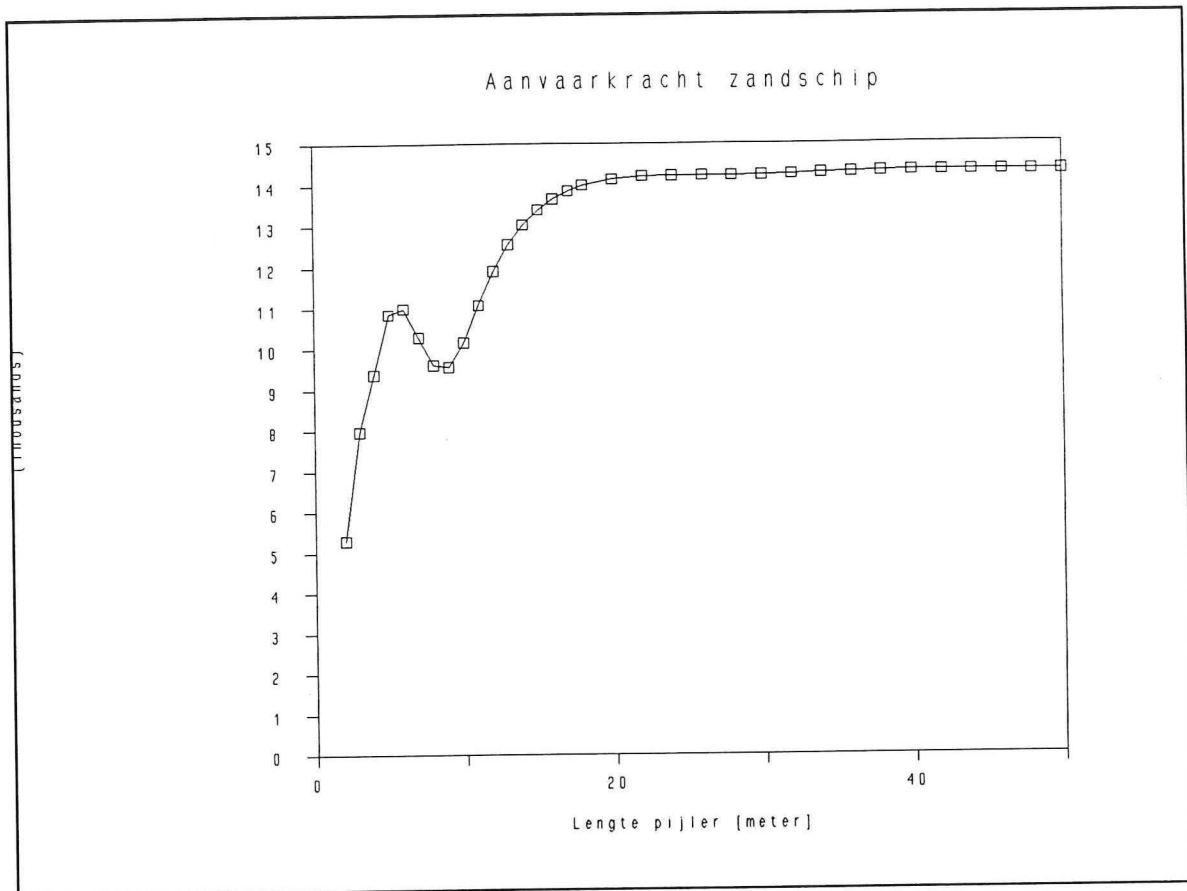


Afb.33: Bepaling aanvaringskracht voor een oneindig stijve pijler

Met bovenstaande gegevens wordt de maximale aanvaringskracht $F = 14$ MN.

Pijler niet oneindig stijf, wel energie opname

De aanvaringskracht als functie van de lengte van de pijler is hieronder weergegeven. Voor lengten van de pijler groter dan 20 meter mag gesteld worden dat de aanvaringskracht constant is (14 MN). Voor lengten kleiner dan 20 meter is er sprake van een aanvaringskracht die kleiner is dan 14 MN.



Afb. 34: Aanvaringskracht als functie van de lengte van de pijler

Conclusie

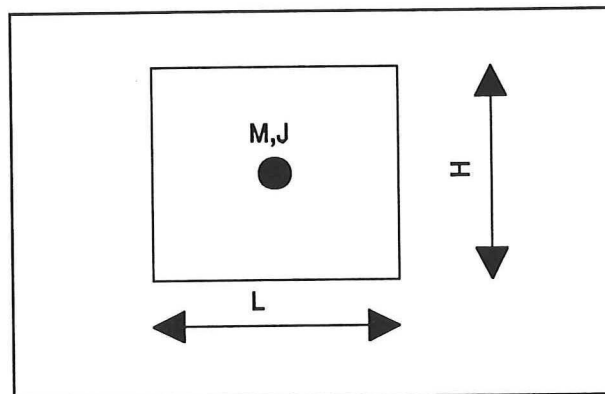
Gekozen is voor een pijler met een hoogte van 20 meter en een breedte van 8 meter. Bij deze afmetingen kan gesteld worden dat voor lengten van de pijler groter dan 20 meter de pijler als oneindig stijf beschouwd mag worden met betrekking tot de aanvaringsbelasting van het zandschip.

7. Dynamische interactie schip - constructie

In dit hoofdstuk zal de schematisering van hoofdstuk 5 verder worden onderzocht. Hiervan moeten de onderdelen geschematiseerd worden. Dit geschiedt in de paragrafen § 7.1 t/m § 7.4. In § 7.5 wordt een handberekening uitgevoerd op basis van statische grondgegevens. Vervolgens wordt deze berekening gecontroleerd d.m.v. een computerberekening in § 7.6.1. Hierna wordt in § 7.6.3 de pijler tot afschuiven gedwongen waarbij de grond d.m.v. statische grondgegevens is gemodelleerd. Tenslotte wordt in § 7.6.4 de invloed van de bovenbelasting bekeken, waarbij gebruik gemaakt wordt van statische en dynamische grondgegevens.

7.1. Schematisering van de pijler tot een star lichaam

De pijler wordt gezien als een star lichaam. Voor het dynamisch rekenen moet dit starre lichaam gekarakteriseerd worden met de afmetingen en de traagheden voor translatie en rotatie.



Afb. 35: Schematisatie pijler tot een blok met massa M , traagheid J , lengte L en hoogte H .

$$\text{Massa} = M = \rho \cdot B \cdot L \cdot H$$

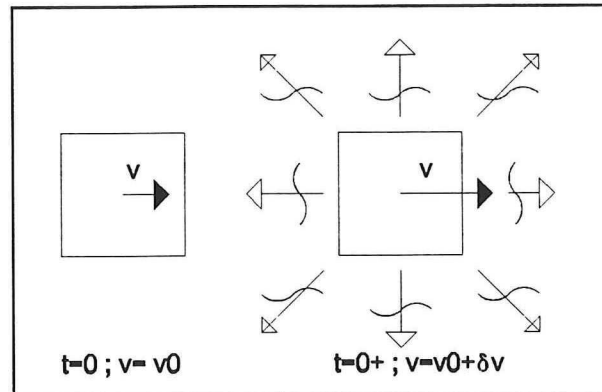
$$\text{Traagheidsmoment} = J = 1/12 \cdot M \cdot (L^2 + H^2)$$

Hierbij is:

- L = lengte pijler in stroomrichting,
- B = breedte pijler,
- H = hoogte pijler,
- ρ = gemiddelde soortelijke massa van de constructie
(hierbij is aangenomen dat de massa continu verdeeld is)

7.2. Schematisering van het water rondom de pijler

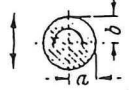
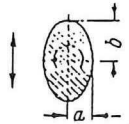
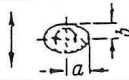
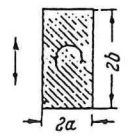
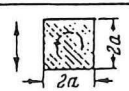
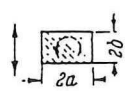
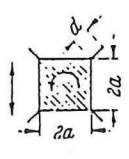
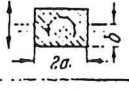
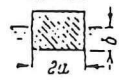
De pijler staat voor een groot deel, danwel geheel in het water.

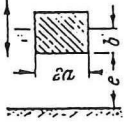
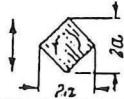
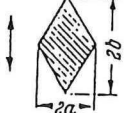
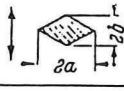
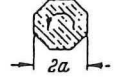


Afb. 36: Verandering van snelheid leidt tot uitstralen golven

Een voorwerp in het water dat een snelheid heeft zal bij verandering van deze snelheid golven gaan uitzenden. De golfenergie is sterk frequentie-afhankelijk. Om het water rond de pijler in de berekeningen te betrekken is gekozen dit te doen via hydrodynamische traagheden i.p.v. hydrodynamische demping. Dit betekent dat aan de pijler een extra massa en traagheidsmoment wordt toegevoegd die de invloed van het water rondom de pijler moet vervangen. De verwachting is dat de invloed van het water niet erg groot zal zijn; daarom is voor deze benadering gekozen.

Hieronder worden de massa- en rotatietraagheden voor verschillende constructievormen gegeven.

Querschnittsformen		Hydr. Masse für Längeneinheit	Trägheitskoeffz. $C = \frac{m''}{m''_{Kreis}}$	Hydr. Träg.-Mom. für Längeneinheit	Trägk. Koeffz. f. Rot. $\frac{J''}{J''_{Platte}}$
Bew. Richt. Drehachse					
	$\frac{a}{b} = 1$ (Kreis)	$m'' = \pi \rho a^2$ ^[1]	1	$J'' = 0$	0
		$m'' = \pi \rho a^2$ ^[1]	1	$= 0,125 \pi \rho (a^2 - b^2)^2$ ^[1]	$\left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right]^2$
	Platte	$= \pi \rho a^2$ ^[1]	1	$= 0,125 \pi \rho a^4$ ^[1]	1
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{2}$	$= 1,7 \pi \rho a^2$ ^[2]	1,7	$= 0,15 \pi \rho b^4$ ^[5]	1,2 } bez. auf Platte v.d. Breite 2b
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{5}$	$= 1,98 \pi \rho a^2$ ^[2]	1,98	$= 0,15 \pi \rho b^4$ ^[5]	
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{10}$	$= 2,23 \pi \rho a^2$ ^[2]	2,23	$= 0,147 \pi \rho b^4$ ^[5]	
	Quadrat	$= 1,51 \pi \rho a^2$ ^[2]	1,51	$= 0,234 \pi \rho a^4$ ^[3,5]	1,872
	$\frac{a}{b} = 2$	$= 1,36 \pi \rho a^2$ ^[2]	1,36	$= 0,15 \pi \rho a^4$ ^[5]	1,2 } bez. auf Platte v.d. Breite 2a
	$\frac{a}{b} = 5$	$= 1,21 \pi \rho a^2$ ^[2]	1,21		
	$\frac{a}{b} = 10$	$= 1,14 \pi \rho a^2$ ^[2]	1,14		
	$\frac{d}{a} = 0,05$	$= 1,61 \pi \rho a^2$ ^[5]	1,61	bez. auf Kreis m. R = a	2,4 } bez. auf Platte v.d. Breite 2a
	$\frac{d}{a} = 0,1$	$= 1,72 \pi \rho a^2$ ^[5]	1,72		
	$\frac{d}{a} = 0,25$	$= 2,19 \pi \rho a^2$ ^[5]	2,19		
	$\frac{a}{b} = 1$	$= 0,75 \pi \rho a^2$ $= \frac{1}{2} \text{Quadrat}$ ^[2]	0,75	$= 0,117 \pi \rho a^4$ ^[5]	0,936
	$\frac{a}{b} = 1$	$= 0,25 \pi \rho a^2$ ^[5]	0,25		

Querschnittsformen		Hydr. Masse für Längeneinheit	Trägheitskoeffz. $C = \frac{m''}{m''_{Kreis}}$	Hydr. Träg.-Mom. für Längeneinheit	Trägk. Koeffz. f. Rot. $\frac{J''}{J''_{rot}}$
Bew. Richt. Drehachse					
	$\frac{c}{b} = \infty$	$= 0,755 \pi \rho a^2$ ^[5]	0,75		
	$\frac{c}{b} = 2,6$	$= 0,83 \pi \rho a^2$ ^[5]	0,83		
	$\frac{c}{b} = 1,8$	$= 0,80 \pi \rho a^2$ ^[5]	0,80		
	$\frac{c}{b} = 1,5$	$\approx 1 \pi \rho a^2$ ^[6]	≈ 1		
	$\frac{c}{b} = 1$	$\approx 1,25 \pi \rho a^2$ ^[6]	$\approx 1,25$		
	$\frac{c}{b} = \frac{1}{4}$	$\approx 2 \pi \rho a^2$ ^[6]	≈ 2		
		$= 0,70 \pi \rho a^2$ ^[2]	0,70	$= 0,059 \pi \rho a^4$ ^[5]	0,47
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{2}$	$= 0,67 \pi \rho a^2$ ^[2]	0,67		
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{5}$	$= 0,61 \pi \rho a^2$ ^[2]	0,61		
	$\frac{a}{b} = 2$	$= 0,85 \pi \rho a^2$ ^[2]	0,85		
	Regelm. Achteck			$\approx 0,055 \pi \rho a^4$ ^[4]	0,14

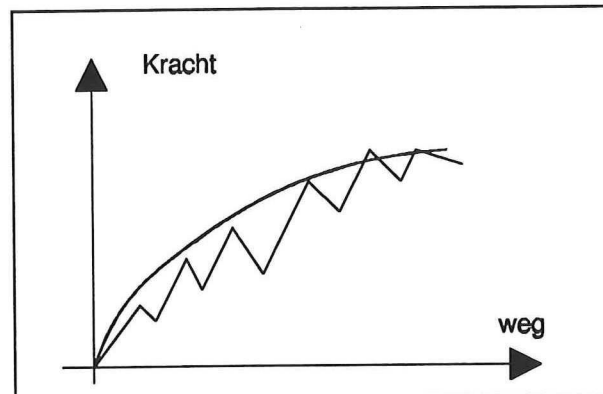
"Hydrodynamische Massen und hydrodynamische Massenträgheitsmomenten"

auteur: K. Wendel

Jahrbuch der Schiffbautechnische Gesellschaft, Vol. 44; 1950; pp 207-225

7.3. Schematisering van het schip

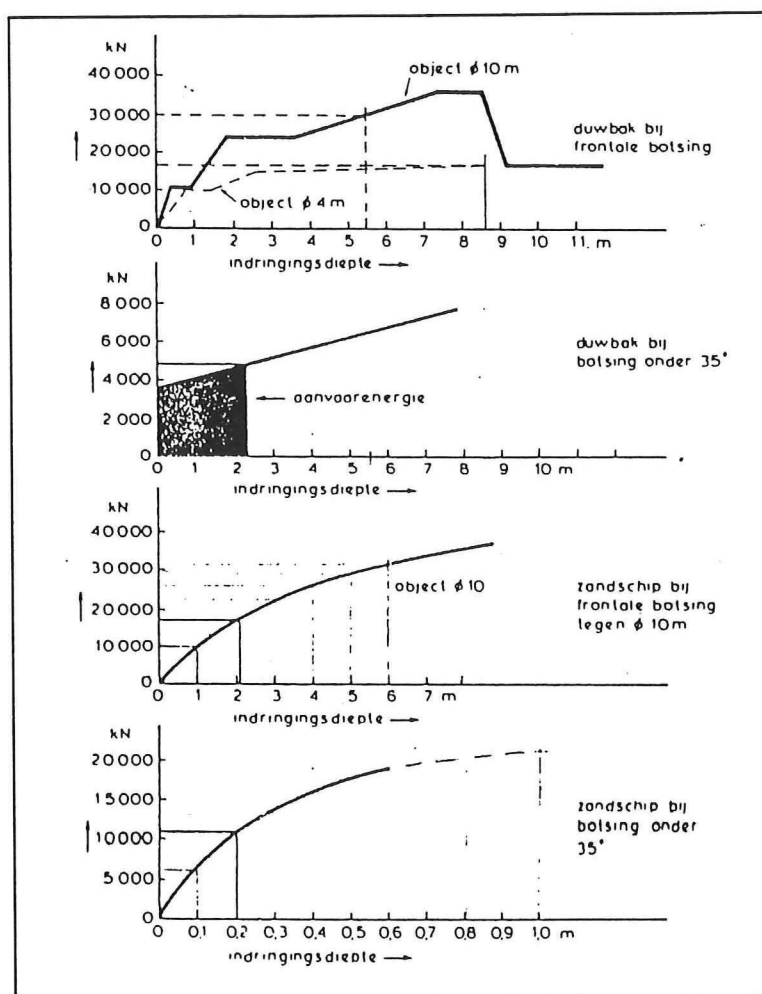
Voor de schematisering van een schip kan men het beste uitgaan van het kracht-verbormingsdiagram van het schip.



Afb. 37: Keuze van een krachtwegdiagram

Hierbij is gekozen om uit te gaan van een 'gestroomlijnd' kracht-weg-diagram (afb. 37). Het piekerige verloop (fig. 24 van de literatuurstudie) geeft een beter beeld wat er in het schip gebeurt tijdens de botsing. Het lopen van de golven in het schip wordt door de pieken in afb. 37 aangegeven.

Voor de kracht-verbormingsdiagrammen van de schepen zullen de diagrammen gebruikt worden die voor de ontwerpen van de Willemsbrug en Erasmusbrug in Rotterdam zijn toegepast (afb. 38).



Afb. 38: kracht-wegdiagram voor twee typen schepen
[polytechnisch tijdschrift; Bouwkunde, wegen-en waterbouw 36; 1981]

Twee typen schepen:

- duweenheid Europa IIA, bestaande uit 6 duwbakken,
- zandschip.

Kenmerken:	duweenheid	zandschip
- breedte [m]	34.2 (2*3 brede formatie) 22.8 (3*2 lange formatie)	12.6
- diepgang [m]	4.0	4.7
- waterverpl. (massa) [ton]	22000	5000
- snelheid t.o.v.bodem [m/s]	4.72	2.78

Aanvaringsenergie (zie literatuurstudie § 10.1)

frontale aanvaring:

	snelh.	C_m	C_E	C_{br}	E [kNm]
duwcombinatie:	4.72	1	1	0.5	122500
zandschip:	2.78	1	1	1	19300

dwarsaanvaring:

	snelh.	C_m	C_E	C_{br}	E [kNm]
duwcombinatie:	4.72	1.23	0.138	0.75	10300
zandschip:	2.78	1.75	0.138	1	1540

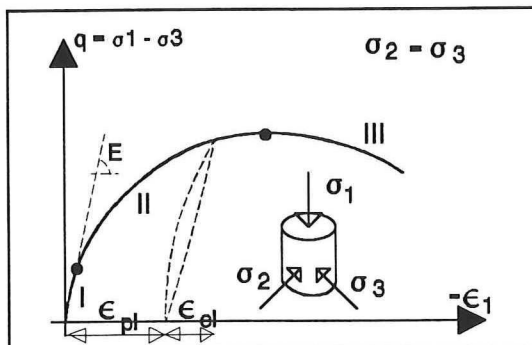
Hierbij is:

- C_m = de vermenigvuldigingsfactor die de hydrodynamische massa van het schip aangeeft,
- C_E = de vermenigvuldigingsfactor die de invloed van een scheve aanvaring aangeeft,
- C_{br} = de vermenigvuldigingsfactor die de invloed van het breken van de koppelingen tussen de duwbakken aangeeft,
- E = de 'op te nemen' vervormingsenergie.

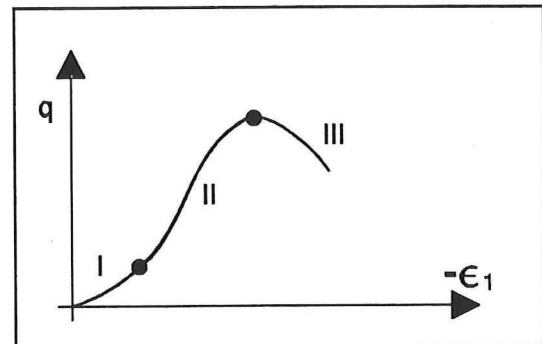
7.4. Schematisering van de grond onder de pijler

7.4.1. Eigenschappen grond

Om de grond te schematiseren is het noodzakelijk te weten hoe de grond reageert. Dit kan verduidelijkt worden met de resultaten van een triaxiaal-proef. Hierbij wordt een monster met beperkte afmetingen eenassig belast (σ_1) waarbij op de andere assen ($\sigma_{2,3}$) een steundruk is geplaatst (Afb. 39 en 40).



Afb. 39: Drukdiagram voor initieel ongescheurd gesteente



Afb. 40: Drukdiagram initieel gescheurd gesteente

In deze afbeeldingen zijn drie trajecten te onderscheiden:

- I. Elastisch gedrag,
- II. Elasto-plastisch gedrag (verstevinging),
- III. Elasto-plastisch gedrag (bezwijken).

Ad I. Elastisch gedrag

Het korrelskelet blijft intact en de vervormingen zijn vrijwel elastisch. Dit betekent dat het materiaal na ontlasten min of meer in de oude toestand terugkeert. Het gedrag is dus reversibel. Voor grond is dit gedrag vrijwel lineair en daarom mag de wet van Hooke gebruikt worden (E-modulus en dwarscontractiecoëfficiënt ν).

Initieel gescheurd gesteente vertoont een niet-lineair elastisch gedrag (afb. 40). Dit wordt veroorzaakt door het sluiten van haarscheurtjes tijdens de eerste fase van belasten waardoor de grond zich gaandeweg stijver gaat gedragen.

Ad II. Elasto-plastisch gedrag (verstevinging)

De overgang van elastisch naar plastisch gedrag gebeurt zeer geleidelijk. De deformatie wordt langzaam steeds plastischer door het ontstaan van haarscheurtjes in het gesteente en het verschuiven van de korrels.

In het elasto-plastische gebied treedt er een blijvende vervorming ϵ_{pl} (afb.39) op na

In het elasto-plastische gebied treedt er een blijvende vervorming ε_{pl} (afb.39) op na ontlasten. Bij het ontlasten en herbelasten treedt een kleine hysteresis op (overdreven getekend), door heroriëntatie van de korrels. Dit hysteresis-verschijnsel is te verwaarlozen en daarom wordt aangenomen dat herbelasten en ontlasten via dezelfde tak verlopen (evenwijdig aan de elastische rechte door de oorsprong).

Ad III. Elasto-plastisch gedrag (bezwijken)

De spannings-tek relaties voor dichtgepakt zand en gesteente vertonen een duidelijk maximum wanneer dit getest wordt onder een geringe steundruk. Voor losgepakt zand en gesteente onder hoge druk verloopt dit maximum veel vlakker en kan er een plateau ontstaan.

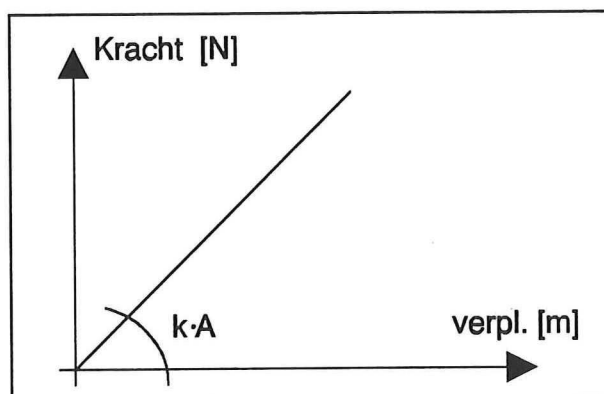
7.4.2. Beddingsconstanten

De literatuur vermeldt de volgende waarden voor de beddingsconstanten voor verschillende soorten grond.

k_{grond}	:	• klei : $1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^3$
		• zand : $1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$
		• grind : $1 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$

Met nadruk dient gezegd te worden dat deze waarden slechts in orde van grootte gegeven zijn.

Voor een oppervlakte grond $A \text{ [m}^2\text{]}$ is de beddingsconstante $A \cdot k_{\text{grond}}$. De eenheid hiervan is N/m . Dit is de eenheid van de stijfheid van een veer (afb. 41).

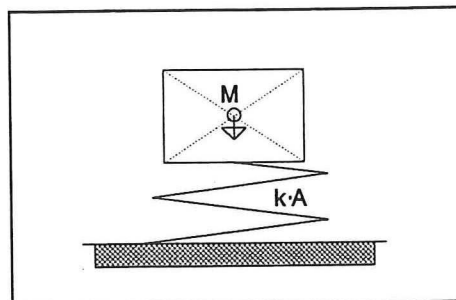


Afb. 41: Beddingsconstante $k \cdot A$ heeft het kenmerk van een lineaire veer

7.4.3. Meewerkende grond

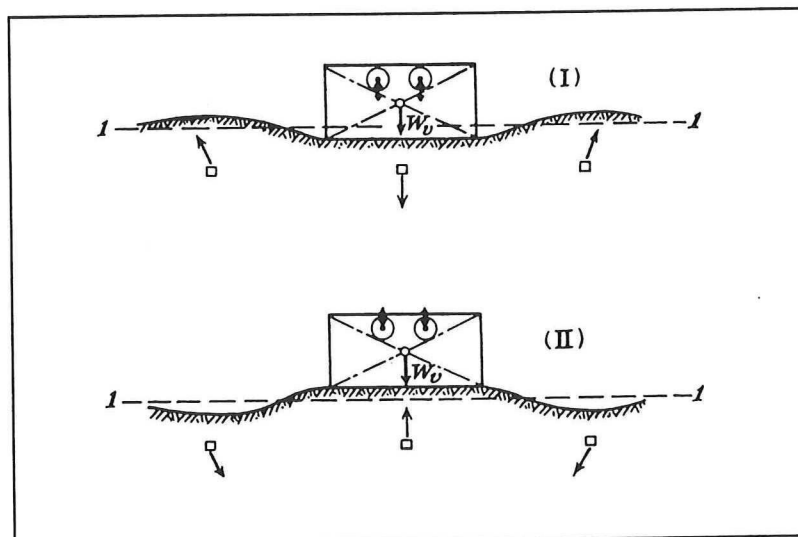
Uitgaande van de schematisering van het blok op een bedding, zou een verticale verplaatsing tot een beweging leiden met een bepaalde eigenfrequentie. Een blok op een veer (afb. 42) heeft als eigenfrequentie:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot A}{M}}$$



Afb. 42: Schematisering van een verticale trilling

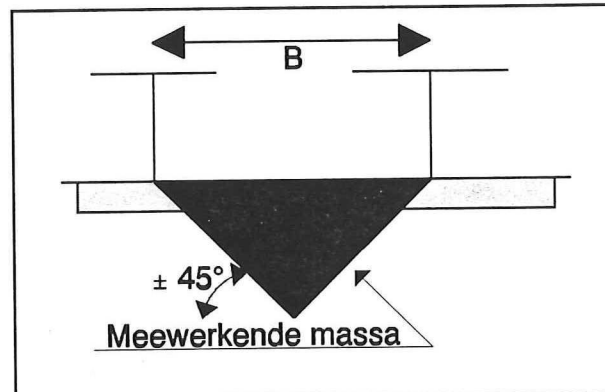
Hierbij is de demping van de grond niet meegenomen. Wanneer deze wel meegenomen wordt, zal de eigenfrequentie verminderen (zolang de beweging onderkritisch gedempt is).



Afb. 43: Een deel van de grond trilt met het blok mee

Tot nu toe is het eigen gewicht van de grond verwaarloosd. De grond zal echter mee gaan trillen met het blok (afb.43). Dit verandert de eigenfrequentie. I.p.v. de massa M_{blok} zal een nieuwe massa $M_{\text{blok}} + M_{\text{grond}}$ gebruikt dienen te worden. Nu is de vraag hoe groot deze grondmassa is. Hiervoor moet een schatting gemaakt worden.

Als B de breedte van het blok is en L de lengte ($B < L$), is een redelijke schatting voor de meewerkende massa: $0,5 \cdot B \cdot B \cdot L \cdot \rho$



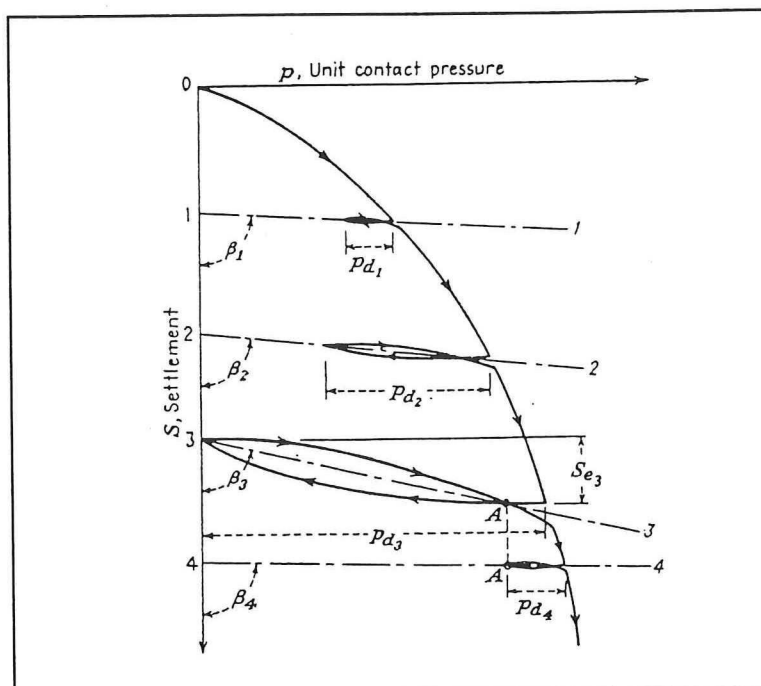
Afb. 44: Meewerkende massa

Aanname: Verwaarloos de meewerkende massa in de schematisering van de aanvaring. Deze aanname wordt gedaan omdat de aanvaring meer een rotatie en een afschuiving tot gevolg heeft dan een verticale trilling. Bij afschuiven is er geen meewerkende massa. Bij rotatie echter wel.

Aanname: Verwaarloos de meewerkende massa voor een roterende beweging.

7.4.4. Dynamische stijfheid grond

Verwacht mag worden dat grond onder een dynamische belasting stijver reageert dan onder een statische belasting (afb. 45).



Afb. 45: Grond reageert dynamisch stijver dan statisch

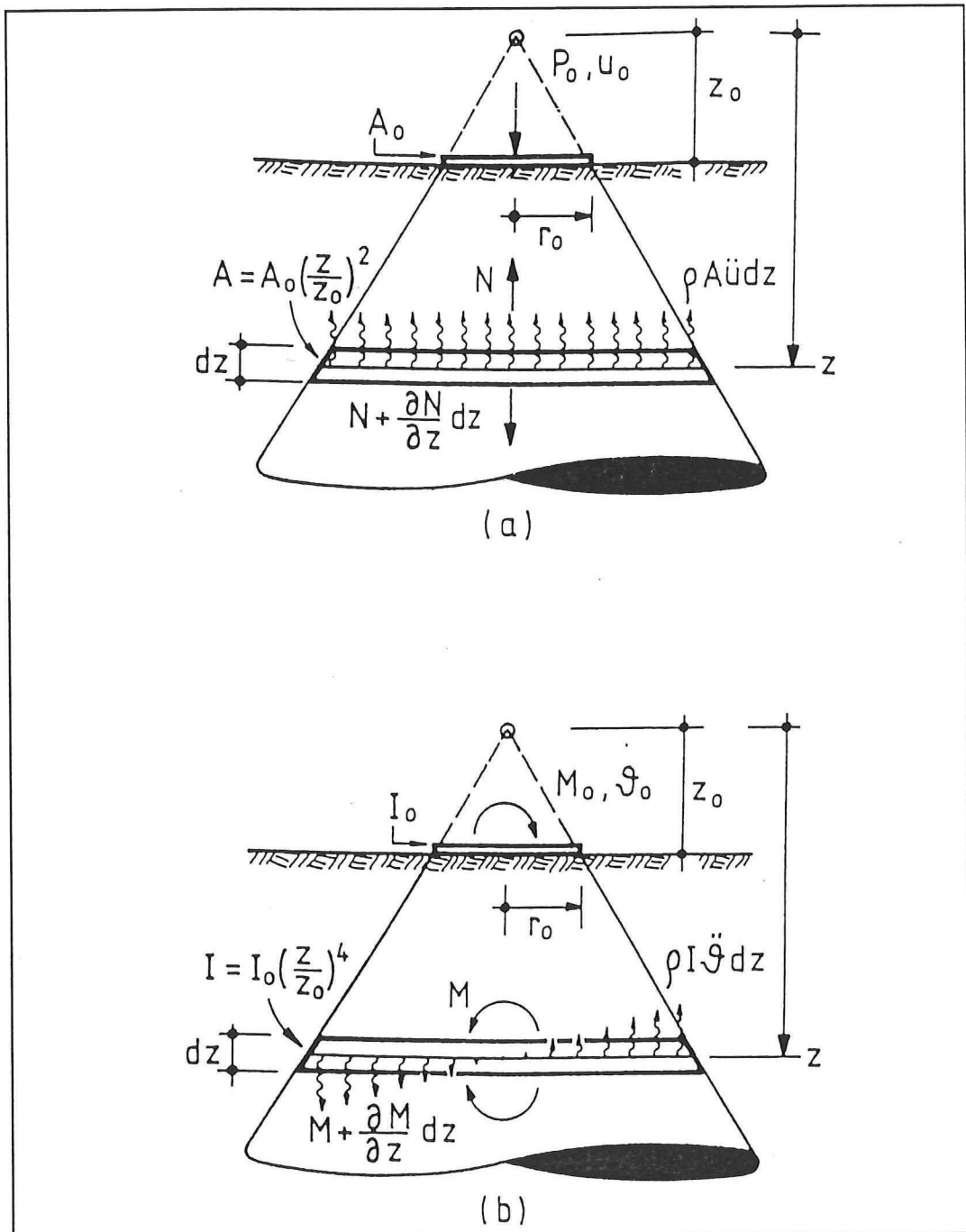
Om deze dynamische stijfheid te weten te komen is het mogelijk gebruik te maken van het conus-model. Dit model (afb. 46) is een vereenvoudigde weergave van grond en zeer geschikt voor een parameterstudie. De twee conusmodellen in afb. 46 zijn geschikt voor oppervlakte-fundaties op een homogene halfruimte.

Het conusmodel gaat uit van een cirkelvormige basis met een radius r_0 . Omzetten van een niet-cirkelvormige naar een cirkel-vormige basis is eenvoudig:

- conusmodel voor translatie: $r_0 : \sqrt{A/\pi}$
- conusmodel voor rotatie: $r_0 : \sqrt[4]{4 \cdot I/\pi}$

Hierbij is:

- A = oppervlakte fundering [m^2],
- I = oppervlakte-traagheid fundering [m^4].



Afb. 46: Conus model voor translatie (a) en voor rotatie (b)

Alle conusmodellen worden mathematisch beschreven met de volgende bewegingsvergelijking:

$$\frac{d^2w}{dz^2} + \frac{n}{z} \cdot \frac{dw}{dz} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2w}{dt^2}$$

Hierbij is:

- $w(z)$ = zakking/rotatie op een afstand z van de top van de kegel.
- c = geschikte snelheid van golfvoortplanting.
 - horizontale translatie en torsie $c = c_s$ = schuifgolfsnelheid.
 - verticale translatie en rotatie $c = c_p$ = dilatatiegolfsnelheid.

Voor grond met een dwarscontractiecoëfficiënt $1/3 < \nu < 1/5$ dient c_p gemaximaliseerd te worden tot $2 \cdot c_s$

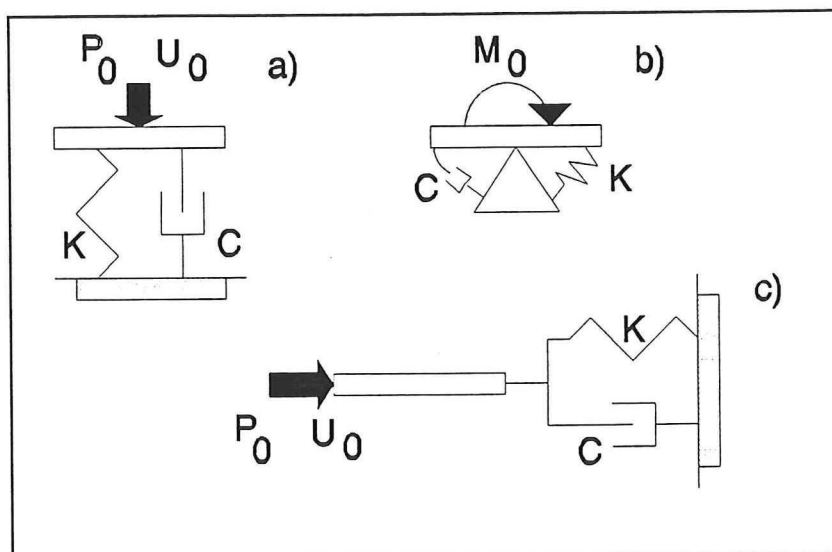
$n=1$: 2-dimensionale schijf in translatie.

$n=2$: 3-dimensionale schijf in translatie.

$n=3$: 2-dimensionale schijf in rotatie.

$n=4$: 3-dimensionale schijf in rotatie.

Conustype	Beweging	r_0	z_0/r_0	ν	c
<u>Translatie</u> $K = \rho c^2 A_0 / z_0$ $C = \rho c A_0$	Verticaal	$\sqrt{(A_0/\pi)}$	$\pi/4(1-\nu) \cdot (c/c_s)^2$	$\leq 1/3$	c_p
				$> 1/3$	$2c_s$
	Horizontaal	$\sqrt{(A_0/\pi)}$		alle	c_s
<u>Rotatie</u> $K = 3\rho c^2 I_0 / z_0$ $C = \rho c I_0$	Rocking	$\sqrt[4]{(4I_0/\pi)}$	$9\pi/32(1-\nu) \cdot (c/c_s)^2$	$\leq 1/3$	c_p
				$> 1/3$	$2c_s$
	Torsie	$\sqrt[4]{(4I_0/\pi)}$	$9\pi/32$	alle	c_s



Afb. 47: Discrete modellen voor hor. translatie a) vert. translatie c) en rotatie b)

Bodenart	c_s [$\frac{m}{s}$]	c_p [$\frac{m}{s}$]
<u>Lockergesteine</u>		
Deckschichten, locker gelagert, verwittert, nicht gesättigt (3m bis 6 m)	110 - 500	200 - 800
Schotter (Kiessand), nicht gesättigt	200 - 500	400 - 800
Schotter, grundwassergesättigt	200 - 500	1300 - 2000
verkitteter Schotter	1000 - 1400	1800 - 2500
Seebodenlehm, nicht vollständig gesättigt	300 - 600	700 - 1300
Seebodenlehm, gesättigt	400 - 700	1300 - 1800
Gehängelehm, nicht gesättigt	100 - 400	300 - 1000
Moräne	600 - 1000	1200 - 2400
Löss	150 - 300	300 - 600
<u>Fels</u>		
Molasse-Mergel und Molasse-Sandstein, weich, verwittert	500 - 1100	900 - 1800
Mergel, nicht verwittert	1200 - 2100	1800 - 3200
Molasse-Sandstein, hart	1200 - 2400	1800 - 3500
Nagelfluh	700 - 2700	1000 - 4000
Schiefer	1200 - 3300	1800 - 5000
Kalk	2000 - 4000	3000 - 6000
Gneis	2000 - 4000	3000 - 5500
Granit	2700 - 4000	4000 - 6000

Afb. 48: Waarden voor de golfvoortplantingssnelheid [ETH- Bericht Nr. 147]

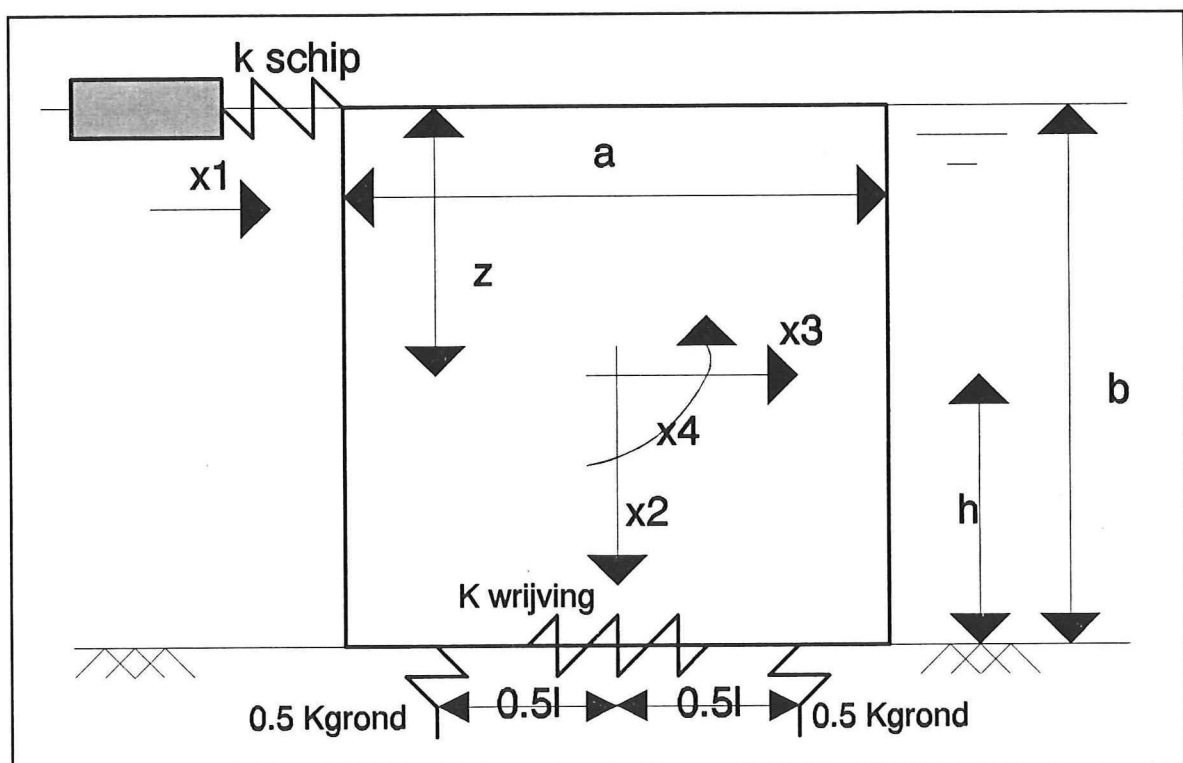
7.5. Dynamica, handberekening

7.5.1. Afleiding bewegingsvergelijking

De pijler is geschematiseerd tot een star blok met een massa M_p en een rotatietraagheid I_p . Voor de schematisering van de grond is gekozen voor twee verticale beddingsveren en één horizontale (afschuif)veer. Het schip is geschematiseerd tot een blok met een massa M_s en een veer die het kracht-vernimmingsdiagram van het schip weergeeft. D.m.v. deze veer worden het schip en de pijler aan elkaar gekoppeld. De veer is een linearisering (stijfheid = k_{schip}) van het kracht-vernimmingsdiagram. Hieruit volgt dat de botsing elastisch is.

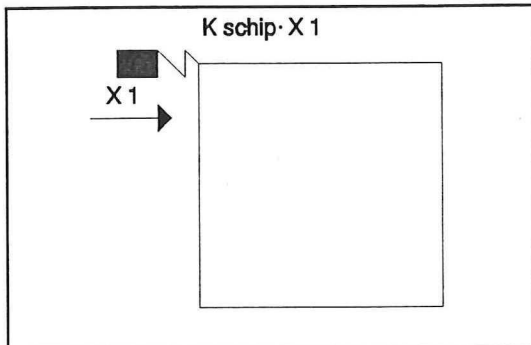
Dit systeem heeft vier vrijheidsgraden:

- horizontale verplaatsing schip (x1),
- verticale verplaatsing blok (x2),
- horizontale verplaatsing blok (x3),
- rotatie blok (x4).

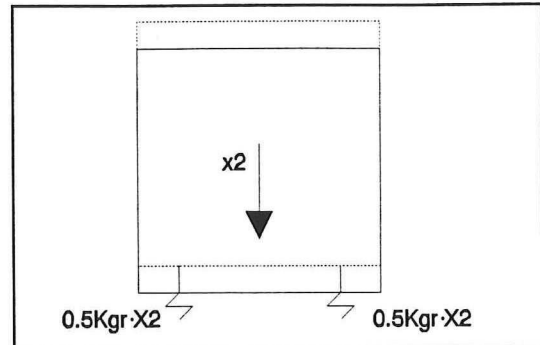


Afb. 49: Situatieschets

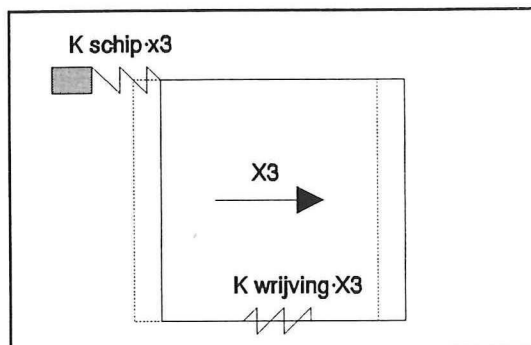
Om de dynamische vergelijking op te stellen wordt gebruik gemaakt van de verplaatsingen-methode.



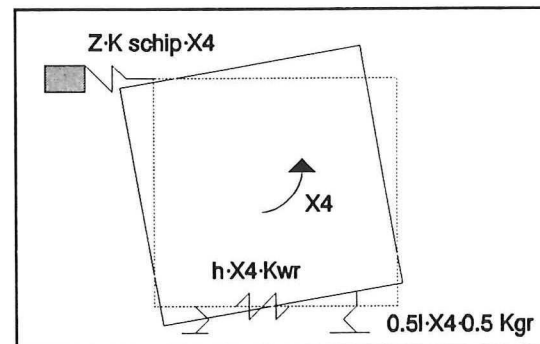
Afb. 50: Uitwijking x1



Afb. 51: Uitwijking x2



Afb. 52: Uitwijking x3



Afb. 53: Uitwijking x4

Dit resulteert in de volgende vergelijkingen:

- $M_s \cdot x_1'' = -k_s \cdot x_1 + k_s \cdot x_3 - z \cdot k_s \cdot x_4$
- $M_p \cdot x_2'' = -k_{grond} \cdot x_2$
- $M_p \cdot x_3'' = -k_{wr} \cdot x_3 - k_s \cdot x_3 + k_s \cdot x_1 - h \cdot x_4 \cdot k_{wr} + z \cdot k_s \cdot x_4$
- $I_p \cdot x_4'' = -k_s \cdot x_1 \cdot z + (k_s \cdot z - k_{wr} \cdot h) \cdot x_3 + (-1/4 \cdot l^2 \cdot k_{gr} - h^2 \cdot k_{wr} - z^2 \cdot k_s) \cdot x_4$
- $M_s \cdot x_1'' + k_s \cdot x_1 - k_s \cdot x_3 + z \cdot k_s \cdot x_4 = 0$
- $M_p \cdot x_2'' + k_{grond} \cdot x_2 = 0$ (Ontkoppeld)
- $M_p \cdot x_3'' - k_s \cdot x_1 + (k_{wr} + k_s) \cdot x_3 + (h \cdot k_{wr} - z \cdot k_s) \cdot x_4 = 0$
- $I_p \cdot x_4'' + k_s \cdot x_1 \cdot z + (k_{wr} \cdot h - k_s \cdot z) \cdot x_3 + (1/4 \cdot l^2 \cdot k_{gr} + h^2 \cdot k_{wr} + z^2 \cdot k_s) \cdot x_4 = 0$

$$\begin{vmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_p & 0 \\ 0 & 0 & I_p \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1'' \\ x_3'' \\ x_4'' \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_s & -k_s & z \cdot k_s \\ -k_s & (k_{wr} + k_s) & (h \cdot k_{wr} - z \cdot k_s) \\ k_s \cdot z & (k_{wr} \cdot h - k_s \cdot z) & (1/4 \cdot l^2 \cdot k_{gr} + h^2 \cdot k_{wr} + z^2 \cdot k_s) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix} = 0$$

Korter genoteerd: $M \cdot \underline{x}'' + K \cdot \underline{x} = 0$

De massamatrix is een diagonaalmatrix en de stijfheidsmatrix is symmetrisch (Wederkerigheidswet van Maxwell).

Het gekoppelde stelsel vergelijkingen, $M \cdot \underline{x}'' + K \cdot \underline{x} = 0$, is homogeen. Dit is de ongedempte vrije trilling. Veronderstel een synchrone harmonische beweging $\underline{x}(t)$, hetgeen impliceert dat alle vrijheidsgraden op dezelfde wijze in de tijd variëren. Dit is de eigentruilling.

$$\underline{x}(t) = \underline{x} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

Vul deze vgl. in bij de homogene vergelijking.

$$(-\omega^2 \cdot M + K) \cdot \underline{x} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) = 0$$

De tijdfunctie kan niet op elk tijdstip gelijk aan nul zijn dus moet gelden:

$$(-\omega^2 \cdot M + K) \cdot \underline{x} = 0$$

$\underline{x} = 0$, is de triviale oplossing en niet interessant.

Een homogeen stelsel is afhankelijk als de determinant van de coëfficiëntenmatrix gelijk aan nul is.

$$\det | -\omega^2 \cdot M + K | = 0$$

$$\begin{vmatrix} -\omega^2 \cdot M_s + k_s & -k_s & z \cdot k_s \\ k_s & -\omega^2 \cdot M_p + (k_{wr} + k_s) & (h \cdot k_{wr} - z \cdot k_s) \\ k_s \cdot z & (k_{wr} \cdot h - k_s \cdot z) & -\omega^2 \cdot I_p + (1/4 \cdot l^2 \cdot k_{gr} + h^2 \cdot k_{wr} + z^2 \cdot k_s) \end{vmatrix}$$

De oplossing van de vergelijking: $\det = 0$ levert een vergelijking op in de vorm:

$$A \cdot \omega^6 + B \cdot \omega^4 + C \cdot \omega^2 + D = 0$$

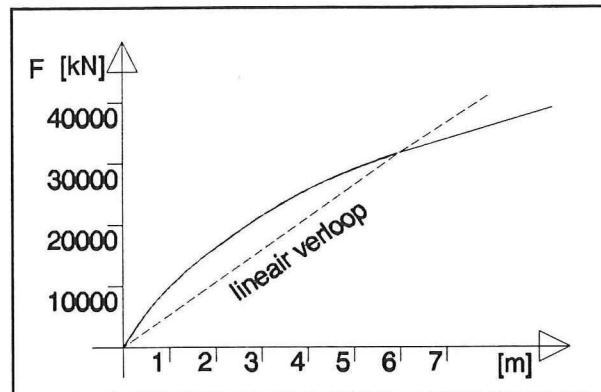
De coëfficiënten zijn afhankelijk van de volgende variabelen:

- M_s = massa van het schip,
- k_s = stijfheid van het schip,
- M_p = massa van de pijler,
- K_{wr} = wrijvingsconstante,
- K_{gr} = stijfheid van de grond,
- l = afstand tussen de twee verticale veren,
- h = afstand massacentrum pijler tot grondveer,
- z = afstand massacentrum pijler tot aanvaringszone.

7.5.2. Voorbeeld

Pijler hoogte	= 20 m,
Breedte	= 8 m,
Hoogte	= 20 m,
gem. soort. gewicht	= 2000 kg/m ³ .

Voor het schip wordt het zandschip gebruikt uit § 7.3.



Afb.54: Linearisering kracht-vervormingsdiagram van het zandschip bij een frontale aanvaring

- M_s = massa schip = $5 \cdot 10^6$ kg
- k_s = stijfheid schip = $5.33 \cdot 10^6$ N/m
- M_p = Massa pijler = $6.4 \cdot 10^6$ kg
- K_{wr} = wrijvingsconstante = $160 \cdot 10^7$ N/m
- K_{gr} = stijfheid grond = $160 \cdot 10^7$ N/m
- l = afstand tussen de twee verticale veren = 13.33 m
- h = afstand massacentrum pijler en grondveer = 10 m
- z = afstand massacentrum pijler en aanvaringszone = 10 m

(De hydrodynamische massa wordt voor zowel het schip als de pijler niet meegenomen)

Dit levert de volgende constanten:

- $A = -1.365 \cdot 10^{22}$,
- $B = 1.085 \cdot 10^{25}$,
- $C = -5.991 \cdot 10^{26}$,
- $D = 6.061 \cdot 10^{26}$.

Het oplossen van de vergelijking levert drie bruikbare eigenfrequenties:

- $\omega_1 = 1.01$ rad/sec,
- $\omega_2 = 7.65$ rad/sec,
- $\omega_3 = 27.11$ rad/sec.

Bij elke eigenfrequentie hoort een eigenvector:

• ω_1 : eigenvector		1	
		0.018	
		-0.0014	
• ω_2 : eigenvector		1	
		-30.449	
		2.349	
• ω_3 : eigenvector		1	
		729.71	
		141.83	

De algemene oplossing is als volgt te schrijven:

$$x = \sum_{i=1}^3 \underline{x}_i \cdot C_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i)$$

In deze formule zitten 6 onbekenden, te weten $C_{1,2,3}$ en $\phi_{1,2,3}$

Om dit op te lossen zijn 6 beginvoorwaarden nodig.

$$x_1(t=0) = 0$$

$$x_3(t=0) = 0$$

$$x_4(t=0) = 0$$

$$x_1'(t=0) = v_0 = 2.78 \text{ m/s} = 10 \text{ km/uur}$$

$$x_3'(t=0) = 0$$

$$x_4'(t=0) = 0$$

Om de constanten C en ϕ te vinden wordt gebruik gemaakt van de orthogonaliteitsrelaties. De randvoorwaarden worden als volgt geschreven:

$$\underline{x}_0 = \sum_{i=1}^3 \underline{x}_i \cdot C_i \cdot \sin(\phi_i)$$

$$\underline{x}'_0 = \sum_{i=1}^3 \underline{x}_i \cdot C_i \cdot \omega_i \cdot \cos(\phi_i)$$

Er wordt gebruik gemaakt van twee constanten A en B:

$$A_j = \frac{\mathbf{x}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}_0}{\mathbf{x}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}_j} \text{ ----- } \tan \phi_i = \frac{A_i \cdot \omega_i}{B_i}$$

$$B_j = \frac{\mathbf{x}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}'_0}{\mathbf{x}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}_j} \text{ ----- } C_i^2 = A_i + \left(\frac{B_i}{\omega_i}\right)^2$$

De randvoorwaarde-vector voor de plaats (\mathbf{x}_0) bestaat uit louter nullen. Dit betekent dat ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 nul dienen te zijn. De randvoorwaarde-vector voor de snelheid is:

$$\begin{vmatrix} v_0 = 2.78 \text{ m/s} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Hiermee kunnen de constanten $C_{1,2,3}$ bepaald worden:

- $C_1 = B_1/\omega_1 = 2.73$
- $C_2 = B_2/\omega_2 = 2.2 \cdot 10^{-4}$
- $C_3 = B_3/\omega_3 = 4.3 \cdot 10^{-8}$

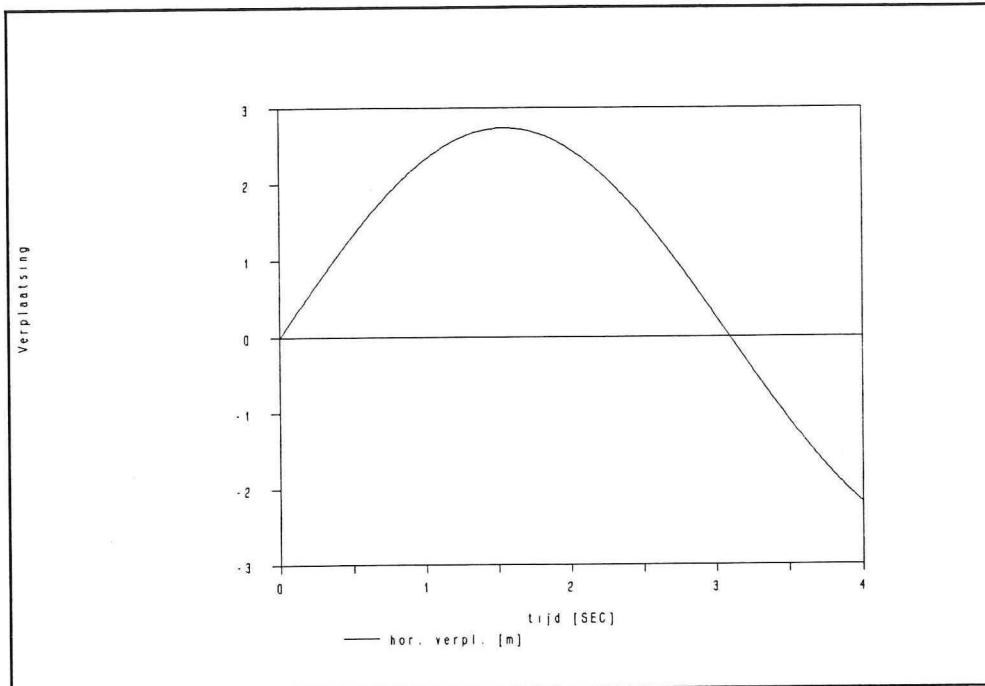
Nu zijn alle constanten bekend en kan de algemene oplossing opgesteld worden.

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{x}_i \cdot C_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t)$$

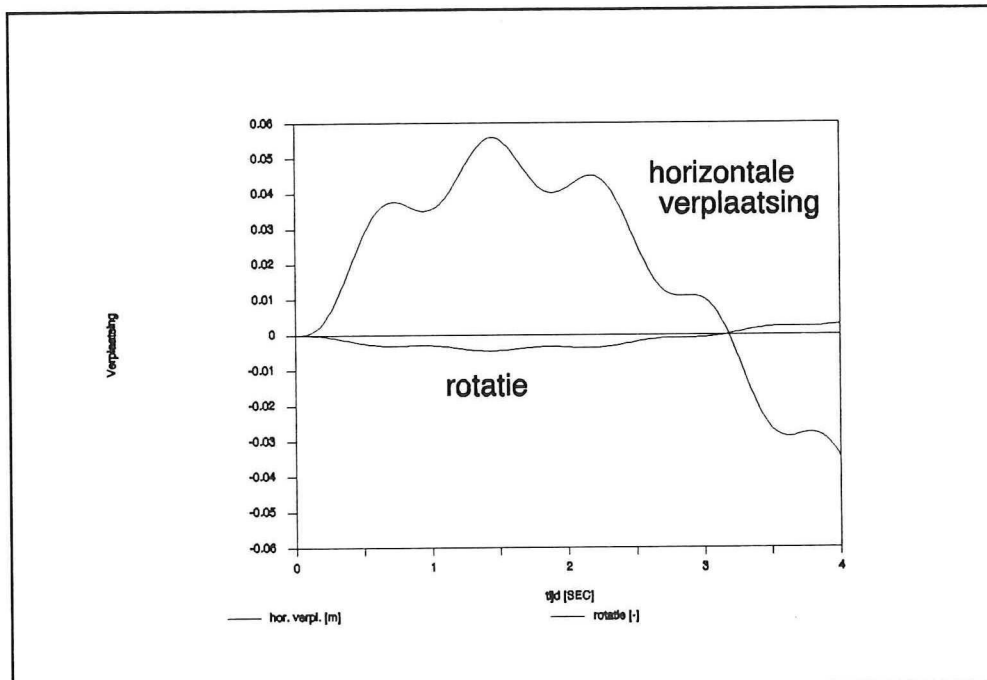
$$\mathbf{x} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.018 & -30.45 & 729.71 \\ -0.0014 & 2.35 & 141.83 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 2.73 \cdot \sin 1.017t \\ 2.2 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 7.653t \\ 4.3 \cdot 10^{-8} \cdot \sin 27.11t \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{x} = [3 \times 3] \cdot [3 \times 1]$$

Dit wordt weergegeven in afb. 55 en afb. 56.



Afb. 55: Verplaatsing schip (x1) (handberekening)

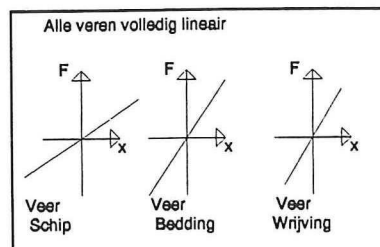


Afb. 56: Verplaatsing massacentrum pijler: hor. (x3) ; rotatie (x4) (handberekening)

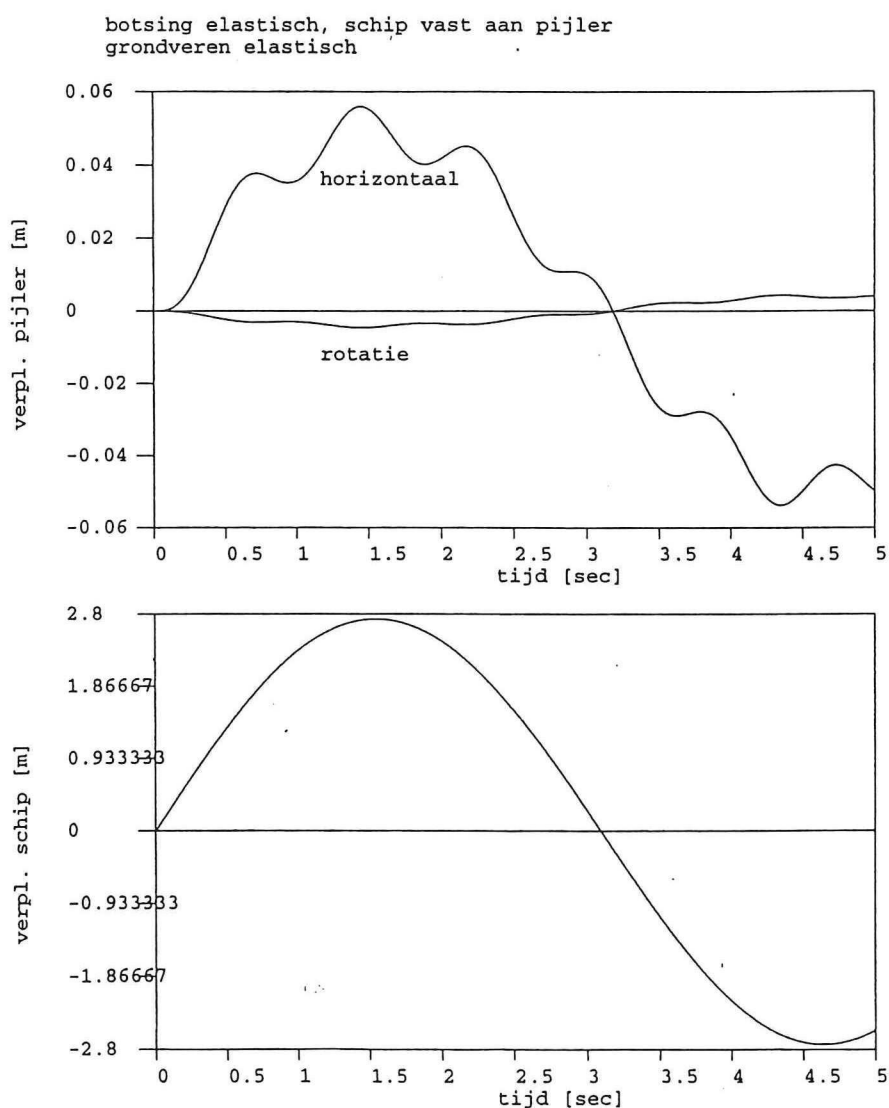
7.6. Dynamica, computerberekening

7.6.1. Controle handberekening

De handberekening uit § 7.5 wordt in deze paragraaf gecontroleerd d.m.v. het computerprogramma Tilly. Hieronder worden 2 verplaatsingen en één rotatie weergegeven. Deze vertonen een goede overeenkomst met de handberekening (§ 7.5.2).



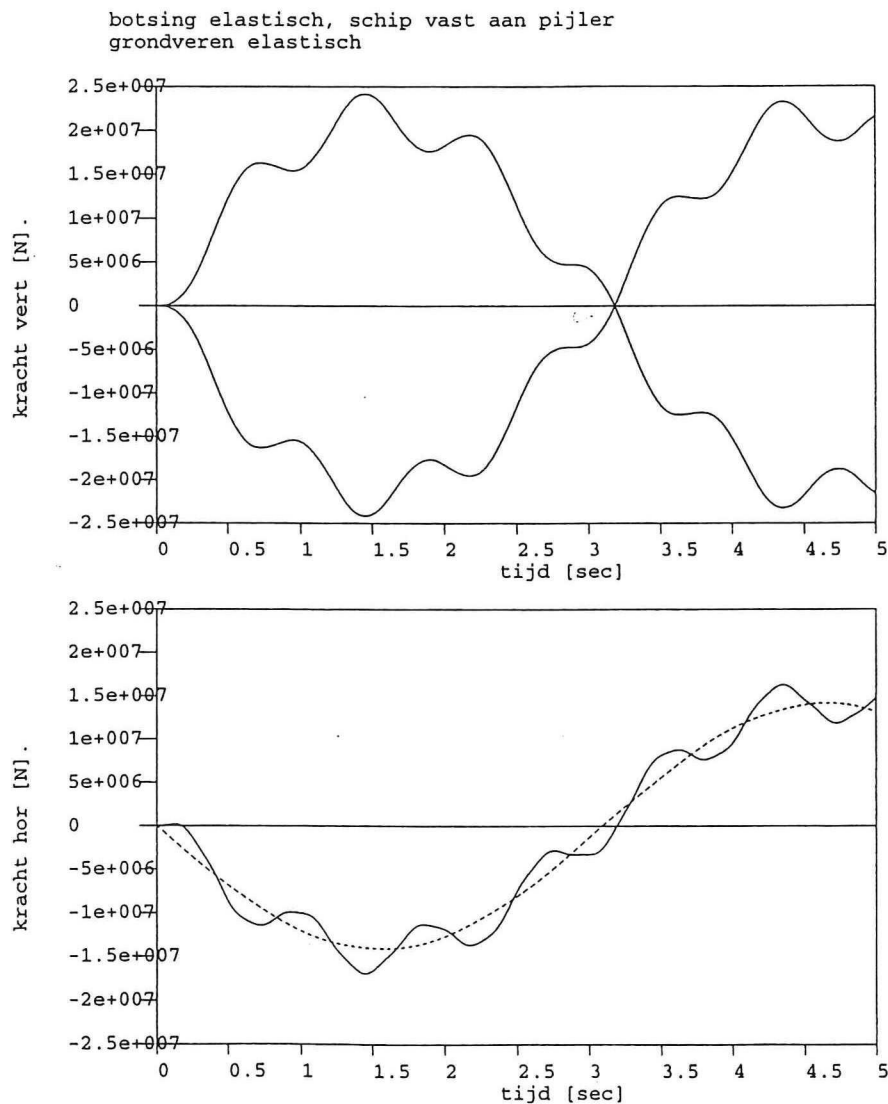
Afb.57: Aangenomen veereigenschappen



Verplaatsingen bij schematisering als in afb. 49 met gegevens uit § 7.5.2 (computerberekening)

Hieronder worden de krachten in de veren gegeven. De twee verticale krachten in de beddingsveren zijn in tegenfase. De kracht in de horizontale wrijvingsveer (----) slingert rond de belasting van het schip(- - -).

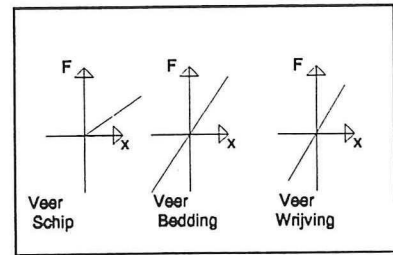
Noot: De belasting uit het schip duurt ongeveer 3 seconden. Dit is veel langer dan de looptijd van de golven in de constructie. Stel de loopsnelheid op $c = 2000$ m/s. Dan is de looptijd = Lengte constructie / $c = 20$ [m] / 2000 [m/s] = 0.01 seconden. Dit is ruim honderd keer zo klein als de belastingstijd. De schematisering van de pijler tot een star lichaam is dus correct.



Krachten bij schematisering als in afb. 49 met gegevens uit § 7.5.2 (computerberekening)

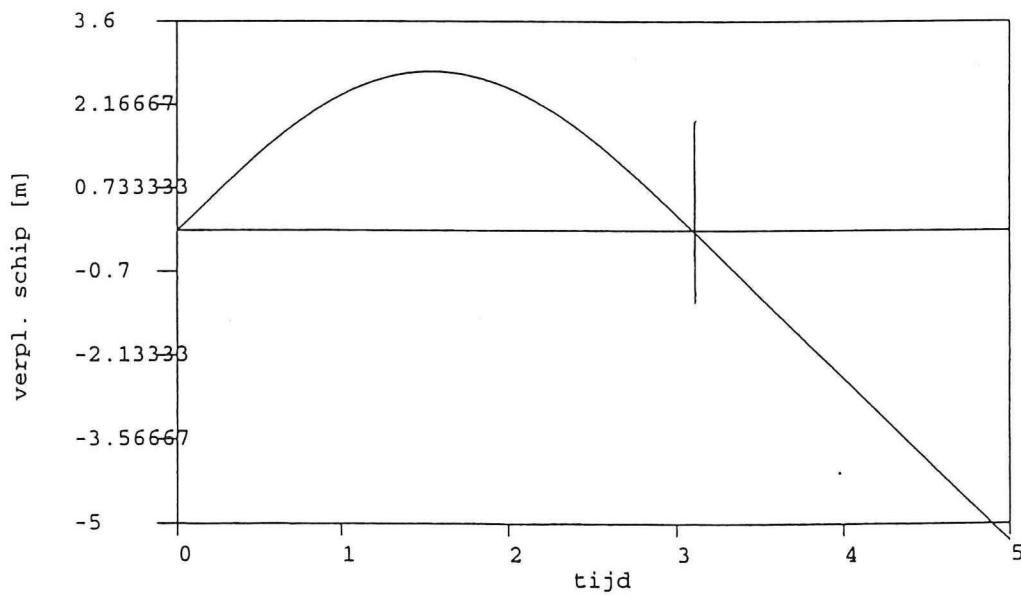
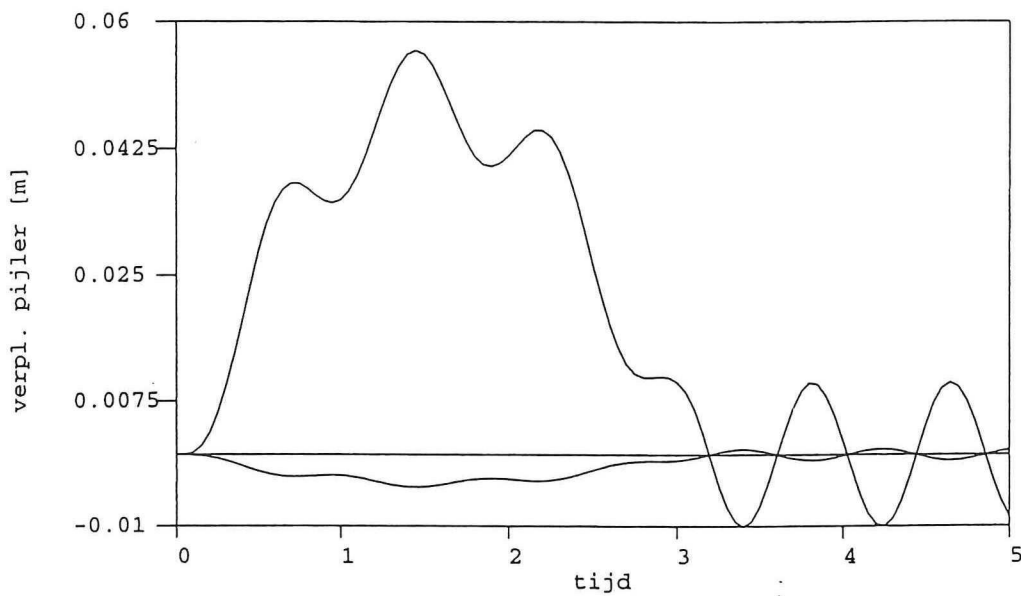
Het schip kan geschematiseerd worden tot een massa M_s en een veer die geen trek op kan nemen. Het schip laat dan los van de constructie. Dit betekent dat de botsing van beperkte duur is, in tegenstelling tot de handberekening waar de botsing in principe oneindig lang doorgaat.

- Maximale horizontale verplaatsing massacentrum pijler: 5.5 cm.
- Maximale rotatie massacentrum pijler: -0.005 rad.
- Maximale verplaatsing schip: 2.8 m.



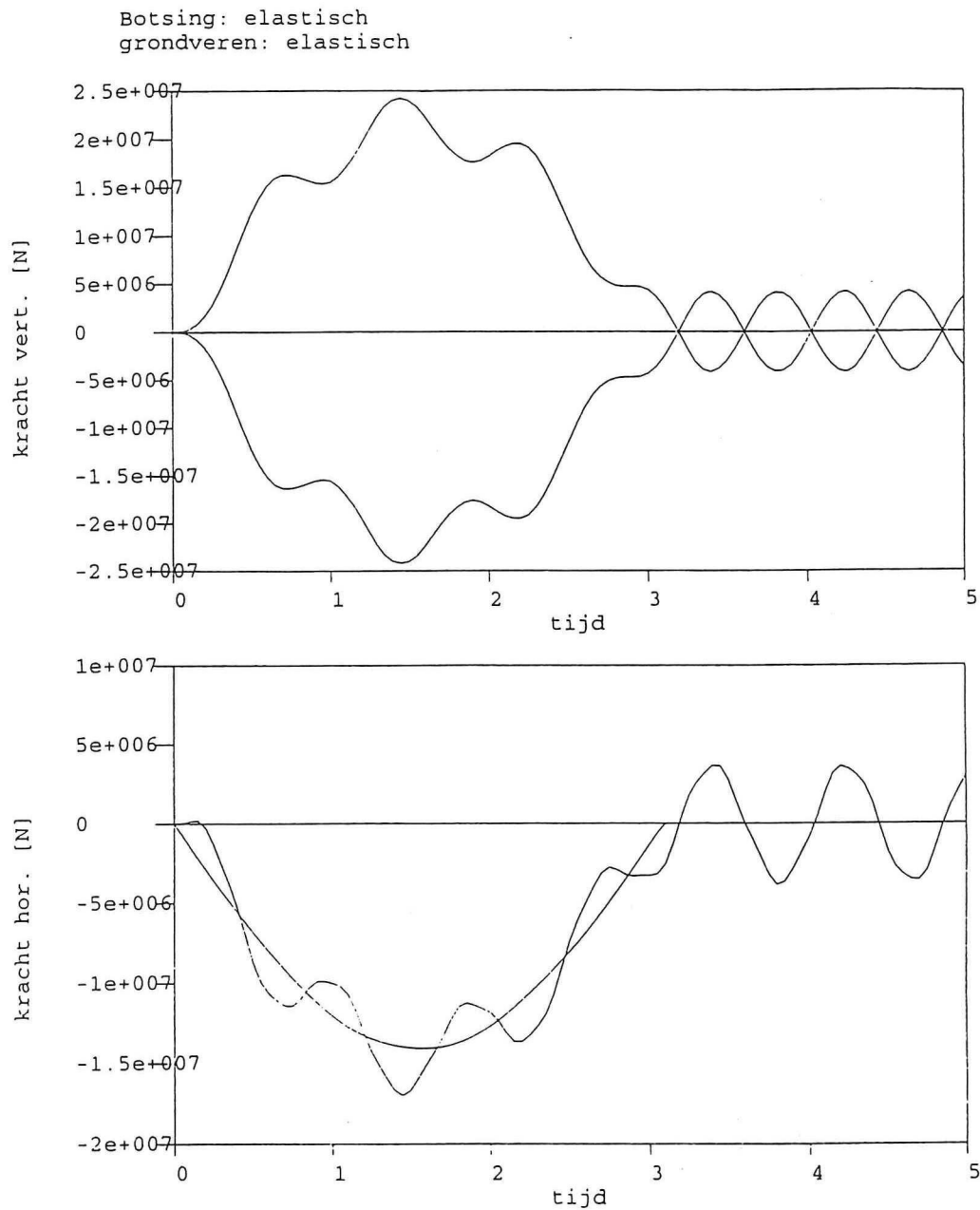
Afb. 58: Aangenomen veereigenschappen

Botsing: elastisch
grondveren: elastisch



Verplaatsingen bij schematisering als in afb. 49 met gegevens uit § 7.5.2

De botsing duurt ongeveer 3 seconden.
De twee verticale beddingsveren zijn in tegenfase.
De maximale belasting op de constructie is 14 MN.



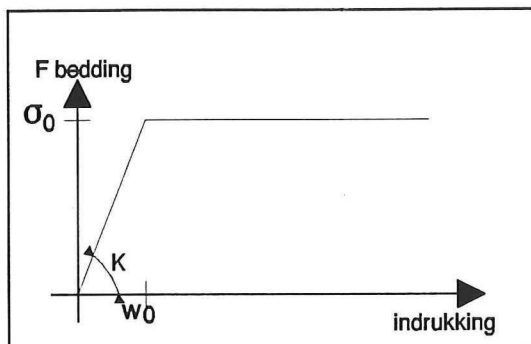
Krachten bij schematisering als in afb. 49 met gegevens uit § 7.5.2

7.6.2. Bepaling kenmerken grond

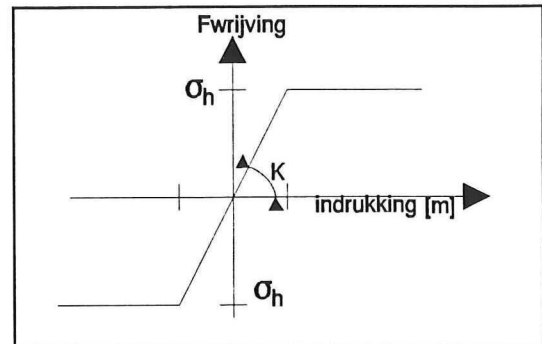
Tot nu toe is voor de grond uitgegaan van geheel lineaire veren. Het prettige van Tilly is dat men niet gebonden is aan lineaire veren. De beddingsveer uit afb. 49 is beter te beschrijven met een veer die geen trek op kan nemen en een vloeigrens heeft (afb. 59).

Dit is in overeenstemming met de theorie van Mohr die aangeeft dat er geen trek op kan treden bij niet-cohesieve grond en de grond een maximale waarde voor de druk heeft behorend bij een steundruk (Cirkel van Mohr).

De wrijvingsveer wordt geschematiseerd tot een veer die zowel trek als druk kan opnemen (afhankelijk van de bewegingsrichting van de pijler) en een vloeigrens heeft.



Afb. 59: Schematisering beddingsveer, wel druk geen trek



Afb. 60: Schematisering wrijvingsveer

7.6.2.1. Bepaling kenmerken grond statisch

Tot nu toe is voor de grond uitgegaan van een beddingsconstante uit de literatuur. In deze paragraaf wordt hier zelf een schatting voor gemaakt.

Probeer uitgaande van verschillende redeneringen om σ_0 en w_0 (afb. 59) te schatten:

- σ_0 : schatting uit plastisch gedrag;
- w_0 : schatting op basis van stijfheid.

Schatting w_0

Voor de aanvaring is er op funderingsniveau een initiële drukspanning $\sigma_i = F/A$. Uitgaande van de grondslag (pleistoceen zand) mag aangenomen worden dat de grond tamelijk stijf is.

$$E = 500 \cdot \sigma_i \quad \{ \sigma_i = 20 \cdot 10 \text{ kN/m}^3 = 200 \text{ kN/m}^2 \}$$

$$= 100 \text{ Mpa.}$$

Dit betekent bij een belasting van $q \cdot A$ een zakking w .

Hierbij is:

- q = belasting op het vlak onder de voetplaat van de pijler [N/m^2],
- A = oppervlak voetplaat [m^2].

De zakking w wordt berekend volgens Boussinesq.

$$\text{Boussinesq: } w = \frac{\pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot D}{E}$$

Hierbij is D een representatieve diameter van een cirkel volgens: $D = \sqrt{4 \cdot A / \pi}$

Schatting σ_0

De schatting van de sterkte (σ_0) wordt gemaakt volgens de theorie van Brinch-Hansen over een strokenfundering.

$$q_c = N_c \cdot c + N_q \cdot q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

Hierbij is:

- q_c = maximale belasting op de strook,
- c = cohesie grond,
- q = bovenbelasting naast belaste strook,
- γ = eigen gewicht grond,
- B = breedte funderingsstrook,
- N_c = factor voor de cohesie,
- N_q = factor voor de bovenbelasting naast de belaste strook,
- N_γ = factor voor het eigen gewicht van de grond.

De factoren N_c , N_q , N_γ zijn een functie van de hoek van inwendige wrijving ϕ van de grond.

ϕ	N_c	N_q	N_γ
21	15.815	7.071	3.496
22	16.883	7.821	4.134
23	18.049	8.661	4.878
24	19.324	9.603	5.746
25	20.721	10.662	6.758
26	22.254	11.854	7.941
27	23.942	13.199	9.324
28	25.803	14.720	10.942
29	27.806	16.443	12.841
30	30.140	18.401	15.070
31	32.971	20.631	17.693
32	35.490	23.177	20.786
33	38.683	26.092	24.442
34	42.164	29.440	28.774
35	46.124	33.296	33.291
36	50.586	37.753	40.053
37	55.630	42.920	47.383
38	61.352	48.933	56.174
39	67.867	55.957	66.756
40	75.313	64.195	79.541

$\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$; Breedte pijler = 8 m.

Pijler op bedding ($\phi = \pm 40^\circ$):

$$q_c = N_c \cdot c + N_q \cdot q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma = \sigma_0$$

$$q_c = N_c \cdot 0 + N_q \cdot 0 + \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 8 \cdot 80 = 3200 \text{ kPa}; 3.2 \text{ Mpa}$$

Pijler ingebed in 10 meter slappe grond ($\phi = \pm 35^\circ$):

$$q_c = N_c \cdot c + N_q \cdot q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma = \sigma_0$$

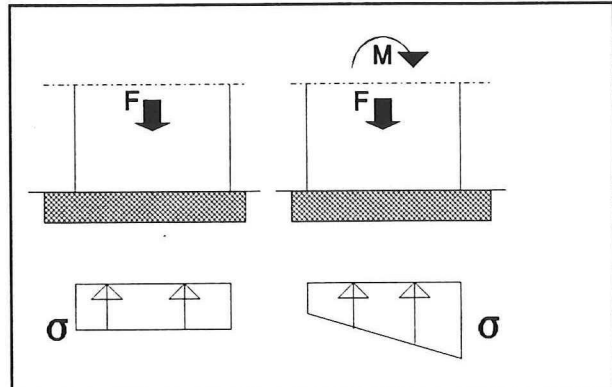
$$q_c = N_c \cdot 0 + 30 \cdot 100 + \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 8 \cdot 30 = 4200 \text{ kPa}; 4.6 \text{ Mpa}$$

De pijler heeft een breedte B (8 meter) en een lengte L (20 meter). De theorie van de strokenfundering is opgezet voor een oneindig lange strook ($L = \infty$). Als gevolg van de beperkte lengte, zou in principe een reductie- en een toeslagfactor meegenomen dienen te worden. Aangezien hierover internationaal geen overeenstemming is en de strekking van de gevolgde methode hierdoor niet verandert, is gekozen om deze factoren niet mee te nemen.

De sterkte σ_0 van de beddingsveren wordt negatief beïnvloed door een horizontale belasting. De belasting is niet meer centrisch.

Aanname:

Door excentriciteit wordt het effectieve oppervlak waarop de pijler rust gehalveerd, evenals het totale draagvermogen. De gemiddelde sterkte van de grond onder de pijler is dan ook gehalveerd. Reduceer daarom de sterkte σ_0 van de beddingsveren met 50%. $q_c = 1.5 \text{ Mpa}$.



Afb. 61: Excentrische belasting geeft reductie draagvermogen

Voor de zakking w_0 geldt dan :

$$w = \frac{\pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot D}{E} = \frac{\pi \cdot (1 - 0.25) \cdot 1.5 \cdot 7}{100} = 0.24 \text{ meter}$$

Dit levert een stijfheid k op van:

$$k = q_c / w = 1500 / 0.24 = 6250 \text{ kN/m}^3$$

De waarde die eerder gekozen was als beddingscontante (10 MN/m^3) is van dezelfde orde van grootte. Deze waarde van 10 MN/m^3 wordt dan ook aangehouden.

Horizontale wrijving

De maximale horizontale wrijving is in principe gekoppeld aan de verticale spanning. Deze is bij een centrische belasting over het gehele grondvlak gelijk. Bij een excentrische belasting geldt dit niet.

Aanname:

Ontkoppel de horizontale wrijving van de verticale spanning.

Stijfheid k :

Theoretisch (volgens Boussinesq) geldt dat de stijfheid ongeveer gelijk is aan de verticale stijfheid, 10000 kN/m^3 .

Sterkte σ_h :

Voor de sterkte σ_h (afb. 60) wordt de waarde bepaald volgens de theorie over slepende wrijving (hfst. 4). Hierbij is de kritische schuifspanning σ_h (afb. 60):

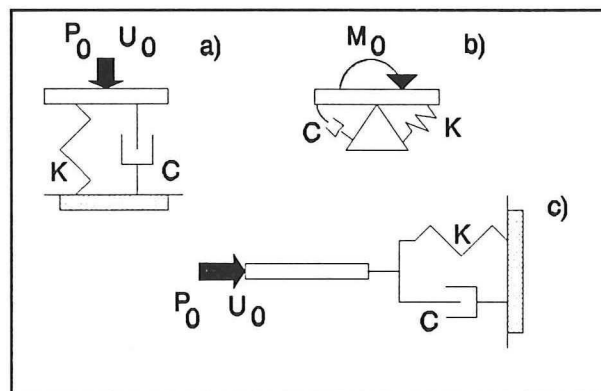
$$\sigma_h = c + \sigma'_v \cdot \tan \phi$$

Hierbij is:

- c = cohesie,
- σ'_v = normaalspanning op het grondvlak,
- ϕ = hoek van inwendige wrijving.

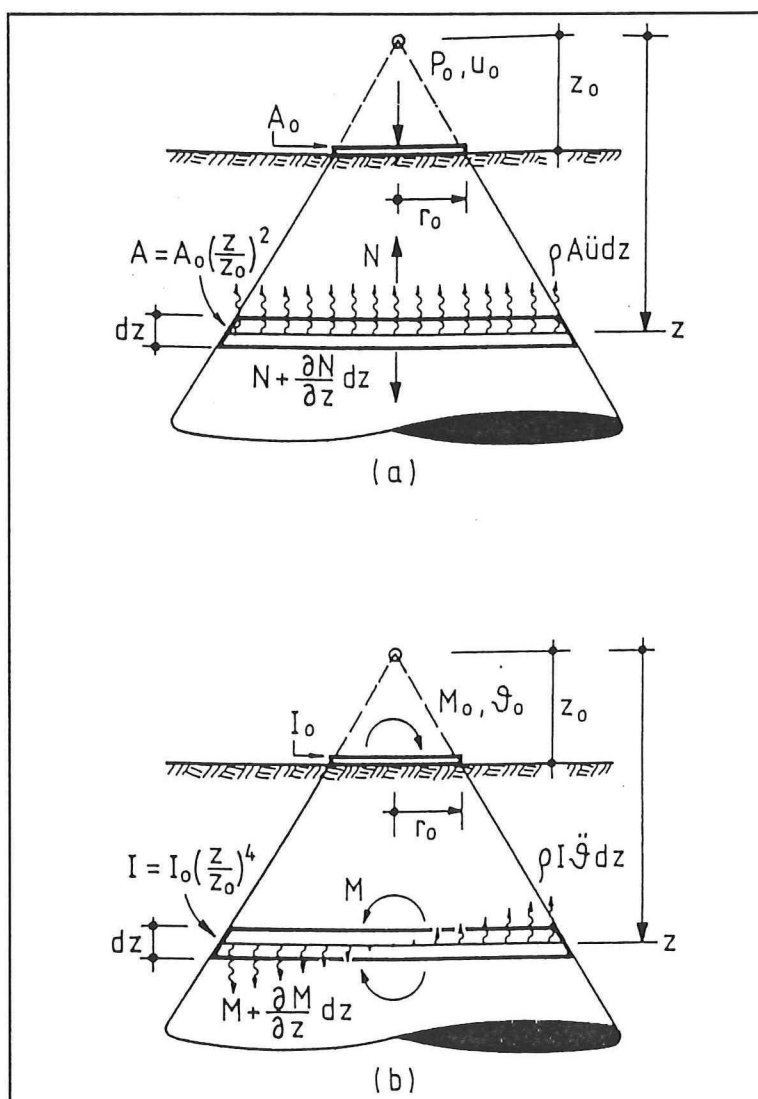
7.6.2.2. Bepaling kenmerken grond dynamisch

Hiervoor wordt het conusmodel (afb. 63) gebruikt.



Afb. 62: Discrete modellen

Conustype	Beweging	r_0	z_0/r_0	ν	c
<u>Translatie</u> $K = \rho c^2 A_0 / z_0$ $C = \rho c A_0$	Verticaal	$\sqrt{A_0 / \pi}$	$\pi / 4 (1 - \nu) \cdot (c / c_s)^2$	$\leq 1/3$	c_p
				$> 1/3$	$2c_s$
<u>Rotatie</u> $K = 3 \rho c^2 I_0 / z_0$ $C = \rho c I_0$	Rocking	$\sqrt[4]{4 I_0 / \pi}$	$9 \pi / 32 (1 - \nu) \cdot (c / c_s)^2$	$\leq 1/3$	c_p
	Torsie	$\sqrt[4]{4 I_0 / \pi}$	$9 \pi / 32$	alle	c_s



Afb. 63: Conusmodel

Voor de voortplantingssnelheid c_s wordt een redelijk lage waarde gekozen: 250 m/s (afb.48).

- soortelijk gewicht $\rho_{\text{grond}} = 2000 \text{ kg/m}^3$
- $A_0 = \text{grondoppervlak pijler} = \text{Lengte} \cdot \text{breedte} = 20 \cdot 8 = 160 \text{ m}^2$
- $r_{\text{translatie}} = \sqrt{(A_0/\pi)} = \sqrt{(160/\pi)} = 7.1 \text{ m.}$
- $r_{\text{rotatie}} = \sqrt[4]{(4 \cdot I_0/\pi)} = \sqrt[4]{(4 \cdot 5333/\pi)} = 9 \text{ m}$
met: $I_0 = 1/12 \cdot B \cdot L^3 = 5333 \text{ m}^4$
- $\nu = 0.5$

Bepaling van z_0 (afb. 63)

verticale translatie:

$$z_0/r_{\text{tr}} = \pi/4 \cdot (1-\nu) \cdot (c/c_s)^2 = 1.57 \rightarrow z = 1.57 \cdot r_{\text{tr}} = 11.2 \text{ m.}$$

horizontale translatie:

$$z_0/r_{\text{tr}} = \pi/8 \cdot (2-\nu) = 0.59 \rightarrow z = 0.59 \cdot r_{\text{tr}} = 4.2 \text{ m.}$$

rotatie:

$$z_0/r_{\text{ro}} = 9 \cdot \pi/32 \cdot (1-\nu) \cdot (c/c_s)^2 = 1.76 \rightarrow z = 1.76 \cdot r_{\text{ro}} = 15.9 \text{ m.}$$

Bepaling stijfheid

$$\text{verticaal: } K = \rho \cdot c^2/z = 500/11.2 = 45 \text{ MN/m}^3 \\ \rightarrow 50 \text{ MN/m}^3$$

$$\text{horizontaal: } K = \rho \cdot c^2/z = 500/4.2 = 120 \text{ MN/m}^3$$

$$\text{rotatie: } K = 3 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot I_0/z_0 = 5 \cdot 10^5 \text{ MNm/rad}$$

Bepaling demping

$$\text{translatie: } C = \rho \cdot c \cdot A_0 = 2000 \cdot 500 \cdot 160 = 1.6 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

$$\text{rotatie: } C = \rho \cdot c \cdot I_0 = 2000 \cdot 500 \cdot 5333 = 5.33 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$

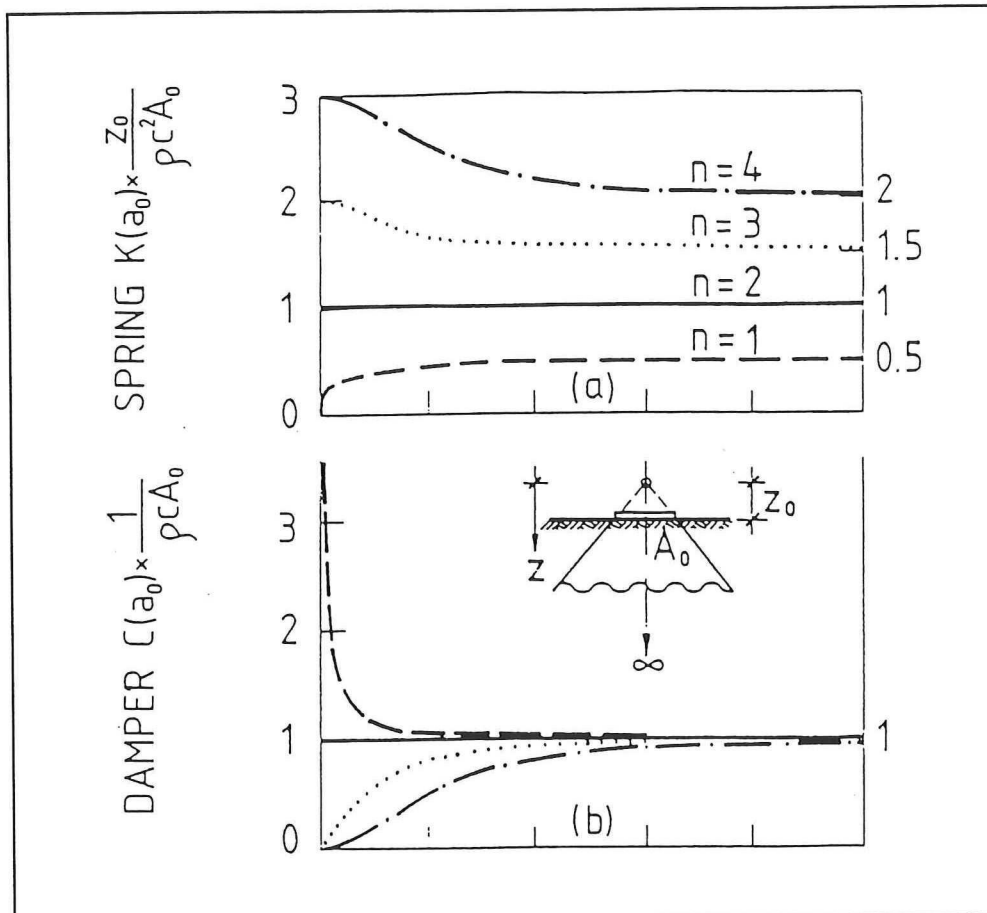
Werken in het frequentiedomein doet de stijfheid en de demping verminderen voor een roterende beweging ($n=4$) (afb. 64). Schat de dimensieloze parameter a_0 .

Gebruik ω uit de handberekening. $\omega = 27 \text{ rad/s}$

$$a_0 = 27 \cdot 15.9/500 = 0.85$$

Dit betekent een reductie met 60 %

$$\text{rotatie: } C = 0.4 \cdot 5.33 \cdot 10^9 = 2 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$



Afb. 64: Stijfheid en demping afhankelijk van de frequentie

7.6.3. Botsing leidt tot afschuiven

Er wordt gebruik gemaakt van de schematisering in afb. 49 en de gegevens uit § 7.5.2. De horizontale wrijvingsveer wordt echter aangepast. Deze krijgt een plastische tak (afb. 65).

$$\sigma_{\max} = F_{\text{neerwaarts;eff.}} \cdot \tan \phi$$

De gehele pijler staat onder water (afb. 49).

Het effectief neerwaartse gewicht is dan:

$$\text{Lengte} \cdot \text{Hoogte} \cdot \text{Breedte} \cdot (\rho_{\text{pijler}} - \rho_{\text{water}}) = 20 \cdot 20 \cdot 8 \cdot (20 - 10) = 3.2 \cdot 10^7 \text{ N.}$$

Voor de bovenbelasting wordt een even grote waarde aangenomen ($= 3.2 \cdot 10^7 \text{ N}$).

N.B. Voor het gewicht van de pijler wordt gekozen voor 20 kN/m^3 . Dit is een geschat gemiddelde over de gehele pijler (bestaande uit betonwanden, ruimten gevuld met zand, eventueel met vulbeton en loze ruimten).

De waarde voor de inwendige wrijving ϕ wordt vrij laag gekozen: $25 \leq \phi \leq 30^\circ$.

$$\sigma_{\max} = F_{\text{neerwaarts;eff.}} \cdot \tan \phi$$

$$\sigma_{\max} = 6.4 \cdot 10^7 \cdot \frac{1}{2} = 3.2 \cdot 10^7 \text{ N}$$

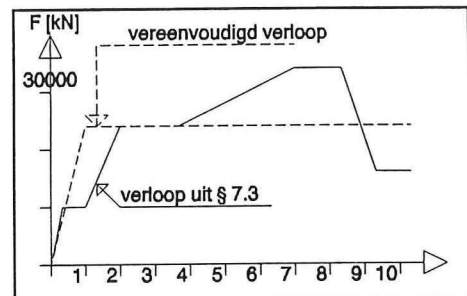
De stijfheid van de wrijvingsveer blijft: $1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$

Voor het schip die de pijler aanvaart wordt het duwkonvooi uit § 7.3 gebruikt (vaarsnelheid $4.72 \text{ m/s} = 16 \text{ km/uur}$). Het breken van de koppelingen tussen de bakken doet de massa verminderen van $22 \cdot 10^6 \text{ kg}$ naar $11 \cdot 10^6 \text{ kg}$.

Het kracht-ervormingsdiagram wordt enigszins vereenvoudigd. De stijfheid van de lineaire tak is $23 \cdot 10^6 \text{ N/m}$, de plastische tak ligt op $23 \cdot 10^6 \text{ N}$ (afb. 66).

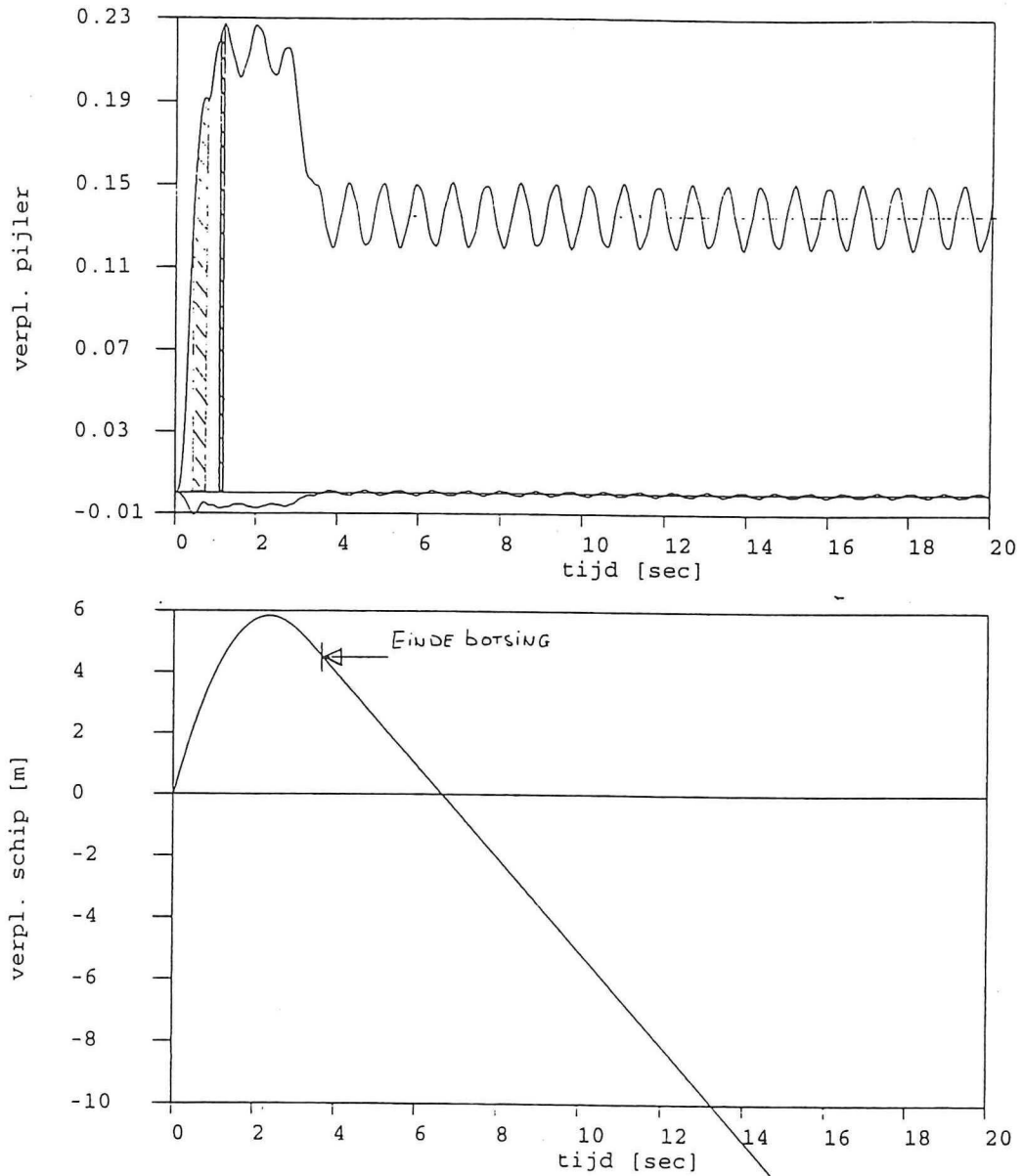
De resultaten van de berekening op basis van deze gegevens zijn:

- de pijler schuift 14 cm. af;
- de belasting vanuit het schip op de pijler bereikt de plastische waarde van $23 \cdot 10^6 \text{ N}$.
- de botsing duurt 3.7 seconden.
- de wrijvingsveer vloeit gedurende ongeveer 0.25 seconden.



Afb. 66: Aangenomen kracht-ervormingsdiagram van het schip

De botsing duurt 3.7 seconden.

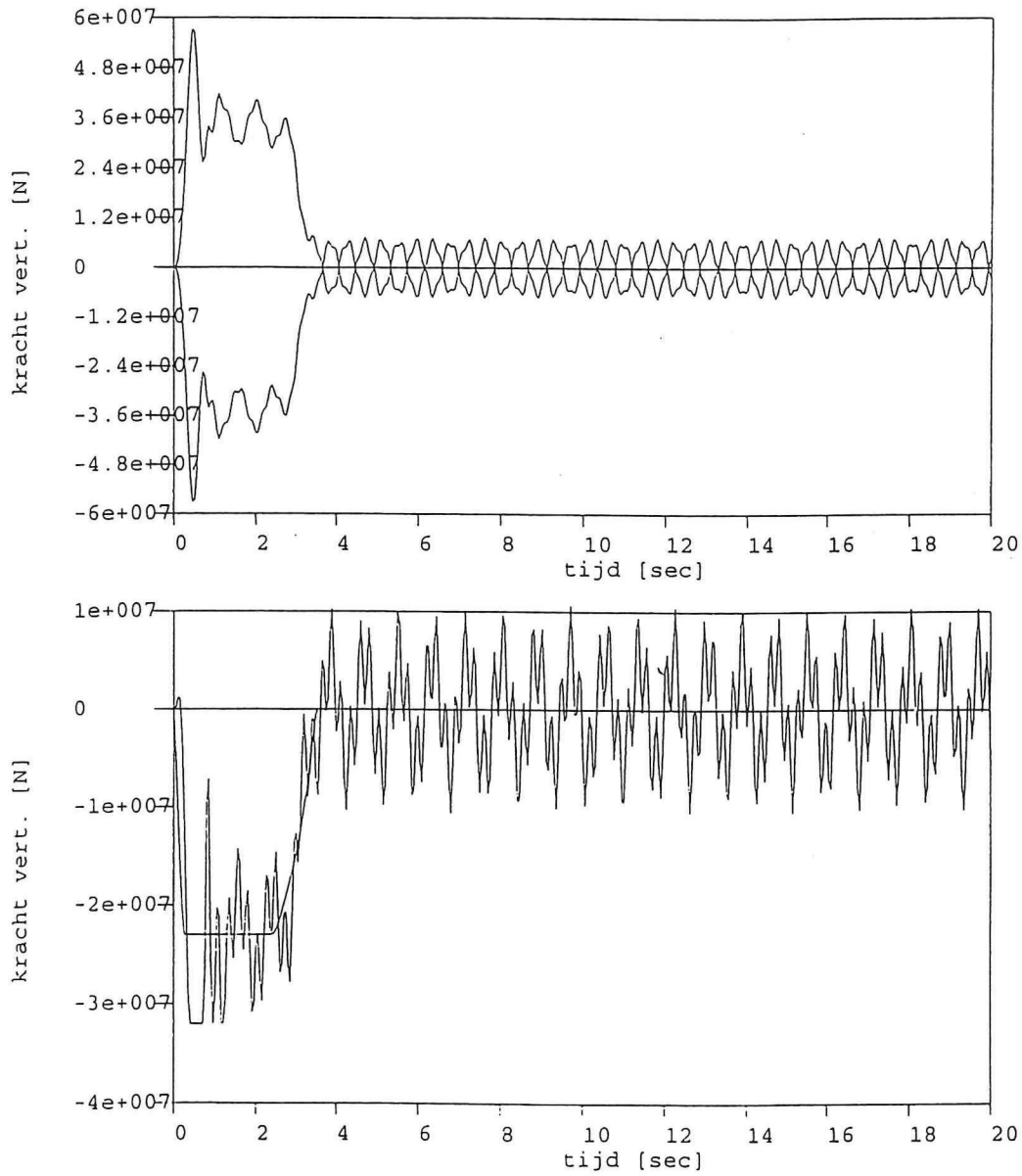


Verplaatsingen bij schematisering als in afb. 49 met gegevens uit § 7.6.3

De beddingsveren zijn in tegenfase.

De belasting vanuit het schip op de pijler is maximaal 23 MN.

De wrijvingsveer bereikt de plastische waarde van 32 MN.



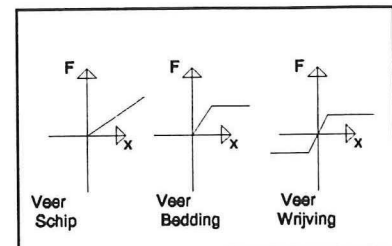
Krachten bij schematisering als in afb. 49 met gegevens uit § 7.6.3

7.6.4. Invloed bovenbelasting

De bovenbelasting spant de grond voor. Dit is een goede eigenschap. De grond kan geen trek opnemen. Het voorspannen brengt de grond onder druk dit heeft tot gevolg dat de grond 'trek' op kan nemen door de druk te verminderen. Daartegenover geeft een bovenbelasting een tweede-orde effect. Door een aanvaring zal er gedurende de botsing een scheefstand optreden. Dit heeft tot gevolg dat de bovenbelasting niet meer centrisch aangrijpt en er een scheefstand zal optreden.

Aanname: Neem wel de voorspanning van de grond door de bovenbelasting mee, maar niet het tweede-orde effect.

De veereigenschappen worden aangenomen zoals ze hiernaast zijn weergegeven (afb. 67). De beddingsveer kan geen trek op nemen. Deze veer wordt wel voorgespannen door het eigen gewicht van de pijler en de bovenbelasting.



Afb. 67: Aangenomen veereigenschappen

Wederom wordt voor het blok gekozen, met de volgende afmetingen: lengte = 20 m; hoogte = 20 m; breedte = 8 m. De schematisering is zoals in afb. 49 afgebeeld. De beddingsveren worden echter geschematiseerd zoals in afb. 68 dat wil zeggen ze worden verdeeld over de hele lengte van de pijler. De eigenschappen van de grondveren zijn op basis van statische overwegingen bepaald.

Eigenschappen schip:

Duwkonvooi
(Massa: $11 \cdot 10^6$ kg)
Stijfheid = $2.3 \cdot 10^7$ N/m
Sterkte = $2.3 \cdot 10^7$ N

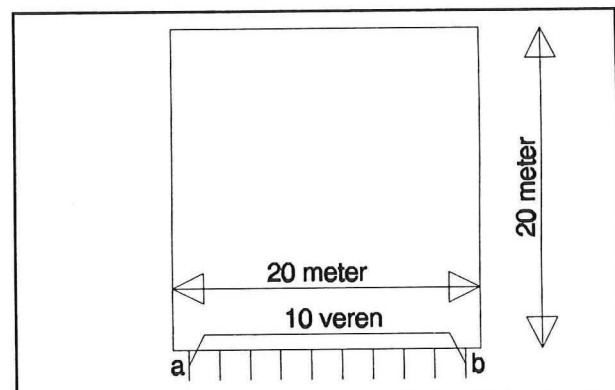
Eigenschappen beddingsveer:

Stijfheid = $1 \cdot 10^7$ N/m³
Sterkte = 1.5 Mpa
(zie § 7.6.2.1)

Eigenschappen wrijvingsveer:

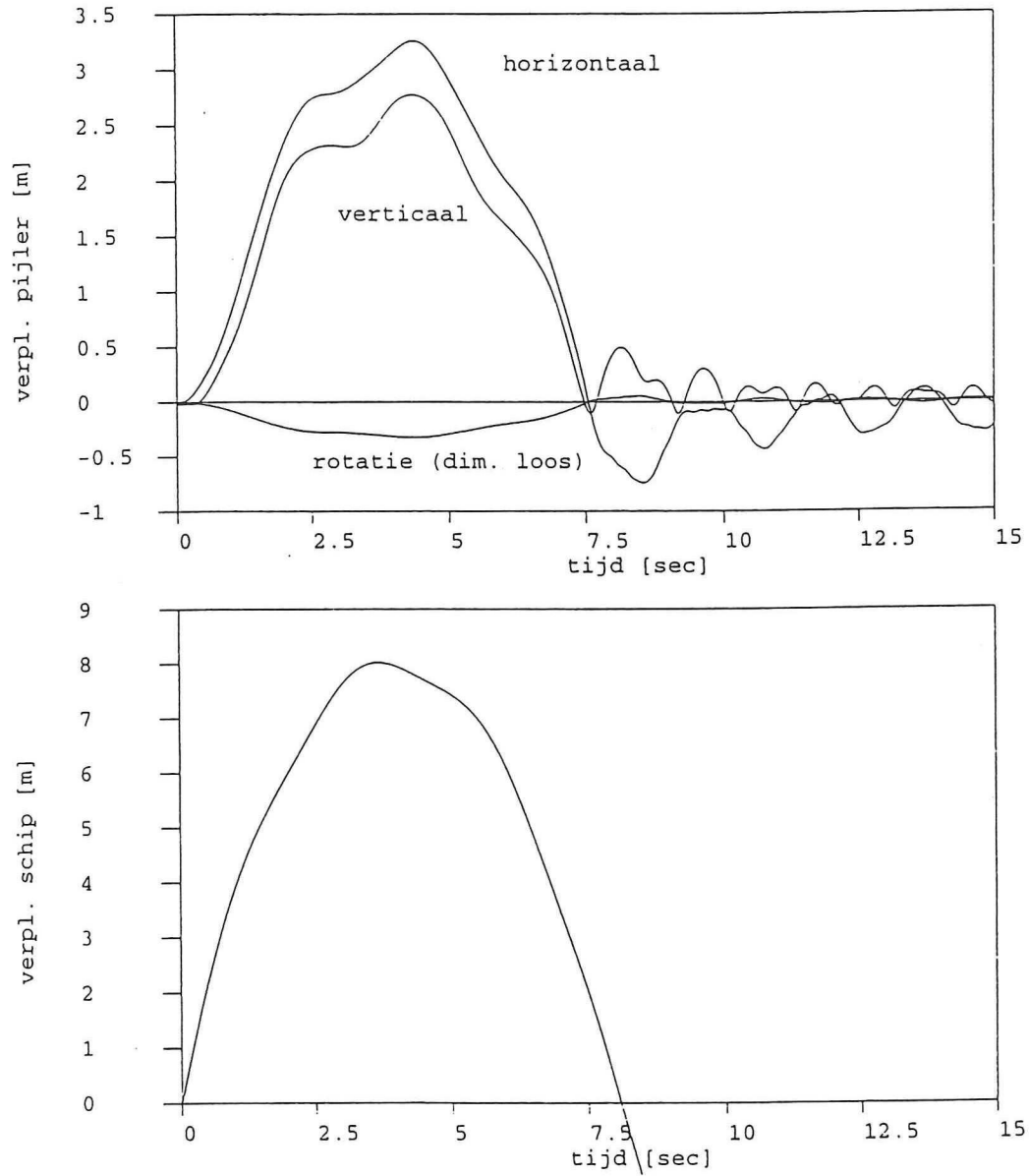
Stijfheid = $1 \cdot 10^7$ N/m³
Sterkte = $3.2 \cdot 10^7$ N (zie § 7.6.3)

Initiële snelheid duwkonvooi: 4.72 m/s = 16 km/uur



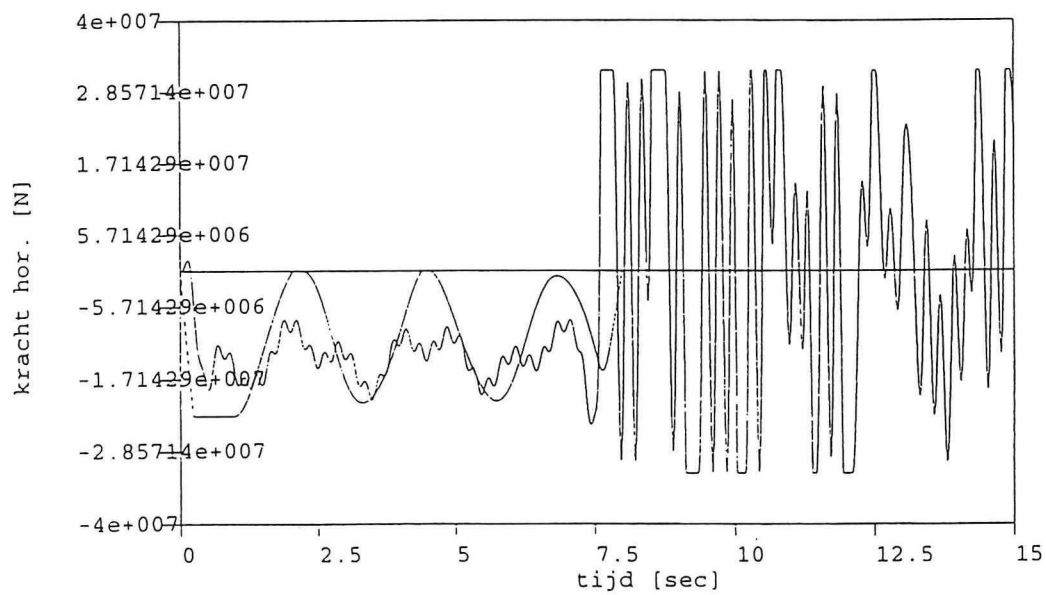
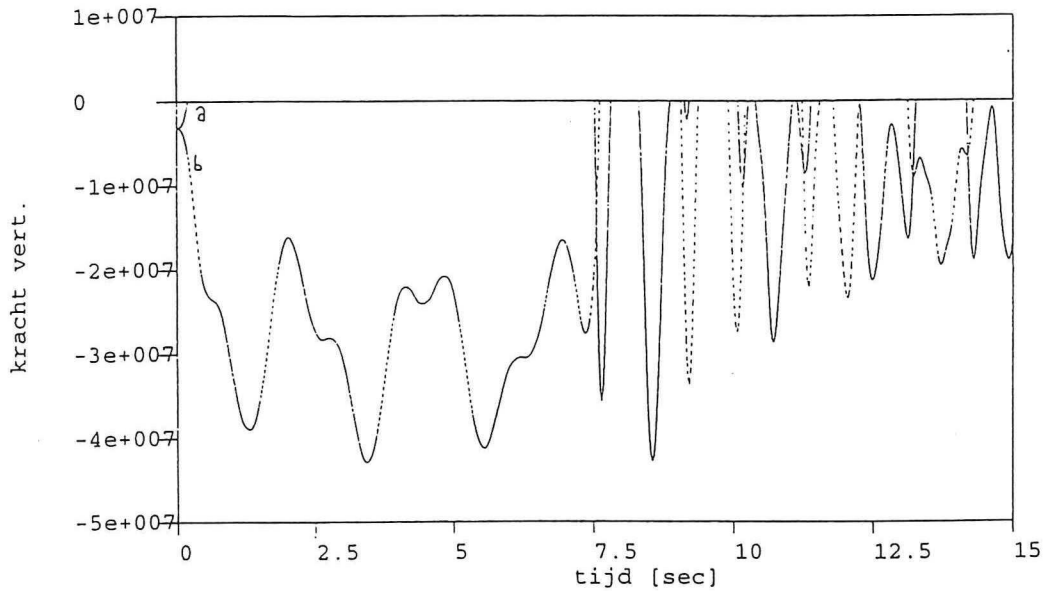
Afb. 68: Veren worden verdeeld over de pijler

Schip: deformatie elastisch
vert. grondveren: elasto-plastisch hor. veer: elastisch



Verplaatsingen bij schematisering als in afb. 68 met gegevens uit § 7.6.4

Let op: Veer a (afb.68) laat reeds zeer snel los. Dit betekent dat ter plaatse van deze veer de pijler geen contact meer heeft met de grond.



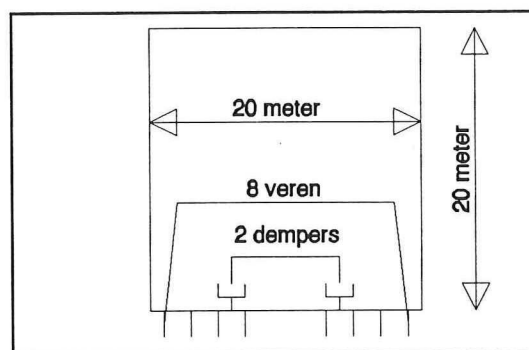
Krachten bij schematisering als in afb. 68 met gegevens uit § 7.6.4

Tot nu toe is gerekend met statische grondeigenschappen. Vanaf hier zal gerekend worden met de dynamische grondeigenschappen. Tevens worden meerdere beddingsveren gebruikt die verdeeld worden over de lengte van de pijler. Om zowel aan de veerstijfheid voor rotatie (§ 7.6.2.2) als aan de verticale stijfheid (§ 7.6.2.2) te voldoen is gekozen voor 8 veren, waarbij de buitenste veren een dubbele stijfheid hebben

Uit § 7.6.2.2 is voortgekomen dat de dynamische verticale stijfheid 50 MN/m^3 is. Dit is 5 keer zo groot als de statische verticale stijfheid (§ 7.6.2.1).

De dynamische stijfheid van de horizontale wrijvingsveer was op basis van statische overwegingen 10 MN/m^3 (§ 7.6.2.1). De dynamische stijfheid heeft een 12 keer zo grote waarde 120 MN/m^3 (§ 7.6.2.2).

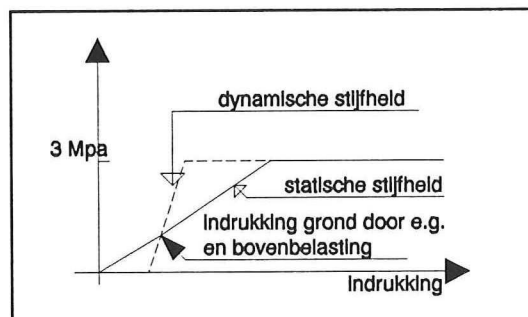
Om zowel aan de roterende demping als aan de verticale demping te voldoen is gekozen voor 2 dempers met een onderlinge afstand van 8 meter (afb. 69).



Afb. 69: Schematisatie met veren en dempers

Bij het voorbelasten van de grond door het eigen gewicht van de pijler en de bovenbelasting is uitgegaan van de statische stijfheid van de grond. Wanneer het schip tegen de pijler botst reageert de grond dynamisch.

De sterkte van de beddingsveren voor een verticale belasting is 3 Mpa (§ 7.6.2.1). Voor de dynamische sterkte is gekozen voor dezelfde waarde. Hierbij is uitgegaan van de veronderstelling dat de dynamische sterkte van de grond groter is dan de statische sterkte. Deze statische sterkte bij een horizontale belasting wordt geschat op 1.5 Mpa (§ 7.6.2.1). Voor de dynamische sterkte wordt een schatting gemaakt. De sterkte wordt geschat op 3 Mpa, zodat de sterkte van de beddingsveren bij het verticaal voorbelasten even groot is als de dynamische sterkte bij een horizontale belasting (afb. 70).



Afb. 70: Uit een statisch evenwicht, een dynamische belasting aanbrenge

Voor de massa van zowel het schip als de pijler wordt rekening gehouden met de hydrodynamische massa. De pijler heeft ook nog een hydrodynamische rotatietraagheid. Hierbij wordt de massa van zowel het schip als de pijler en de traagheid van de pijler vermeerderd.

Eigenschappen schip en pijler:

pijler:

- ρ = 2000 kg/m³,
- volume = 20·20·8 = 3200 m³,
- massa = 6.4·10⁶ kg,
- traagheid = 1/12·massa·(20²+20²)= 4.26·10⁸ kg·m².

schip:

- massa = 11·10⁶ kg.

Hydrodynamische eigenschappen:

pijler:

- $M_{hydr.}$ = 1.51· π · ρ_{water} · a^2 = 474000 kg/m (a=10 m. § 7.2)
= 8·474000=3.795·10⁶ kg,
- $I_{hydr.}$ = 0.234· π · ρ · a^4 =7.3·10⁶ kg·m²/m
= 5.88·10⁷ kg·m².

schip:

- $M_{hydr.}$ = 10 % (massa_{droog}) = 1.1·10⁶ kg.

Totaal

pijler:

- massa = 1.0·10⁷ kg,
- traagheid = 4.85·10⁸ kg·m².

schip:

- massa = 12.1·10⁶ kg.

Pijler: l·b·h = 20·8·20 m³

de snelheid van het schip is 4.72 m/s (duwkonvooi)

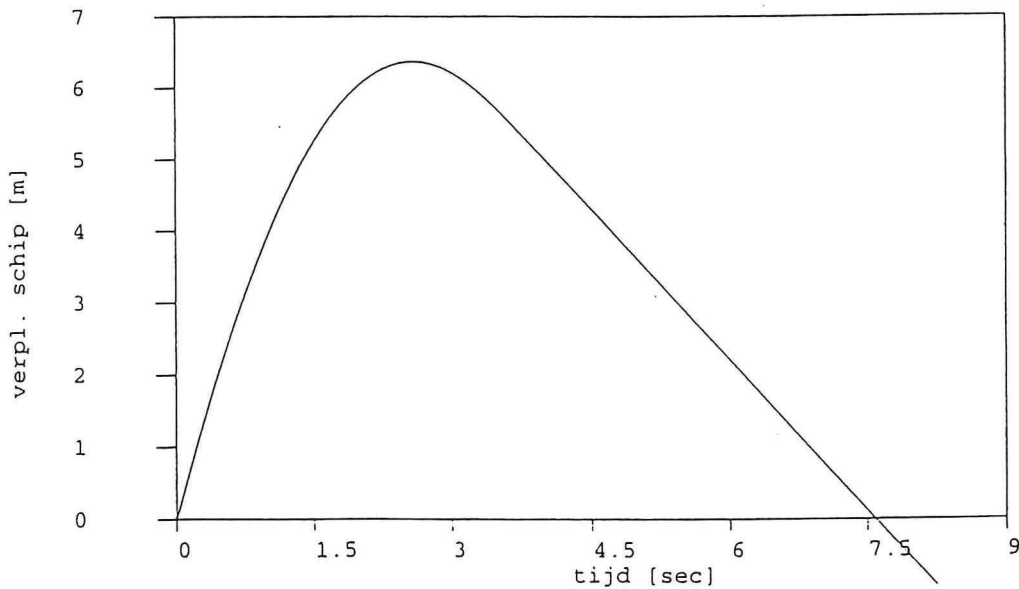
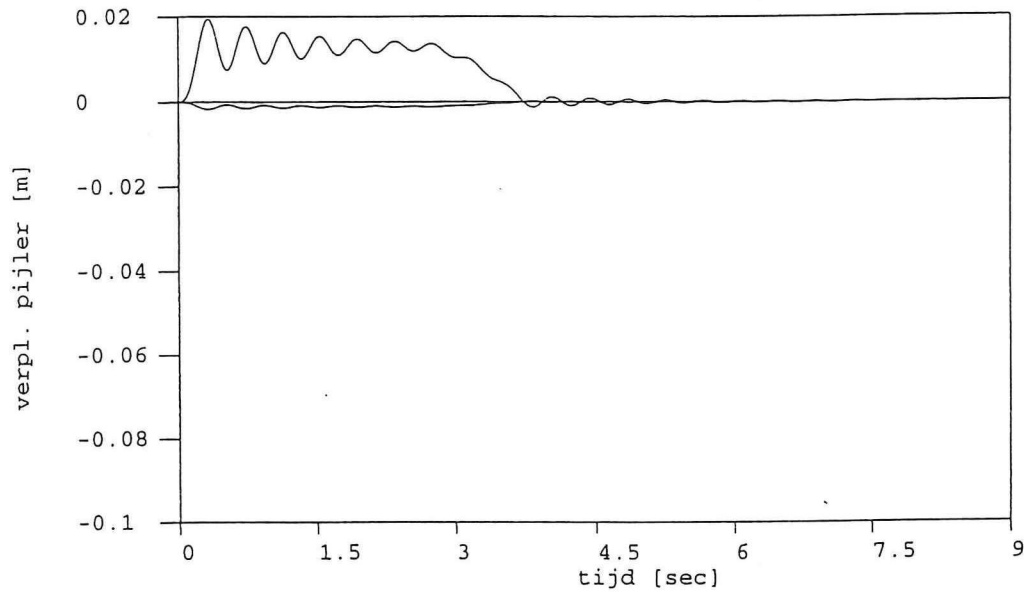
de verplaatsing van het schip is 6.3 meter

de horizontale verplaatsing van het massacentrum van de pijler is 2 cm.

verplaatsing pijler t.p.v. de opleggingen=

= 2 cm. + $1.8 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 3.8$ cm.

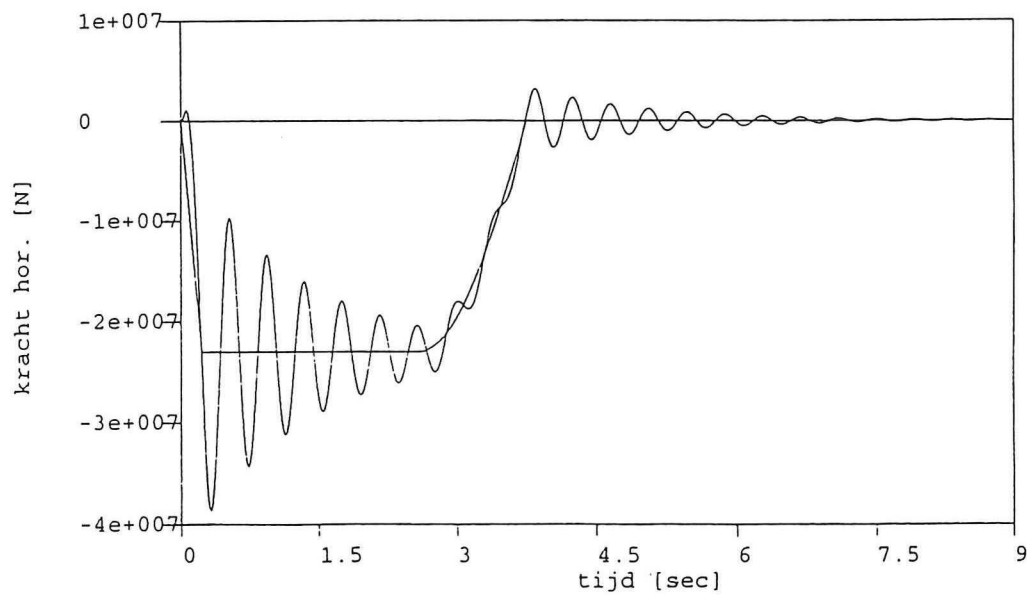
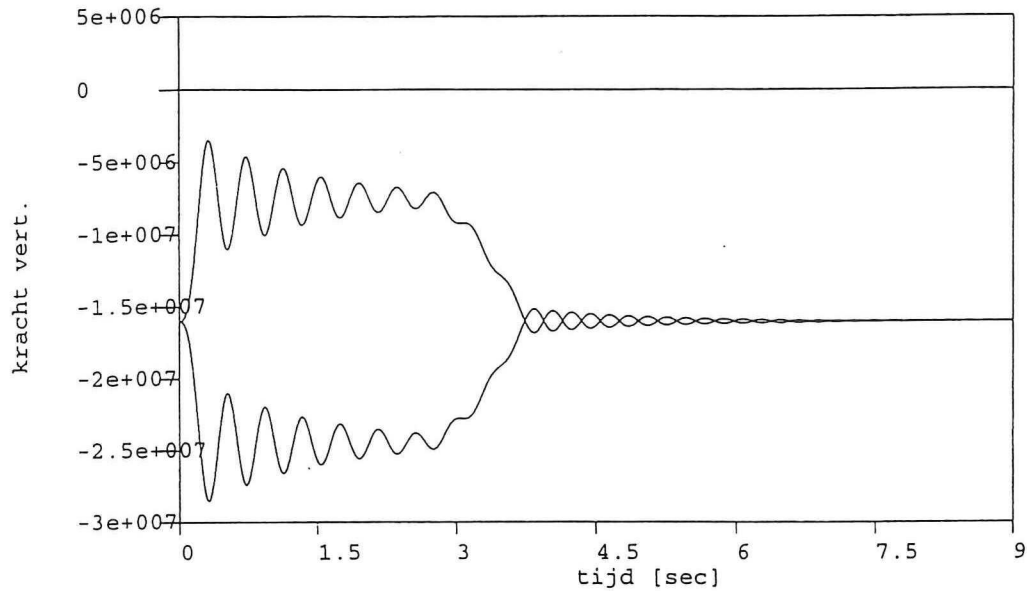
Schip: deformatie elasto-pl
vert. grondveren: elasto-plastisch hor. veer: elasto-pl



Verplaatsingen bij schematisering als in afb. 69 met gegevens uit § 7.6.4 (bovenbelasting: $12.8 \cdot 10^7$ N)

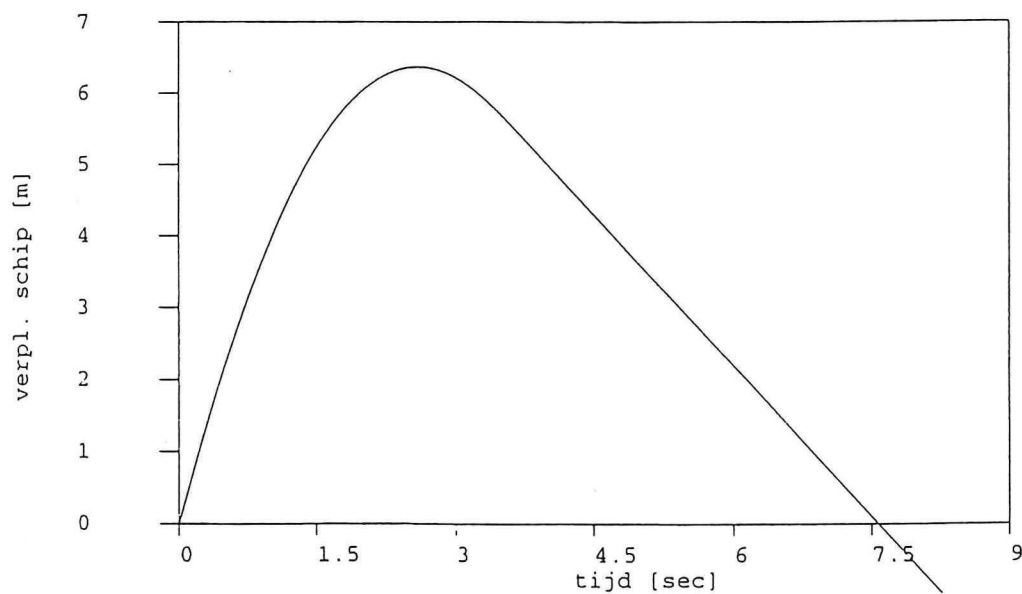
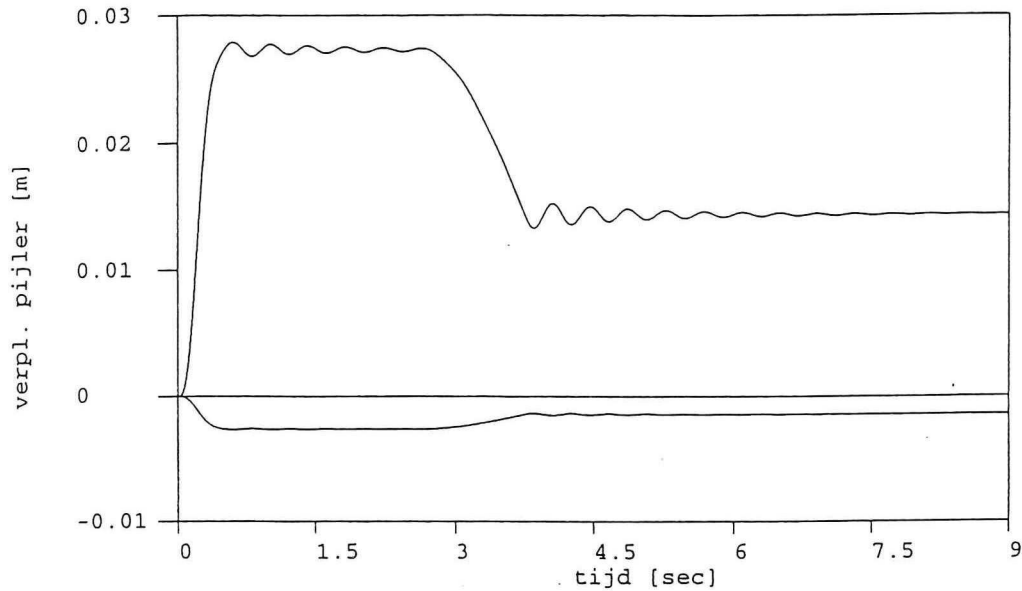
de verplaatsing van het massacentrum van de pijler is 2 cm. (horizontaal)
de botsingsduur is 3.7 seconden.
de maximale belasting vanuit het schip op de constructie is 23 MN.

Schip: deformatie elastisch
vert. grondveren: elasto-plastisch hor. veer: elastisch



Krachten bij schematisering als in afb. 69 met gegevens uit § 7.6.4 (bovenbelasting: $12.8 \cdot 10^7$ N)

De maximale horizontale verplaatsing van het massacentrum van de pijler is 2.8 cm.
De maximale verplaatsing van het schip is 6.35 meter.
De botsing duurt 3.7 seconden.
De blijvende horizontale verplaatsing van het massacentrum van de pijler is 1.4 cm.
De blijvende rotatie van het massacentrum van de pijler is $1.3 \cdot 10^3$ rad.

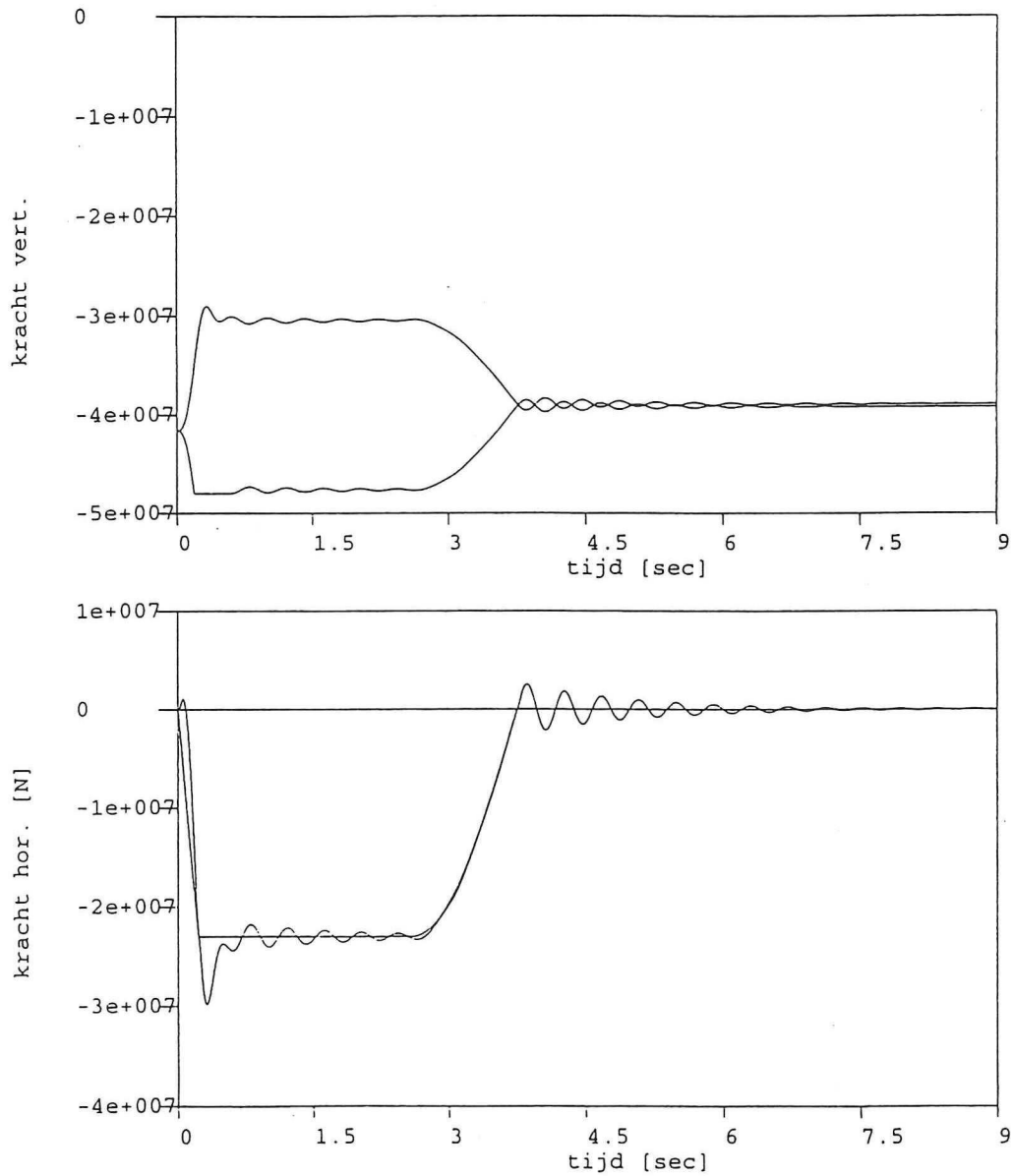


Verplaatsingen bij schematisering als in afb. 69 met gegevens uit § 7.6.4 (bovenbelasting: $38.4 \cdot 10^7$ N)

De botsing duurt 3.7 seconden.

De maximale belasting van het schip op de pijler is 23 MN.

Schip: deformatie elastisch
vert. grondveren: elasto-plastisch hor. veer: elastisch

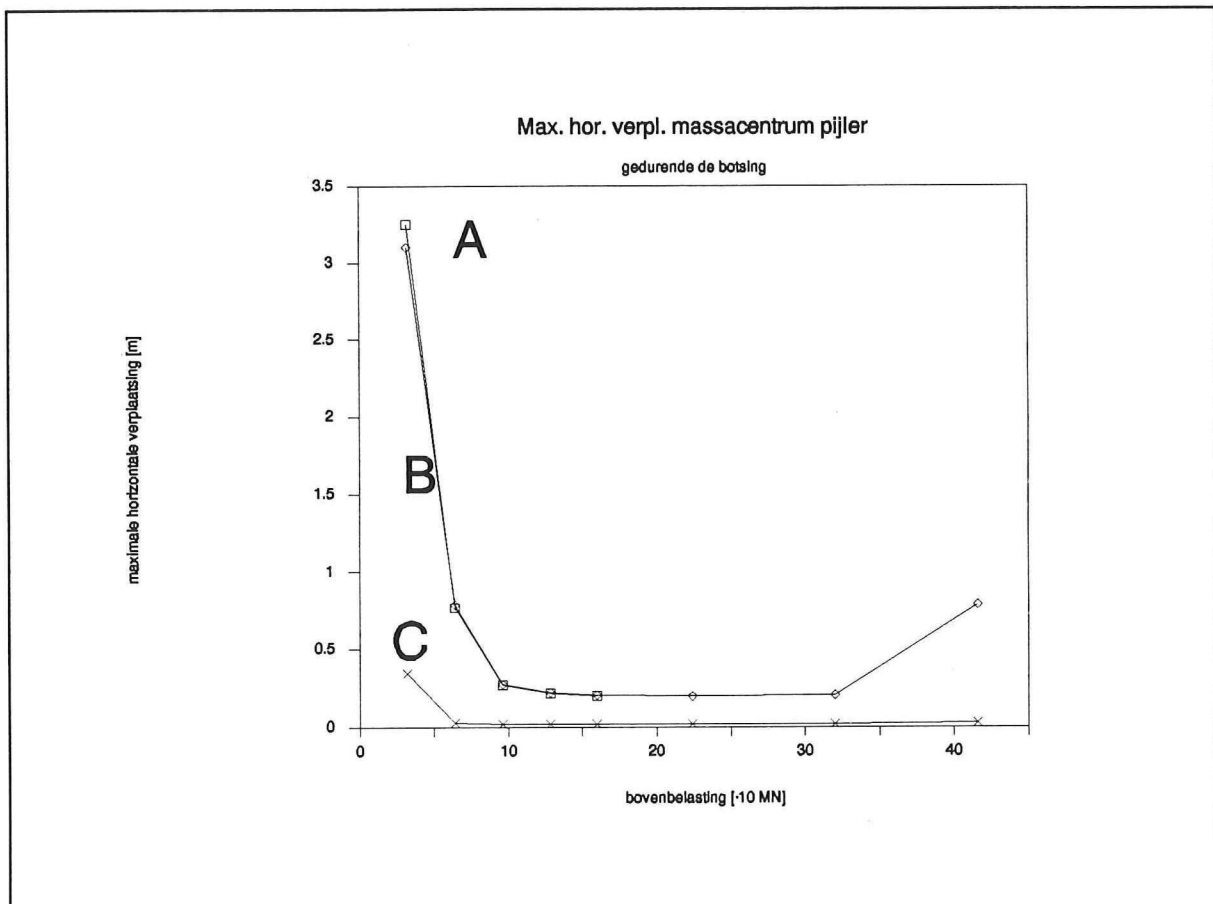


Krachten bij schematisering als in afb. 69 met gegevens uit § 7.6.4 (bovenbelasting: $38.4 \cdot 10^7$ N)

De maximale horizontale verplaatsing bij een aanvaring door het duwkonvooi als functie van de totale belasting (bovenbelasting en eigen gewicht) van de pijler wordt weergegeven in onderstaande afbeelding. Dit wordt gedaan voor drie gevallen:

- A Bij zowel het schip als de pijler wordt rekening gehouden met de hydrodynamische aspecten. De stijfheid van de grond volgt uit een statische overweging.
- B Bij zowel het schip als de pijler wordt geen rekening gehouden met de hydrodynamische aspecten. De stijfheid van de grond volgt uit een statische overweging.
- C Bij zowel het schip als de pijler wordt rekening gehouden met de hydrodynamische aspecten. De stijfheid van de grond volgt uit een dynamische overweging.

Voor elk geval wordt de sterkte van de bedding gesteld op 3 MPa. Dit betekent dat ook de statische sterkte deze waarde heeft. Dit heeft als reden dat zo de invloed van de dynamische stijfheid danwel statische stijfheid van de bedding goed beoordeeld kan worden.



Afb. 71: Maximale horizontale verplaatsing van het massacentrum van de pijler bij een botsing van een duwkonvooi tegen de pijler

Er zijn drie gebieden in de grafiek van afbeelding 71 te onderscheiden:

1. bovenbelasting ≤ 10 MN. Een gedeelte van de voetplaat van de pijler komt los van de ondergrond;
2. $10 \text{ MN} \leq \text{bovenbelasting} \leq 32 \text{ MN}$. De verplaatsingen bij een aanvaring zijn constant;
3. bovenbelasting ≥ 32 MN. De sterkte van de bedding bepaalt de maximale horizontale verplaatsing.

Voor het ontwerp van een pijler kan met deze gegevens rekening worden gehouden door de lengte en de breedte van de pijler die afmetingen te geven zodat bij een gegeven bovenbelasting de pijler in gebied 2 valt.

7.7. Conclusie

Het dynamisch berekenen van een aanvaring van een schip tegen een pijler is mogelijk. De verplaatsing van de pijler bij dynamische grondeigenschappen is aanzienlijk kleiner dan bij statische grondeigenschappen. De belangrijkste parameters zijn deze grondeigenschappen. De kennis van de voortplantingssnelheden van golven in de bodem is daarom zeer belangrijk.

De hydrodynamische effecten hebben geen grote invloed. Dit wordt duidelijk uit afbeelding 71 waar geval A en geval B niet veel van elkaar verschillen.

Met behulp van het conusmodel kan ook een pijler gemodelleerd worden die een verdiepte ligging heeft t.o.v. de bodem (afb. 28). Dit geeft wellicht een reëler beeld van de werkelijkheid. Wanneer gerekend wordt met het model van een blok op een vlakke bedding met dynamische grondeigenschappen zijn de verplaatsingen zeer klein. Afhankelijk van het soort vervoer over de brug kan de verplaatsing van de pijler wel of niet aanvaardbaar zijn. Bij een spoorbrug betekent een verplaatsing van enkele centimeters dat het treinverkeer geen doorgang kan vinden, terwijl voor het wegvervoer enkele centimeters niet nadelig hoeven te zijn.

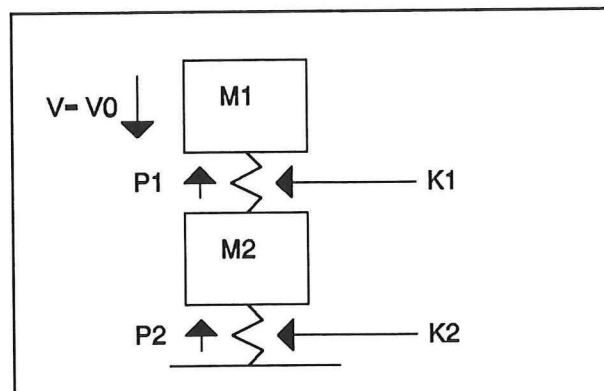
Het afschuiven van de pijler is bekeken met slechts één wrijvingsveer. Dit is een sterke vereenvoudiging. Om meer inzicht in het afschuiven te verkrijgen zal dit moeten geschieden met een andere modellering.

8. Schematisering van een onderdeel van de pijler

In dit hoofdstuk zal een eerste aanzet worden gegeven om de pijler te construeren op een aanvaring. Bij de schematisatie van het aangevaren onderdeel wordt er vanuit gegaan dat dit onderdeel een wand is.

8.1. Schematisering en voorstel berekeningsmethode

De aanvaring van het schip tegen de wand wordt geschematiseerd tot een twee massa-verensysteem (afb. 72).



Afb. 72: Schematisering botsing schip <--> wand

In de schematisering zitten de volgende parameters:

- K_1 : stijfheid van het schip,
- K_2 : stijfheid van de wand,
- M_1 : meewerkend deel massa schip,
- M_2 : meewerkend deel massa wand,
- V_0 : snelheid van het schip.

De stijfheid van het schip kan uit het kracht-ervormingsdiagram van het schip gehaald worden.

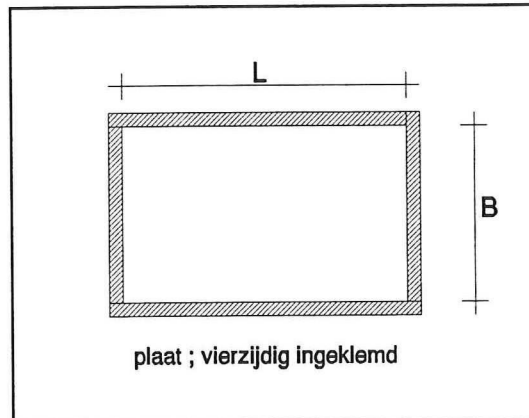
De stijfheid van de wand is te bepalen uit een statica-som.

Voor de stijfheid kan zowel een onder- als bovengrens gegeven worden.

- Bovengrens: de belasting wordt gelijkmatig over de wand verdeeld.
- Ondergrens: de belasting wordt geconcentreerd tot een puntlast.

De meewerkende massa van de wand wordt bepaald door de laagste eigenfrequentie van het continue systeem (de wand) gelijk te stellen aan de eigenfrequentie van het discrete systeem (Massa M_2 en stijfheid K_2).

Wanneer aangenomen wordt dat de aangevaren wand omgeven is door meerdere plaatvelden kan de wand geschematiseerd worden tot een vierzijdig ingeklemde plaat (afb. 73).



Afb. 73: Vierzijdig ingeklemde plaat

Voor een aan vier zijden ingeklemde plaat gelden de volgende eigenfrequenties.

$$f_{ij} = \frac{\lambda^2_{ij}}{2\pi L^2} \cdot \left(\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)} \right)^{1/2}$$

Hierbij is:

- E = Elasticiteitsmodulus beton = 30000 N/mm²,
- h = dikte van de wand,
- ρ = massadichtheid,
- L = lengte,
- ν = dwarscontractiecoëfficiënt,
- λ² = factor (zie afb. 74).

λ^2_{ij} en (ij)						
rangorde						
L/B	1	2	3	4	5	6
0,4	23,65 (11)	27,82 (12)	35,45 (13)	46,70 (14)	61,55 (15)	63,10 (21)
2/3	27,01 (11)	41,72 (12)	66,14 (21)	66,55 (13)	79,85 (22)	100,9 (14)
1,0	35,99 (11)	73,41 (21)	73,41 (12)	108,3 (22)	131,6 (31)	132,2 (13)
1,5	60,77 (11)	93,86 (21)	148,8 (12)	149,74 (31)	179,74 (22)	226,9 (41)
2,5	147,80 (11)	173,9 (21)	221,5 (31)	291,9 (41)	384,7 (51)	394,4 (12)

Afb. 74: Waarden voor λ^2 .

De eigenfrequentie van een discreet systeem is $\omega = \sqrt{(K_2/M_2)}$. Door de twee functies voor de eigenfrequentie aan elkaar gelijk te stellen is de enige onbekende M_2 op te lossen. Voor de massa van het schip dient een meewerkende massa genomen te worden. Deze massa is een functie van het oppervlak van de wand en het oppervlak van de kreukelzone van de boeg van het schip.

Voorstel:

$A_{\text{kreukelzone}} < A_{\text{plaat}}$ dan dient voor de meewerkende massa M_1 de massa van het schip genomen te worden.

$A_{\text{kreukelzone}} > A_{\text{plaat}}$ dan dient voor de meewerkende massa M_1 de massa $A_{\text{pl}}/A_{\text{kr}} \cdot M_{\text{schip}}$ genomen te worden.

Als de 5 parameters (M_1, M_2, K_1, K_2, V_0) bekend zijn is alles gereed voor het 2 massa verensysteem.

Het resultaat van de berekening geeft 2 kracht-tijdrelaties:

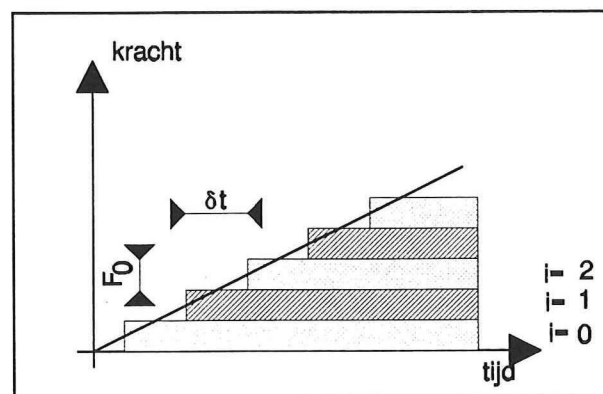
- P_1 als functie van de tijd (afb. 72),
- P_2 als functie van de tijd (afb. 72).

P_1 geeft de kracht tussen het schip en de pijler weer. Deze kracht dient gebruikt te worden voor de berekening van de wand op dwarskracht/pons.

P_2 geeft de kracht in veer 2 weer. Deze kracht dient gebruikt te worden voor berekening van de wand op buiging.

Noot:

P_1 is een functie van de tijd, voor berekening van de wand op dwarskracht/pons dient deze omgezet te worden naar een statisch equivalente kracht. Dit is te doen door de P_1 functie in stapfuncties op te bouwen zoals in afbeelding 75.



Afb. 75: Opbouwen kracht-tijd-diagram met stapfuncties

Voor de stapfunctie geldt dan:

$$u_0(t) = F_0/k \cdot (1 - \cos \omega_0 t)$$

$$u_1(t) = F_0/k \cdot (1 - \cos \omega_0 (t - \delta t))$$

Zoek nu bij onderstaande functie naar het maximum.

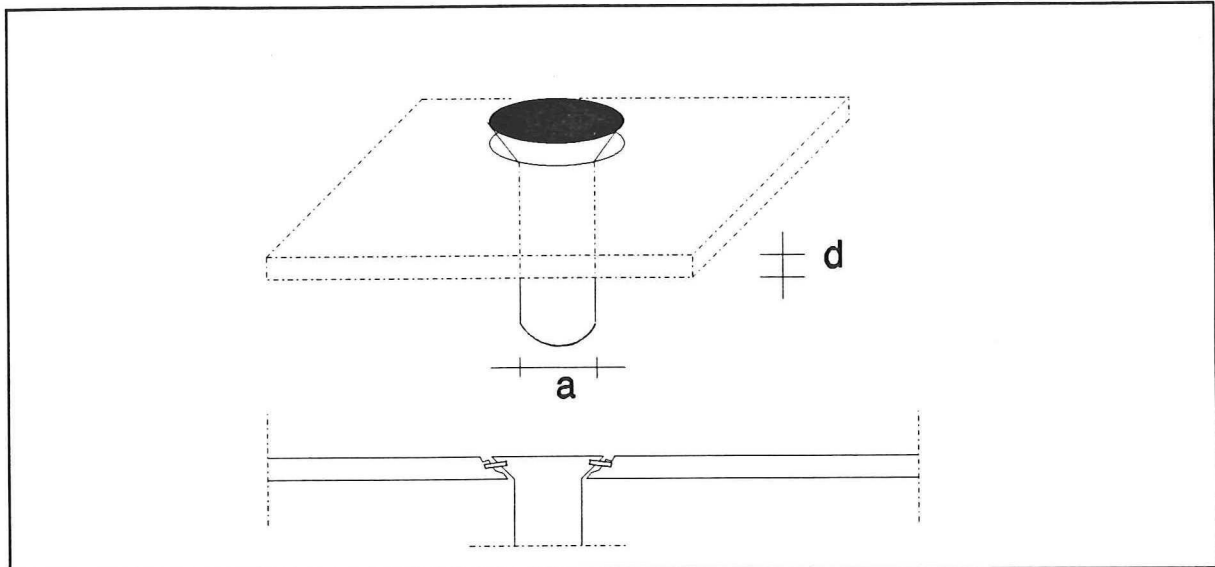
$$u = \sum_{i=0}^n \frac{F_0}{k_2} \cdot [1 - \cos \omega \cdot (t - i \cdot \delta t)]$$

$$u_{\max} = F_0/k_2 \cdot (\text{factor})$$

Deel de term getoeterd als factor door het aantal stapfuncties. Dit levert de vermenigvuldigingsfactor α op voor de functie P_1 . Deze vermenigvuldigingsfactor α heeft altijd een waarde tussen 1 en 2. De wand wordt nu berekend op een ponskracht $\alpha \cdot P_{1,\max}$. Voor de sterkte van de materialen kan de korte duursterkte gebruikt worden.

8.2. Pons

Voor de berekening van de wand op pons (door de aanvaring) wordt gebruik gemaakt van de theorie over pons met betrekking tot een door kolommen ondersteunde vlakke plaatvloer (afb. 76)



Afb. 76: Ondersteuning vlakke plaatvloer door een kolom leidt tot pons

De invloedsfactoren bij pons zijn:

- betonkwaliteit,
- plaatdikte,
- grootte van het inleidingsvlak,
- plaatwapening.

Het ponsmechanisme is zeer complex. De TGB geeft echter een sterk vereenvoudigde controle. Deze werkt als volgt:

1) Definieer een omtrekcirkel $u = \pi(a+2 \cdot 0.5d)$

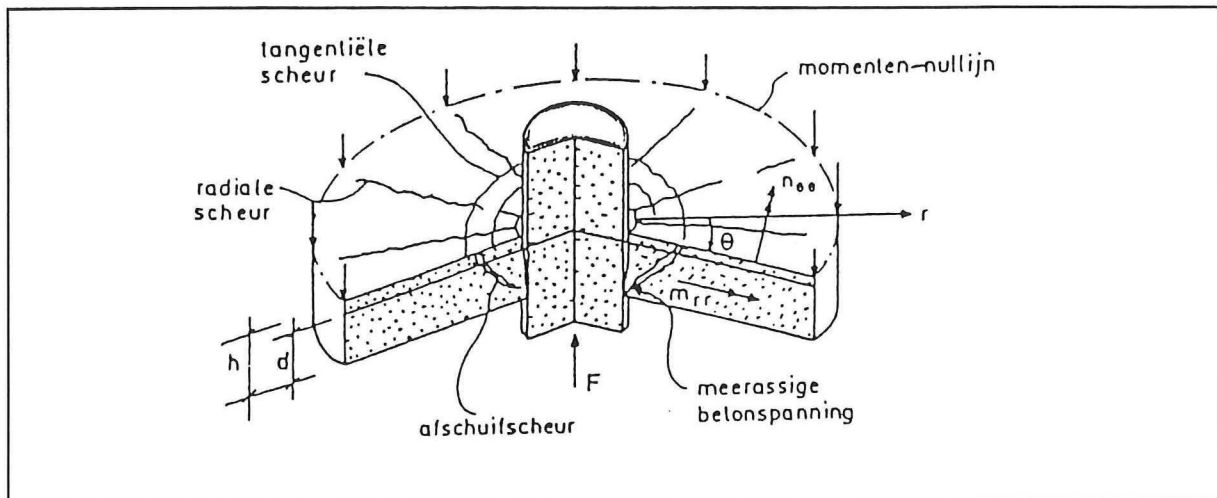
- Hierbij is:
- d : plaatdikte
 - a : kolomdiameter

Dit is de omtrek van een cirkel in het midden van de plaat bij een spreiding van de kracht onder een hoek van 45° .

Bij een aanvaring gaat het erom een representatieve a (=kolomdiameter) te vinden. Deze verandert gedurende de aanvaring. De op te nemen ponskracht verandert eveneens.

2) Eis: $\tau_d = V_d / u \cdot d < \tau_1$

$$\text{Met: } \tau_1 = 0.8 \cdot f_{ctd} \cdot k_d \cdot \sqrt{\omega_0} \geq 0.8 f_{ctd}$$



Afb. 77: Ontstaan van scheuren leidt tot pons

Hierbij is:

- $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c$,
- $k_d = 1.5 - 0.6d > 1$ (d in meters),
- $\omega_0 = \sqrt{[\omega_{ix} \cdot \omega_{iy}]} < 2$.

	B25	B35	B45
f_{ctd} [N/mm ²]	1.64	2	2.36 ($\gamma_c = 1.4$)

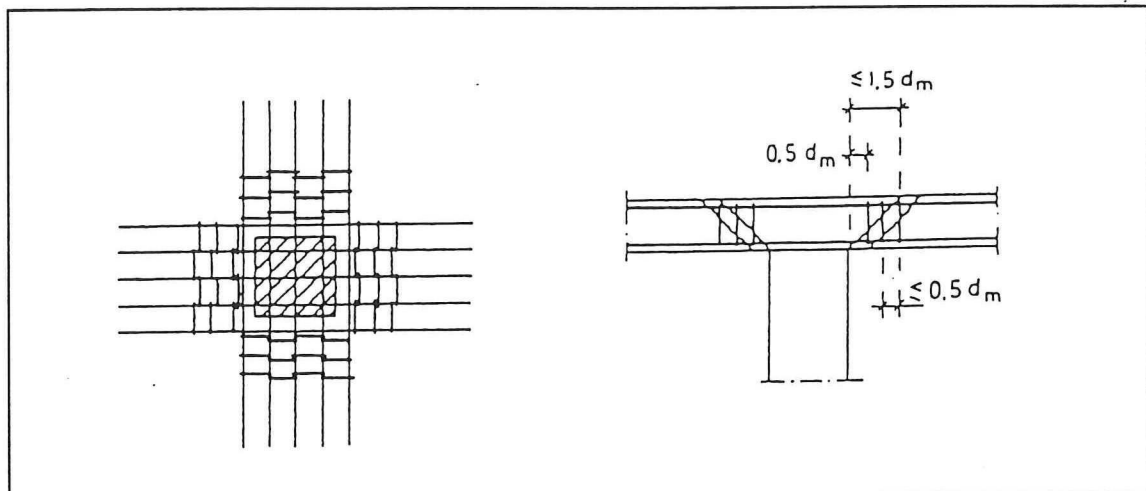
Dat de aanvaringskrachten zeer groot zijn wordt duidelijk met een zeer vereenvoudigde berekening van de wand op pons. In hoofdstuk 4 is bij een scheve aanvaring tegen een oneindig stijve constructie een belasting voortgekomen van 19 MN. Bij een schatting van de representatieve kolomdiameter op 3 meter een waarde van α van 1.5 dient de wand (beton: B35) ongeveer 1.5 meter dik te zijn.

8.3 Vergroten ponscapaciteit

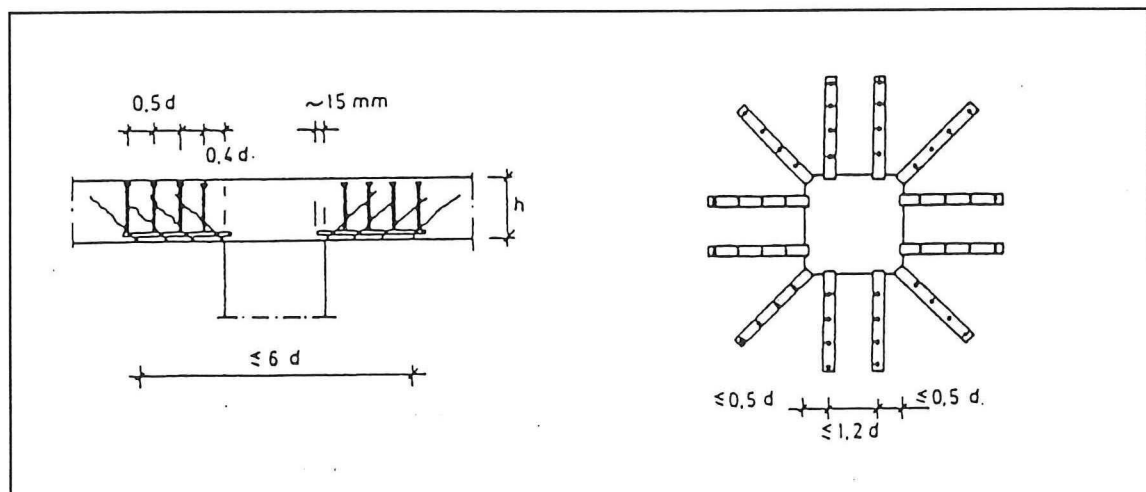
Oplossingen voor vergroten ponscapaciteit:

- vergroting van de plaatdikte;
- verhoging van de betonkwaliteit;
- vergroting van het wapeningspercentage.

Hierbij kan gedacht worden aan extra langswapening in de wanden, maar ook aan het aanbrengen van ponswapening. Deze dient ervoor om de ponskegel vast te houden aan de omringende wapening. Hierbij kan gedacht worden aan beugels (afb. 78) en aan deugelstrippen (afb. 79).



Afb. 78: Vergroten ponscapaciteit met beugels



Afb. 79: Vergroten ponscapaciteit met deugelstrippen

Het vergroten van de ponscapaciteit door het toevoegen van wapening is aan een maximum gebonden. Op een gegeven moment is de drukspanning in het beton maatgevend voor het bezwijken. De TGB stelt als bovengrens $\tau_d \leq 0.15f_{cd}$ met een maximum van 5 N/mm^2 .

Wanneer gekozen wordt om de wand de aanvaringskracht zelf op te laten nemen zijn de oplossingen die voor een aanvaring het beste voldoen:

- vergroting van de plaatdikte;
- verhoging van de betonkwaliteit;
- zwaardere langswapening.

De reden dat ponswapening niet voldoet, is dat de aanvaring overal op de wand kan voorkomen in tegenstelling tot de door kolommen ondersteunde vlakke plaatvloer waarbij de plaats van de kolom en daarmee de ponskegel eenduidig is gespecificeerd (afb. 76).

Het is mogelijk de wand (en daarmee de pijler) tegen een aanvaring te beschermen. Hierbij valt te denken aan:

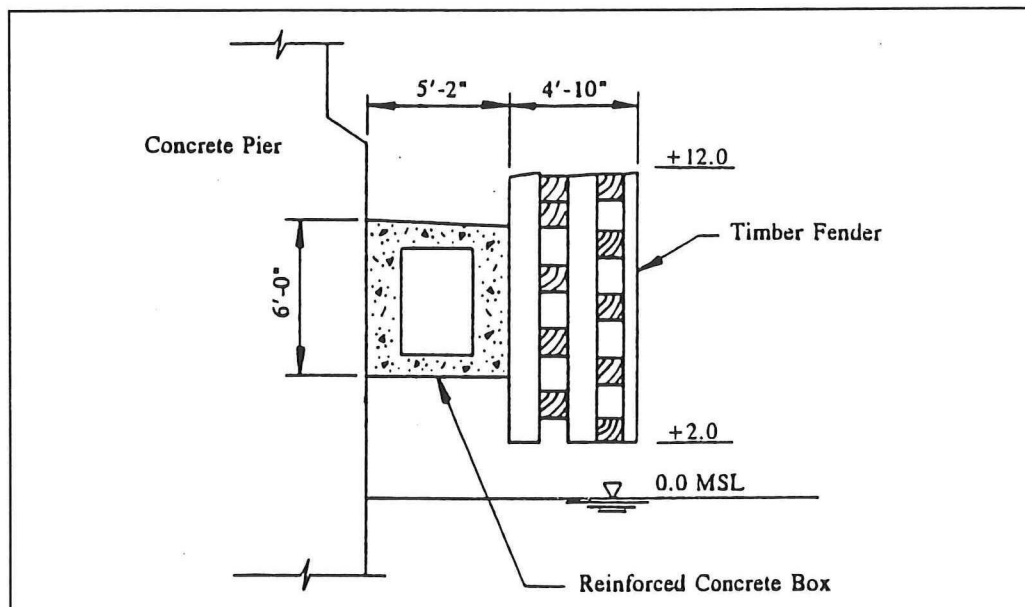
- 1) Een aanvaring tegen de pijler onmogelijk maken.
- 2) De gevolgen van een aanvaring verkleinen.

Ad 1. Enkele voorbeelden zijn:

- dukdalf,
- verhoogde bodemligging rond de pijler. Het schip loopt aan de grond voordat de botsing tegen de pijler plaats heeft kunnen vinden.

Ad 2. B.v een fender. Dit kan gemaakt zijn van rubber, maar ook van beton (afb. 80).

Het fender neemt een deel van de aanvaringsenergie op. Het schip hoeft minder te vervormen. Dit levert afhankelijk van het kracht-vervormingsdiagram van het schip een lagere aanvaringskracht op.



Afb. 80: Betonnen fender (Francis Scott Key Bridge , Baltimore, USA)

9. Beïnvloeding van de aanvaring

Door verandering van relevante parameters is het mogelijk de aanvaring te beïnvloeden. Deze parameters zijn gekoppeld aan de twee facetten vermeld in de inleiding:

1. aanvaringskans,
2. aanvaringsbelasting.

9.1. Aanvaringskans

Hierbij wordt het aanvaringsrisicomodel gebruikt (hfst. 1).

$$F = \sum N_i \cdot P_{c,i} \cdot \sum P_{G,i,k} \cdot P_{F,i,k}$$

Door variatie van de parameters van bovenstaand model kan de aanvaringskans beïnvloed worden.

N: reductie --> F: reductie.

Dit is geen goede oplossing, omdat het aantal schepen een randvoorwaarde is en niet afhankelijk dient te zijn van het ontwerp van een brug.

$P_{c,i}$: reductie --> F: reductie

Door verminderen van de oorzakelijke kans wordt F gereduceerd. De reductie van de oorzakelijke kans kan verkregen worden door:

- goede betonning,
- aanbrengen van lichten op de brug,
- etc.

$\sum P_{G,i,k}$: reductie --> F: reductie

De geometrische kans op een aanvaring kan verminderd worden door zo min mogelijk pijlers in de waterweg te plaatsen.

9.2. Aanvaringsbelasting

Relevante parameters:

- $E_{kin.}$: kinetische energie schip,
- α : aanvaringshoek,
- kracht-vervormingsdiagram schip,
- lengte van de waterbouwkundige constructie,
- vorm van de waterbouwkundige constructie.

Door één parameter te variëren en de andere parameters constant te houden is de invloed van deze ene parameter weer te geven.

- $E_{kin.}$: *kinetische energie schip*

Het schip heeft een hoeveelheid kinetische energie $E_{kin.} = 1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Afhankelijk van de hoek van aanvaring en de wrijving langs de wand, dient $\eta \cdot E_{kin.}$ opgenomen te worden door kreuken van het schip (hfst. 4). Hoe kleiner $E_{kin.}$ des te minder energie dient door de scheepswand opgenomen te worden. Bij een elastisch kracht-vervormingsdiagram van het schip is de invloed van $E_{kin.}$ groter op de maximale aanvaringskracht dan bij een plastisch kracht-vervormingsdiagram.

Elastische kracht-vervormingsdiagram:

$$F_{max} = \sqrt{2 \cdot k \cdot E}$$

Hierbij zijn:

- k: stijfheid kracht-vervormingsdiagram;
- E: de hoeveelheid op te nemen energie.

Een reductie van E tot 25% (halvering snelheid) geeft een reductie van de maximale aanvaarkracht met 50%

Plastisch kracht-vervormingsdiagram:

$$F_{max} = \text{constant voor elke E}$$

- α : *aanvaringshoek*

Reductie van de aanvaringshoek α geeft een reductie van de op te nemen energie tot $\eta \cdot E_{kin.}$. Hier geldt wederom de invloed van de hoeveelheid kinetische energie zoals vermeld bij het vorige punt. De aanvaringshoek kan echter niet ontkoppeld worden van het kracht-vervormingsdiagram.

Bij een scheve aanvaring neemt E (hfst. 4) af, maar k is niet constant voor verschillende aanvaringshoeken α .

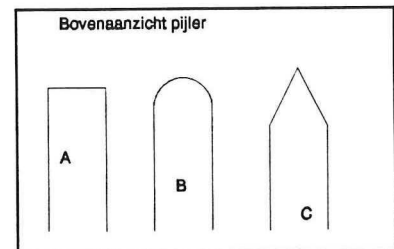
- *kracht-ervormingsdiagram schip*

Het kracht-ervormingsdiagram is de belangrijkste parameter. Dit diagram is sterk afhankelijk van het aan te varen object. (zie het kracht-ervormingsdiagram van een duwbak in afb. 38 in § 7.3) Als de afmetingen van de aangevaren constructie kleiner zijn, dringt de constructie makkelijker in het schip door.

De vorm van de constructie is zeer belangrijk. De constructie-vorm 'A' van afb. 81 dringt bij een frontale aanvaring moeilijker in een schip door dan de vormen 'B' en 'C'. Dit levert bij 'A' hogere aanvaringskrachten dan bij de vormen 'B' en 'C'. De invloed van de stijfheid op de maximale aanvaringskracht wordt duidelijk gemaakt met een elastisch kracht-ervormingsdiagram van het schip:

$$F_{\max} = \sqrt{(2 \cdot k \cdot E)}$$

Reductie van de stijfheid met 50% geeft een reductie van de maximale aanvaringskracht met 30%.



Afb. 81 : Verschillende vormen pijler

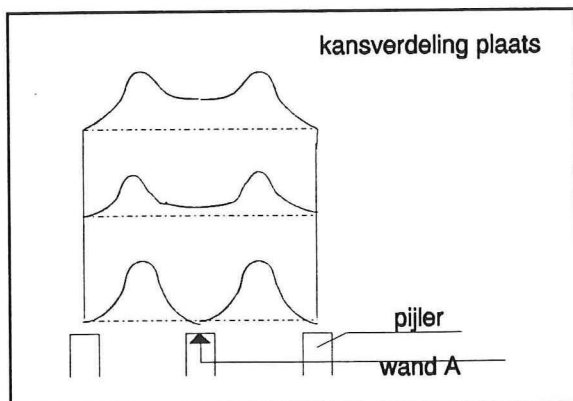
- *lengte aan te varen constructie*

De botsingsduur wordt mede bepaald door de lengte van de wand waarlangs het schip plaatsvindt. Door deze lengte korter te maken kan de botsingsduur beperkt worden en daarmee ook de belasting uit deze botsing. Constructie-vorm 'B' in afb. 81 maakt hiervan gebruik d.m.v. de afgeronde pijlerkop.

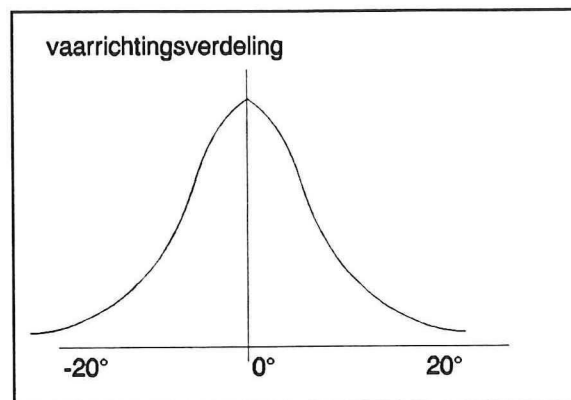
- *vorm constructie*

De vorm van de constructie bepaalt naast het kracht-ervormingsdiagram van het schip ook de aanvaringshoek.

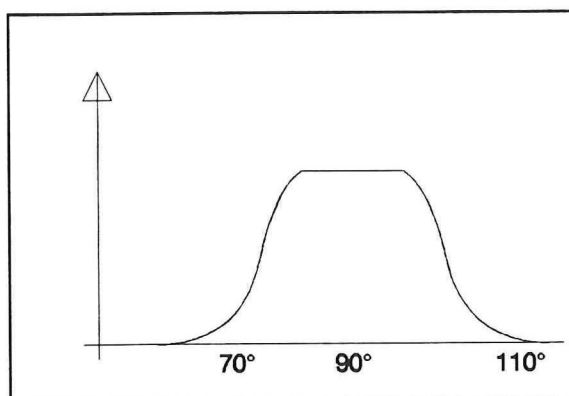
Trekkingen uit een plaatsverdeling (afb. 82) en een vaarrichtingsverdeling (afb. 83) geeft de verdeling van de aanvaringshoek van wand A (afb. 84).



Afb. 82: Plaats kansverdeling

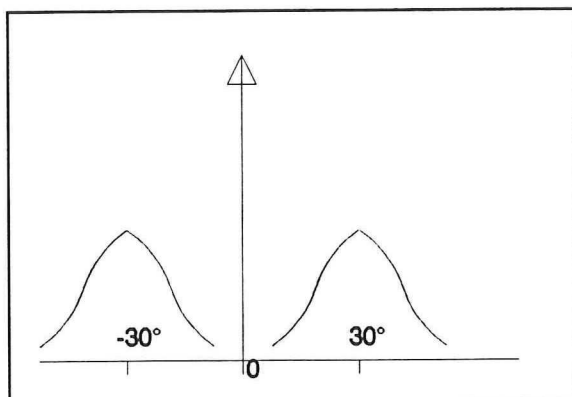


Afb. 83: Richtings-kansverdeling

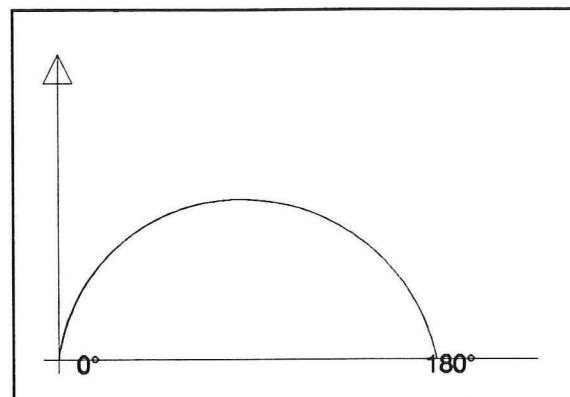


Afb. 84: Aanvaringshoek-verdeling

Voor de constructievormen 'B' en 'C' zijn de verdelingen van de aanvaringshoek dan ongeveer zoals in afb. 85 en 86.



Afb. 85: Aanvaringshoekverdeling voor constructie-vorm 'C'



Afb. 86: Aanvaringshoekverdeling voor constructie vorm 'B'

De vorm van de constructie heeft een grote invloed op de aanvaringshoek en hierdoor op de hoeveelheid energie die door het schip opgenomen dient te worden.

10. Conclusies en aanbeveling

Conclusie

In hoofdstuk 3 is de doelstelling geformuleerd om de aanvaring dynamisch te beschrijven. Dit is in de daarop volgende hoofdstukken gebeurd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de gekozen pijler zeer stijf reageert.

De verplaatsingen zijn klein (enkele centimeters) en zijn van dezelfde orde van grootte als de verplaatsingen die berekend zijn voor de pijlers van de Erasmusbrug in Rotterdam bij een statische last.

Erasmusbrug (literatuurstudie § 10.2)

Pijler 2: 5.3 centimeter.

Pijler 5: 5.2 centimeter.

Pijler uit dit verslag: 3.8 centimeter (blz. 83).

De pijlers 2 en 5 van de Erasmusbrug hebben vergelijkbare breedte- en hoogteafmetingen met de de pijler in dit verslag. De lengte van pijler 5 is echter groter en bedraagt 51 meter. Voor de schepen die tegen de pijler botsen zijn dezelfde schepen gekozen als bij het ontwerp van de Erasmusbrug.

Ondanks het feit dat de grond boven het funderingsniveau niet is meegenomen in de berekening en de kortere lengte van de pijler, levert de dynamische berekening een waarde voor de verplaatsing op die van dezelfde grootte is als bij de Erasmusbrug. Wanneer de berekening uitgevoerd wordt met de afmetingen van de pijlers van de Erasmusbrug en de grond rond de pijler niet verwaarloosd wordt, is de verwachting dat de verplaatsing nog kleiner dan 3.8 cm. wordt.

Aanbeveling

Voor de constructeur moet er een handleiding komen die hem de nodige informatie verschaft om de waterbouwkundige constructie op een aanvaring te berekenen.

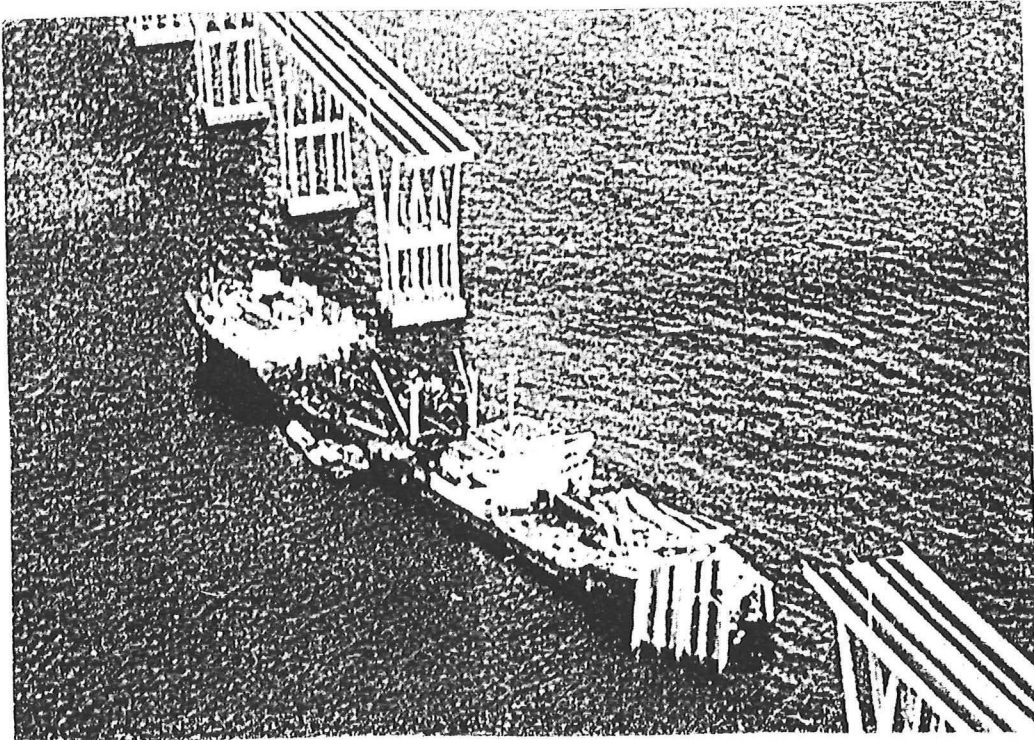
Deze handleiding kan de volgende structuur hebben:

- opdeling van de vaarwegen in gebieden, (b.v. Waal: Tiel-Zaltbommel)
- weergave van de typen schepen in dit gebied met enkele kracht-ervormingsdiagrammen,
- representatieve snelheden van de schepen in dit gebied. (t.o.v. de bodem)

11. Literatuurlijst

- H.A. Dieterman
B8-dictaat: Algemene Mechanica deel II,
TU Delft, April 1992.
- J. Spijkers / H. Dieterman / E. Klaver / A. Vrouwenvelder
B9-dictaat: Dynamica van constructies deel 1,
TU Delft, September 1992.
- A. Verruijt
grondmechanica,
DUM, Maart 1990.
- Dr.ir. C.W.M. Sitters,
B27-dictaten: Materiaalmodellen voor grond en gesteente,
TU Delft, november 1995.
- ETH-Bericht Nr. 147 Erdbebenverhalten Schwimmend gelagerten balkenbrücken.
- Ontwerp Willemsbrug Rotterdam,
polytechnisch tijdschrift,
Bouwkunde, wegen- en waterbouw 36 (1981).
- Tilly User's Manual version 3.2,
TU Delft, januari 1993.
- Gemeentewerken Rotterdam,
Ingenieursbureau Geotechniek en Milieu,
Geotechnische Aspecten, Erasmusbrug,
oktober 1994.
- O.L Larsen
Ship Collision with bridges,
Structural Engineering Documents 4,
International Association for Bridge and Structural
Engineering,
1993.
- Nederlandse Spoorwegen, afd. infrastructuur/betonbouw,
"Door schip op te nemen vervormingsenergie bij
dwarsaanvaring",
Augustus 1984.

Literatuurstudie



Aanvaring van waterbouwkundige constructies

D.C. van Zanten
augustus 1996

Prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling
Prof.dr.ir. A. Verruijt
dr.ir. H.A. Dieterman
ir. K.G. Bezuyen

TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek

Voorwoord

Ter afsluiting van mijn studie aan de T.U. Delft, faculteit der Civiele Techniek is dit afstudeerrapport opgesteld. Het afstudeerrapport bestaat uit twee delen: nl. een literatuurstudie en een eindrapport.

Tijdens mijn stage-periode bij het Ingenieursbureau van Gemeentewerken Rotterdam werd ik op een mogelijk afstudeeronderwerp geattendeerd. Het betrof het onderwerp "aanvaring van waterbouwkundige constructies". In overleg met Prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling en ir. K.G. Bezuyen van de sectie Waterbouwkunde werd dit mijn definitieve afstudeeronderwerp.

Gedurende het afstuderen hebben ook Prof.dr.ir. A. Verruijt en dr.ir. H.A. Dieterman zitting genomen in de afstudeercommissie. De afstudeercommissie bestaat uit:

Prof.dr.s.ir J.K. Vrijling,
Prof.dr.ir A. Verruijt,
dr.ir H.A. Dieterman,
ir. K.G. Bezuijen.

Ik wil de commissieleden bedanken voor de aanwijzingen en tips die zij mij gegeven hebben gedurende het afstuderen.

Hellevoetsluis,
augustus 1996.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Enquête	3
3. Regelgeving	4
3.1. Eurocode 1, part 2.7	4
3.2. Normen in Europa	7
3.3. Duitse Normen	8
4. Lay-out van de brug	11
4.1. Algemeen	11
4.2. Voorbeeld (literatuurlijst [2])	15
5. Aanvaringsrisico, acceptatie	17
6. Aanvaringskracht	21
6.1. Algemene formules	21
6.2. Krachtvervormingsdiagram	27
6.3. Modelproeven	29
7. Hydrodynamische massa	31
8. Omzetting energie schip	32
8.1. Methode door ir. M.G. Parent	32
8.2. Methode van Saul/Svensson	34
9. Omzetting kracht-wegdiagram	35
10. Projecten	38
10.1. Willemsbrug te Rotterdam (literatuurlijst [5])	38
10.2. Erasmusbrug te Rotterdam (literatuurlijst [10,11,12,13])	41
11. Literatuurlijst	43

Bijlage I

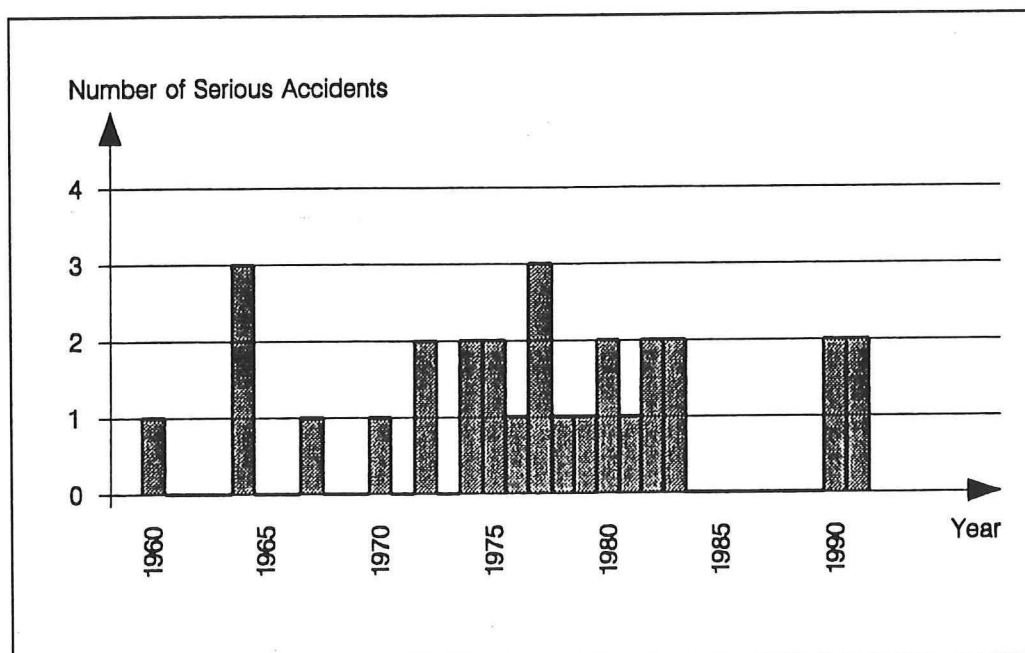
1. Inleiding

Deze literatuurstudie heeft twee doelen:

- aangeven welke literatuur bestudeerd is,
- overzicht geven van het onderwerp "aanvaring van waterbouwkundige constructies".

Een aanvaring van een schip tegen een constructie gaat gepaard met een grote krachtsontwikkeling. De krachten zijn vaak mede-maatgevend in het ontwerp.

Afbeelding 1 geeft het aantal aanvaringen over 32 jaar in de wereld (1960-1991). Deze ongevallen zijn in bijlage I beschreven.



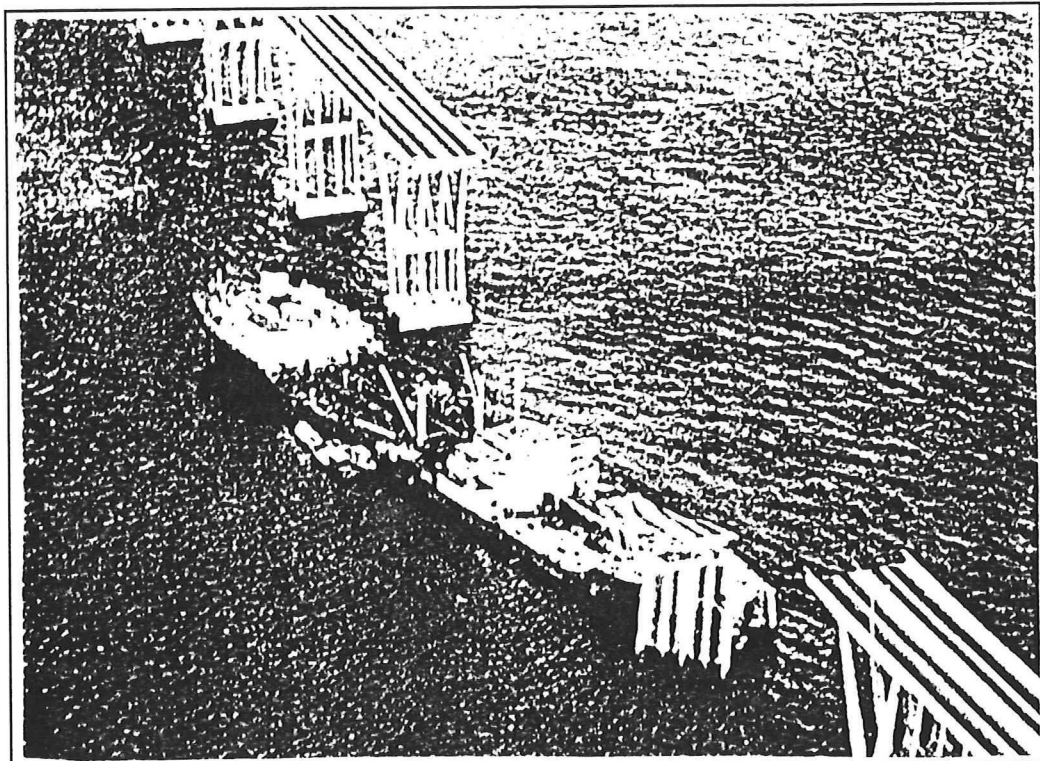
Afb. 1: Aantal serieuze schip-brug aanvaringen per jaar (1960-1991).

Meer dan 100 mensen vonden hierbij in totaal de dood.

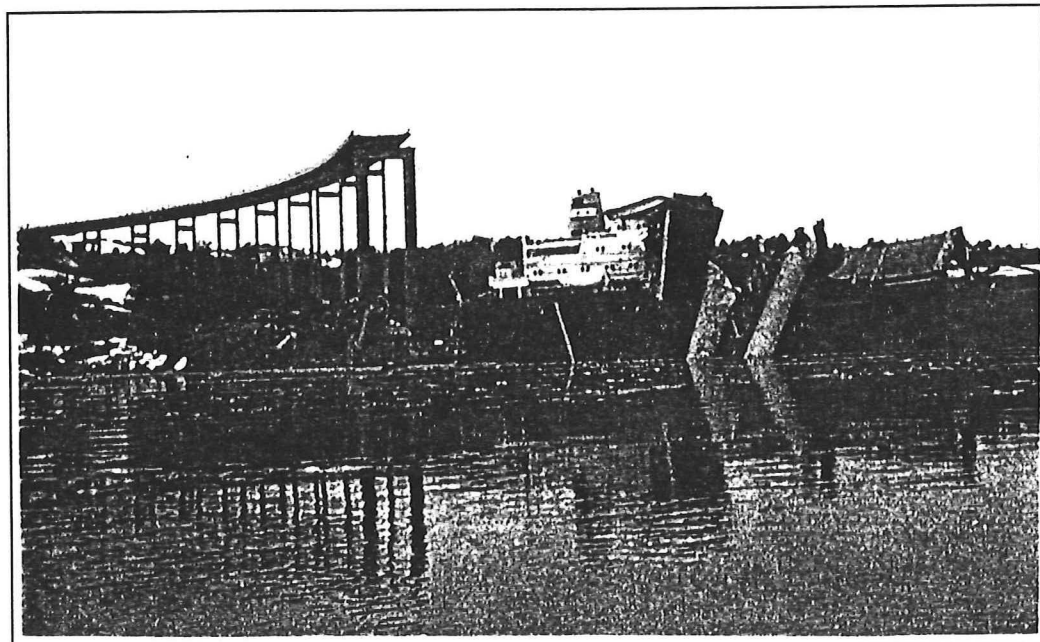
De materiële gevolgen zijn zeer groot. Dit wordt duidelijk gemaakt in de afbeeldingen 2 en 3.

Enkele zeer belangrijke factoren betreffende aanvaringen zijn:

- toename van de scheepvaart en toename van de grootte van de schepen;
- toename van het aantal bruggen;
- aanvaringsbelastingen werden niet altijd in rekening gebracht;
- slechte situering van een brug;
- moderne schepen met torpedovormige boeg vergroten de aanvaringsbelasting.



Afb. 2: Aanvaring van de Maracaibo-brug te Venezuela in 1964



Afb. 3: Aanvaring van de Tjörn-brug in Zweden in 1980

2. Enquête

Werkgroep 3 "Aanvaringsbelasting" van de CUR-commissie heeft een enquête (zie literatuurlijst [4]) gehouden onder 25 organisaties die betrokken zijn bij de problematiek van aanvaringen. Het doel van de enquête was inzicht te verkrijgen van wat er voor informatie bekend is en aan welke informatie behoefte is.

De vragenlijst is verstuurd aan:

- beheerders van waterwegen,
- opdrachtgevers voor het bouwen van waterbouwkundige constructies,
- ingenieursbureaus,
- kennisinstituten op het gebied van aanvaringen,
- scheepscertificeerders, scheepswerven, reders en vlooteigenaren.

Hieronder volgt een selectie van de resultaten:

- Het blijkt dat bij slechts enkele organisaties aanvaringsstatistieken aanwezig zijn. Deze waren zelf verzameld of uit een databestand van de adviesdienst Verkeer en Vervoer van Rijkswaterstaat (AVV) afkomstig.
- Bij het ontwerp m.b.t. aanvaringen bleek zowel met interne als met externe richtlijnen gewerkt te worden. Over het algemeen betrof de richtlijn een deterministische benadering. Slechts bij enkele grote waterbouwkundige constructies is een probabilistische benadering toegepast.
- Een aanvaringsbelasting bleek vaak maatgevend te zijn.
- Er is veel behoefte aan kennisontwikkeling.
- Er is meer behoefte aan een richtlijn dan aan een norm, omdat een norm wellicht te strenge eisen zou geven die het ontwerp belemmeren. De richtlijn voor de constructeur dient het liefst zo eenvoudig mogelijk te zijn.
- Bij een bundeling van statistische informatie dient deze gevuld te zijn met concrete waarden i.p.v. algemene terminologie.

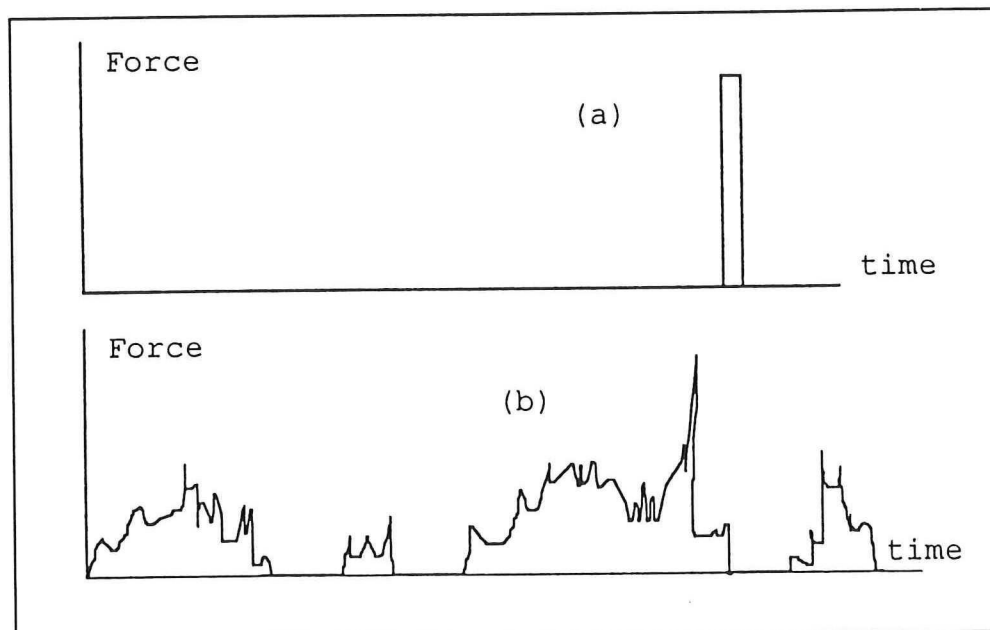
N.B. Tussen [] geplaatste cijfers verwijzen naar de literatuurlijst.

3. Regelgeving

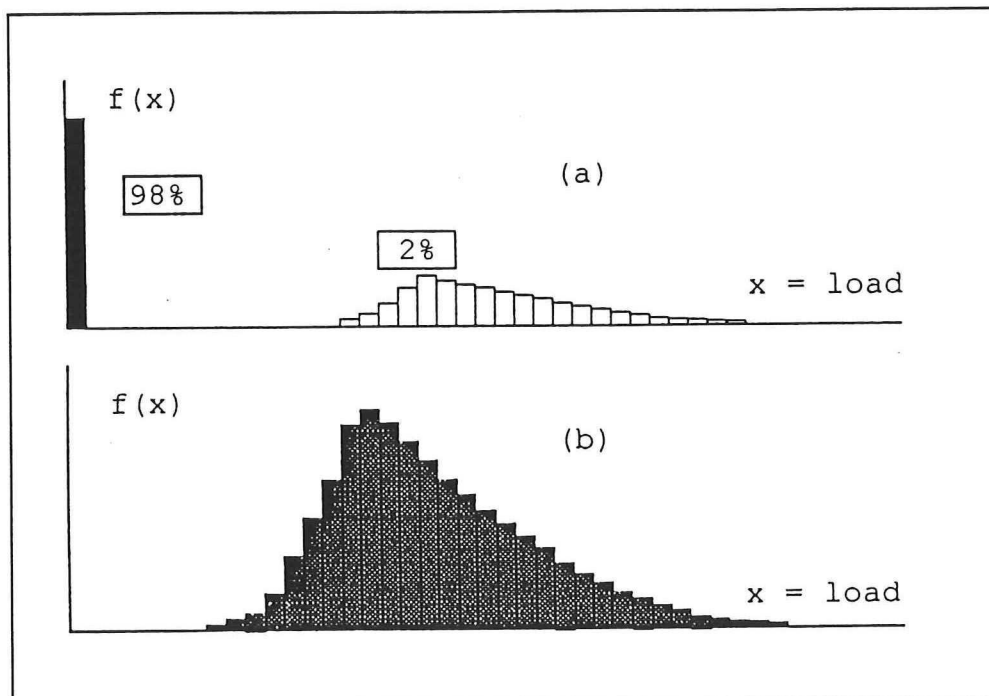
3.1. Eurocode 1, part 2.7

In de Eurocode is een start gemaakt met het opstellen van een document betreffende ongevallen. Naast aanvaringen betreft dit explosies en botsingen van rail- en wegverkeer.

Een ongeval-belasting verschilt zeer van een variabele belasting. De variabele belasting is gedurende de gehele levensduur van de constructie aanwezig en zal wellicht een aantal keren gedurende de levensduur van de constructie een grote waarde bereiken. Een ongeval-belasting daarentegen zal wellicht nooit optreden en als deze wel optreedt is het slechts gedurende seconden of minuten. De kracht-tijdverdeling (afb. 4) en de kansverdeling (afb. 5) zijn voor een veranderlijke belasting en een ongeval-belasting dan ook zeer verschillend.



Afb. 4: kracht-tijdverdeling voor a) ongeval-belasting; b) variabele belasting



Afb. 5: kansverdeling voor a) ongeval-belasting; b) variabele belasting

Deze verschillende soorten belastingen resulteren in verschillende ontwerpstrategieën. Bij een veranderlijke belasting dient altijd met een zekere waarde van de belasting rekening gehouden te worden. Bij een ongeval-belasting is dit niet altijd het geval.

Ontwerpstrategieën voor ongeval-belastingen:

- geen maatregelen, de kans op een ongeval-belasting is extreem klein.
- preventieve maatregelen, beïnvloeding van de kans op een ongeval-belasting.
- beschermende maatregelen, een ongeval-belasting kan plaatsvinden. De gevolgen zijn echter verkleind.
- 'parallelsysteem', onderdelen mogen bezwijken, maar de gehele constructie blijft stabiel.
- elk onderdeel van de constructie wordt zo sterk gemaakt dat het een ongeval-belasting aankan.

Bij ongeval-belastingen wordt vaak gekozen voor het 'parallelsysteem'. Door de lage kans op een ongeval-belasting wordt lokale schade geaccepteerd zolang de hele constructie stabiel blijft.

Analyse van een ongeval-belasting.

Een ongeval-belasting kan op verschillende niveaus geanalyseerd worden:

- geen analyse,
- statische analyse (gegeven een belasting uit een norm),
- dynamische analyse (gegeven een belasting uit een norm),
- risicoanalyse.

Het voordeel van de risicoanalyse is dat het een systematische procedure is waarbij alle risico's bekeken worden.

Door verschillende alternatieven af te wegen kan een economisch optimum gevonden worden. Dit kan afhankelijk zijn van het aantal slachtoffers bij een ongeval. Als 'input' in de afweging wordt het te tolereren individuele risico en het maatschappelijk risico genomen (hoofdstuk 5).

De botsing volgens de Eurocode

Voor de botsing wordt een eenvoudig 1-massa-veersysteem gehanteerd. Dit geeft een formule voor de interactiekracht:

$$F = v_r \cdot \sqrt{(k \cdot m)}$$

Hierbij is:

- v_r = snelheid schip bij de botsing,
- k = stijfheid van het schip,
- m = massa schip.

Deze formule geeft de belasting op de 'buitenkant' van de constructie. Inwendig kan deze belasting dynamische effecten geven. Wanneer de maximale belasting direct op de constructie wordt aangebracht (belasting $t=0$, $F=0$; $t=0+$ $F=F_{\max}$) is de dynamische belastingfactor 2. Voor een realistische bovengrens wordt een dynamische belastingfactor van 1.6 aangehouden. Dit geeft als formule:

$$F = 1.6 \cdot v_r \cdot \sqrt{(k \cdot m)}$$

3.2. Normen in Europa

De volgende tabel geeft een overzicht van de belastingen voor aanvaringen in de normen van verschillende west-Europese landen.

code	traffic type	m [ton]	v[m/s]	F in [MN] (sailing direction)
ISO	class III	-	-	6 (Class according to CEMT)
	class VII	-	-	22
DNV rules	supply vessel	5000	2	20 (estimated by (4.2.1); not prescribed in the Rules)
Belgium	small	1000	-	1
	large	8000	-	8
Denmark		2500	> 2	>12 (estimated by (4.2.1); not prescribed in the rules)
Finland	-	-	-	75
France	small	-	-	1
	large	-	-	10
Ireland				none
Netherlands				none
Norway		5000	> 2	>17 (estimated by (4.2.1); not prescribed in the rules)
UK				none
Sweden				none
Switzerland				none

Afb. 6: Veronderstellingen voor de massa, snelheid en krachten in normen in West-Europa

3.3. Duitse Normen

Een Duits onderzoek voor pijlers in binnenwateren beveelt de volgende statische krachten aan:

Voor pijlers in een rivierbed : 30 MN

Voor pijlers in de uiterwaarde: 6 MN

Deze waarden komen van het Bundesministerium für Verkehr (BMV)
Sicherung der Pfeiler an Rheinbrücken gegen Rammstöße von Schubverbänden.

Door de 'Wasser en Schifffahrtdirection Mainz' worden kleinere waarden aangehouden, tussen de 7 en 15 MN.

Schaderisico en klasse van bouwwerken.

Om het schaderisico te categoriseren worden bouwwerken opgedeeld in klassen:

- Klasse 1: hoog schaderisico,
- Klasse 2: aanzienlijk schaderisico,
- Klasse 3: beperkt schaderisico.

Bij klasse 1 hoort een kans van optreden van 1 keer in 1000 jaren.

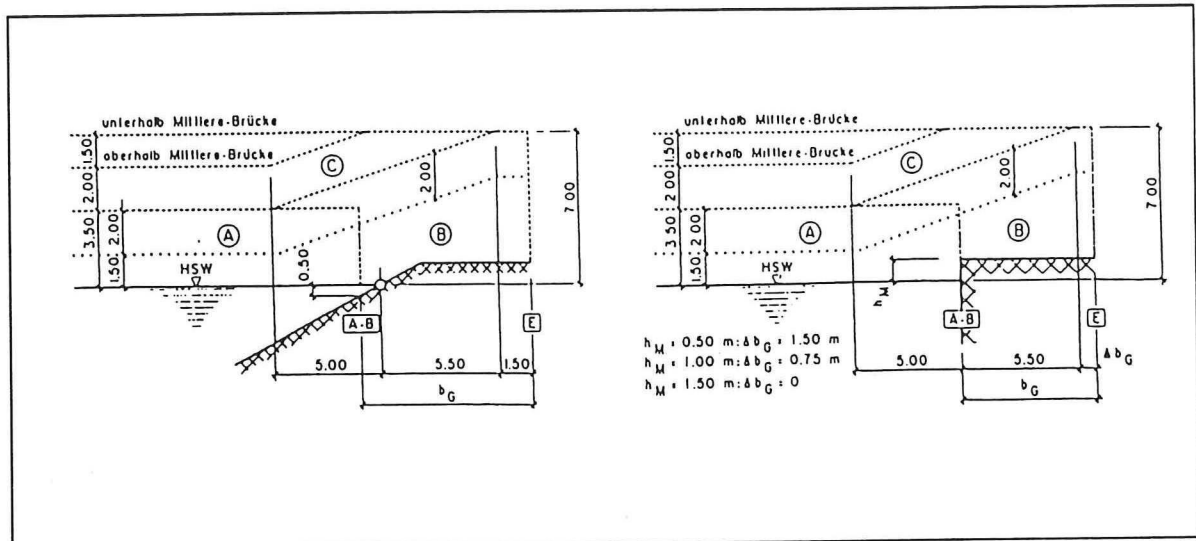
Voor een frontale botsing van een schip tegen bouwwerken uit klasse 1, benedenstrooms van de Mittlere Brücke te Basel, wordt uitgegaan van 30MNm aan kinetische energie.
Bovenstrooms van de Mittlere Brücke worden lichtere eisen gesteld: 20 MNm.

De 30 MNm komt van een schip met een massa van 3450 ton en een snelheid bij botsen van 15 km/h.

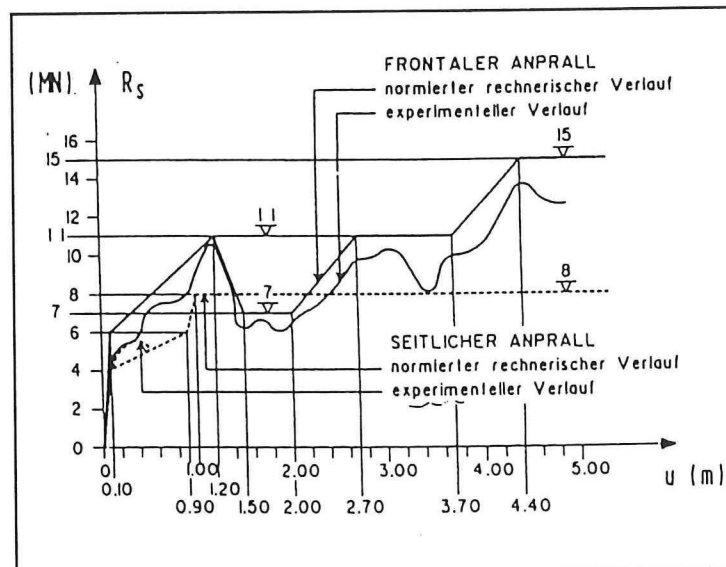
De 20 MNm komt van een schip met een massa van 2400 ton en een snelheid bij botsen van 15 km/h.

Er wordt onderscheid gemaakt naar de plaats van de pijler (afb. 7). Deze kan geheel in de rivier staan of gedeeltelijk in de oever.

Het kracht-ervormingsdiagram van het schip dat gebruikt is, wordt weergegeven in afb. 8.

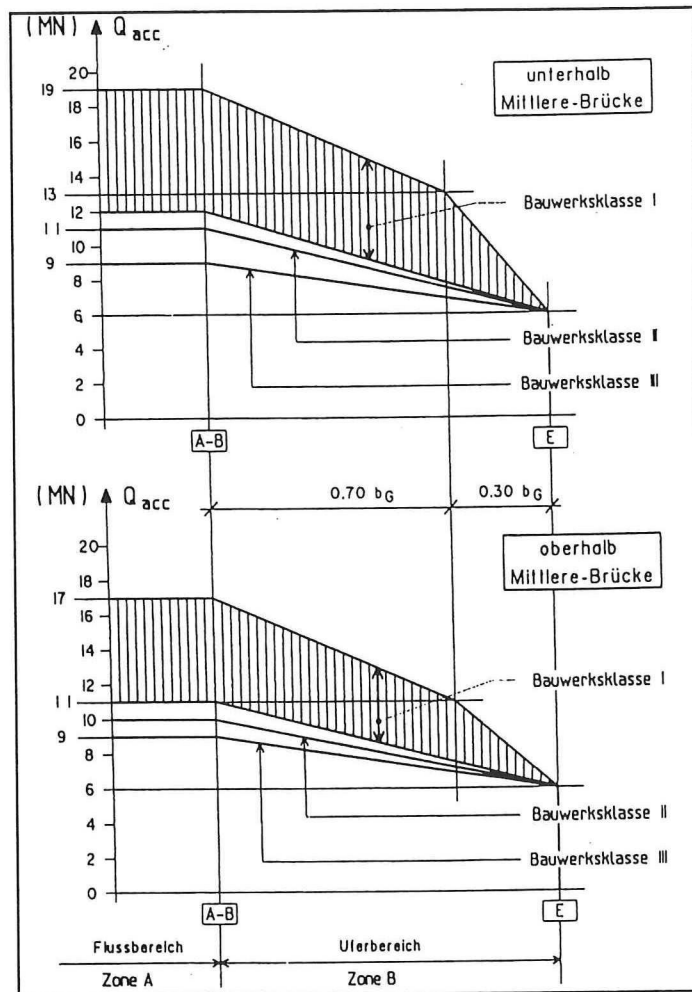


Afb. 7: Opdeling in zones, afhankelijk van de plaats van de pijler



Afb. 8: Aangenomen kracht-ervormingsdiagram

In onderstaande grafiek wordt de aanvaringskracht weergegeven als functie van de plaats van de pijler (bij een frontale aanvaring).



Afb. 9: Aanvaringskrachten voor een frontale botsing in de 2 zones

Voor een zijdelingse aanvaring worden de volgende waarden gegeven (loodrecht op de pijler):

Onderstrooms 'Mittlere Brücke':

- Bauwerksklasse 1: 9-13 MN
- Bauwerksklasse 2: 8 MN
- Bauwerksklasse 3: 6 MN

Bovenstrooms 'Mittlere Brücke':

- Bauwerksklasse 1: 7-10 MN
- Bauwerksklasse 2: 7 MN
- Bauwerksklasse 3: 6 MN

Voor de kracht evenwijdig aan de pijler wordt een waarde gehanteerd die 30 % is van de waarde voor de kracht loodrecht op de pijler.

4. Lay-out van de brug

4.1. Algemeen

Bij de interactie tussen brug en scheepsverkeer is de plaats van de brug en de lay-out van de brug zeer belangrijk. Bij deze interactie spelen de volgende aspecten een rol:

- *plaats van de brug*

De plaats van de brug wordt bepaald door plaatselijk omstandigheden. Hierbij dient men te letten op de volgende aspecten:

- aansluitende wegen,
- de navigatiecondities voor de schepen,
- vermijdt bochten in de vaargeul in de nabijheid van de brug,
- ligging van de brug t.o.v. de vaargeul (bij voorkeur loodrecht),
- etc.

- *lay-out vaargeul*

Door de vaargeul zo veilig mogelijk te maken wordt de kans op een aanvaring verminderd. Hierbij dient gedacht te worden aan:

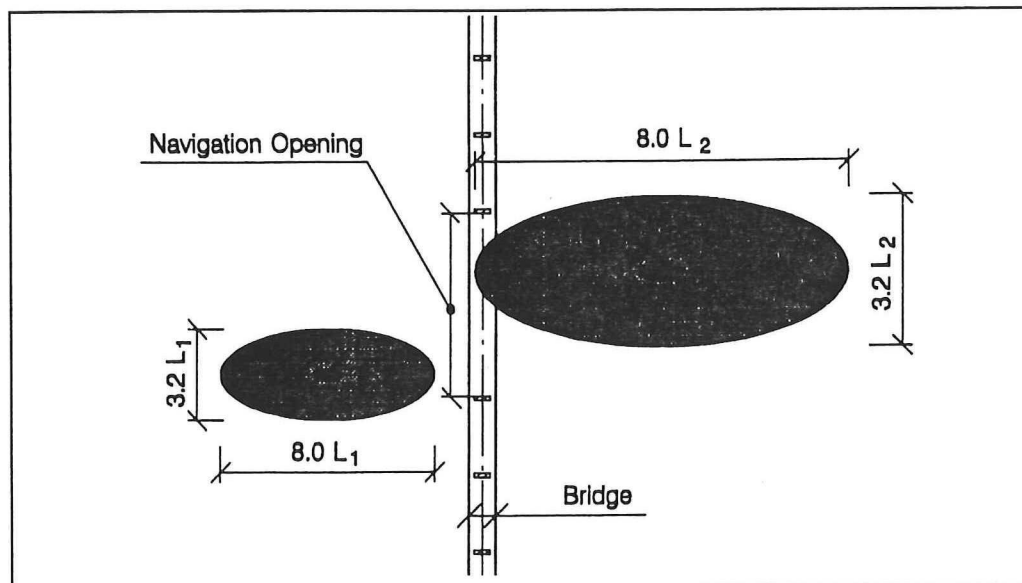
- een duidelijke afbakening van de vaargeul (betonning),
- scheiding van de pleziervaart en de beroepsvaart,
- een diepte van de vaargeul van minstens 1.2 x diepgang van het schip,
- verticale en horizontale speling bij de passage van de brug.

Door een vergroting van de horizontale en verticale speling vermindert de kans op een aanvaring van de pijler en het brugdek. Een methode die de horizontale speling behandelt is de 'Ship Domain Analysis' [1]. Deze gaat er vanuit dat rond een schip een hoeveelheid ruimte ('bumperruimte') aanwezig is waarbij voor een veilige vaart de bumperruimte van een ander schip niet overlapt mag worden (afb. 10).

Bij snelheden van 5-8 m/s is deze in lengterichting van het schip ongeveer 8 L, in breedterichting 3.2 L.

Bij snelheden van 3-4 m/s is deze in lengterichting van het schip ongeveer 6 L, in breedterichting 1.6 L. Waarbij L de lengte van het schip is.

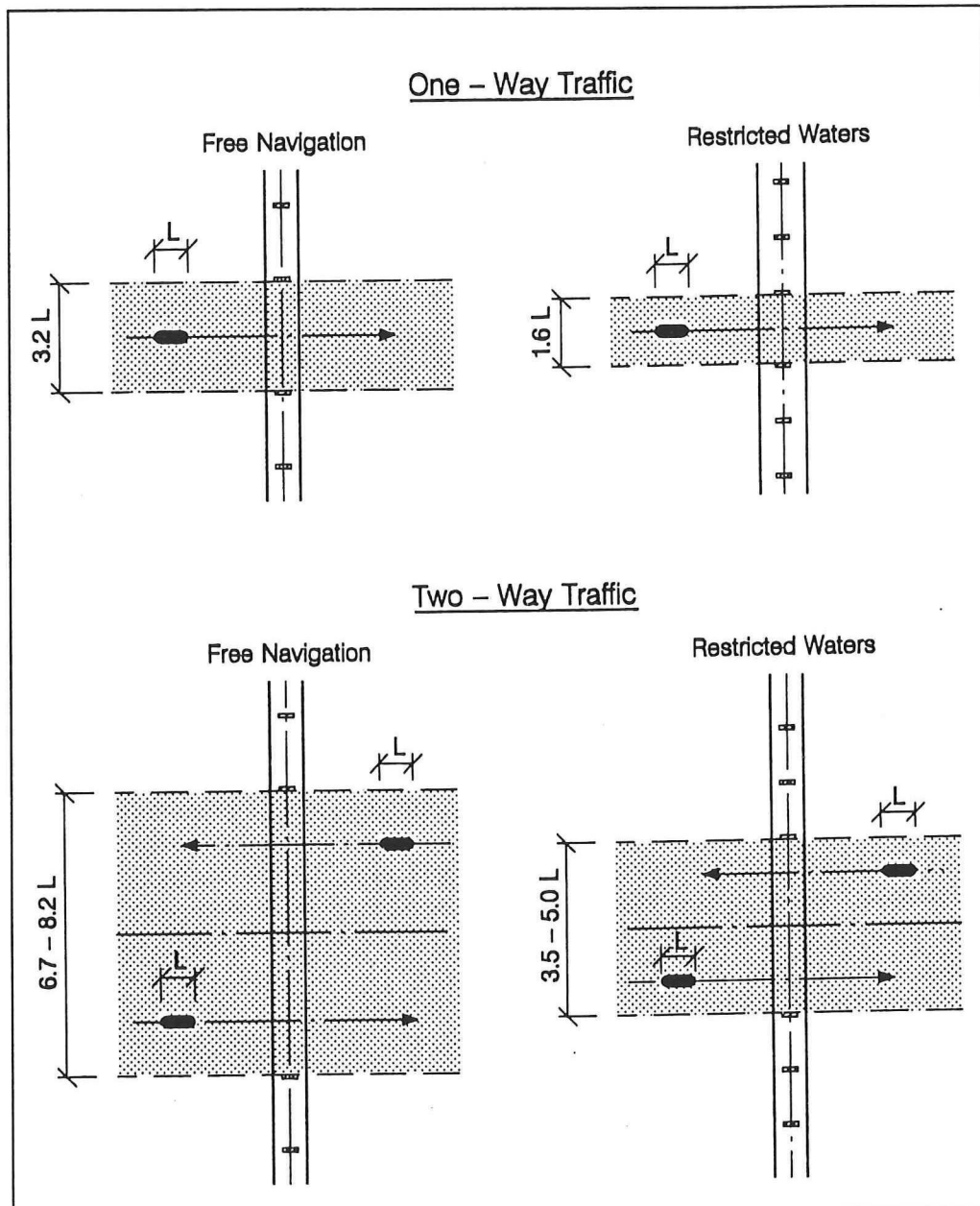
N.B. Tussen [] geplaatste cijfers verwijzen naar de literatuurlijst.



Afb. 10: 'bumper-ruimte' van een schip

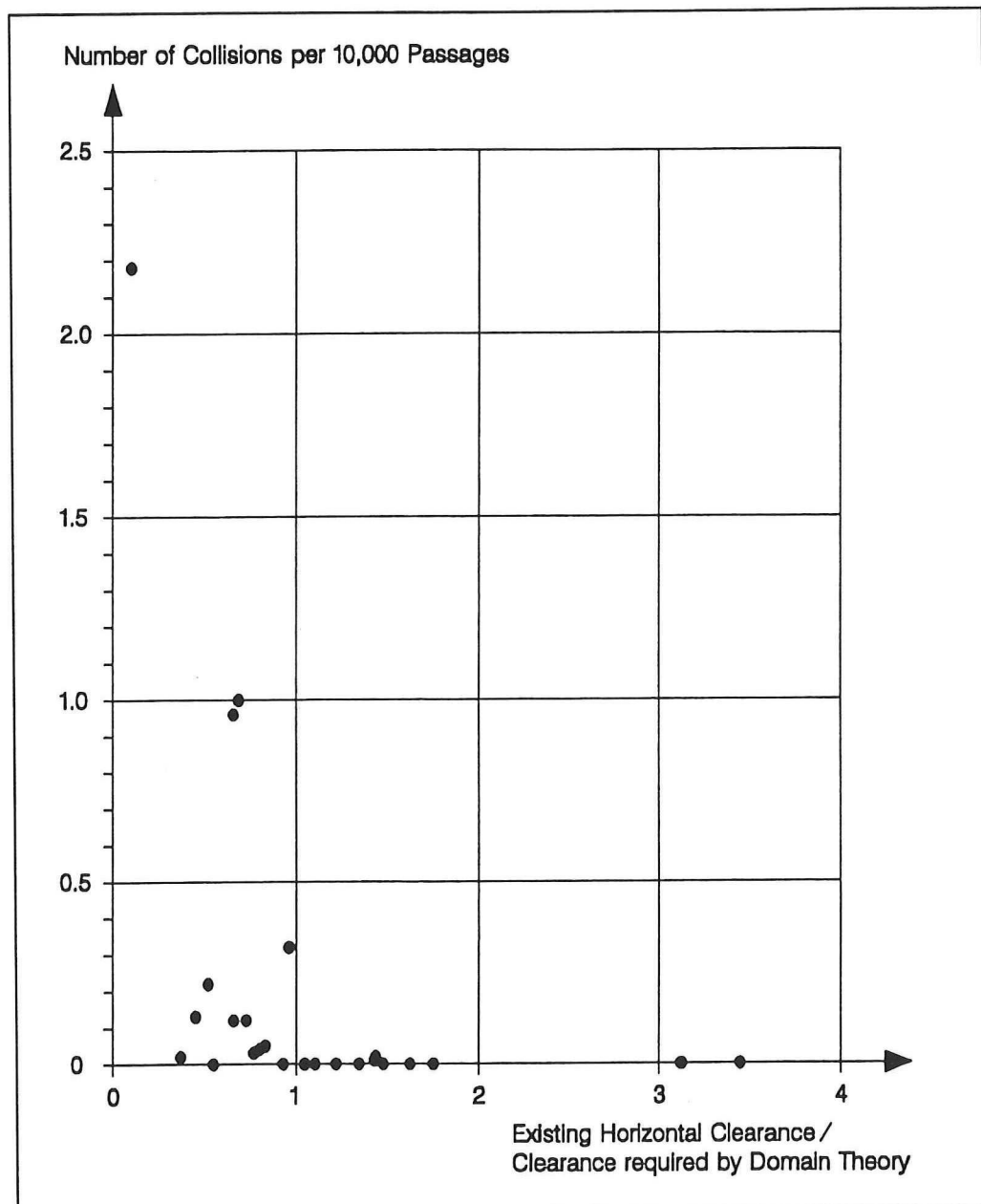
Uitgaande van de 'bumper-ruimte' theorie is een goede doorvaartbreedte van de brug te bepalen (afb. 11):

(Hierbij dient voor tweerichtingsverkeer een scheidingszone genomen te worden met een breedte van 0.3 à $1.8 L$)



Afb. 11: Benodigde overspanning bij belangrijke bruggen uitgaande van de 'bumper-ruimte' theorie

Wanneer de aanbevolen horizontale speling getoetst wordt aan de praktijk geeft dit het volgende beeld:

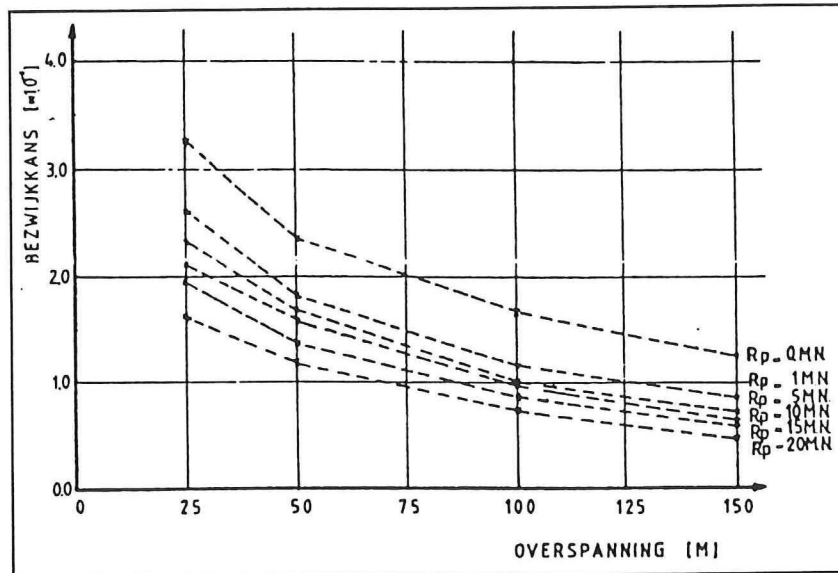


Afb. 12: Toetsing van de Ship-domain analyse aan gegevens uit de praktijk

De theorie voldoet, want bij waarden groter dan 1 (Ship-domain analyse) zijn bijna geen aanvaringen geconstateerd.

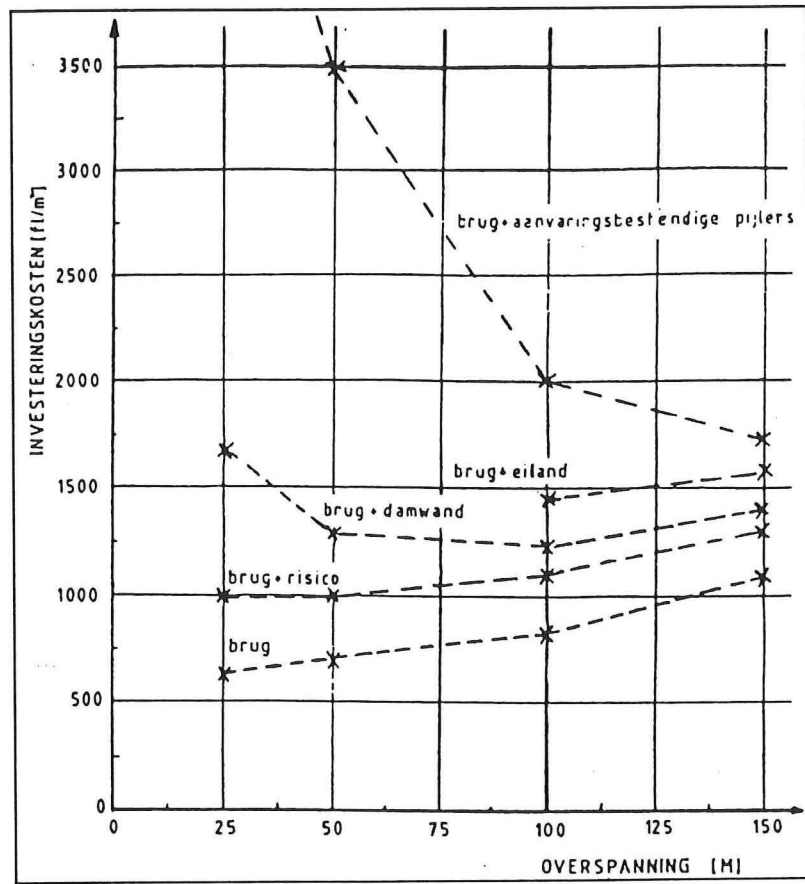
4.2. Voorbeeld (literatuurlijst [2])

Voor een 38 km. lange brug over het Pontchartrainmeer (V.S.) is een analyse uitgevoerd m.b.t. de investeringskosten als functie van de overspanning en de mate van acceptatie van een aanvaring. De resultaten zijn afgebeeld in afb. 13.



Afb. 13: Bezwijkkans van de onderbouw als functie van de sterkte van de pijler en de overspanning

De grafiek geeft aan dat grotere overspanningen en sterkere pijlers de bezwikkans t.g.v. een aanvaring doen afnemen. De kosten van de brug met langere overspanningen zijn echter groter. Dit leidt tot een relatie tussen de investeringskosten en de overspanningslengte die in afb. 14 is weergegeven.



Afb. 14: Investeringskosten als functie van de overspanning en de aanvaringsbestendigheid van de pijlers

5. Aanvaringsrisico, acceptatie

Risico kan gedefinieerd worden als een product van kans en gevolg. Het risico dat geaccepteerd wordt, kan bepaald worden uit:

1. een aantal risicoacceptatie criteria
2. optimum kosten-criterium

Ad 1. risicoacceptatie criteria

Bij de risicoacceptatie criteria moet rekening gehouden worden met de consequenties van een aanvaring:

- schade aan: brug, de gebruikers, het schip en haar lading,
- verlies van mensenlevens,
- schade aan het milieu,
- kosten voor de gemeenschap en het bedrijfsleven.

Vaak, bij gebrek aan gegevens, zal bij de analyse slechts met twee parameters rekening gehouden worden:

- *Acceptatie van de kans dat de brug buiten gebruik raakt.*

Hiervoor worden afhankelijk van de belangrijkheid van de brug verschillende waarden gevonden. Bij belangrijke bruggen (zoals de Great Belt, Denemarken) worden hiervoor kansen genomen van 0.01 à 0.1 in 100 jaar.

- *Acceptatie van de kans van verlies van mensenlevens.*

Hierbij moeten twee risico's gescheiden worden:

- individueel risico,
- maatschappelijk risico.

Deze twee risico's hebben een andere 'eenheid'. Het individuele risico gaat uit van het aantal slachtoffers per jaar. Het maatschappelijk risico heeft als 'eenheid' ongevallen per jaar; hierbij wordt onderscheid gemaakt naar het aantal slachtoffers per ongeval (afb. 15). De maatschappij reageert namelijk heftiger op weinig ongevallen met veel slachtoffers dan op veel ongevallen met weinig slachtoffers.

Category of Risk	Risk Acceptance Criteria
Individual Fatality Risk	$8 \cdot 10^{-3}$ fatalities/year
Societal Risk	
• 1-19 fatalities	$3 \cdot 10^{-3}$ accidents/year
• 20-200 fatalities	$5 \cdot 10^{-6}$ accidents/year
• more than 200 fatalities	$1 \cdot 10^{-6}$ accidents/year

Afb. 15: risico-acceptatie criteria voor de Grote belt-spoorwegtunnel in Denemarken

Ad 2. optimum kosten criterium

Als het technisch of economisch niet mogelijk is de brug zo te construeren dat aan de risicoacceptatie criteria wordt voldaan gaat men over op het optimum kosten criterium. Hierbij wordt naar een optimum gezocht van de directe en indirecte kosten bij het ontwerp van de brug. Dit kan door het minimaliseren van de volgende functie:

$f =$ bouwkosten + onderhoud + risico (b.v. een aanvaring)

Met de definitie van risico als het product van kans en gevolg moet het gevolg (aanvaring, ontploffing, etc.) ook in kosten uitgedrukt worden.

De gevolgen van een aanvaring zijn:

- schade aan: brug, de gebruikers, het schip en haar lading,
- verlies van mensenlevens,
- schade aan het milieu,
- kosten voor de gemeenschap en het bedrijfsleven.

Kans op een aanvaring.

Voor de kans op een aanvaring van een schip tegen een brug bestaat een algemeen model:

$$F = \sum N_i \cdot P_{c,i} \cdot \sum P_{G,i,k} \cdot P_{F,i,k}$$

Hierbij is:

- F = aantal aanvaringen per jaar, waarbij bezwijken van de constructie optreedt,
 N_i = aantal schepen van een bepaalde klasse (i),
 $P_{c,i}$ = oorzakelijke kans,
 $P_{G,i,k}$ = geometrische kans,
 $P_{F,i,k}$ = de bewijkskans van de constructie bij een aanvaring.

Oorzakelijke kans

De oorzakelijke kans is zeer moeilijk te bepalen op basis van aanvaringen, omdat in de statistiek weinig gegevens voorhanden zijn die hierover uitsluitel geven. Er zal vaak een benadering over gedaan moeten worden. Deze kan bijvoorbeeld gebaseerd worden op P_c -waarden voor andere vaarwegen. Hierop dienen dan correcties toegepast te worden. Voor P_c is wel een orde van grootte te geven. Deze bleek ongeveer $1 \cdot 10^{-4}$ te zijn. [1]

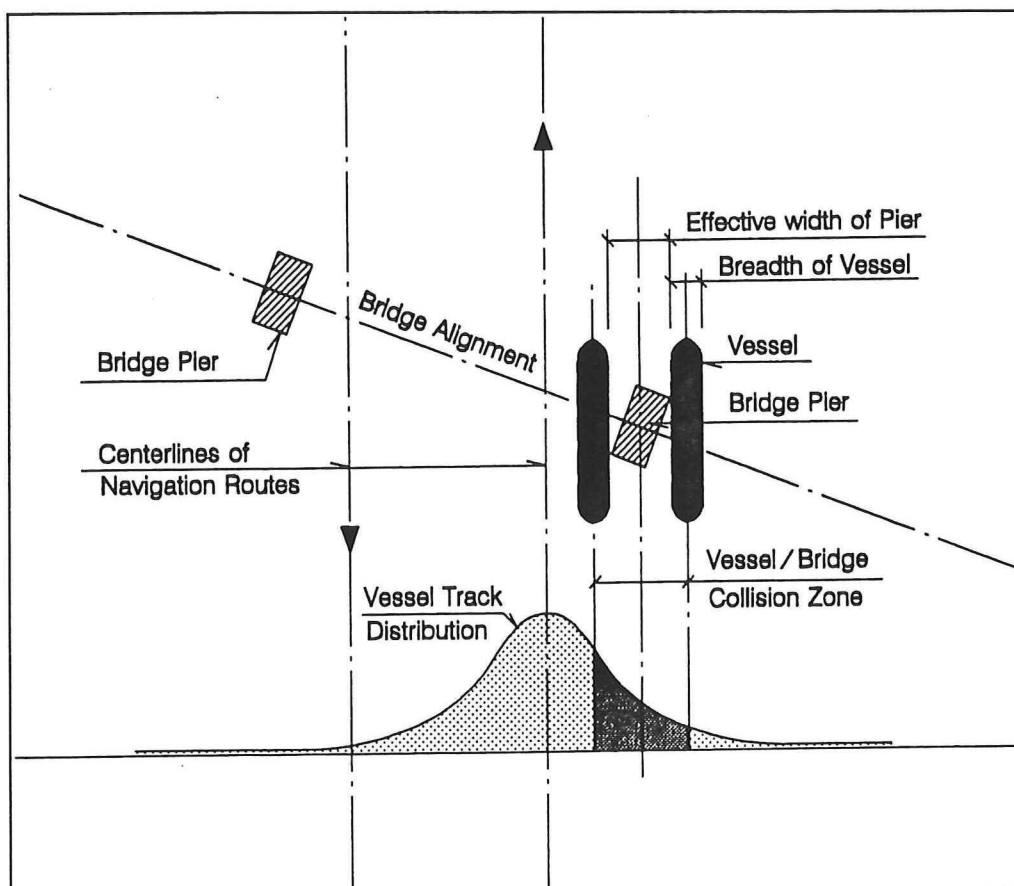
Voor de oorzakelijke kans zijn een aantal factoren van belang:

- zicht,
- wind,
- stroom,
- intensiteit scheepvaart
- etc.

Geometrische kans

Hierbij zijn een viertal scenario's interessant:

- in de buurt van de brug treedt een technische of menselijke fout op.
- in de buurt van de brug moeten ontwijkende bewegingen uitgevoerd worden tussen schepen onderling.
- schepen die niet bij kunnen 'sturen' na een bocht.
- schepen die niet de normale route volgen (b.v. schepen op drift)



Afb. 16: Definitie van de geometrische kans voor het eerste scenario

Bezwijkkans van de constructie

Hiervoor zijn twee methoden:

- Heinrich ratio.
Deze geeft op basis van statistiek de verhouding tussen de zware aanvaringen en alle aanvaringen.
- Probabilistische methode.
Hiervoor moet een probabilistisch model gemaakt worden met daarin kansverdelingen voor de aanvaringskracht (S) en de sterkte van de constructie (R). Door trekkingen uit beide verdelingen kan de bezwikkans gehaald worden.

6. Aanvaringskracht

6.1. Algemene formules

Door velen zijn formules opgesteld die een relatie geven tussen de aanvaringskracht bij een frontale aanvaring en enkele parameters. Voor deze parameters valt te denken aan:

- tonnage van het schip,
- snelheid van het schip,
- lengte van het schip.

Woisin:

$$P_0 = V^{2/3} \cdot L^2 / 1100$$

Hierbij is:

- P_0 = gemiddelde aanvaringsbelasting [MN],
 V = snelheid van het schip [m/s],
 L = lengte van het schip [m].

Saul:

voor bulk carriers:

$$P_{\max} = 0.88 \cdot (\text{DWT})^{1/2} \pm 50\%$$

Hierbij is:

- P_{\max} = effectieve maximum aanvaringsbelasting [MN].

Knott:

een aanpassing op de formule van Saul, om de snelheid en de beladingsgraad mee te nemen.

$$P_{\max} = 0.88 (\text{DWT})^{1/2} \cdot (V/8)^{2/3} \cdot (D_{\text{act}}/D_{\text{max}})^{1/3}$$

Hierbij is:

- V = effectieve snelheid bij botsen [m/s],
 D_{act} = actuele waterverplaatsing van het schip [ton],
 D_{max} = maximale waterverplaatsing van het schip [ton].

The Norwegian Public Roads Administration:

$$P = 0.5(\text{DWT})^{1/2}$$

Hierbij is:

- P = statische aanvaringsbelasting. [MN]

Deze formules komen niet geheel overeen met de afleiding van de maximale aanvaringskracht volgens het 1 massa-veersysteem met een lineaire veer. Deze geeft voor de maximale aanvaringskracht: $F_{\max} = v \cdot \sqrt{(k \cdot m)}$

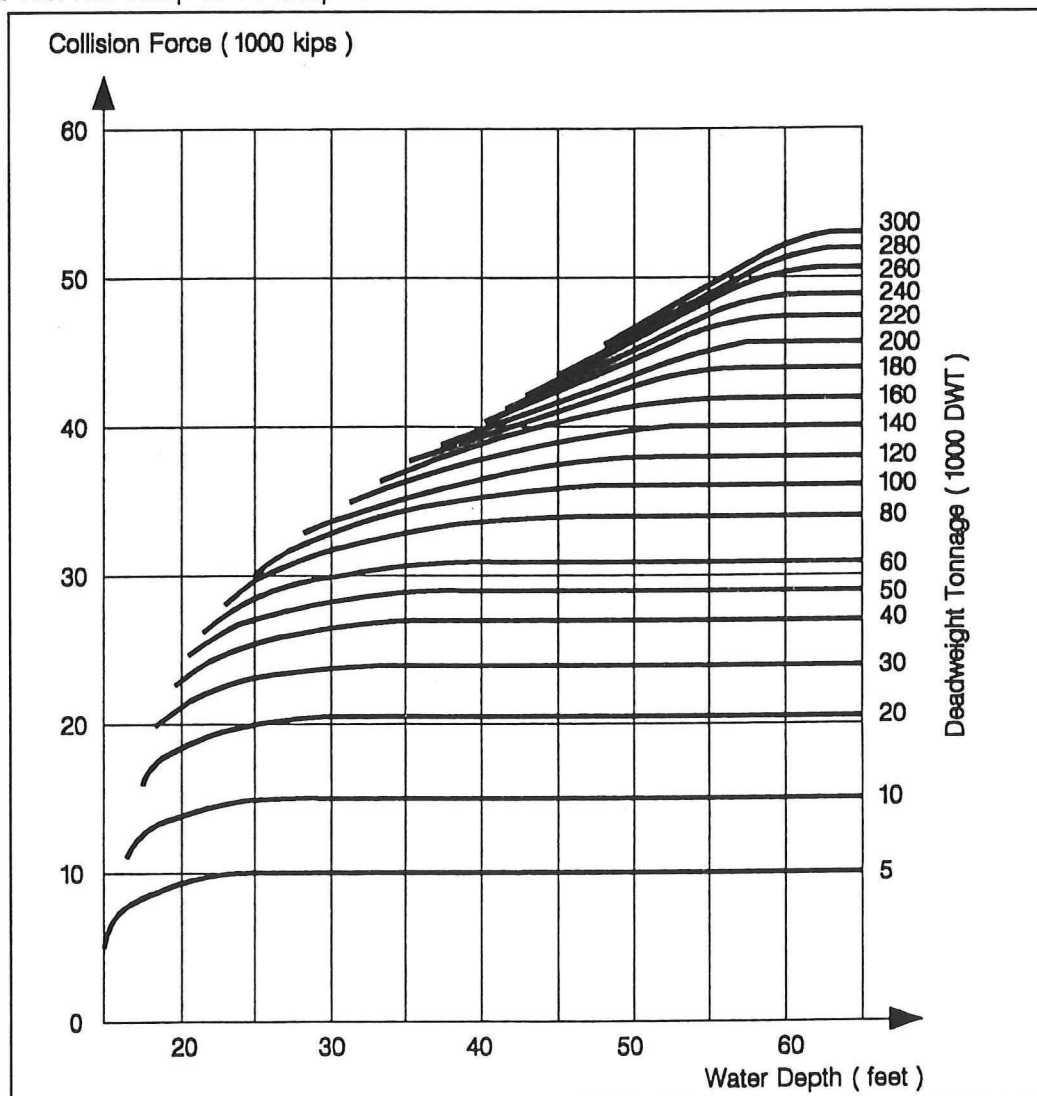
Hierbij is:

- v = snelheid van het schip voor de botsing,
- k = stijfheid schip,
- m = massa schip.

De stijfheid komt niet expliciet in bovenstaande formules voor.

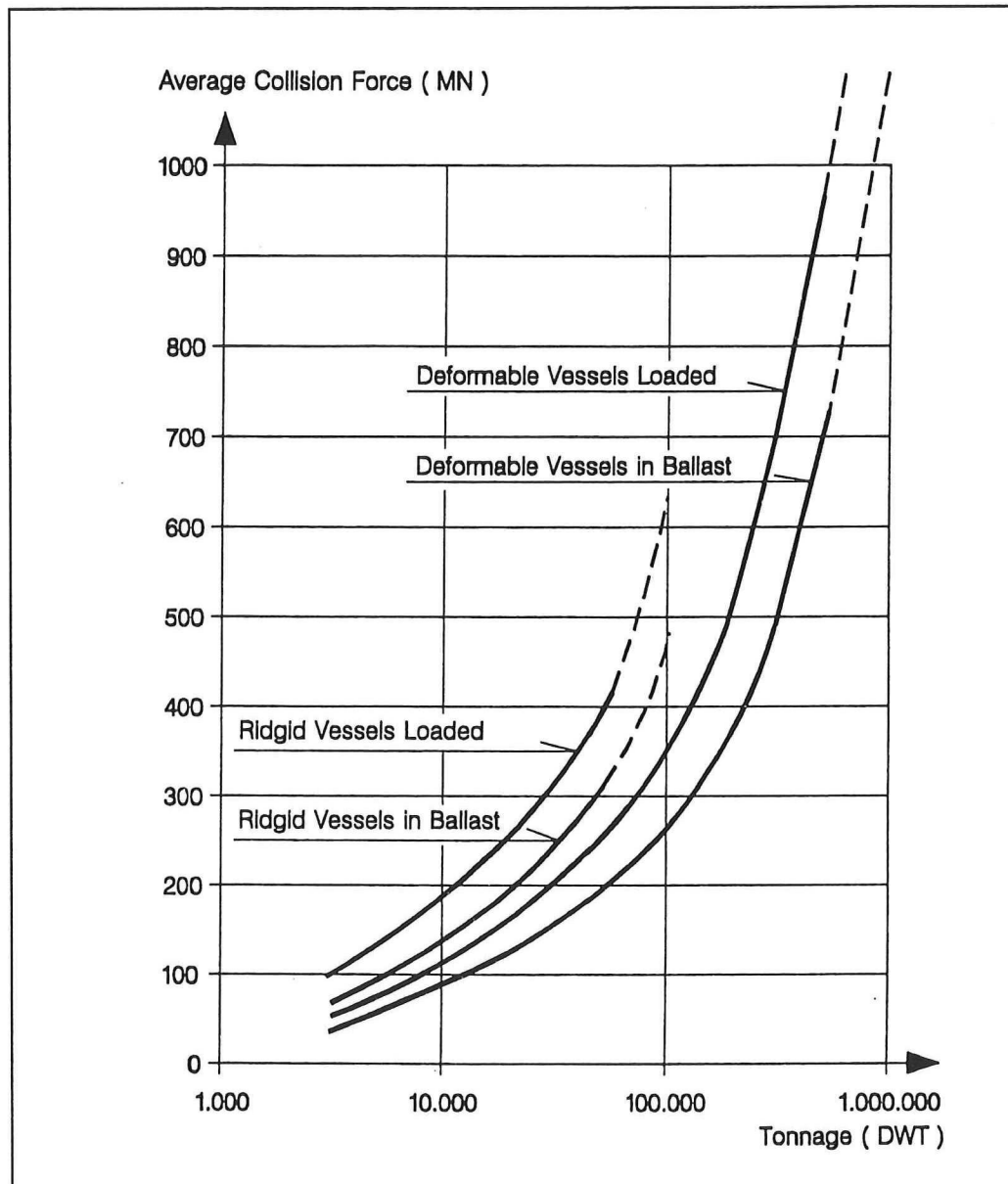
Hierna wordt de aanvaringskracht in verschillende grafieken weergegeven.

In afbeelding 17 wordt het voorstel van de staat Louisiana, V.S. weergegeven (1985). De snelheid van het schip is 14 knopen.



Afb. 17: Aanvaringsbelasting (snelheid van 14 knopen) voorgesteld door de staat Louisiana (1000 kips = 4.45 MN); kips= kilo pounds

Afbeelding 18 geeft de gemiddelde krachten weer, ontwikkeld voor de eventuele nieuwe oeververbinding bij de Straat van Gibraltar.



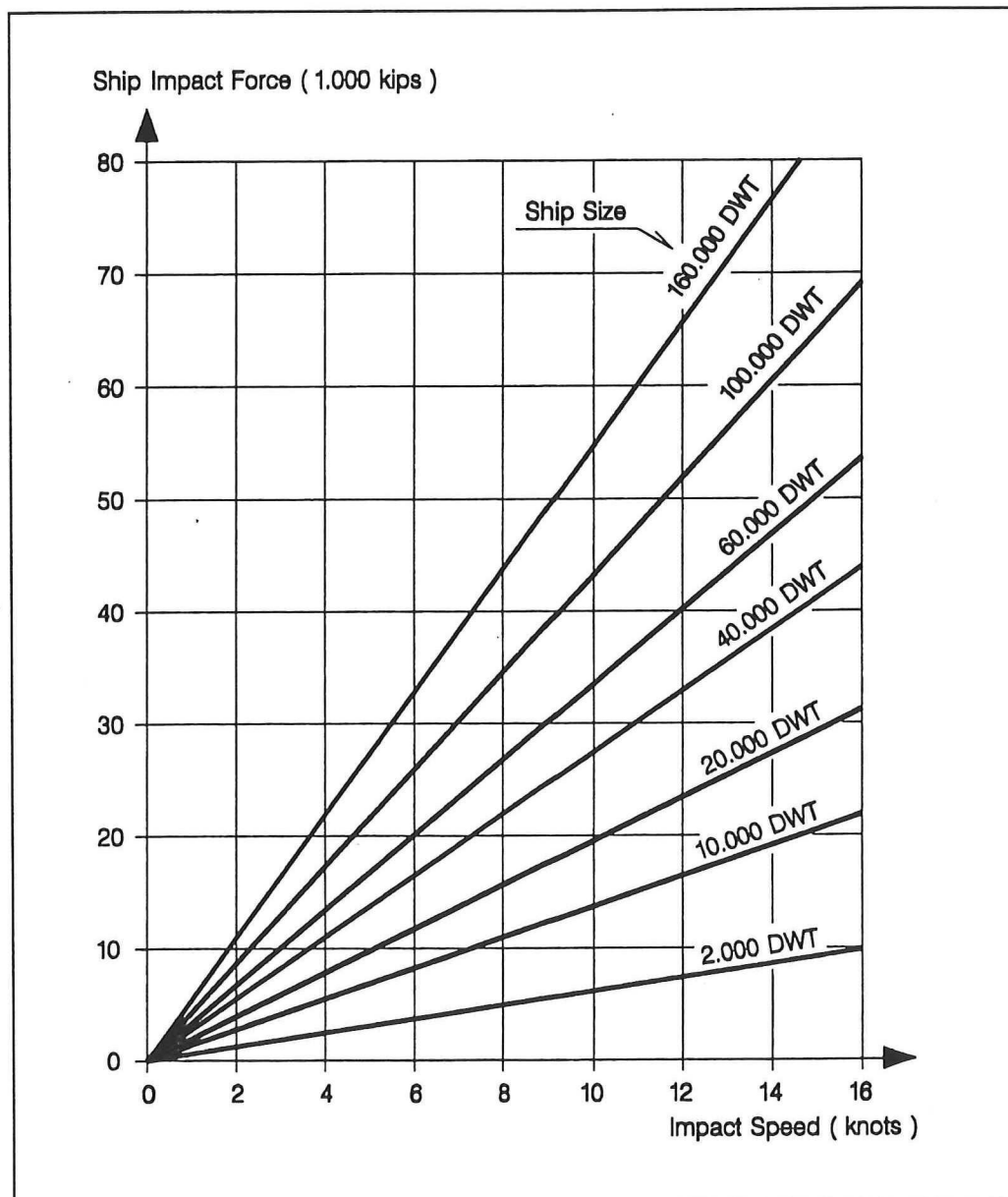
Afb. 18: Gemiddelde aanvaringskrachten (voor een eventuele nieuwe oeververbinding bij de straat van Gibraltar)

De US Guide Specification geeft de volgende formule en de daarbij behorende grafiek (afb. 19).

$$P_s = 0.98 \cdot (\text{DWT})^{1/2} \cdot [V/8]$$

Hierbij is:

- P_s = aanvaringsbelasting [MN],
 V = snelheid schip [m/s].



Afb. 19: Aanvaringskrachten volgens de US Guide Specification (1000 kips = 4.45 MN)

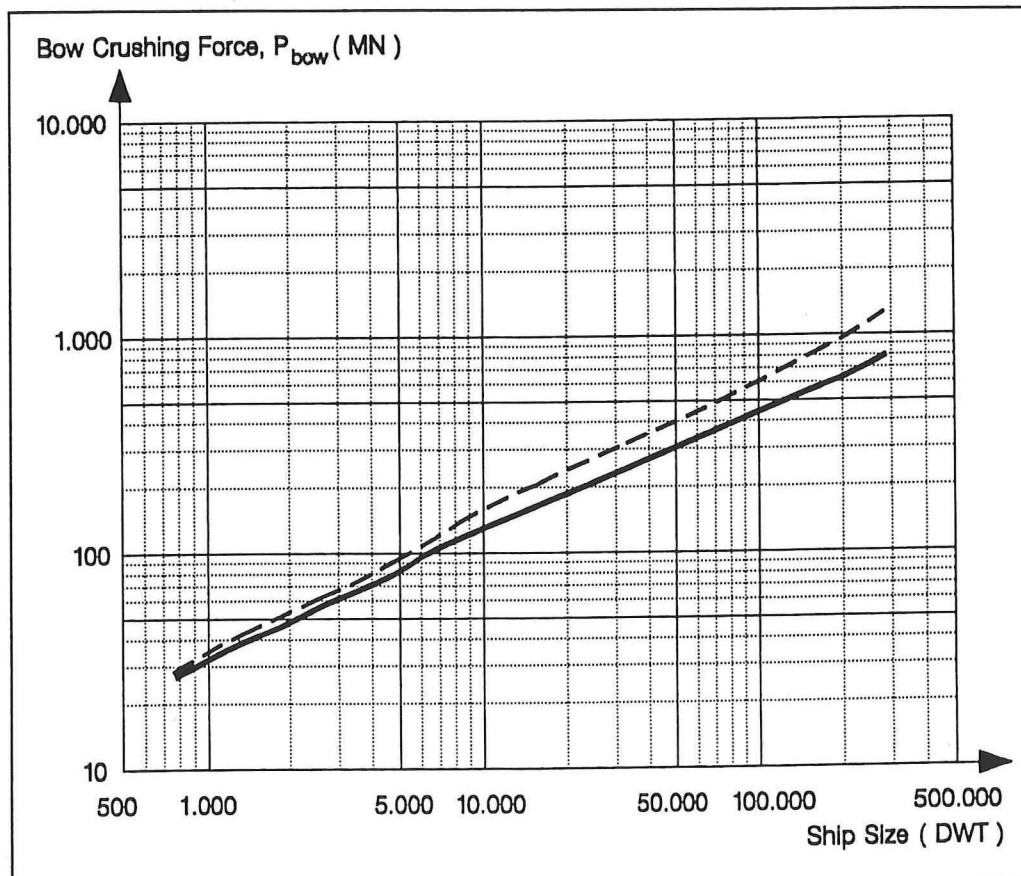
Uit onderzoek voor het grote Belt bruggenproject in Denemarken komt onderstaande formule voor de maximale aanvaringskracht met bijbehorende grafiek:

$$P_{\text{bow}} = P_0 \cdot [E \cdot L^2 + (5.0 - L)^{2.6}]^{1/2} \quad \text{voor } E \geq L^{2.6}$$

$$P_{\text{bow}} = P_0 \cdot [5.0 \cdot E \cdot L]^{1/2} \quad \text{voor } E < L^{2.6}$$

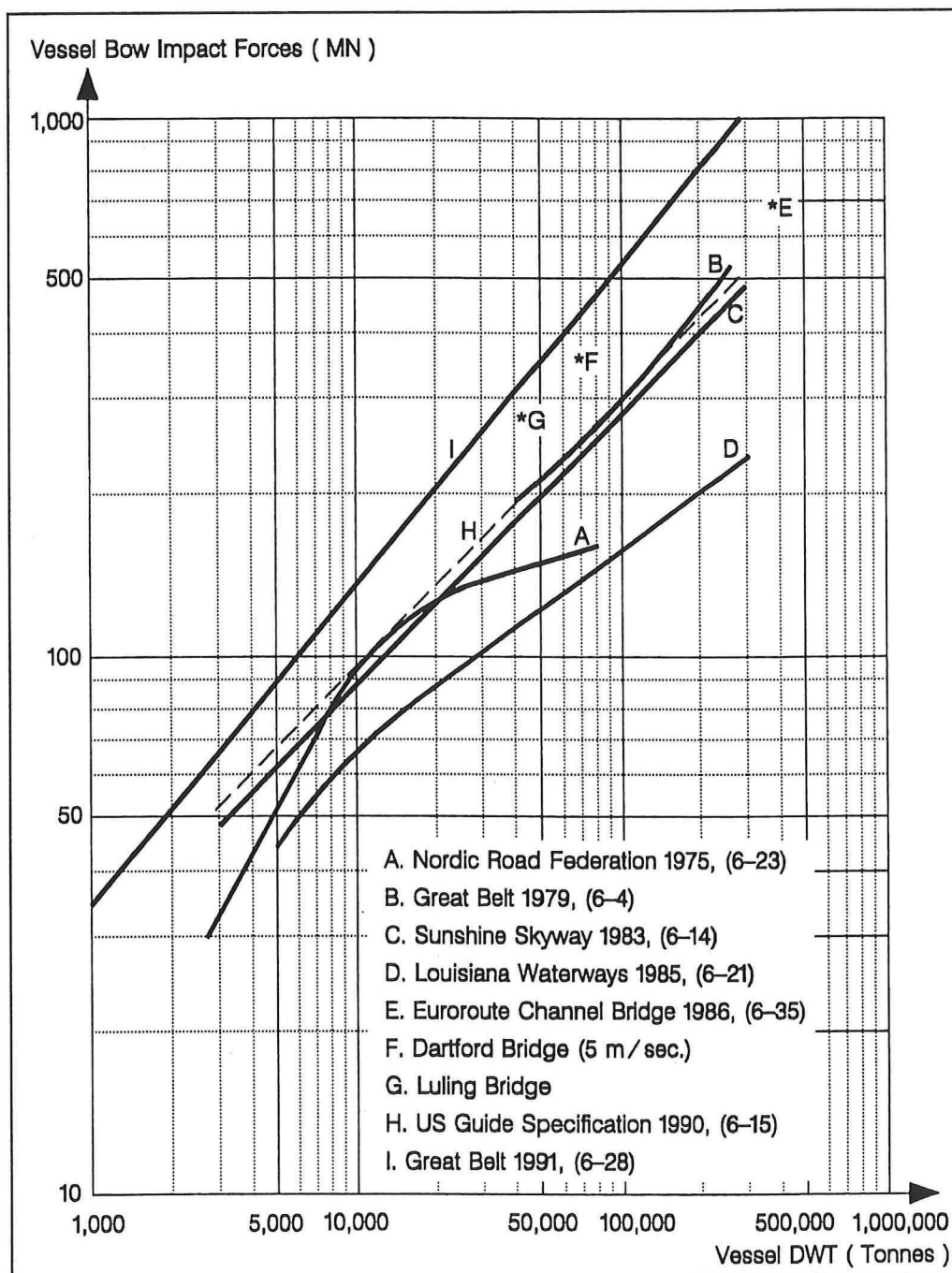
Hierbij is:

- P_{bow} = maximale aanvaringskracht [MN],
- P_0 = referentie aanvaringskracht van 210 MN,
- L = $L_{\text{pp}}/275$ [-],
- E = $E_{\text{imp}}/1425$ [-],
- L_{pp} = lengte van het schip [m],
- E_{imp} = kinetische energie van het schip [MNm].



Afb. 20: Aanvaringskrachten ontwikkeld voor het Grote Belt bruggenproject

Onderstaande grafiek geeft de aanvaringsbelastingen weer die verkregen zijn uit verschillende bronnen. Uitgegaan is van volledig beladen schepen, met een aanvaringssnelheid van 7-8 m/s.

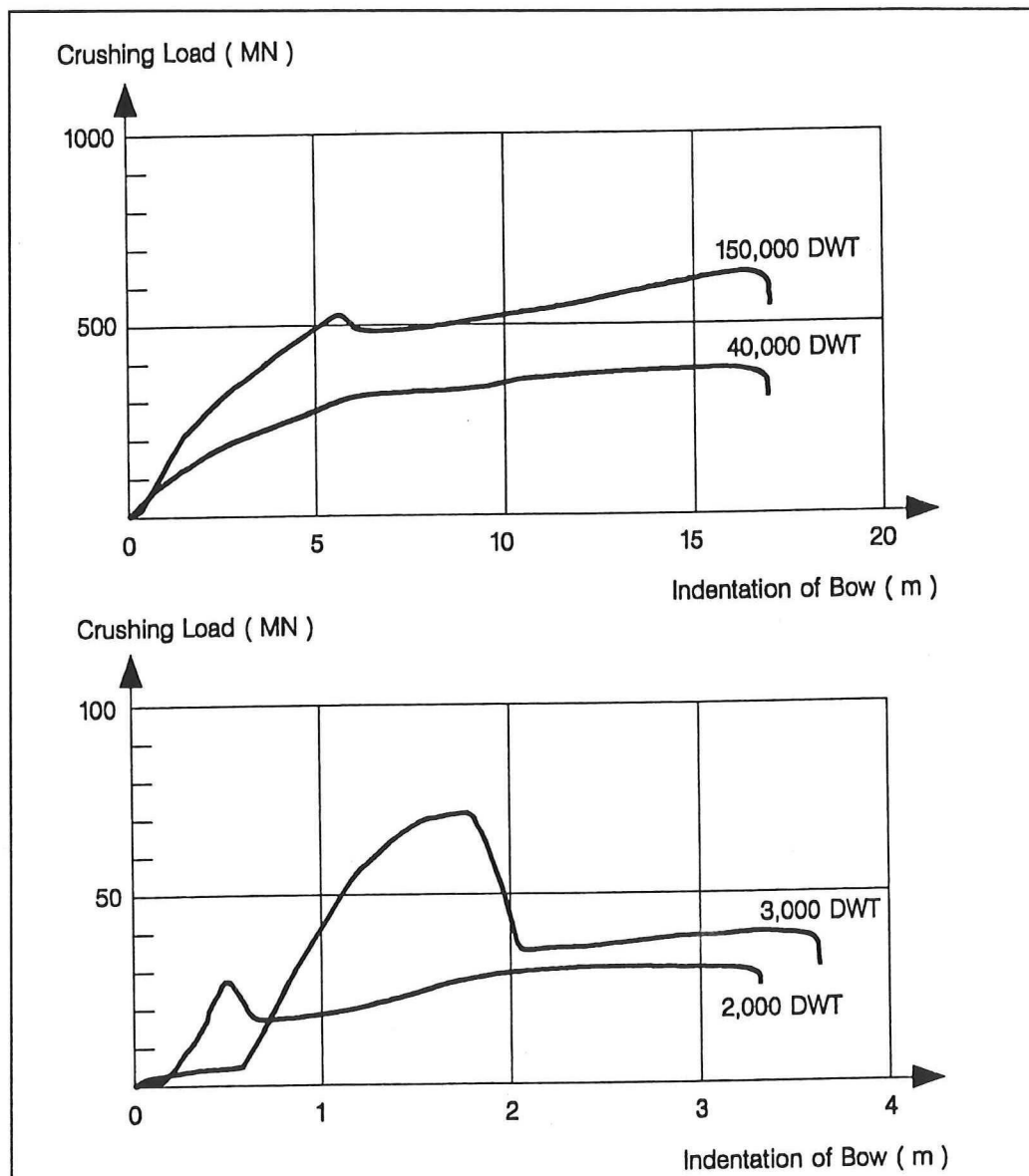


Afb. 21: Vergelijking tussen verschillende opinies over de aanvaringskrachten

6.2. Krachtvervormingsdiagram

Een zeer belangrijk gegeven bij het ontwerp op aanvaringen is het kracht-vervormingsdiagram van het schip. In afbeelding 22 wordt dit gegeven voor twee typen schepen [1].

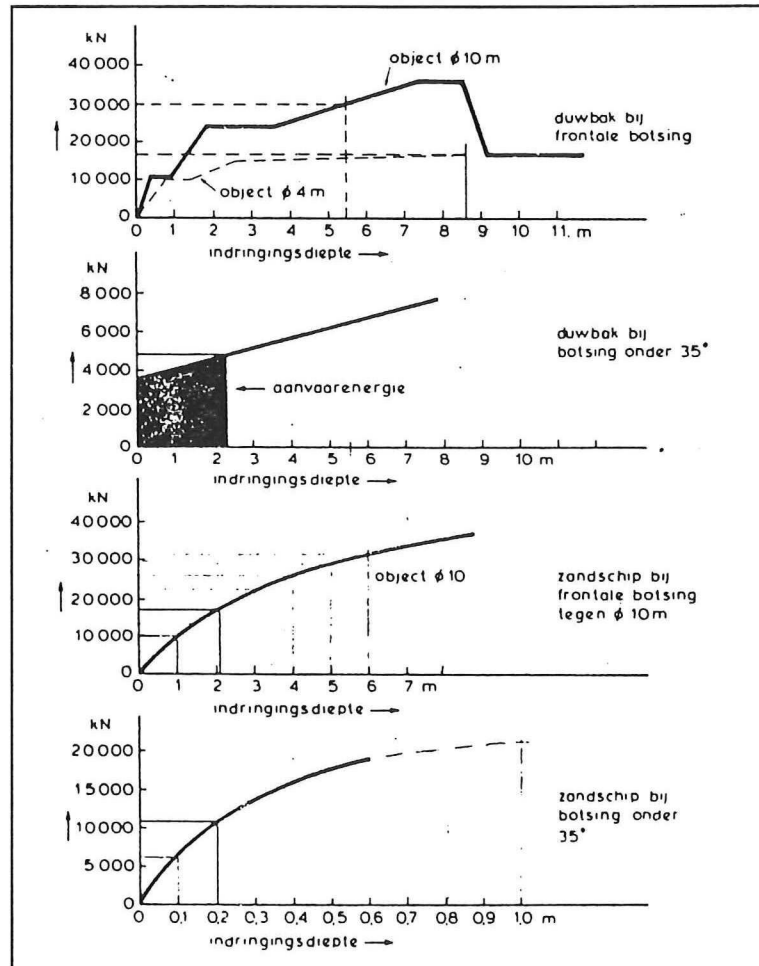
boven: 150.000 DWT bulk carrier
40.000 DWT container schip
onder: 3.000 DWT general cargo carrier
2.000 DWT tanker



Afb. 22: Kracht-wegdiagram voor 4 typen schepen

Afbeelding 23 geeft de vervormingskarakteristiek weer van twee scheepstypen [5].

- een duweenheid met 6 duwbakken type Europa IIa,
- een zandschip van 5000 ton (firma Oosterwijk).

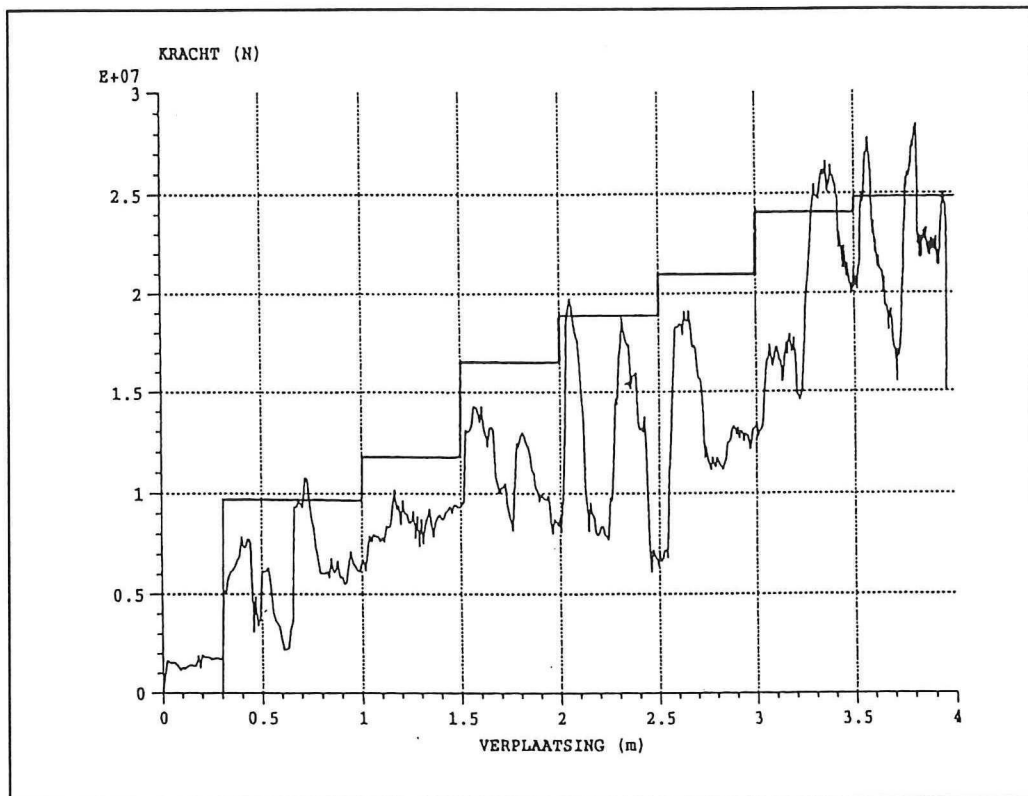


Afb. 23: Kracht-wegdiagram voor twee schepen in twee situaties, frontaal en zijdelings (35°)

Het mooie van de kracht-vervormingsdiagrammen is dat hieruit een schatting van de aanvaringskracht gehaald kan worden (bij een aanvaring tegen een oneindig stijve pijler). Het oppervlak onder de grafiek heeft de eenheid kracht-weg (SI-eenheid [$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{sec}^2$]). Dit is gelijk aan de eenheid van energie van het schip ($E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$). Door de hoeveelheid energie die door het schip opgenomen dient te worden in de grafiek te plaatsen wordt duidelijk hoeveel het schip vervormt en hoe groot de aanvaringskracht is (zie bovenstaande grafiek).

Bij een frontale aanvaring dient de totale hoeveelheid kinetische energie van het schip opgenomen te worden; bij een scheve aanvaring een gedeelte hiervan (zie hfst. 8).

Afbeelding 24 geeft het kracht-weg diagram weer bepaald via een handberekening en een computersimulatie. De computersimulatie is de lijn met het grillige verloop (dynamische effecten). Tijdens de botsing gaan er golven door het schip lopen. De staplijn volgt uit een handberekening en is een bovengrens benadering (literatuurlijst [3]).



Afb. 24: Kracht-weg diagram met een handberekening en een computersimulatie

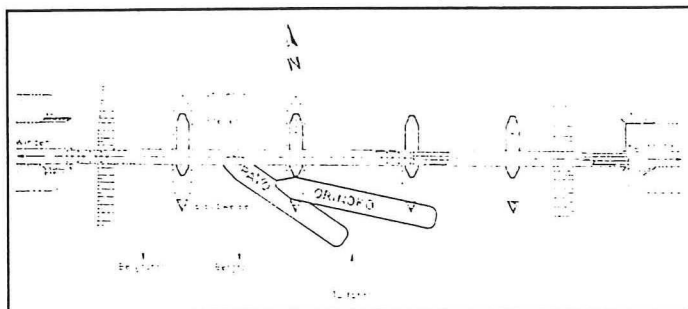
6.3. Modelproeven

Om een botsing te analyseren is het mogelijk dit met modelproeven te doen. Zo werd door de TH Darmstadt een model op schaal gemaakt (1:6.4). Hiermee werd de botsing van afb. 25 nagebootst. (Spoorwegbrug bij Karlsruhe-Maxau)

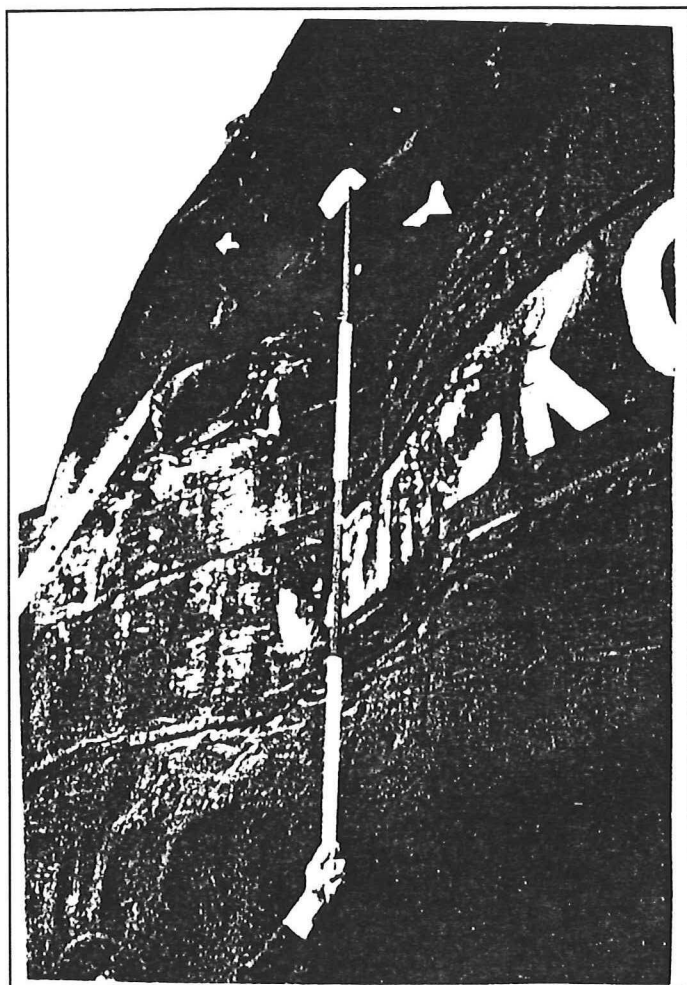
De Orinoko : (L=86 m ; B=11.05 m ; D=2.75m)

De Pavo : (L=76.5m ; B=11.20 m ; D=3.45m)

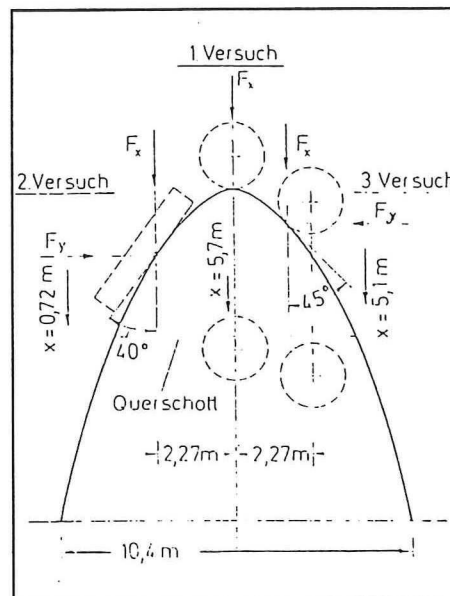
Door de schade aan het model en de schade aan het schip te vergelijken kwam men op een aanvaringskracht van 5 MN.



Afb. 25: Aanvaring spoorwegbrug (Karlsruhe-Maxau)



Afb. 27: Schade aan de 'Orinoko'



Afb. 26: Verschillende aanvaringsmogelijkheden

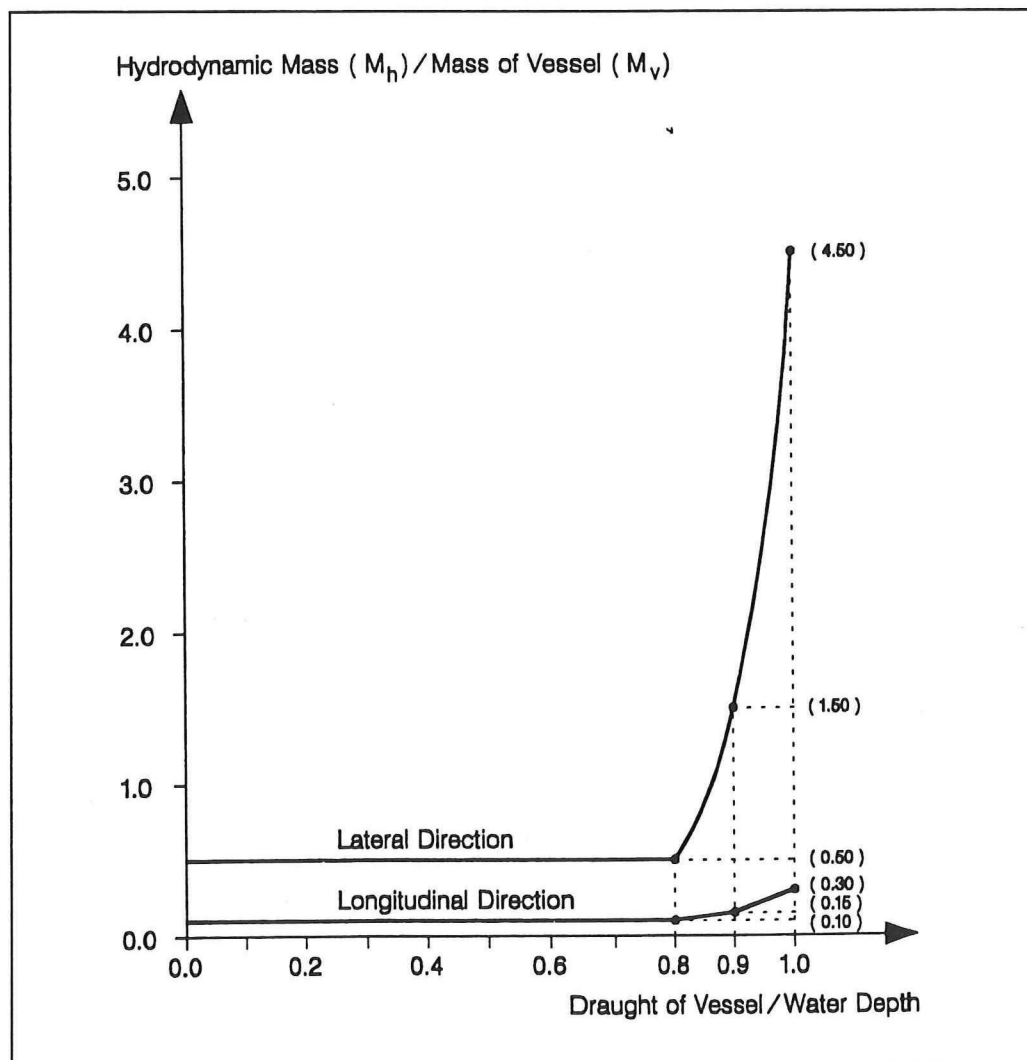
7. Hydrodynamische massa

Rond een varend schip beweegt een hoeveelheid water mee. Dit wordt de hydrodynamische massa van het schip genoemd. Het is een extra massa en dient meegenomen te worden in de botsing. De hydrodynamische massa is afhankelijk van de bewegingsrichting van het schip.

De totale hoeveelheid kinetische energie van het schip wordt dan: $E_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \cdot (M_v + M_h) \cdot v^2$

Hierbij is:

- v = snelheid van het schip [m/s],
- M_v = massa van het schip,
- M_h = hydrodynamische massa van het schip.



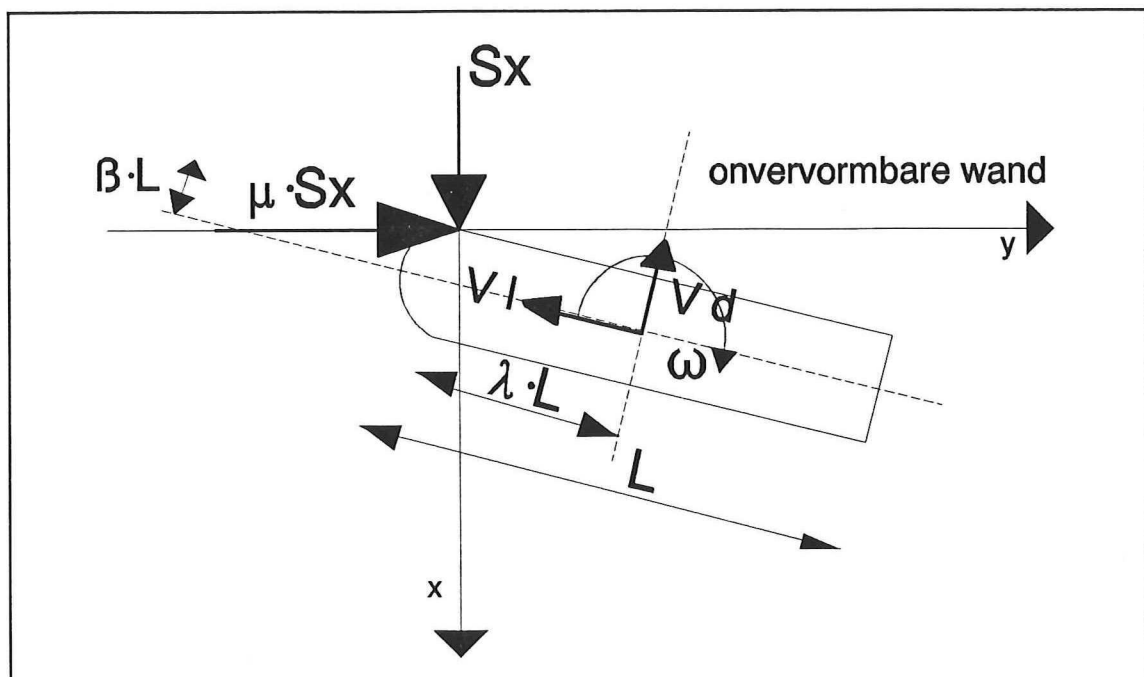
Afb. 28: Hydrodynamische massa factoren

8. Omzetting energie schip

De omzetting van de hoeveelheid kinetische energie van het schip bij een botsing is ondermeer afhankelijk van de hoek van de botsing. Voor de omzetting zijn meerdere methoden ontwikkeld. Voor een opsomming zie literatuurlijst [3].

8.1. Methode door ir. M.G. Parent

Hierbij wordt gebruik gemaakt van een impulsmodel en wordt de aangevaren constructie als oneindig stijf beschouwd.



Afb. 29: Schematisering van een scheve aanvaring via een impulsmodel

De gebruikte parameters zijn:

- S_x = impuls in x-richting in het raakpunt,
- S_y = impuls in y-richting in het raakpunt $= \mu \cdot S_x$,
- μ = wrijvingscoëfficiënt (tussen het schip en de wand),
- $\beta \cdot L$ = afstand raakpunt tot de lengteas van het schip,
- $\lambda \cdot L$ = afstand raakpunt tot de breedteas van het schip,
- $\tau \cdot L$ = traagheidsstraal van het schip,
- L = lengte van het schip,
- m = massa van het schip,
- v_0 = snelheid van het schip voor de botsing,
- v_1 = snelheid van het schip na de botsing in langsricting,
- v_d = snelheid van het schip na de botsing in dwarsrichting,
- ω = rotatie van het schip na de botsing.

De coëfficiënten voor de hydrodynamische massa zijn:

- langsbeweging: 1.05
- dwarsbeweging en rotatie: 1.5

Doel: Bepaal een stoot S_x , waarbij de snelheid van het raakpunt in x-richting nul wordt.

Randvoorwaarden in het raakpunt:

$$V_x = 0$$

$$V_y \leq 0$$

Door de impulsvergelijkingen op te stellen in de drie bewegingsrichtingen en deze in te vullen in de voorwaarde $V_x=0$ volgt: S_x (de impuls in x-richting in het raakpunt)

Met S_x zijn de translatiesnelheden en de rotatiesnelheid te bepalen van het schip en hieruit de hoeveelheid kinetische energie van het schip na de botsing. In onderstaande tabel wordt de 'op te nemen' vervormingsenergie weergegeven (als functie van de kinetische energie van het schip voor de botsing).

Voorbeeld:

- λ = 0.5
- β = 0 (schip heeft geen breedte)
- μ = 0.2 (wrijvingsfactor)
- α = 30° (hoek van aanvaring)

----> Tabel ----> 0.165

Dit betekent dat $0.165 \cdot 1.05 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ aan kinetische energie is 'verloren'.

Hierbij is:

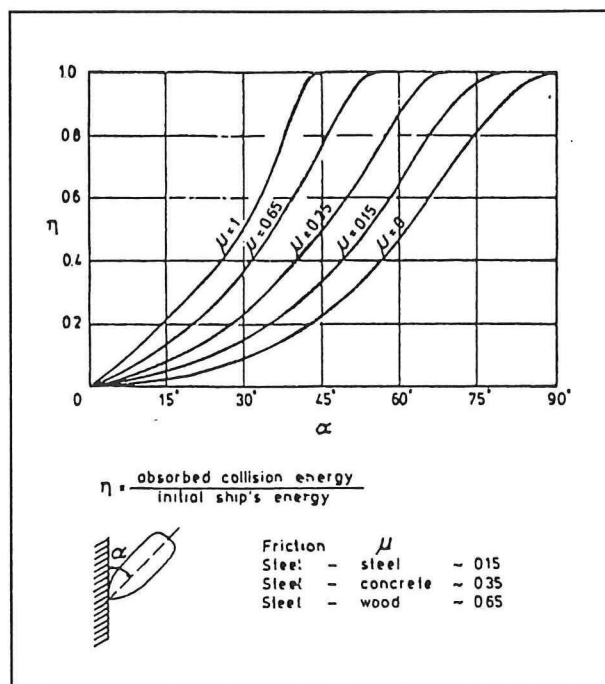
- 0.165 = waarde uit de tabel,
- 1.05 = hydrodynamische factor voor de langsbeweging,
- m = massa schip,
- v = snelheid schip voor de botsing.

De 'verloren' kinetische energie van het schip moet opgenomen worden door kreuken van het schip en schampen van het schip langs de wand. Door de hoeveelheid energie die door kreuken van het schip opgenomen dient te worden in het kracht-vervormingsdiagram te plaatsen wordt de aanvaringskracht verkregen (afb. 23).

β λ	0				0.02			
	μ α	0.2	0.35	0.5	μ α	0.2	0.35	0.5
0.45	20°	0.095	0.137	0.181	20°	0.099	0.143	0.19
	30°	0.189	0.260	0.336	30°	0.198	0.274	0.356
0.5	20°	0.082	0.119	0.157	20°	0.085	0.123	0.164
	30°	0.165	0.229	0.299	30°	0.172	0.24	0.316

8.2. Methode van Saul/Svensson

Voor deze methode wordt slechts het resultaat gegeven. Voor meer informatie over deze methode zie [3] en [15]. In onderstaande tabel wordt de 'op te nemen' vervormingsenergie weergegeven (als functie van de kinetische energie van het schip voor de botsing).



Afb. 30: Waarden voor η volgens Saul/Svensson

Voorbeeld:

Bij een botsing onder een hoek van 30° en voor een wrijvingsfactor van 0.35 is $\eta = 0.23$. Dit betekent dat $0.23 \cdot 1.05 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ door kreuken en schampen opgenomen dient te worden.

9. Omzetting kracht-wegdiagram

In het algemeen wordt voor aanvaringskrachten een statische equivalent gegeven (zie hoofdstuk 3 regelgeving).

Aangenomen dat de aangevaren constructie oneindig stijf is, wordt het mogelijk d.m.v. het kracht-vervormingsdiagram van het schip de tijdsafhakelijke belasting op de constructie te bepalen:

frontale aanvaring:

Het kracht-vervormingsdiagram voor een frontale aanvaring is nodig (afb. 31).

de differentiaalvergelijking:

$$M_{\text{schip}} \cdot u'' + R(u) = 0$$

u = samendrukking van het schip,
 u'' = versnellingsterm van u ,
 $R(u)$ = kracht-vervormingsdiagram van het schip.

kan opgelost worden met behulp van 2 beginvoorwaarden ($t=0$ sec.):

- de verplaatsing van het schip is nul,
- de snelheid van het schip is de aanvaringssnelheid.

De oplossing geeft de verplaatsing als functie van de tijd. Twee keer differentiëren geeft de versnellingen. Hieruit is het kracht-tijdverloop $F(t)$ te halen door vermenigvuldiging met de massa M . $F(t) = M \cdot u''(t)$

scheve aanvaring:

Het kracht-vervormingsdiagram voor een scheve aanvaring is hierbij nodig.

Er zijn drie bewegingen:

- u : beweging (samendrukking) in richting normaal pijler,
- u_T : beweging evenwijdig aan de pijler,
- ϕ : rotatie van het schip.

Uit onderzoek [8] werd aangetoond dat de verdraaiing van het schip en de hydrodynamische aspecten niet meegenomen hoefden te worden.

Er worden dan twee differentiaalvergelijkingen verkrijgen:

- $M \cdot u'' + R(u) = 0$
- $M \cdot u_T'' + R_T(u) = 0$

Bepaal $R_T(u)$ uit $R(u)$ door $R_T(u) = \mu \cdot R(u)$

Met μ = wrijvingsfactor (b.v 0.3).

Om de differentiaalvergelijking op te lossen zijn ook hier randvoorwaarden nodig.
op $t=0$ sec. :

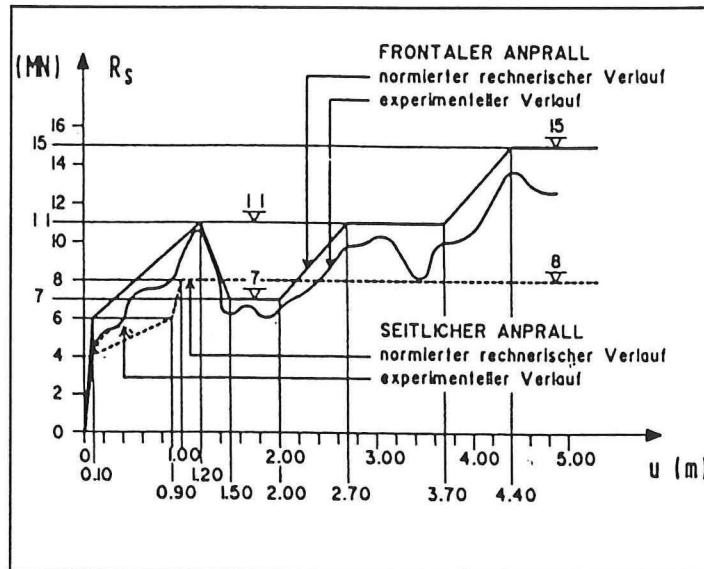
$$u = 0; u' = v_0 \cdot \sin \alpha$$

$$u_T = 0; u_T' = v_0 \cdot \cos \alpha$$

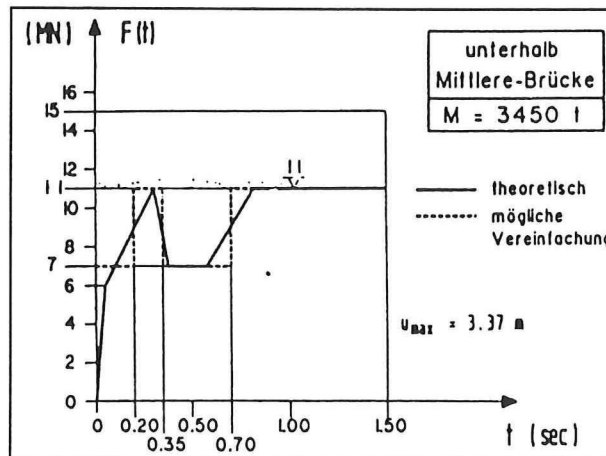
De tijdsafhankelijke belasting volgt uit:

$$F_N(t) = M \cdot u''$$

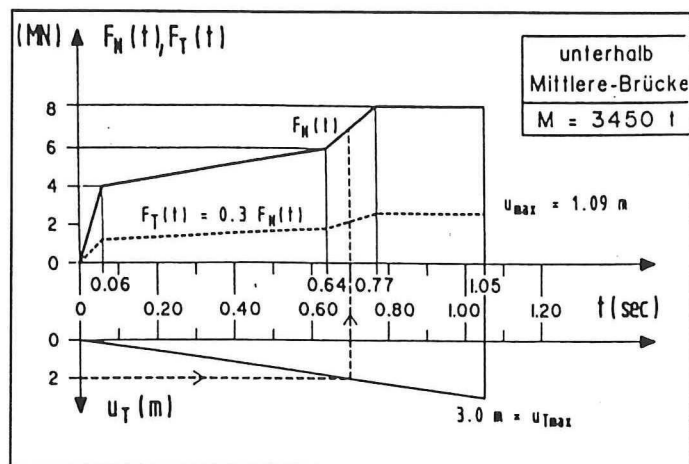
$$F_T(t) = \mu \cdot F_N(t)$$



Afb. 31: Kracht-weg diagram van het schip



Afb. 32: Stootfunctie voor een frontale botsing

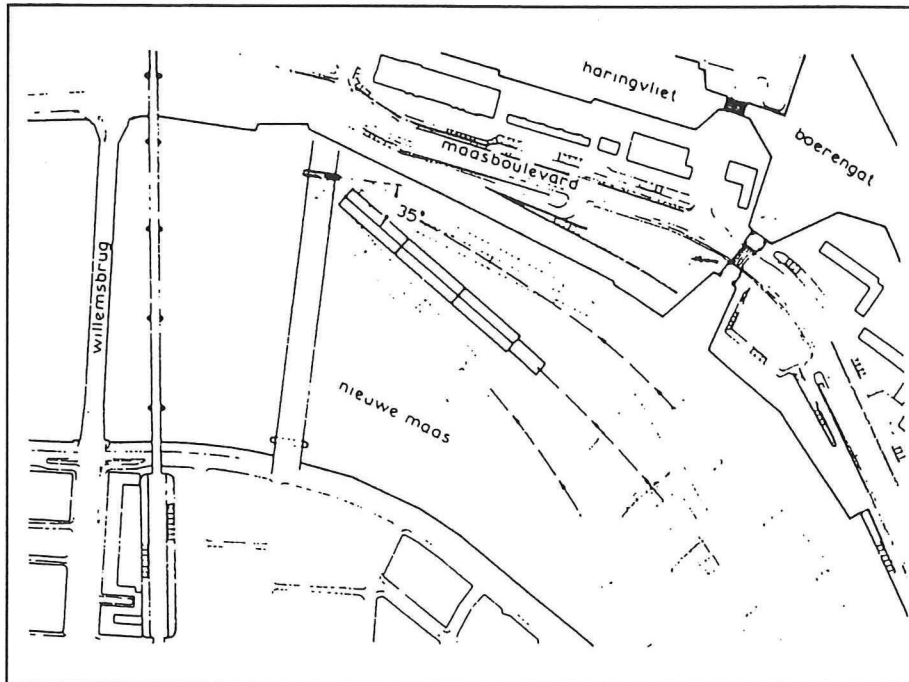


Afb. 33: Stoofunctie voor een scheve botsing

10. Projecten

10.1. Willemsbrug te Rotterdam (literatuurlijst [5])

Afb. 34 geeft de situatie weer ten tijde van de bouw van de Willemsbrug (midden jaren tachtig).



Afb. 34: Situatie pijler-noord in de Nieuwe Maas, mogelijke aanvaarhoeken

De zuidelijke pijler is opgenomen in de kade, waardoor aanvaringsrisico's uitgesloten worden. Voor de noordelijke pijler werd gekozen geen gebruik te maken van voorzieningen die de pijler tegen aanvaringen zouden kunnen beschermen. Dit had twee redenen:

- voorzieningen om een dwarsaanvaring tegen te gaan waren hinderlijk voor de scheepvaart.
- de afmetingen van de voorziening (een dukdalf) om een frontale aanvaring tegen te gaan waren zeer groot.

De aanvaringskrachten worden door de pijler opgenomen.

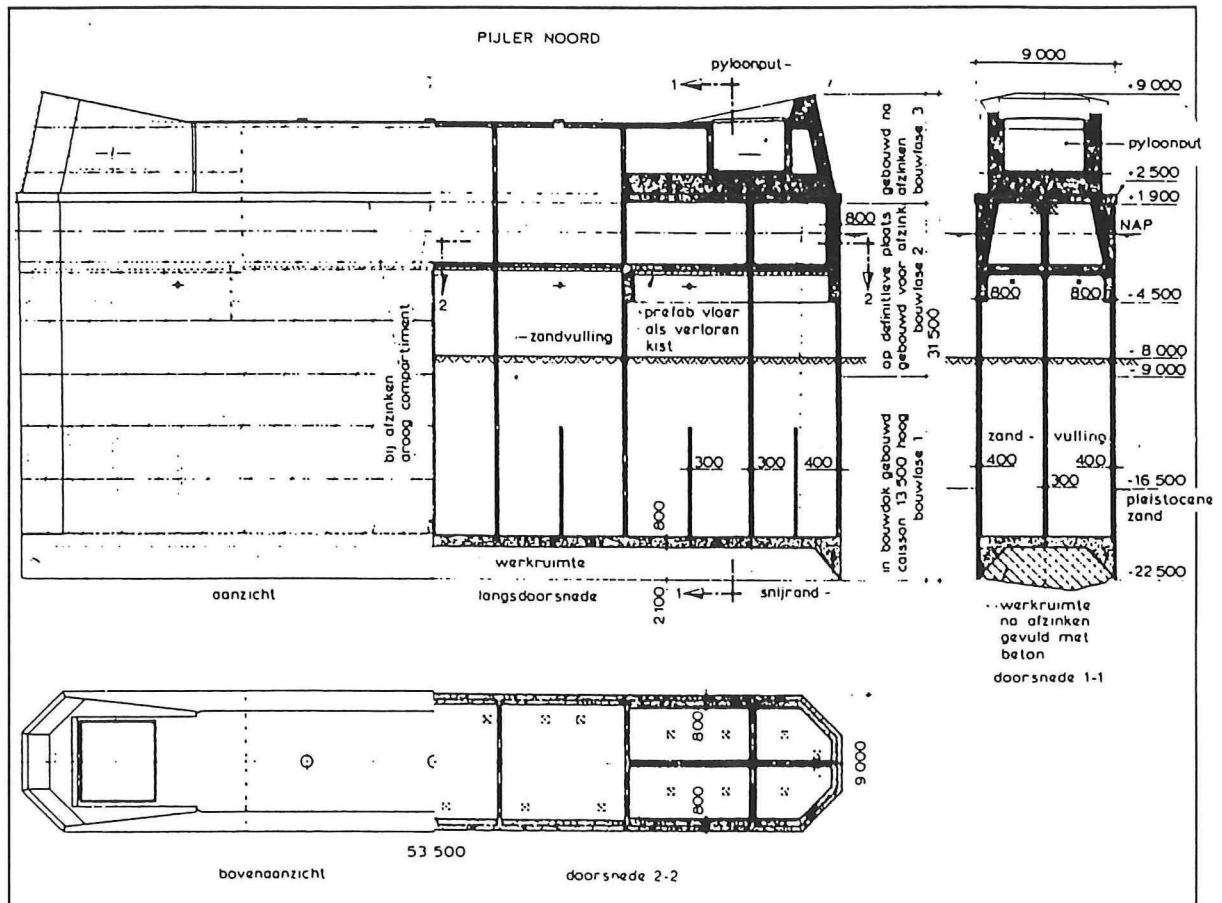
Uitgegaan werd dat alleen het schip energie opneemt. Deze energie wordt bepaald met de volgende formule: $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot C_m \cdot C_{br} \cdot C_E$

Hierbij is:

- m = massa schip,
- v = snelheid schip,
- C_m = factor die de hydrodynamische massa aangeeft,
 = 1 voor frontale aanvaring (geen hydr. massa)
 = $1 + 2D/B$ (uitdrukking van Vasco Costa)
 D = diepgang schip
 B = breedte schip

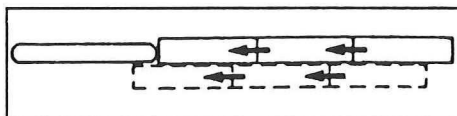
- C_{br} = factor die het breken van de koppelingen tussen de duwbakken aangeeft,
- C_E = factor die de hoeveelheid vervormingsenergie aangeeft, uitgedrukt in de kinetische energie van het schip voor de botsing,
 - = 1 voor een frontale botsing
 - = 0.138 voor een botsing onder een hoek van 35°

Hoe aan deze laatste waarde (0.138) gekomen wordt is niet duidelijk. Wellicht is gekozen voor een wand zonder wrijving. Dan komt C_E aardig overeen met de η van afb. 30.

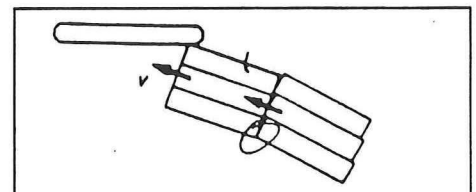


Afb. 35: Pijler Noord, overzicht van de constructie (caisson)

Bij duwbakken treedt een reductie op, omdat de koppeling tussen de bakken kapot gaat.



Afb. 36: frontale aanvaring met een duwbak



Afb. 37: Zijdelingse aanvaring met een duwbak

Voor een frontale aanvaring (afb. 36) is de reductiefactor $C_{br} = \frac{1}{2}$.

Voor een scheve aanvaring (afb. 37) is de reductiefactor $C_{br} = 0.75$. Een waarde zonder duidelijk fysische achtergrond.

Er werd gebruik gemaakt van twee typen schepen:

- duweenheid Europa IIA, bestaande uit 6 duwbakken,
- zandschip.

Kenmerken van de schepen:

	duweenheid	zandschip
breedte [m]	34.2 (afb. 37) (2*3 brede formatie) 22.8 m (afb. 36) (3*2 lange formatie)	12.6
diepgang [m]	4.0	4.7
waterverpl. (massa) [ton]	22000	5000
snelheid [m/s] t.o.v. bodem	4.72	2.78

Aanvaringsenergie

frontale aanvaring:

	snelh.	C_m	C_E	C_{br}	E [kNm]
duwcombinatie:	4.72	1	1	0.5	122500
zandschip:	2.78	1	1	1	19300

dwarsaanvaring:

	snelh.	C_m	C_E	C_{br}	E [kNm]
duwcombinatie:	4.72	1.23	0.138	0.75	10300
zandschip:	2.78	1.75	0.138	1	1540

Gebruik makend van de kracht-ervormingsdiagrammen in afbeelding 23, blz. 28 wordt de belasting gevonden bij een indringingsdiepte waarbij de 'gewenste' hoeveelheid energie is opgenomen.

Dit resulteert in een maximale aanvaringskracht. Deze wordt beschouwd als zijnde statisch. Op basis van de volgende aannamen kan deze statische belasting omgezet worden naar een representatieve belasting:

- de extreemheid van de aannamen (max.aanvaringssnelheid, zwaarste schepen)
- door de korte duur van de belasting zullen de materiaalsterkten hoger zijn dan de in rekening te brengen materiaalsterkte bij een statische belasting.

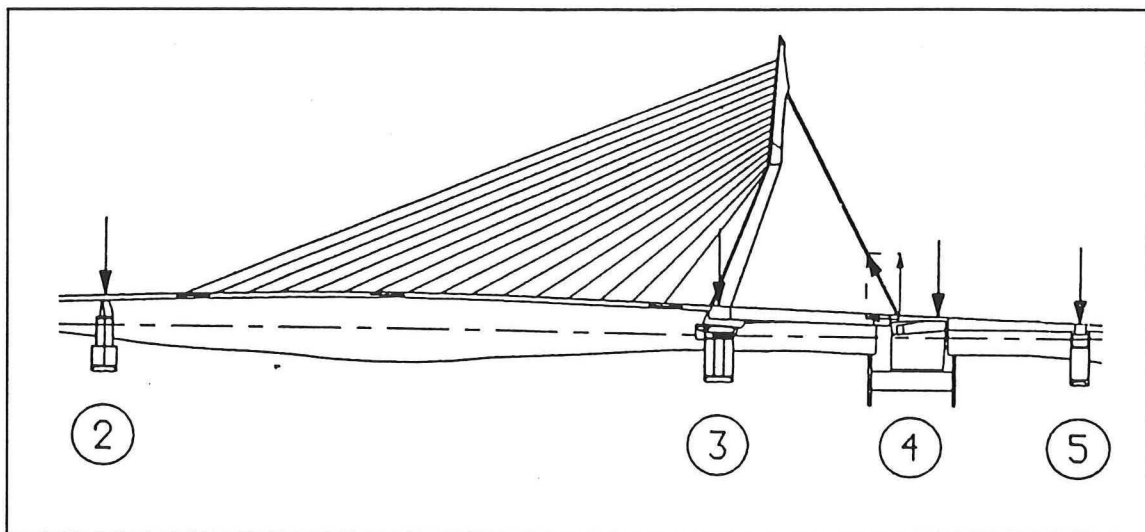
Hiermee kwam men op de volgende 'karakteristieke' statische aanvaringsbelastingen:

- frontale botsing: 17,5 MN
- dwarsaanvaring: 10 MN

Bij de dwarsaanvaring werd nog een wrijvingskracht meegenomen. Deze werd gebaseerd op een wrijvingscoëfficiënt van 0.5. Dit betekent een wrijvingskracht van $0.5 \cdot 10 \text{ MN} = 5 \text{ MN}$.

10.2. Erasmusbrug te Rotterdam (literatuurlijst [10,11,12,13])

Een overzicht van de Erasmusbrug wordt gegeven in afbeelding 38.



Afb. 38: Overzicht Erasmusbrug in Rotterdam

Voor het ontwerp van de onderbouw van de Erasmusbrug wordt deels teruggegrepen op het ontwerp van de onderbouw van de Willemsbrug en de daarbij gebruikte schepen (duweenheden en zandschepen).

Naast deze schepen wordt nog een ander schip in het ontwerp betrokken. Dit is de 'Bahrein'.

Bij een zijdelingse aanvaring van de pijlers 4 en 5 wordt voor de 'Bahrein' uitgegaan van een ontwerpsnelheid van 4 knopen ($\pm 2 \text{ m/s}$) en een aanvaarhoek van 8° .

Omdat de gegevens van de Willemsbrug gedeeltelijk zijn overgenomen komen de belastingen overeen.

Quasi-statische belastingen pijlers Erasmusbrug door een aanvaring:

Pijler	frontaal	zijdelingse	aanvaring
	F_x [MN]	F_x [MN]	F_y [MN]
2	17.5	5	10
3	30	5	10
4	30	5	10
5	17.5	5	10

De x-richting is evenwijdig aan de lengte-as van de pijler.
De y-richting staat loodrecht op de x-richting.

Door deze belasting zal de pijler 'verschuiven'. Aangenomen is dat de belasting aangrijpt op een hoogte van NAP +3.0 m. Dit levert dan de volgende verplaatsing van de opleggingen van de bovenbouw:

Pijler nr.	Horizontale deformatie	
	x-richting [mm]	y-richting [mm]
2	53	60
3	17	27
4	9	10
5	52	20

11. Literatuurlijst

- [1] Larsen, O.L.
Ship Collision with bridges,
Structural Engineering Documents 4,
International Association for Bridge and Structural,
Engineering.
1993.
- [2] Tollenaar, E.E.M.
Het ontwerp van een geprefabriceerde aanvaringsbestendige brugpijler,
Delft, maart 1986.
- [3] Joustra, N.D. / Pater, R.P.N.
Aanvaarbelasting door schepen op starre constructies.,
Delft, mei 1993.
- [4] CUR-werkgroep 3 "Aanvaringsbelasting",
Aanvaringsbelasting waterbouwkundige constructies,
Resultaten Enquete,
mei 1995.
- [5] Ontwerp Willemsbrug Rotterdam,
polytechnisch tijdschrift,
Bouwkunde, wegen-en waterbouw 36 (1981).
- [6] Nederlandse spoorwegen, afd. infrastructuur/betonbouw,
"Door schip op te nemen vervormingsenergie bij dwarsaanvaring",
Augustus 1984.
- [7] Eurocode 1, part 2.7
Accidental Actions, Background Document,
Augustus 1995.
- [8] Grob, J./ Hajdin, N.
Schiffsanprall,
Schweizer Ingenieur un Architekt. Nr 30/31, juli 1995.
- [9] Wagner, R.
Schiffsanfahrung an Brückenpfeiler,
"Vergleich Modellversuche- Havarie
Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstrassen.
Nr. 4, juli 1986, blz. 150-151.
- [10] Gemeentewerken Rotterdam ,
Ingenieursbureau Geotechniek en Milieu,
Geotechnische Aspecten, Erasmusbrug,
oktober 1994.

- [11] Gemeentewerken Rotterdam ,
Ingenieursbureau Geotechniek en Milieu,
Funderingsadvies pijler 5,
april 1994.

- [12] Gemeentewerken Rotterdam ,
Ingenieursbureau Utiliteits- en Waterbouw,
Erasmusbrug, Ontwerpnota IUW, deel A, Rivierpijlers.
juli 1993.

- [13] Gemeentewerken Rotterdam ,
Ingenieursbureau Utiliteits- en Waterbouw,
Erasmusbrug, Onwerpaspecten rivierpijlers
juni 1992.

- [14] CUR-rapport 57,
Dynamische problemen in de bouw,
december 1972.

- [15] Saul, R. / Svensson, H.
"On the theory of Ship Collision against Bridge Piers"
IABSE Periodica 2/1982, blz. 29-40.

Bijlage I**Serious Vessel Collision Accidents recorded in the Period 1960-1991**

1960 Severn River Railway Crossing, England

Vessel : Tug pulling two barges each 450 tonnes displacement
Accident : Broadside collision with pier
Damage : Two spans and one supporting pier collapsed causing five fatalities
Cause : Tug pilot's negligence in dense fog
Lit. : Peter Mason: "An investigation into the cause of damage to the Severn Railway Bridge". The Structural Engineer No. 2, 1963

1964 Maracaibo Lake, Venezuela

Vessel : 36,000 DWT loaded tanker
Accident : Broadside collision with two piers more than 600 m from the navigational spans
Damage : Three spans collapsed
Cause : Failure in electrical system affecting steering gear
Lit. : Engineering News Record, 1964-04-16 and 1964-12-24

1964 Pontchartrain Lake, Louisiana, USA

Vessel : Tug towing two loaded barges
Accident : Three trestles were struck by the tug and the two barges
Damage : Four spans collapsed, causing six fatalities
Cause : Helmsman's lack of attention
Lit. : Engineering News Record, 1964-06-25

1964 Pontchartrain Lake, Louisiana, USA

Vessel : Tug towing two barges
Accident : Tug hit a pile bent
Damage : One pile bent was destroyed and two spans collapsed
Cause : Tug pilot's inattention (possibly asleep)
Lit. : Engineering News Record, 1964-07-30

1967 Chesapeake Bay, Virginia, USA

Vessel : Drifting coal barge
Accident : Vessel thrown repeatedly against the bridge deck
Damage : Six spans were seriously damaged
Cause : Barge torn loose from moorings in storm
Lit. : Engineering News Record, 1967-12-14

1970 Chesapeake Bay, Virginia, USA

Vessel : 10,000 DWT US-navy cargo ship
Accident : 1 hour battering against the bridge
Damage : Five spans knocked down and 11 other spans damaged
Cause : Vessel torn loose in stormy weather
Lit. : Engineering News Record, 1970-01-29 and 1970-03-12

1972 Chesapeake Bay, Virginia, USA

Vessel : Drifting barge
Accident : Barge thrown repeatedly against the bridge deck
Damage : Two spans partially collapsed and five other spans were damaged
Cause : Towline to tug broken in heavy wind
Lit. : Engineering News Record, 1972-09-28

1972 Brunswick River, Georgia, USA

Vessel : 13,000 DWT freighter
Accident : The superstructure hit by the bow of the ship
Damage : Three spans collapsed, causing ten fatalities
Cause : The helmsman misunderstood the pilot's instructions
Lit. : US National Transport Safety Board and US Coast Guard:
"SS African Neptune collision with the Sidney Lanier
Bridge", Marine Accident Report, 1973

1974 Pontchartrain Lake, Louisiana, USA

Vessel : Tug pulling four empty barges
Accident : Tug hit pier some way from navigation span
Damage : Two pile bents were damaged and three spans collapsed,
causing three fatalities
Cause : Tug pilot asleep
Lit. : Engineering News Record, 1974-08-08

1974 Welland Canal, Ontario, Canada

Vessel : Ore carrier (length: 204 m)
Accident : Ship rammed lifting span while opening
Damage : Lift span fell in canal and lift towers were damaged
Cause : Unknown
Lit. : Engineering News Record, 1974-08-29 and 1974-09-12

- 1975 Derwent River, Hobart, Tasmania, Australia
- Vessel : 7,200 DWT bulk carrier
Accident : Head-on and broadside collision with two piers
Damage : Three spans collapsed, causing 15 fatalities
Cause : Loss of steering ability due to engine failure
Lit. : Engineering News Record, 1975-01-09 and 1975-01-16
- 1975 Fraser River, New Westminster, British Columbia, Canada
- Vessel : Barge in ballast (length: 183 m)
Accident : Barge hit the bridge superstructure
Damage : One 120 m span collapsed
Cause : Barge tore loose from mooring in heavy rainstorm
Lit. : Canadian newspaper "Vancouver Sun", 1975-12-27
- 1976 Pass Manchac Channel, Louisiana, USA
- Vessel : Barge towed by a tug
Accident : Barge hit a pile bent
Damage : Pile bent destroyed and three spans collapsed, causing at least one fatality
Cause : Barge off course due to careless navigation
Lit. : Engineering News Record, 1976-09-23
- 1977 James River, Hopewell, Virginia, USA
- Vessel : 25,000 DWT tanker in ballast
Accident : The stem of the ship destroyed a pier bent about 120 m from the navigational span centerline
Damage : Two spans collapsed
Cause : Electrical fault in steering gear
Lit. : US National Transport Safety Board: "US Tank Ship SS Marine Floridian, Collision with Benjamin Harrison Memorial Bridge", Marine Accident Report, 1978
- 1977 Passaic River, Union Avenue, New Jersey, USA
- Vessel : Empty oil barge
Accident : Collision with a pier
Damage : Two spans collapsed
Cause : Broken towline to tug
Lit. : Engineering News Record, 1977-08-05
-

-
- 1977 Gothenburg Harbour, Tingstad, Sweden
- Vessel : 1600 DWT gas tanker in ballast
 - Accident : Ship hit approach spans
 - Damage : Two approach spans destroyed
 - Cause : Electrical fault in steering gear
 - Lit. : Danish newspaper POLITIKEN, 1977-09-11
- 1978 Berwick Bay, Southern Pacific Railroad, Louisiana, USA
- Vessel : Tug pushing four barges
 - Accident : Lead barge hit the side span bridge superstructure
 - Damage : One 70 m steel span fell into water and sank
 - Cause : Tug skipper navigating with underpowered tow
 - Lit. : US National Transport Safety Board: "Collision of M/V Stud with the Southern Pacific Railroad Bridge...", Marine Accident Report, 1980
- 1979 Second Narrows Railway Crossing, Vancouver, Canada
- Vessel : 22,000 DWT bulk carrier
 - Accident : Stem of ship struck the superstructure in side span about 100 m from the navigational span centre line
 - Damage : One span collapsed
 - Cause : Captain's misjudgment of land marks due to dense fog
 - Lit. : New Civil Engineer International, June 1980
- 1980 Tjörn, Almö Sound, Sweden
- Vessel : 27,000 DWT product carrier in ballast
 - Accident : Deck house of ship struck the arch structure near the foundation on shore, about 100 m from the navigation channel centre line
 - Damage : Total collapse of the main span causing eight fatalities
 - Cause : Steering difficulties in rough weather and dense fog due to reduced engine power
 - Lit. : Statens Havarikommission: "Utredningsrapport beträffande... Star Clippers påsegling af Almöbroen...", Stockholm, April 1981
- 1980 Tampa Bay, Sunshine Skyway, Florida, USA
- Vessel : 35,000 DWT bulk carrier in ballast
 - Accident : Stem of ship struck bridge column above pier top about 250 m from navigational channel
 - Damage : Three spans collapsed, causing 35 fatalities
 - Cause : Pilot's careless navigation in rough weather with reduced visibility
 - Lit. : US National Transport Safety Board: "Ramming of the Sunshine Skyway Bridge", Marine Accident Report, 1981
-

- 1981 Narragansett Bay, Newport, Rhode Island, USA
Vessel : 45,000 tonnes displacement tanker
Accident : Ship struck main tower pier of suspension bridge head-on at 3 m/sec velocity
Damage : Only superficial damage although the collision force substantially exceeded the design force
Cause : Pilot's careless navigation in dense fog
Lit. : T.R. Kuesel: "Newport Bridge Collision", IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Copenhagen, 1983
- 1982 Mosel River, Richemont Gas Pipeline, France
Vessel : Tug pushing two barges
Accident : Barge struck bridge pier
Damage : One pier was destroyed resulting in collapse of the gas pipeline causing seven fatalities
Cause : Tug pilot's careless navigation in dense fog
Lit. : French newspaper "Le Figaro", 1982-01-18
- 1982 Mississippi River, Hannibal, Missouri, USA
Vessel : Tug pushing 15 barges
Accident : Barges struck abutment while passing swing span, lost control and tug swung into approach span
Damage : One approach span collapsed
Cause : Careless navigation
Lit. : Engineering News Record, 1982-05-13
- 1983 Sentosa Aerial Tramway, Singapore
Vessel : Petroleum drill ship with 69 m high mast
Accident : Ship drifted into tramway and the mast severed the aerial cables of the tramway
Damage : Two tramway cars fell into harbour causing seven fatalities
Cause : Tow line failed when ship was warped out of berth by tug
Lit. : Local newspapers

- 1983 Volga River Railway Crossing, Ulyanovsk, Russia
- Vessel : Passenger vessel "Alexander Suwarow"
 - Accident : Vessel strayed off course and ran too close to the support column for the arch bridge and the upper deck of vessel collided with bridge superstructure
 - Damage : The deckhouse of the vessel, including a film hall, was torn off causing approx. 170 fatalities
 - Cause : Captain's careless navigation
 - Lit. : European newspapers, June 1983
- 1990 Herbert C. Bonner Bridge, North Carolina, USA
- Vessel : Hopper dredge "Northerly Isle" (length: 60 m)
 - Accident : Vessel drifted into the substructure of the bridge
 - Damage : 4 pile bents were demolished and five spans collapsed
 - Cause : The vessel dragged its anchors during a storm
 - Lit. : Engineering News Record, 1990-11-01
- 1990 Tosterö, Strängnäs, Sweden
- Vessel : Freighter "Arosandra" (length: 60 m)
 - Accident : Vessel struck the swing span support pier and side span superstructure
 - Damage : The pier was displaced and the bridge superstructure in side span was partly torn down
 - Cause : Captain's careless navigation due to drunkenness
 - Lit. : Local newspapers
- 1991 Carnafuli River, Chittagong, Burma
- Vessel : Unknown
 - Accident : Vessel drifted into the superstructure of the bridge
 - Damage : One superstructure span torn down
 - Cause : Vessel lost control due to cyclone
 - Lit. : Personal Communication from Dr. Y. Fujii, Dec. 1991
- 1991 Hamburg Harbour, Kattwyk, Germany
- Vessel : 21,450 tonnes freighter "Stanislaw Kulczynski"
 - Accident : Freighter under tow by three tugs in dense fog lost control and crashed into the side span of the lift bridge
 - Damage : The side span fell into the river and one of the lift towers was seriously damaged
 - Cause : The vessel lost control due to loss of one of the three tow lines
 - Lit. : Construction Today, Oct. 1991
-

