

# DYNAMISCH GEDRAG VAN WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES

## DEEL B CONSTRUCTIES IN GOLVEN

**B I D O C**

(bibliotheek en documentatie)



Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT  
Tel. 015 - 2518 363/364

P.A. KOLKMAN &  
T.H.G. JONGELING



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

## TEN GELEIDE

Al tientallen jaren wordt er in Nederland aandacht besteed aan het dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies. In de civiele techniek is de aandacht voor de dynamica niet altijd vanzelfsprekend geweest. Vroeger waren civiele constructies zwaar en stijf. De voortschrijdende technische ontwikkelingen hebben de mogelijkheden om slanker en lichter te bouwen sterk vergroot. Daardoor zijn de constructies ook gevoeliger geworden voor dynamische belastingen. Door het bezwijken van een aantal civieltechnische constructies door dynamisch gedrag is het besef gegroeid dat dynamisch gedrag ook binnen de civiele techniek een belangrijk fenomeen is.

*In deze eeuw is door de bouw van diverse grote kunstwerken in Nederland veel ervaring opgedaan met het dimensioneren op dynamisch gedrag van grote constructies. Het ziet er naar uit dat de komende jaren in Nederland beduidend minder op dit terrein zal gebeuren. Hierdoor ontstaat het gevaar dat opgedane kennis verloren zal gaan. Dit is niet wenselijk met het oog op het beheer en onderhoud van bestaande constructies.*

Rijkswaterstaat heeft dr. ir. P.A. Kolkman gevraagd een boek samen te stellen, waarin de kennis die is opgedaan op een toegankelijke manier wordt weergegeven. Hij heeft dit met veel elan en enthousiasme uitgevoerd, in samenwerking met ir. T.H.G. Jongeling van het Waterloopkundig Laboratorium. Dit boekwerk is bestemd voor jonge ontwerpers en adviseurs binnen Rijkswaterstaat.


*Voor iedere ontwerper op dit gebied, en ook anderen die geïnteresseerd zijn in de dynamica van constructies, vormt het een nuttig naslagwerk, dat naast veel gedetailleerde 'know-how' ook een goed overzicht geeft van de technieken die beschikbaar zijn.*

*Ik ben er van overtuigd dat het boekwerk in de toekomst ontwerpers en andere betrokkenen goede diensten zal bewijzen.*

ir. G. Blom

Directeur-Generaal Rijkswaterstaat

**B I D O C**  
(bibliotheek en documentatie)

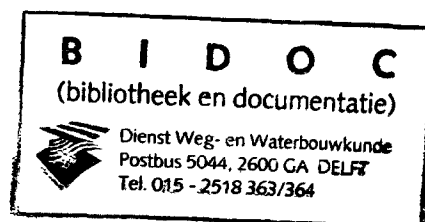


Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT  
Tel. 015 - 2518 363/364

- 1 NOV. 2000

# DYNAMISCH GEDRAG VAN WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES

## DEEL B CONSTRUCTIES IN GOLVEN



P.A. KOLKMAN &  
T.H.G. JONGELING



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

## Uitgave

Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Delft, november 1996

## Ontwerp, eindredactie en realisatie

Van Hasselt Van Everdingen & Partners  
Den Haag

## Druk

NKB Offset  
Bleiswijk

# INHOUDSOPGAVE DEEL B

<b>NOTATIES DEEL B</b>	3
<b>1 INLEIDING</b>	5
<b>2 GOLVEN</b>	7
2.1 Golfverschijnselen	7
2.2 Windgolven	10
2.2.1 Golfkarakteristieken	10
2.2.2 Windgolven als stochastisch proces	12
2.2.3 Reflectie, refractie en diffractie	16
2.2.4 Voorspelling van windgolven	18
<b>3 GOLFBELASTINGEN</b>	19
<b>4 QUASI-STATISCHE GOLFBELASTING</b>	22
4.1 Analytische berekening	22
4.1.1 Slanke constructies	23
4.1.2 Niet-slanke constructies	28
4.2 Numerieke berekening	30
4.3 Schaalmodelonderzoek	30
4.4 Invloed van stroming	31
4.5 Responsie van constructies op quasi-statische golfbelasting	31
<b>5 GOLFKLAPBELASTING</b>	33
5.1 Golfklappen in relatie tot de constructie	33
5.2 Golfklapkarakteristieken	35
5.3 Invloedsfactoren	37
5.4 Typering van de golfklappen	38
5.5 Analytische berekening van klapdrukmaxima	39
<b>6 RESPONSIE VAN CONSTRUCTIES OP GOLFKLAPPEN</b>	45
6.1 Van belang zijnde eigenschappen van de constructie	45
6.2 Responsie van een enkelvoudig massaveersysteem op een stootbelasting	46
6.3 Invloed van de responsie op de klapbelasting	49
<b>7 ERVARINGEN MET GOLFKLAPPEN IN PROTOTYPE EN MODEL</b>	51
7.1 Stormvloedkering Oosterschelde. Roosterbalkontwerp (schaalmodelstudie)	51
7.2 Stormvloedkering Oosterschelde. Caissonontwerp (schaalmodelstudie)	53
7.3 Stormvloedkering Oosterschelde. Ontwerp met pijlers en hefschuiven (modelstudies en prototypemetingen)	55

7.4	Spuisluis Haringvliet (schaalmodelstudies en prototypemetingen)	58
7.5	Koelwaterinlaat van Alto Lazio kernenergiecentrale (modelstudie)	60
7.6	Civitavecchia caisson breakwater (modelstudie)	62
7.7	Asfalttalud (modelstudie)	64
<b>8</b>	<b>ALGEMENE RICHTLIJNEN BIJ HET ONTWERPEN</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>68</b>
9.1	WL-rapporten	68
9.2	Overige literatuur	71
	<b>INDEX OP ONDERWERP (DEEL B)</b>	<b>74</b>

# NOTATIES DEEL B

- A = golfamplitude (m)  
A = door golfklap aangevallen oppervlak van een constructie (m<sup>2</sup>)  
A<sub>n</sub> = golfamplitude van de n<sup>e</sup> golfcomponent (m)  
c = loopsnelheid golf (m/s)  
c<sub>c</sub> = voortplantingssnelheid schokgolf in het constructiemateriaal (m/s)  
C<sub>d</sub> = weerstandscoefficiënt (Engels: dragcoëfficiënt)  
C<sub>m</sub> = massatraagheidscoëfficiënt  
c<sub>s</sub> = slammingcoëfficiënt  
c<sub>w</sub> = voortplantingssnelheid schokgolf in het water (m/s)  
c<sub>0</sub> = waarde van de slammingcoëfficiënt op het moment dat de golf de constructie net raakt  
d = waterdiepte (m)  
D = afmeting van de constructie (m)  
D(f) = frequentieafhankelijke richtingsverdelingsfunctie  
E = golfenergie per (van bovenaf gezien) eenheid van oppervlak (N/m)  
E = elasticiteitsmodulus van het constructiemateriaal (N/m<sup>2</sup>)  
E(f) = frequentieafhankelijke golfenergie (N/m)  
E<sub>i</sub>(f) = frequentieafhankelijke energie van de inkomende golf  
f = golffrequentie (s<sup>-1</sup>)  
f<sub>p</sub> = (piek)frequentie waar het golfspectrum zijn maximale waarde heeft (s<sup>-1</sup>)  
F = kracht (N)  
F<sub>0</sub> = maximale waarde van F tijdens de golfklap (N)  
g = zwaartekrachtversnelling (m/s<sup>2</sup>)  
H = golfhoogte (top-dalwaarde) (m)  
H<sub>rms</sub> = standaarddeviatie (root-mean-square) van de golfhoogte (m)  
H<sub>s</sub> = significante golfhoogte (m)  
I = impulsinhoud van de golfklap (Ns)  
k = golfgetal = 2π/L (m<sup>-1</sup>)  
k = klapdrukcoëfficiënt bij het lineaire schokgolfmodel  
k = veerstijfheid (N/m)  
k = maat voor wandruwheid (m)  
K = compressiemodulus (N/m<sup>2</sup>)  
K = KC = Keulegan-Carpentergetal = u<sub>m</sub> T/D  
L = golflengte (m)  
m = massa (kg)  
m = massa van het water dat bij de golfklap betrokken is (kg)  
m<sub>0</sub> = oppervlakte golfspectrum  
p = waterdruk (N/m<sup>2</sup>)  
p<sub>0</sub> = waterdruk voordat de golfklap optreedt (N/m<sup>2</sup>)  
p(H) = kansdichtheidsfunctie van de golfhoogte  
r = reflectiecoëfficiënt  
r(f) = frequentieafhankelijke reflectiecoëfficiënt  
Re = Reynoldsgetal = vD/ν  
s = indompelingsdiepte bij een vallend voorwerp (m)  
S = Strouhalgetal = dimensieloos gemaakte excitatiefrequentie van stromende vloeistof = fD/v



$t$	=	tijd (s)
$t_s$	=	stijgtijd bij een golfklap (s)
$T$	=	golfteriode (s)
$T$	=	eigenperiode van een massaveersysteem (s)
$T_k$	=	periode van drukoscillaties in de dalende flank van een golfklap (s)
$T_p$	=	dominante golfteriode (piekperiode)
$u_m$	=	horizontale orbitaalsnelheid (m/s)
$v$	=	watersnelheid (m/s)
$v_0$	=	aankomende snelheid van het water (voordat de golfklap ontstaat) (m/s)
$V$	=	volume van de constructie (m <sup>3</sup> )
$x$	=	horizontale coördinaat in de looprichting van de golf (m)
$x$	=	uitwijking van de constructie in x-richting (m)
$z$	=	coördinaat in verticale richting (ten opzichte van het ongestoorde wateroppervlak) (m)
$\alpha$	=	coëfficiënt
$\gamma(f)$	=	frequentieafhankelijke versterkingsfactor
$\gamma_p$	=	piekversterkingsfactor
$\eta$	=	waterspiegeluitwijking (m)
$\Theta$	=	hoek ten opzichte van de hoofdgolfrichting (rad)
$\kappa$	=	compressibiliteit = K <sup>-1</sup> (zie bij K) (m <sup>2</sup> /N)
$\rho$	=	dichtheid (soortelijke massa) van de vloeistof (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_c$	=	dichtheid (soortelijke massa) van de constructie (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	=	vormfactor van een spectrum
$\tau$	=	klapduur (s)
$\nu$	=	kinematische viscositeit van de vloeistof (m <sup>2</sup> /s)
$\phi$	=	fasehoek (rad)
$\phi_n$	=	fasehoek (rad) van de n <sup>e</sup> golfcomponent (rad/s)
$\omega$	=	eigen(hoek)frequentie van een massaveersysteem (rad/s)
$\omega$	=	golffrequentie (hoekfrequentie) (rad/s)
$\omega_n$	=	hoekfrequentie van de n <sup>e</sup> golfcomponent (rad/s)

# 1 INLEIDING

Deel B van het handboek is grotendeels gewijd aan golfklappen en de responsie van een constructie op golfklappen. Golfklappen geven per definitie een stootvormige belasting; afhankelijk van de dynamische eigenschappen van de constructie kan de klapbelasting tot een sterkere maar ook tot een zwakkere responsie aanleiding geven dan een statische belasting met een grootte gelijk aan de amplitude van de klapbelasting. Met andere woorden: de dynamische vergrotingsfactor kan groter of kleiner dan één zijn.

Tal van factoren zijn van invloed op het optreden van golfklappen, op de grootte van de klapdrukken en op het verloop van de klap in tijd en ruimte. De belangrijkste factoren zijn de geometrie van de constructie, de lokale golf- en stromingscondities en de vorm van de individuele golf (hierin speelt ook de 'voorgeschiedenis' mee, dit wil zeggen de beïnvloeding van de inkomende golf door voorgaande golven). Ook kunnen luchtinsluitingen een belangrijke rol spelen zowel in de grootte van de belasting als in de responsie. Een golfklap is een verschijnsel dat zich nooit precies herhaalt en is ook daarom een bijzonder soort belasting.

De door wind gegenereerde golven worden onderscheiden in lokaal opgewekte golven (windgolven) en golven die het restant zijn van elders opgewekte golven (deiningsgolven). Voor de ontwikkeling van windgolven van enige importantie is een redelijk grote strijklengte voor de wind vereist. Constructies waar windgolven en deiningsgolven op werken, zijn dus typisch constructies in of aan de rand van een groot water, of constructies aan water dat in verbinding staat met een groot wateroppervlak. Voorbeelden van dergelijke constructies zijn: dijken, havenhoofden, golfbrekers, stormvloedkeringen, uitwateringssluizen en offshore constructies.

In het navolgende wordt een introductie gegeven in golfverschijnselen en meer in het bijzonder in windgolven. Hierbij komen ook begrippen als refractie, diffractie en reflectie aan de orde. Deze introductie is opgenomen vanwege het belang van een goede reproductie van inkomende golven bij een schaalmodelonderzoek gericht op golf(klap)belastingen.

Vervolgens wordt ingegaan op de belastingen voortvloeiend uit golven. Onderscheid wordt gemaakt in quasi-statische belastingen en golfklapbelastingen. De duur van de golfklapbelastingen is een orde kleiner dan die van de quasi-statische belastingen en de klapbelasting is dus slechts een klein deel van de golfperiode werkzaam. Er wordt ingegaan op golfklapkarakteristieken, op de modelvorming voor golfklapbelastingen en op factoren, met name lucht, die van invloed zijn op de klapbelasting. Aan de hand van een enkelvoudig massaveersysteem wordt de responsie op een golfklap besproken. Evenals bij stromingsgeïnduceerde trillingen het geval is, genereren de door golfklappen opgewekte, uitdempende trillingen interactiekrachten (hydrodynamische traagheidskrachten en dempingskrachten).

Voor een aantal geselecteerde constructies worden vervolgens de bij het WL opgedane ervaringen met golfklappen weergegeven. Het blijkt dat bij een waterbouwkundige constructie de golfklapdrukken (gemiddeld over een oppervlak van enkele vierkante meters groot) kunnen oplopen tot 100 à 200 kN/m<sup>2</sup>; lokaal kunnen echter veel hogere drukken ontstaan tot, 300 à 400 kN/m<sup>2</sup>. De klapduur ligt typisch tussen 10 en 100 ms, maar uitschieters, vooral naar beneden, zijn ook mogelijk.

Op basis van de ervaringen worden enkele algemene ontwerprichtlijnen geformuleerd. Meer gedetailleerde adviezen zijn vrijwel alleen mogelijk aan de hand van een zorgvuldig uitgevoerd schaalmodelonderzoek.

Deel B van het handboek wordt, ten slotte, gecompleteerd met een literatuurlijst.

## 2 GOLVEN

### 2.1 GOLFVERSCHIJNSELEN

De bewegingen van golven in water met een vrij vloeistofoppervlak worden gedomineerd door de zwaartekracht. Om deze bewegingen te laten ontstaan is energietoevoer nodig. In de natuur zorgt wind voor energietoevoer; wind is daarmee de belangrijkste oorzaak van golfopwekking, maar in de waterbouwkunde zijn kunstmatig opgewekte golven, bijvoorbeeld haalgolven bij varende schepen, evenzeer van belang.

Zijn de golven eenmaal opgewekt, dan is er ter plaatse van de golftoppen een hogere en ter plaatse van de golfdalen een lagere, met de zwaartekracht samenhangende potentiële energie aanwezig. In het vervormde wateroppervlak is bovendien nog een hoeveelheid potentiële energie aanwezig die is gerelateerd aan de oppervlaktetspanning van het water. Deze component is overigens alleen van belang bij kleine rimpelingen in het water, dit wil zeggen bij grote kromming van het waterspiegeloppervlak; bij grotere golven is hij volledig verwaarloosbaar ten opzichte van de zwaartekrachtcomponent. Tussen de gebieden met hoge en lage potentiële energie vindt continu uitwisseling van energie plaats door omzetting van potentiële in kinetische energie.

Bij beschouwing van een golfveld lijkt er een volkomen wanorde te zijn; desondanks zijn er karakteristieke grootheden te definiëren en is het veelal mogelijk een benaderende, mathematische beschrijving te geven van het golfveld.

Individuele golven worden gekenmerkt door een periode, een hoogte, een voortplantingssnelheid en een voortplantingsrichting. Wanneer de golfperiode als vergelijkingsmaatstaf wordt genomen, dan blijkt er een grote variatie te zijn in golven die in de natuur voorkomen. Van kort naar lang zijn dit:

- Windgolven. Deze ontstaan doordat wind langs het waterspiegeloppervlak strijkt. Van belang hierbij zijn de windsterkte, de duur van de windbelasting, de strijklengte en de (variatie in de) windrichting. Initieel ontstaan er rimpelingen in het water door wrijving van de wind over het water. Wanneer zich kleine golfjes gevormd hebben, gaat de golfvorm ook een rol spelen in het opwekkingsproces. Aan de loefzijde van de golf ontstaat een overdruk en aan de lijzijde een onderdruk, waardoor er een resulterende kracht werkzaam is in de voortplantingsrichting van de zich ontwikkelende golf. De golfhoogte, de golflengte en de golfperiode, nemen toe. De periode van windgolven op zee ligt typisch in het gebied tot circa 10 s; op binnenwateren met een beperkte strijklengte en met minder hoge windsnelheden dan op zee is de golfperiode veelal niet hoger dan 3 à 5 s. Windgolven op zee worden gewoonlijk aangeduid met zeegang.
- Deining. Deze bestaat uit golven die het restant zijn van windgolven; deze golven kunnen uit een windveld elders zijn weggelopen of het overblijfsel zijn van golven nadat de wind is geluwd. Kenmerkend is dat ze niet meer onderhevig zijn aan de inwerking van de wind. Als de wind wegvalt, verliezen de golven energie door wrijving (inwendige wrijving, wrijving met de lucht en met de bodem). Ook wordt de golfenergie over een groter gebied verspreid doordat de golven uitwaaiëren (richtingdispersie) en doordat langere golven (op diep water)

sneller lopen (frequentiedispersie). De laatste twee factoren zorgen er in feite voor dat er per eenheid van oppervlak minder golfenergie overblijft.

In een deiningsveld gaan de langere golven - vanwege hun hogere loopsnelheid - voorop, gevolgd door de kortere golven. Omdat de kortere golven er langer over doen om hetzelfde punt te bereiken, is het energieverlies bij de kortere golven relatief groter, waardoor op den duur de langere golven overblijven. Opmerkelijk is overigens dat de golflengte en de golfperiode kunnen groeien tijdens het weglopen van de golven. Deiningsgolven kunnen daardoor een periode hebben oplopend tot zo'n 30 s.

Als gevolg van frequentiedispersie en richtingdispersie vertonen deiningsgolven een regelmatig beeld dan windgolven.

- Seiches. Waterstandvariaties met een relatief korte duur die echter ook wel periodiek kunnen zijn, komen op zee en langs de kust voor. De periodieke waterstandvariaties, bui-oscillaties genaamd, kunnen enerzijds opgevat worden als een tijdelijke waterstandverandering, maar anderzijds ook als een lange golf. Ze worden op zee gevormd als gevolg van grootschalige luchtdrukschommelingen die doorgaans optreden bij een stormdepressie. Men spreekt van buistoten als het gaat om een enkele verstoring van de waterspiegel.

De golfperiode van bui-oscillaties en -stoten ligt tussen 10 minuten en 1 uur. Havenbekkens en estuaria kunnen gevoelig zijn voor opslingering bij dergelijke lange golven. Als voorbeeld kan het havenbekken van IJmuiden genoemd worden, dat een eigenperiode van 35 minuten heeft.

Deze opslingeringen (lange staande golven) in een (deels) afgesloten waterbekken worden seiches genoemd. Zij kunnen bijvoorbeeld ontstaan door bui-oscillaties of -stoten. Doorgaans zijn de seiches nog lange tijd aanwezig nadat de oorzaak al is verdwenen.

- Getijden. Dit zijn zeer lange golven (dat wil zeggen golven met lange periode) opgewekt door wisselwerkingen tussen de zwaartekrachtsvelden van aarde, maan en zon. De periode is ruim twaalf uur aan de Nederlandse kust.
- Stormvloed. Dit zijn eveneens zeer lange golven die ontstaan onder invloed van meteorologische verschijnselen. De tijdsduur van deze niet-periodieke golven ligt in de orde van één à enkele dagen.
- Hoogwatergolven op rivieren. Deze ontstaan na langdurige regenval in het stroomgebied van de rivier en kunnen dagen tot weken aanhouden. De loopsnelheid van deze golven is een factor 1,5 groter dan de profielgemiddelde stroomsnelheid.
- Translatiegolven. Deze ontstaan bijvoorbeeld wanneer een schuif onder verval wordt getrokken. Benedenstrooms ontstaat een positieve golf, bovenstrooms een negatieve golf (een waterspiegelverlaging, die zich in bovenstroomse richting verplaatst). Het front van de translatiegolf plant zich voort met een snelheid:

$$v_t = \sqrt{gd} \tag{B2.1}$$

met  $d$  = waterdiepte (golfhoogte  $\ll d$ ).

De stroomsnelheid is uiteraard lager en is gemiddeld over het doorstroomprofiel A gelijk aan de afvoer  $Q$  gedeeld door  $A$ .

Bij windgolven en deiningsgolven op diep water is de netto horizontale waterverplaatsing (in de voortplantingsrichting van de golven) gering en zelfs vrijwel verwaarloosbaar. Bij de lange golven daarentegen (bijvoorbeeld hoogwatergolven op rivieren) is het grote horizontale watertransport juist kenmerkend.

In het bovenstaande wordt gesproken over lange golven. Bij lange golven zijn de stroomlijnen slechts weinig gekromd. Het drukverloop in de verticaal is daarom vrijwel hydrostatisch en het watertransport wordt bepaald door het drukverloop in transportrichting en door de bodemweerstand. In lange-golfberekeningen kan met dieptegemiddelde grootheden worden gerekend.

In tegenstelling tot de lange golven worden korte golven gekarakteriseerd door een sterk gekromd oppervlak en gekromde stroomlijnen. Door verticale versnellingen van het water is het drukverloop in de verticaal niet hydrostatisch. Windgolven en deiningsgolven kunnen worden opgevat als korte golven.

Bij alle hiervoor genoemde oppervlaktegolven (zwaartekrachtgolven) speelt de compressibiliteit van het water geen rol. Bij akoestische golven (drukgolven) in het water, bijvoorbeeld in leidingsystemen, is de variatie in dichtheid als functie van tijd en plaats juist wel van belang. Dit type golf is daardoor geheel afwijkend van oppervlaktegolven en ontstaat bijvoorbeeld bij plotselinge afsluiting van een leiding. De voortplantingssnelheid van akoestische golven is gelijk aan de voortplantingssnelheid van geluid in water; deze is afhankelijk van de hoeveelheid lucht die in het water aanwezig is en van de mate van verdeeldheid en van de grootte van de luchtbelletjes (zonder lucht is de geluidssnelheid in water circa 1500 m/s, met lucht kan de geluidssnelheid in water zakken tot 100 m/s, dus tot onder de geluidssnelheid in lucht van atmosferische druk, die 330 m/s bedraagt).

In geval van explosies kan de voortplantingssnelheid van het explosiefrent overigens hoger zijn dan de geluidssnelheid. Men spreekt dan van supersone golven. Akoestische golven in leidingsystemen worden hier niet verder behandeld. Voor een introductie in deze problematiek wordt verwezen naar Wijdiëks (1983).

In geval dat een oppervlaktegolf abrupt wordt afgestopt, bijvoorbeeld doordat het golffrent tegen een constructie slaat, ontstaat er een golfklap. Ook dan wordt er een drukgolf (compressiegolf) in het water opgewekt. In Hoofdstuk 5 wordt hier op teruggekomen.

In de volgende paragraaf worden windgolven nader besproken. Voor een uitgebreide behandeling kan worden verwezen naar onder anderen Battjes (1982 en 1988), Groen en Dorrestein (1976) en Le Méhauté (1976). Lange golven worden in het kader van dit handboek niet verder besproken. Het effect van deze golven op hydraulische constructies blijft als regel beperkt tot een quasi-statische belasting. Seiches kunnen soms aanleiding geven tot resonantieverschijnselen in relatief slappe constructies; dit is het geval wanneer de periode van de seiches overeenkomt met één van de eigenperiodes van de constructie. Een soortgelijke problematiek is al uitvoerig in Deel A aan de orde gekomen. Hier wordt korthedshalve naar verwezen.

## 2.2 WINDGOLVEN

### 2.2.1 GOLFKARAKTERISTIEKEN

Golven kunnen worden gekarakteriseerd door een hoogte  $H$  (top-dalwaarde), een periode  $T$ , een lengte  $L$  en een voortplantingsrichting. Iedere individuele golf heeft een vorm; de steilheid van het front kan van belang zijn voor het ontstaan van golfklappen. De lengte  $L$  is gelijk aan het produkt van loopsnelheid  $c$  en periode  $T$ :

$$L = cT \quad (\text{B2.2})$$

De golffrequentie  $\omega$  (hoekfrequentie) is gedefinieerd als:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{B2.3})$$

en het golfgetal  $k$  als:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{B2.4})$$

De grootte  $H/L$  wordt de steilheid van de golf genoemd. De steilheid van de golven kan toenemen wanneer golven in een stroming geraten of wanneer golven in ondieper water komen. De steilheid van de golven heeft een bovengrens: wanneer de steilheid van golven op diep water groter is dan circa 1:7 breken ze.

De loopsnelheid van de golven neemt toe met de golfperiode. Op ondiep water worden de golven beïnvloed door de bodem en is de snelheid van de golven lager dan op diep water; de loopsnelheid is nu niet meer afhankelijk van de golfperiode, maar is een functie van de waterdiepte  $d$ . Men spreekt van diep water als  $d/L > 0,5$  en van ondiep water als  $d/L < 0,05$ . Daartussen is een overgangsgebied.

Waterdeeltjes in een golf op diep water doorlopen bij benadering cirkelvormige banen. De cirkelbanen zijn aan het oppervlak het grootst en nemen volgens een  $e$ -macht naar de bodem toe af. Bij kleinere waterdiepte veranderen de cirkelbanen in ellipsvormige banen. In werkelijkheid zijn de banen niet gesloten maar open en ondergaan de waterdeeltjes een geringe nettoverplaatsing in de voortplantingsrichting van de golven. De beweging van de waterdeeltjes wordt orbitaalbeweging genoemd.

Voor de mathematische beschrijving van golven zijn verschillende theorieën ontwikkeld. De lineaire golftheorie wordt eenvoudigheidshalve veel toegepast en geeft in veel gevallen een voldoende nauwkeurige beschrijving. In de niet-lineaire golftheorieën worden hogere-orde-termen toegevoegd aan de beschrijving; voor diep water zijn dat reeksontwikkelingen voor de grootte  $H/L$ , voor ondiep water reeksontwikkelingen voor  $H/d$ . Voor een beschrijving van de golftheorieën wordt verwezen naar de uitgebreide literatuur op dit gebied (zie voor een algemene introductie onder anderen Le Méhauté, 1976).

Volgens de lineaire golftheorie (dat wil zeggen uitgaande van relatief kleine verstoringen van het wateroppervlak) is de loopsnelheid van golven in water met constante diepte:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (\text{B2.5})$$

Dit is de zogenaamde dispersierelatie.

In geval van diep water nadert de term  $\tanh(2\pi d/L)$  tot de waarde 1 en wordt de loopsnelheid:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad (\text{B2.6})$$

De golflengte kan dan worden berekend met:

$$L=cT = \frac{gT^2}{2\pi} \approx 1,56T^2 \quad (\text{B2.7})$$

Op ondiep water nadert de term  $\tanh(2\pi d/L)$  tot  $2\pi d/L$  en met  $L=cT$  gaat de loopsnelheid over in:

$$c = \sqrt{gd} \quad (\text{B2.8})$$

Dit is dezelfde snelheid als die waarmee het front van een translatiegolf zich voortplant (translatiegolfhoogte klein ten opzichte van de waterdiepte).

Golven blijken zich in groepen te verplaatsen. Dit verschijnsel kan worden begrepen door de golven op te vatten als een combinatie van samenstellende golven die een weinig verschillen in frequentie en golflengte. In de combinatie ontstaan de bekende zwevingen uit de dynamica, die in het water zichtbaar worden als groepen (zie Groen en Dorresteyn, 1976).

De loopsnelheid van een individuele golf is niet gelijk aan de voortplantingsnelheid van een golfgroep. Op diep water verplaatst een golfgroep zich met een snelheid die een factor 2 lager ligt dan de loopsnelheid van de individuele golf. Dit betekent dat individuele golven op een groep inlopen, groter worden, vervolgens weer in hoogte afnemen en aan het front van de groep verdwijnen. Op ondiep water echter nadert de groepssnelheid bij afnemende waterdiepte de voortplantingssnelheid van de individuele golf.

Golven bezitten energie die in geval van lopende golven in de voortplantingsrichting wordt getransporteerd. De golfenergie bestaat uit potentiële energie (met als referentievlak het ongestoorde waterspiegeloppervlak) en kinetische energie. In de lineaire golftheorie is de gemiddelde potentiële energie per eenheid van oppervlak gelijk aan de gemiddelde kinetische energie per eenheid van oppervlak. De totale energie is gelijk aan:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{B2.9})$$



De energie wordt getransporteerd met een snelheid overeenkomend met de snelheid van de golfgroep. De orbitaalbeweging van de golven (kinetische energie) levert – er van uitgaande dat de orbitaalbeweging een gesloten kring is, zoals bij benadering op diep water het geval is – geen netto-energietransport; energietransport is dan alleen een transport van potentiële energie (de lokale waterspiegelverheffing). Op ondiep water kan voor de orbitaalbeweging niet meer van een gesloten-kringbeweging worden uitgegaan; in dat geval is er ook transport van kinetische energie.

Volgens de lineaire golftheorie is de drukverdeling in de verticaal:

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(\omega t - kx) \quad (\text{B2.10})$$

Op diep water is  $k(d+z) \gg 1$  waardoor Formule B2.10 overgaat in:

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (\text{B2.11a})$$

Op ondiep water is  $kd \ll 1$  en gaat Formule B2.10 over in:

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \sin(\omega t - kx) \quad (\text{B2.11b})$$

In deze formules is  $z$  de coördinaat in verticale richting (de oorsprong valt samen met het stilwateroppervlak),  $x$  is de coördinaat in voortplantingsrichting,  $t$  is de tijd en  $H$  is de golfhoogte. De term  $\rho g z$  is de hydrostatische drukterm waar de golfdruk bij wordt opgeteld. De factor  $e^{kz}$  is de reductiefactor waarmee de diepteafhankelijke golfdruk op diep water naar de bodem toe afneemt. Op ondiep water tendeert deze factor voor  $z = -d$  naar 1, zodat de golfdruk in de verticaal constant wordt en de totale druk hydrostatisch. Deze ondiep-watergolven worden ook lange golven genoemd; de diep-watergolven korte golven.

In het bovenstaande wordt gesproken over eerste-ordegolven. In de natuur gaan eerste-ordegolven gepaard met tweede-ordegolven. Het blijkt namelijk dat de gemiddelde positie van het wateroppervlak in golfgroepen volgens een golfvorm verloopt. De amplitude van deze tweede-ordegolven is gering; de periode hangt samen met de frequentie van de golfgroepen in een golfveld en is daardoor relatief groot. Bij nadering van de kust en oplopen van de bodem kunnen deze tweede-orde-gebonden golven los raken van de golfgroepen als gevolg van breking, refractie en diffractie en vrije golven worden.

## 2.2.2 WINDGOLVEN ALS STOCHASTISCH PROCES

Een golfveld dat zich in een bepaalde richting voortplant, kan worden voorgesteld als opgebouwd uit een groot aantal enkelvoudige golven, elk met eigen periode, golfhoogte en voortplantingssnelheid. Iedere golf heeft daarbij een eigen fasehoek  $\phi$ . Deze fasehoek kan als een stochastische grootte worden beschouwd met een uniforme kansdichtheidsverdeling op het interval  $[-\pi, +\pi]$ , zodat iedere fasehoek op dit

interval een even grote kans van voorkomen heeft. De resulterende uitwijking van het wateroppervlak  $\eta$  ten opzichte van de stilwaterstand kan dan worden geschreven als:

$$\eta(t) = \sum_n A_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (\text{B2.12})$$

met  $\omega_n$  = hoekfrequentie =  $2\pi/T_n$  van golfcomponent n  
 $A_n$  = amplitude van golfcomponent n

Dit model staat bekend als het random phase model.

Theoretisch kan worden afgeleid dat de golfhoogten een Rayleighkansdichtheidsfunctie volgen. Uit metingen is gebleken dat de golfhoogten goed voldoen aan deze verdeling.

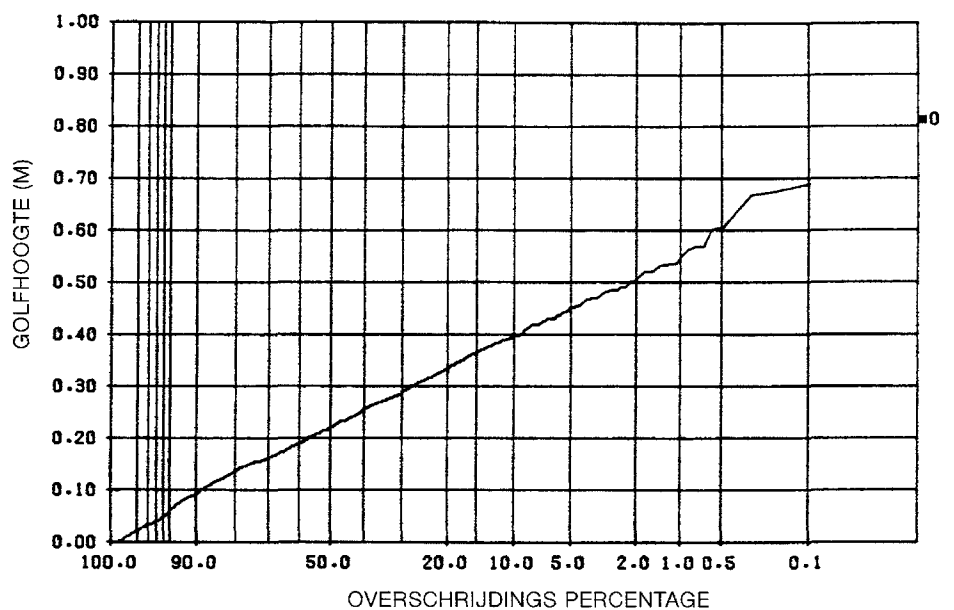
De Rayleighverdeling is gedefinieerd als:

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad \text{voor } H > 0$$

$$p(H) = 0 \quad \text{voor } H \leq 0$$
(B2.13)

met  $H_{rms}$  = rms-waarde van de golfhoogtes (zie voor definitie van rms-waarde Paragraaf 5.7.2 in Deel C).

Bij metingen is het gebruikelijk om gemeten golfhoogten in een overschrijdingsverdeling uit te zetten. Deze verdeling geeft de kans dat een zekere golfhoogte wordt overschreden en is gebaseerd op het totale aantal gemeten golven. De schaalverdeling van de horizontale as met overschrijdingspercentages kan zodanig worden gekozen dat een rechte lijn in de grafiek ontstaat als de golfhoogten Rayleighverdeeld zijn. Een voorbeeld is te zien in de volgende figuur.



Figuur B2.1:  
Overschrijdingsverdeling van golfhoogten.

De golfenergie in een golfveld kan met gebruikmaking van Fourieranalyse in spectrale vorm worden weergegeven. Het golfspectrum (energiedichtheidsspectrum) geeft de verdeling van de energie over de frequenties in het golfveld.

Het golfspectrum geeft geen informatie over de hoogte van individuele golven. Wel geldt, aannemende dat de golfhoogten Rayleighverdeeld zijn, dat:

$$H_s \approx 3,8\sqrt{m_0} \quad (\text{B2.14})$$

en:

$$H_s \approx H_{rms}\sqrt{2} \quad (\text{B2.15})$$

zodat:

$$H_{rms} \approx 2,7\sqrt{m_0} \quad (\text{B2.16})$$

met  $m_0$  = oppervlak van het golfspectrum

$H_s$  = significante golfhoogte

$H_{rms}$  = rms-waarde van de golfhoogten in het spectrum

In de literatuur komt men voor de coëfficiënt 3,8 ook wel de waarde 4 tegen. De significante golfhoogte  $H_s$  is gedefinieerd als het gemiddelde van het hoogste derde deel van de golven; deze grootheid wordt algemeen gebruikt om de golfhoogte van een golfveld aan te geven. In de Rayleighverdeling komt  $H_s$  ongeveer overeen met een overschrijdingswaarde van 13,5%.

Metingen op zee hebben verschillende vormen van het golfspectrum opgeleverd. Algemeen aanvaard is het Pierson-Moskowitzenergiedichtheidsspectrum voor vol-groeide zeeegang op diep water. Dit standaardpectrum is als volgt gedefinieerd:

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right] \quad (\text{B2.17})$$

met  $\alpha$  = coëfficiënt (schaalparameter)

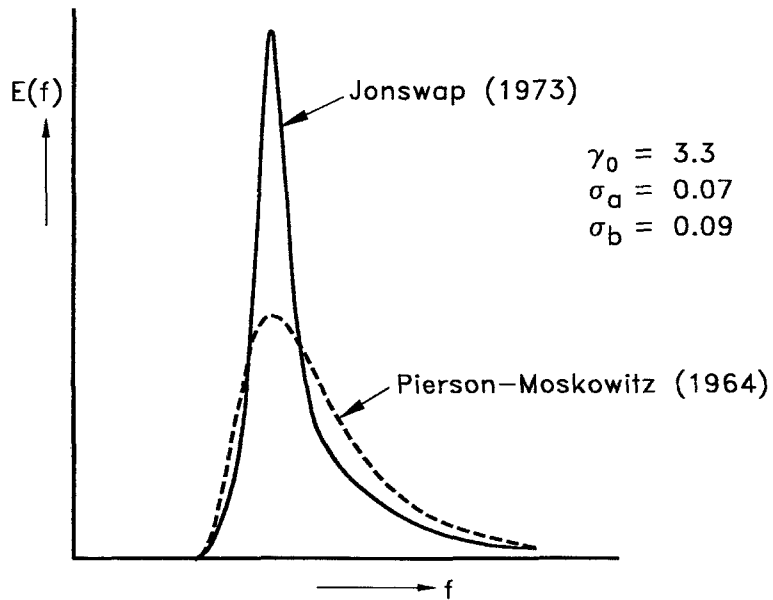
$g$  = zwaartekrachtsversnelling

$f$  = golffrequentie

$f_p$  = piekfrequentie, dat wil zeggen de frequentie in het spectrum met maximale energie

Andere bekende standaardvormen van het golfspectrum, maar minder vaak toegepast dan het Pierson-Moskowitzspectrum, zijn het Bretschneiderspectrum en het Neumannspectrum.

Bij groei van de zeeegang breidt de energie zich uit van de hogere frequenties in het spectrum naar de lagere frequenties (er ontstaan steeds meer golven met langere periode). Zoals in Figuur B2.2 is te zien, is de energiedichtheid in een volgroeid zee-gangsspectrum het grootst bij de lagere frequenties.



Figuur B2.2:  
Pierson-Moskowitzgolfspectrum en  
JONSWAPgolfspectrum.

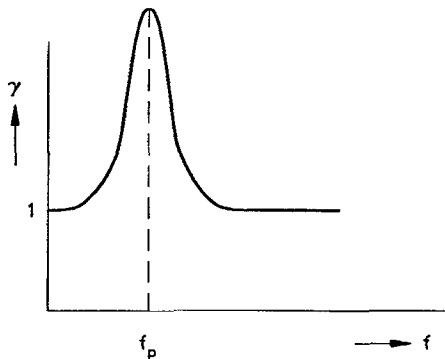
In de jaren zeventig zijn ten westen van Denemarken golfmetingen verricht in het kader van JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). Deze metingen hebben opgeleverd dat bij beperkte strijklengte de vorm van het spectrum afwijkend is van het Pierson-Moskowitzspectrum. Dit doet zich met name in kustgebieden voor. Er blijkt dan meer energie geconcentreerd te zijn rond de piekfrequentie van het golfspectrum. Dit heeft geresulteerd in het JONSWAPspectrum. Het JONSWAPspectrum wordt verkregen door het Pierson-Moskowitzspectrum te vermenigvuldigen met een frequentieafhankelijke versterkingsfactor  $\gamma(f)$ :

$$\gamma(f) = \gamma_0^a$$

$$a = \exp \left[ -0,5 \frac{(f-f_p)^2}{\sigma^2 f^2} \right] \tag{B2.18}$$

met  $\gamma_0$  = piekversterkingsfactor (veelal 3,3)  
 $f_p$  = piekfrequentie  
 $\sigma$  = vormfactor; veelal  $\sigma = \sigma_a = 0,07$  voor  $f < f_p$   
 $\sigma = \sigma_b = 0,09$  voor  $f > f_p$

In Figuur B2.2 wordt het JONSWAPspectrum vergeleken met het Pierson-Moskowitzspectrum. De spectra hebben een zelfde topperiode  $T_p$  en een gelijk oppervlak  $m_0$  (dus een gelijke significante golfhoogte  $H_s$ ).



Figuur B.2.3:  
Piekversterkingsfactor  $\gamma(f)$ .

Het is mogelijk dat in een deiningsveld lokaal windgolven worden opgewekt. Het spectrum vertoont in dat geval twee pieken: een piek overeenkomend met het deiningsveld en een piek overeenkomend met de hogere frequenties van het lokaal opgewekte windgolfveld (tweetoppig golfspectrum).

In het voorgaande is uitsluitend gesproken over het golfspectrum voor één golf-richting. Normaal zal door variatie van de windrichting ook de voortplantings-richting van de golven variëren. Er ontstaat dan een driedimensionaal spectrum met langs de ene as de golffrequentie en langs de andere as de golf-richting.

In algemene termen kan het gecombineerde golfhoogte/golfrichtingspectrum  $E(f, \theta)$  worden weergegeven met de formule:

$$E(f, \theta) = E(f) \times D(f, \theta) \quad (\text{B2.19})$$

met  $E(f)$  = frequentieafhankelijke golfenergie  
 $D(f, \theta)$  = frequentieafhankelijke richtingsverdelingsfunctie met een maximum voor  $\theta = 0^\circ$  (de hoofdrichting)  
 $\theta$  = hoek met de hoofdgolfrichting

Per definitie geldt:

$$\int_{-\pi}^{\pi} D(f, \theta) d\theta = 1 \quad (\text{B2.20})$$

Voor de richtingsverdelingsfunctie  $D(f, \theta)$  wordt veelal genomen:

$$D(f, \theta) = A \left( \cos \frac{\theta}{2} \right)^{2s} \quad (\text{B2.21})$$

met  $A$  = coëfficiënt  
 $s$  = coëfficiënt afhankelijk van de frequentie  $f$

### 2.2.3 REFLECTIE, REFRACTIE EN DIFFRACTIE

Golven planten zich in een bepaalde richting voort. Wanneer zich een obstakel voordoet in de baan van de golven, zullen de golven deels worden teruggekaatst (reflectie) en deels om het obstakel heen lopen.

Golven die in de richting van een verticale wand lopen, kunnen voor nagenoeg 100% worden gereflecteerd. De gereflecteerde golf is dan even hoog als de inkomende golf. In een goot waar regelmatige golven (met constante periode en constante hoogte) worden opgewekt en waarin een verticale wand haaks op de goot-as is geplaatst, is het effect van reflectie goed te zien: de inkomende golven planten zich voort tot aan de reflecterende wand, waarna de golven van richting omdraaien en met dezelfde snelheid weer teruglopen. Het lijkt nu alsof de golven zich niet meer voortplanten, want er ontstaat een regelmatig patroon van knopen (plaatsen zonder verticale waterbeweging) en buiken (plaatsen met maximale verticale waterbeweging), met de knopen en buiken op een vaste plaats (staande golf). Dit patroon is de som van de golven die heenlopen en teruglopen. De knopen bevinden zich op een onderlinge afstand van  $1/2L$ , en de eerste knoop bevindt zich op een afstand van  $1/4L$  van het reflectievlak. Bij volledige reflectie is de verticale uitwijking van het water in een buik gelijk aan twee maal de inkomende golfhoogte.

Golven die onder een hoek een wand raken, worden onder dezelfde hoek met de normaal gereflecteerd. Bij volledige reflectie is de hoogte van de gereflecteerde golf ook nu weer gelijk aan de hoogte van de invallende golf. Er ontstaat dan het bekende kruispatroon met – bij een reflectie van 100% – plaatselijke golfhoogten tot  $2H$  ( $H$  = inkomende golfhoogte).

Bij onregelmatige golven is het reflectiepatroon minder herkenbaar vanwege de variatie in zowel golfhoogte als golfperiode, maar het verschijnsel doet zich ook hier voor.

De reflectiecoëfficiënt  $r(f)$  is gedefinieerd als:

$$r(f) = \sqrt{\frac{E_r(f)}{E_i(f)}} \quad (\text{B2.22})$$

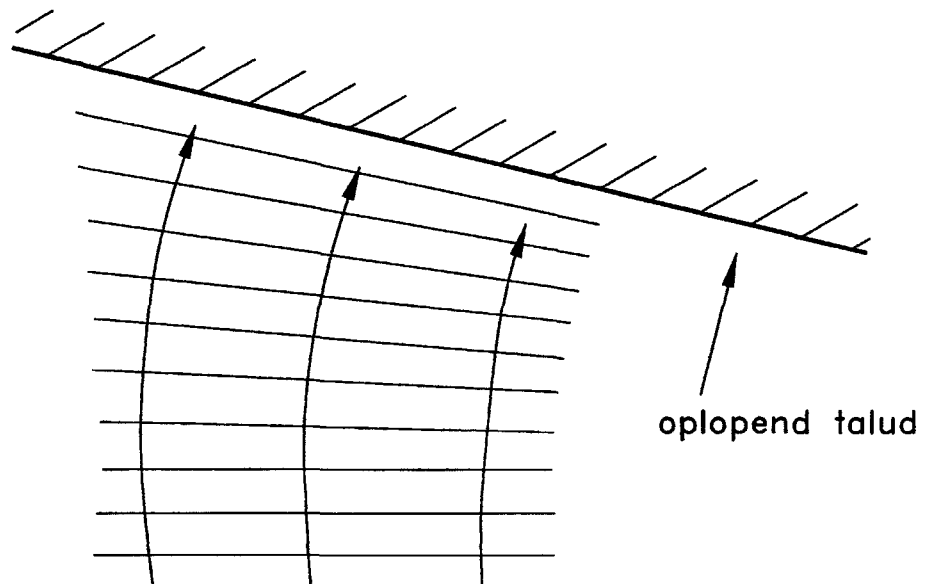
met  $E_i(f)$  = inkomende golfenergie

$E_r(f)$  = gereflecteerde golfenergie

De reflectiecoëfficiënt is dus afhankelijk van de hoeveelheid energie die bij kaatsing van de golf tegen een object vernietigd wordt. Bij een flauw oplopend talud bedekt met ruwe elementen (bijvoorbeeld grind, stenen, speciaal gevormde betonelementen) is de energiedissipatie hoog en dientengevolge de reflectiecoëfficiënt laag. De reflectiecoëfficiënt zal als regel afhankelijk zijn van de golfrequentie.

Refractie van golven is het verschijnsel waarbij langs de golfkam een verloop in voortplantingssnelheid optreedt. Dit kan zich voordoen wanneer een golf onder een hoek een oplopende bodem nadert. Wanneer het eerste deel van de golf de bodem voelt, wordt de snelheid afgeremd en ontstaat een bijdraaien van de golf naar het talud toe.

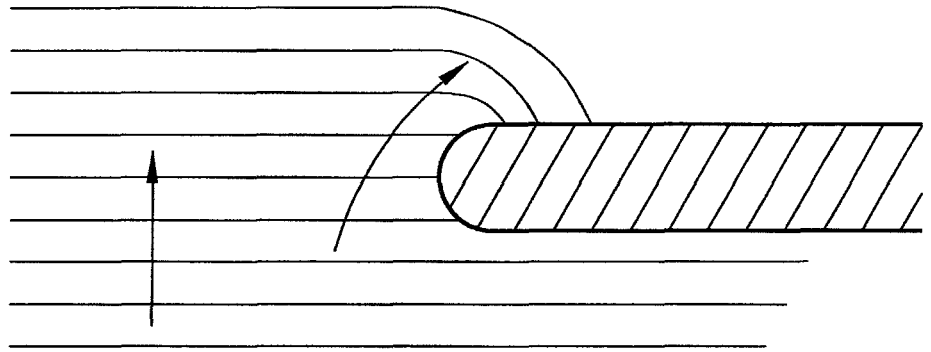
Soortgelijke effecten kunnen zich ook voordoen wanneer een golfveld een lokaal stromingsveld inloopt; de golven draaien bij in de richting van de stroming.



Figuur B2.4:  
Refractie.

DiffRACTIE is het verschijnsel waarbij zich langs de golfkam (dus in laterale richting) energie voortplant. Bijvoorbeeld bij een golfbreker, waarbij de langs de kop van de golfbreker trekkende golven energie uitstralen naar het rustige gebied achter de golfbreker.

Figuur B2.4:  
Diffractie.



Reflectie, refractie en diffractie zijn in belangrijke mate geometriaafhankelijke verschijnselen. Ze spelen dus bijvoorbeeld een rol bij het binnendringen van golven in havens. Bij een trechtervormige geometrie zal een binnenlopende golf naar het einde van de trechter toe steeds hoger worden. In bochtige geulen zullen korte golven met relatief korte periode minder ver doordringen dan lange golven met relatief lange periode, vanwege een sterker energiedissipatie-effect van de oevers op korte golven.

Reflectie is bij waterbouwkundige constructies van belang, omdat de lokaal bij de constructie aanwezige golven hoger zijn dan de inkomende golven op afstand.

## 2.2.4 VOORSPELLING VAN WINDGOLVEN

De golfgroei is afhankelijk van de windsnelheid, de strijklengte en de duur van de windbelasting. Ook is van belang of de golven zich op diep of ondiep water ontwikkelen.

Op basis van deze grootheden zijn voorspellingsmodellen ontwikkeld waarmee de significante golfhoogte  $H_s$  en de piekperiode  $T_p = 1/f_p$  kunnen worden afgeschat. Een bekend voorspellingsmodel is het model van Sverdrup-Munk, dat door Bretschneider is herzien met gebruikmaking van empirische gegevens. In het Shore Protection Manual (CERC, 1984) zijn op dit model weer enkele wijzigingen aangebracht. In nomogrammen in het Shore Protection Manual zijn voor diep water golfhoogten en golfperiodes af te lezen, gegeven een zekere windbelasting. De windbelasting wordt uitgedrukt in een duurgemiddelde windsnelheid op een standaardhoogte boven het wateroppervlak. Beperkende factoren voor de golfgroei zijn daarbij of de duur van de windbelasting of de strijklengte; hierop moet worden gecontroleerd. Een andere beperkende factor is de zogenaamde volgroeiende-golfconditie: golven op diep water zullen niet hoger worden dan de maximale steilheid van de golven toelaat; daarna breken ze. Deze conditie is in de nomogrammen voor diep water ingetekend.

Op ondiep water zijn voor dezelfde windomstandigheden en bij dezelfde strijklengte de golven lager en korter. In het Shore Protection Manual zijn voor de ondiep-watersituatie ook nomogrammen opgenomen, waarin golfhoogte en golfperiode kunnen worden afgelezen. De nomogrammen zijn gebaseerd op aangepaste diep-waterformules. Soortgelijke nomogrammen zijn ook opgenomen in Groen en Dorrestein (1976).

Wanneer in een bepaald gebied gedurende vele jaren metingen zijn uitgevoerd van windbelasting en golven, kunnen op basis van deze metingen gevalideerde golfvoorspellingsmodellen worden gemaakt. Voor het betreffende gebied zullen golven dan met een hogere betrouwbaarheid kunnen worden voorspeld.

### 3 GOLFBELASTINGEN

Golven die tegen een constructie aanlopen, veroorzaken in de tijd variërende belastingen. De grootte van deze belastingen is afhankelijk van de golfhoopte, de golfperiode en de golfrichting en uiteraard van de grootte van het constructieoppervlak waarop de golfdrukken werkzaam zijn. De vorm en de oppervlakte-eigenschappen van de constructie, de voorlandgeometrie en de aanwezigheid van andere constructies spelen daarbij ook een rol in verband met reflectie, diffractie en refractie, golfoverslag en dissipatie van golfenergie. In dit hoofdstuk wordt een voorbeschouwing gegeven over het begrip golfbelasting. In de Hoofdstukken 4 en 5 wordt dieper op de materie ingegaan.

Golfbelastingen kunnen worden onderscheiden in quasi-statische belastingen en golfklapbelastingen. Quasi-statische belastingen zijn belastingen die met dezelfde periode verlopen als de golven. Golfklapbelastingen zijn veel snellere belastingen; ze treden slechts gedurende een kort deel van de golfperiode op (indicatie van de klapduur: 10 - 200 ms) en na het wegvallen van de golfklapdruk blijft de quasi-statische golfdruk over.

De met golfgroepen samenhangende tweede-ordegolven met relatief kleine amplitude en grote periode zijn vooral van belang voor drijvende en afgemeerde objecten. Ze kunnen oorzaak zijn van driftkrachten; bij het manoeuvreren van schepen of bij het positioneren van bijvoorbeeld grote offshoreconstructies kunnen deze krachten van invloed zijn. Ook kunnen ze oorzaak zijn van resonanties in havenbekkens, waardoor hierin afgemeerde schepen hinder ondervinden.

Bij constructies met een horizontale afmeting  $D$  die klein is ten opzichte van de golflengte  $L$ , zal de golf vrijwel ongestoord om de constructie heen lopen. Lokaal ontstaan er wel verstoringen met een zog aan de zijzijde van de constructie. Dit zog (een gebied met loslatende stroming en vrije grenslagen in het water waar wervelvorming plaatsvindt) is vergelijkbaar met het zog dat bij omstroomde constructies ontstaat (zie ook Hoofdstuk 5 in Deel A). Bij stationaire stroming is de stromingskracht of weerstandskracht in het algemeen evenredig met  $\rho v^2 D/2$ ; dit geldt ook voor het fluctuerende deel van deze kracht. De frequentie  $f$  van het fluctuerende deel van de kracht hangt samen met aanstroomsnelheid  $v$  en dwarsafmeting  $D$  via het Strouhalgetal  $S = fD/v$ . Het Strouhalgetal is bij constructies met afgeronde hoeken en niet-hoekige vorm een functie van het Reynoldsgetal  $Re = vD/\nu$ , met  $\nu$  kinematische viscositeitscoëfficiënt (zie ook Hoofdstuk 5 in Deel A).

In het geval van golven is de stroming evenwel niet stationair, maar is er een met de orbitaalbeweging samenhangende wisselende stroming aanwezig, waarvan de amplitude bovendien afneemt met de afstand onder het wateroppervlak. Er ontstaan dus zowel traagheidskrachten (door het versnellen en vertragen van de waterbeweging) als weerstandskrachten (samenhangend met de omstroming). Met afnemende amplitude van de horizontale waterbeweging neemt het belang van de weerstandskracht ten opzichte van de traagheidskracht af.

Bij toenemende constructieafmeting  $D$  ten opzichte van de golflengte  $L$  wordt de diffractie van de golven belangrijker, dit wil zeggen de golven zelf worden in steeds



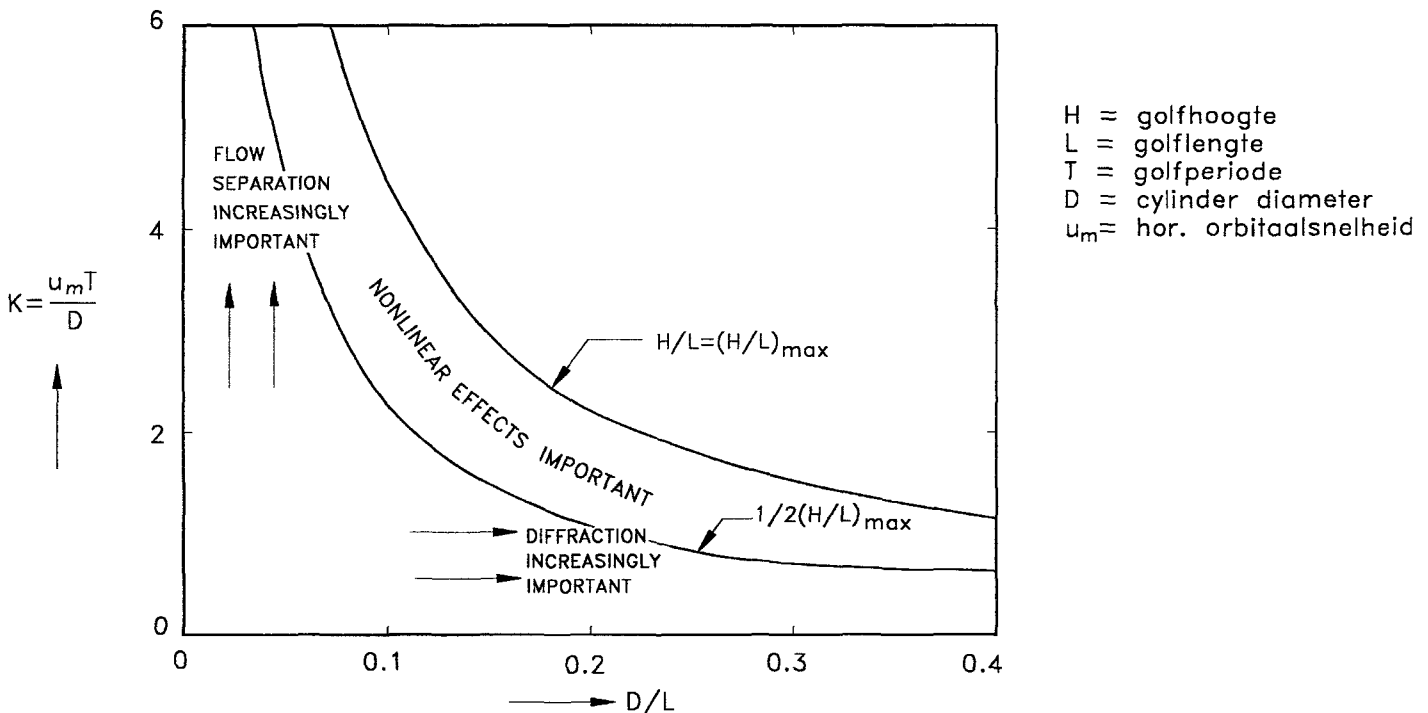
sterkere mate door de aanwezigheid van de constructie beïnvloed ('scattering') en in de golfkrachten is de traagheidsterm dominant. Er ontstaan faseverschillen tussen de golfdrukken op verschillende punten van de constructie.

Bij ronde constructies ontstaat steeds minder een zog aan de lijzijde en de krachten worden in afnemende mate bepaald door stromingsloslating en in toenemende mate door golfdiffractie; vanaf  $D/L > 0,2$  is golfdiffractie dominant. In de waterbeweging rond de constructie komen nagenoeg geen wervels meer voor. Golfkrachten kunnen dan op basis van de potentiaalstromingstheorie worden berekend (in de potentiaaltheorie wordt uitgegaan van een niet-visceuze, rotatievrije stroming). Deze berekeningen staan bekend als diffractieberekeningen. Zie ook Berkhoff (1976).

Bij hoekige constructies, zoals een rechthoekig caisson, blijven zich bij toenemende constructieafmeting  $D$  loslaatverschijnselen voordoen op de hoekpunten, maar de effecten hiervan zijn lokaal. Evenals bij ronde constructies het geval is, wordt golfdiffractie bij toenemende  $D$  dominant en bepalend voor de golfkrachten. De overgang ligt mogelijk bij een hogere  $D/L$ -waarde dan bij ronde constructies. Gegevens hierover zijn evenwel niet voorhanden.

In Figuur B.3.1 (uit Isaacson, 1979) zijn ter illustratie van het bovenstaande voor een verticale cirkelvormige cilinder de gebieden aangegeven waar loslating van de stroming (zogvorming) en waar diffractie belangrijk is. Langs de horizontale as staat de grootte  $D/L$ , langs de verticale as het Keulegan-Carpentergetal  $K$ .  $K$  (of  $KC$  in sommige literatuur) is de verhouding van de amplitude van de horizontale waterbeweging en de cilinderdiameter  $D$  (zie ook de definitie van  $K$  in Hoofdstuk 4). In het gebied met lage waarde van zowel  $K$  als  $D/L$  is de traagheid dominant. De getrokken lijn  $(H/L)_{\max}$  geeft een fysische begrenzing, die wordt opgelegd door de maximaal mogelijke steilheid van de golven. In het gebied met steile golven (tussen de lijnen  $(H/L)_{\max}$  en  $0,5(H/L)_{\max}$ ) kunnen niet-lineaire effecten een belangrijke rol spelen in het proces van stromingsloslating en in het golfdiffractieproces.

Figuur B3.1.  
Golfkrachtgebieden (Isaacson, 1979).



In het bovenstaande is verondersteld dat de constructie star is en dus niet vervormt of (ten opzichte van ondersteuningspunten) beweegt. Bij quasi-statische golfbelastingen werkend op ondersteunde constructies is dit als regel een goed uitgangspunt, omdat de elastische eigenschappen van de constructie over het algemeen geen rol spelen. Bijvoorbeeld: een constructie die onder invloed van de golfbelasting enigszins doorbuigt, zal daardoor geen invloed uitoefenen op de grootte van de belasting.

Dit ligt anders bij scharnierend bevestigde, afgemeerde of drijvende constructies; in dat geval kan de constructie onder invloed van de golfbelasting relatief grote bewegingen uitvoeren en zijn de quasi-statische belastingen ook een functie van de mate van bewegen.

In geval van golfklapbelastingen waarbij een zekere hoeveelheid water plotseling wordt 'afgestopt' doordat de constructie de waterbeweging blokkeert, spelen de elasticiteit van de constructie, van het water en van de lucht die ingesloten wordt in hun algemeenheid een belangrijke rol in de grootte van de belasting en in de responsie.

In Hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de grootte van de quasi-statische belastingen. Golfklapbelastingen worden verder besproken in Hoofdstuk 5.

## 4 QUASI-STATISCHE GOLFBELASTING

Voor het ontwerpen van een constructie in de golfzone is het nodig dat een schatting wordt gemaakt van de golfbelastingen die naar verwachting gedurende de levensduur van de constructie zullen optreden. Dit betekent enerzijds dat inzicht in het golfklimaat is vereist en anderzijds dat inzicht is vereist in het proces van omzetting van golfenergie in belastingen op de constructie. In dit hoofdstuk wordt een globaal overzicht gegeven van de mogelijkheden die er zijn om de quasi-statische golfbelastingen te bepalen. Er wordt daarbij verondersteld dat de golfcondities bekend zijn; op het vaststellen van de golfcondities en op de kans van voorkomen van deze condities wordt in dit handboek niet verder ingegaan.

### 4.1 ANALYTISCHE BEREKENING

Voor de berekening van quasi-statische golfbelastingen op constructies staan analytische methoden ter beschikking. In de berekening wordt uitgegaan van een zogenaamde ontwerp golf met zekere hoogte, periode en richting. Deze wordt gekozen op basis van een statistische analyse van het golfklimaat. Voor de berekening van de golfbelasting zijn vloeistofsnelheden en -versnellingen in de golf nodig, dan wel golfdrukken; er moet daartoe een golftheorie worden gehanteerd. Bij de berekening wordt in het algemeen verondersteld dat de golf langkammig is en loodrecht op de constructie inloopt.

In geval van kortkammige golven (als gevolg van richtingspreiding) zijn de golfbelastingen lager en kan een reductiefactor worden toegepast. Dit geldt in zijn algemeenheid ook voor schuin inlopende golven. Zie hiervoor ook Battjes (1992).

De in de literatuur gegeven formules hebben gemeen dat ze een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid zijn en dientengevolge met de nodige voorzichtigheid moeten worden gehanteerd.

De eerste golfbelastingsformules zijn ontwikkeld voor golfbrekers; van meer recente datum zijn de formules voor offshoreconstructies. Golfbrekers zijn brede constructies en vereisen een andere benadering dan de als regel slanke offshoreconstructies. In tegenstelling tot wat gebruikelijk is in de mechanica wordt een slanke constructie als volgt gedefinieerd. Een slanke constructie heeft een afmeting  $D$  loodrecht op de golfrichting, die klein is ten opzichte van de golflengte  $L$ :

$$\frac{D}{L} < 0,05 \text{ à } 0,2 \quad (\text{B4.1})$$

Bij slanke constructies kan met een vrijwel ongestoord golfveld gerekend worden; de golfbelasting bestaat uit een traagheidsterm en een weerstandsterm (zie ook Hoofdstuk 3).

Bij niet-slanke constructies (ronde constructies:  $D/L > 0,2$ ) worden de krachten bepaald door diffracterende golven. Wanneer  $D/L$  voldoende groot is (orde van grootte 1) treedt ook reflectie op.

### 4.1.1 SLANKE CONSTRUCTIES

Een veel toegepaste formule voor het berekenen van de quasi-statische golfbelasting (werkend in golfrichting) op slanke, verticale constructies is de formule van Morison, die bestaat uit de som van een traagheidsterm en een weerstandsterm:

$$F = C_m \rho V \frac{du}{dt} + C_d \frac{1}{2} \rho D u |u| \quad (\text{B4.2})$$

- met F = kracht per eenheid van lengte in verticale richting  
C<sub>m</sub> = massa traagheidscoëfficiënt  
C<sub>d</sub> = weerstandcoëfficiënt  
ρ = soortelijke massa water  
u = horizontale orbitaalsnelheid in de as van de constructie (berekend alsof de constructie er niet is)  
V = volume van de constructie per eenheid van lengte in verticale richting  
D = dwarsafmeting van de constructie loodrecht op de golfrichting

Bij een orbitaalbeweging is de horizontale snelheid u nabij het waterspiegeloppervlak het grootst; u neemt naar de bodem toe af. De belasting varieert dus met de positie onder het wateroppervlak.

De horizontale snelheid u wordt veelal berekend met de lineaire golftheorie; in dat geval varieert de snelheid sinusvormig in de tijd:

$$u = \frac{\omega H \cosh k(d+z)}{2 \sinh kd} \sin(\omega t - kx) \quad (\text{B4.3})$$

- met z = coördinaat in verticale richting (positieve richting omhoog; de oorsprong valt samen met het stilwateroppervlak)  
x = horizontale coördinaat in voortplantingsrichting; deze is nul wanneer de oorsprong in de hartlijn van de constructie wordt gekozen  
H = golfhoogte  
k = golfgetal = 2π/L  
d = waterdiepte (stilwater)  
ω = golffrequentie = 2π/T  
L = golflengte  
T = golfperiode

Voor de berekening van de golfbelasting wordt de maximale snelheid u<sub>m</sub> aangehouden; deze is dus nog afhankelijk van de positie onder het wateroppervlak.

Zoals uit Formule (B4.2) blijkt, is de extreme waarde van de traagheidsterm in geval van een harmonische waterbeweging 90° uit fase met de extreme waarde van de weerstandsterm; de maxima in beide termen treden dus niet gelijktijdig op.

Voor verschillende geometrieën zijn proefondervindelijk C<sub>m</sub>- en C<sub>d</sub>-waarden bepaald. Dit geldt met name voor cirkelvormige cilinders (frequente toepassing in de offshore-industrie; zie onder anderen Klopman en Kostense, 1989). In het laatste geval is in Formule B4.2 V = 1/4 πD<sup>2</sup> (volume per lengte-eenheid) en D = paaldiameter.

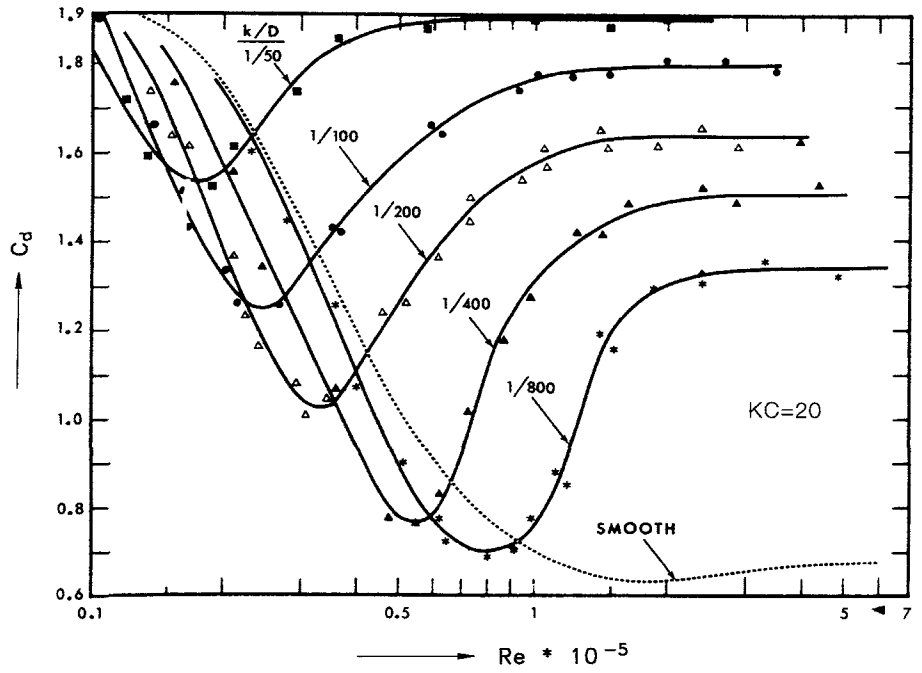
Met de potentiaalstromingstheorie wordt voor  $C_m$  voor een cirkelvormige cilinder een waarde van 2 gevonden; dit betekent dat een denkbeeldig volume aan water van twee maal het volume  $V$  van de cilinder in een versnelde beweging wordt gebracht. Bij een bewegende cilinder in stilstaand water is het denkbeeldige in versnelling gebrachte volume water (de toegevoegde watermassa) gelijk aan één maal het volume van de cilinder, dus een factor 2 kleiner. De potentiaalstromingsleer geeft voor  $C_m$  een bovengrenswaarde; in werkelijkheid is  $C_m$  wegens zogvorming kleiner. Om dezelfde reden is de coëfficiënt  $C_d$  die met de potentiaalstromingsleer voor cilinders wordt gevonden, namelijk  $C_d = 0$ , niet bruikbaar.

De coëfficiënten  $C_m$  en  $C_d$  voor cirkelvormige constructies zijn sterk afhankelijk van het getal van Reynolds (zie ook Hoofdstuk 5 in Deel A). Net als bij een stationaire stroming is bij een oscillerende stroming om een cilinder de mate van turbulentie in de grenslaag langs de cilinder en in de vrije grenslaag achter de cilinder bepalend voor de breedte van het zog achter de cilinder. De grootte van de krachten is afhankelijk van de breedte van het zog. Bij toenemende turbulentie in de vrije grenslaag (hoger Reynoldsgetal) buigt de stroming meer terug, waardoor het zog smaller wordt en de weerstandskracht ( $C_d$ ) kleiner wordt. De traagheidskracht ( $C_m$ ) neemt daarbij toe. Wanneer het Reynoldsgetal verder toeneemt, neemt ook de turbulentie in de vrije grenslaag langs de cilinder toe. Het effect daarvan is dat de stroming eerder loslaat (de snelheden op het cilinderoppervlak zijn groter), waardoor het zog weer breder wordt en  $C_d$  weer toeneemt en  $C_m$  kleiner wordt. In het loslatingsproces heeft de ruwheid van het constructieoppervlak een sterke invloed (hoe hoger de ruwheid, hoe hoger de turbulentie in de grenslaag). De ruwheid  $k$  is een representatieve maat voor de grootte van de oneffenheden op het cilinderoppervlak. De dimensie is  $m$  maar meestal wordt  $k$  uitgedrukt in  $mm$ . In de praktijk kunnen de afmetingen van de oneffenheden variëren tussen enkele  $mm$  (lichte aangroei / roest) tot enkele  $cm$  (sterke aangroei). In onderstaande figuren (ontleend aan Sarpkaya en Isaacson, 1981) zijn de afhankelijkheid van de  $C_d$ - en  $C_m$ -coëfficiënten van het Reynoldsgetal en het effect van de ruwheid  $k$  weergegeven. Het Reynoldsgetal  $Re$  is gedefinieerd als:

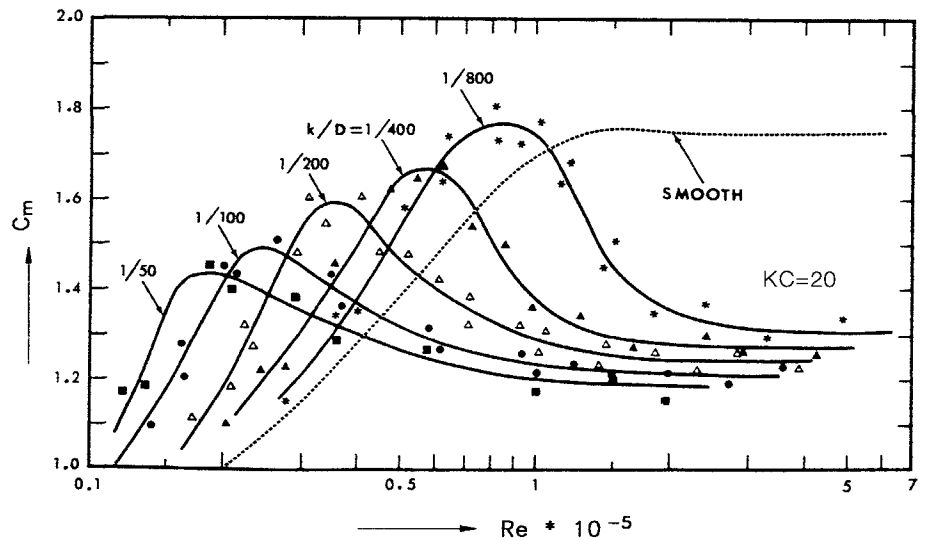
$$Re = \frac{u_m D}{\nu} \quad (B4.4)$$

- met  $\nu$  = kinematische viscositeitscoëfficiënt  
 $u_m$  = maximale horizontale orbitaalsnelheid  
 $D$  = cilinderdiameter

Figuur B4.1:  
 $C_d$ -coëfficiënt als functie van Reynoldsgetal  $Re$   
 en ruwheid  $k$  voor cirkelvormige cilinders  
 (Sarpkaya en Isaacson, 1981).



Figuur B4.2:  
 $C_m$ -coëfficiënt als functie van Reynoldsgetal  $Re$   
 en ruwheid  $k$  voor cirkelvormige cilinders  
 (Sarpkaya en Isaacson, 1981).



Bovenstaande figuren gelden voor een harmonische golfbeweging met  $KC = 20$ , en voor ruim water (de coëfficiënten veranderen in de nabijheid van een wand of bodem). De grootte  $KC$  is het Keulegan-Carpentergetal, dat als volgt is gedefinieerd:

$$KC = \frac{u_m T}{D} \quad (B4.5)$$

- met  $T$  = golfperiode
- $u_m$  = maximale horizontale orbitaalsnelheid
- $D$  = cilinderdiameter

KC is een maat voor de verhouding van de amplitude van de waterbeweging en de cilinder-diameter en kan ook worden gezien als een maat voor de verhouding van weerstandsterm en traagheidsterm.

De  $C_d$ - en  $C_m$ -coëfficiënten blijken afhankelijk te zijn van KC. In onderstaande figuren worden de door Sarpkaya en Isaacson (1981), aanbevolen  $C_d$ - en  $C_m$ -coëfficiënten gegeven voor  $KC = 20$  en  $KC = 100$ . De coëfficiënten zijn nu uitgezet voor verschillende waarden van de ruwheid  $k$  tegen het zogenaamde ruwheid-Reynoldsgetal  $Re_k$ :

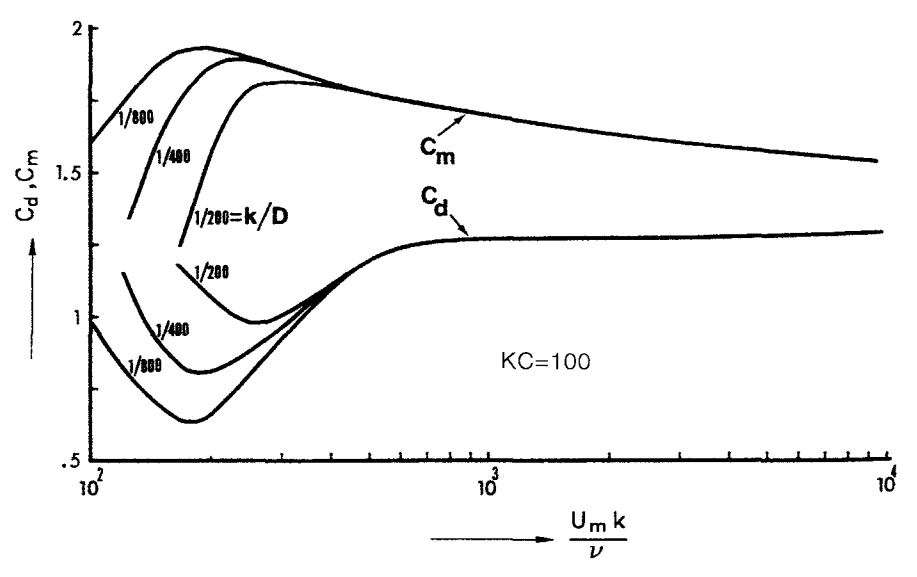
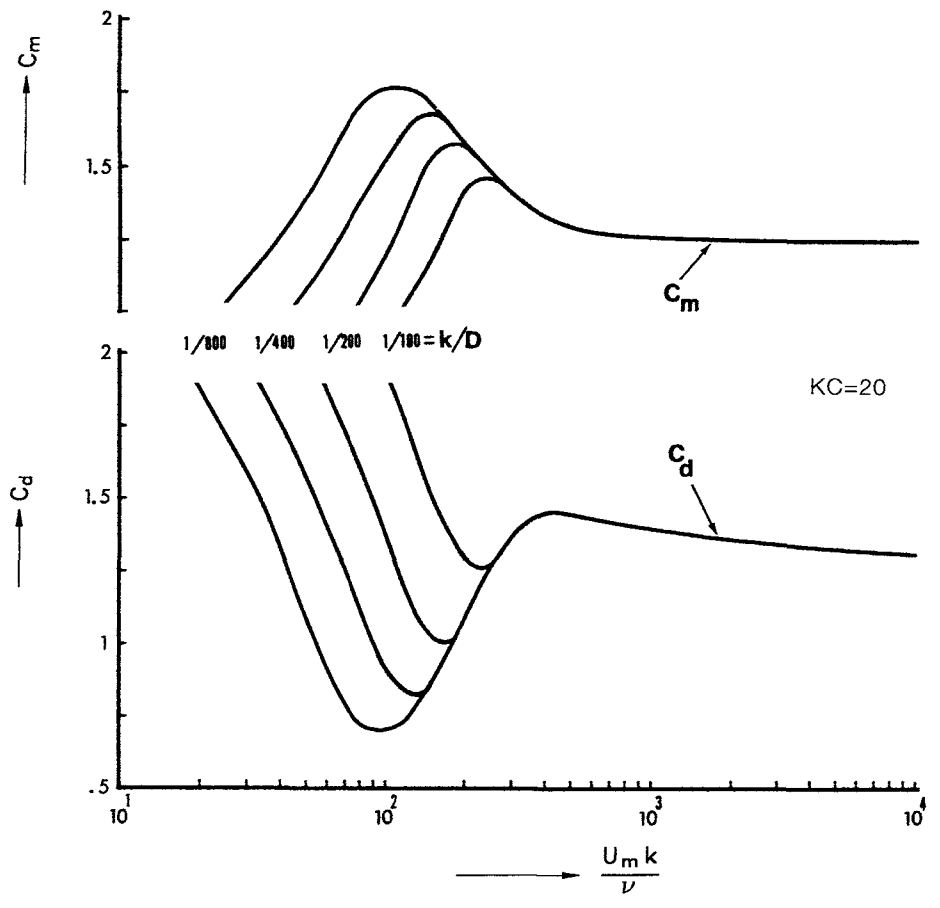
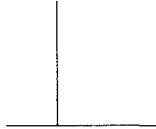
$$Re_k = \frac{u_m k}{\nu} \quad (B4.6)$$

De massastraagheidskracht en de weerstandskracht volgend uit de formule van Morison, werken beide in de richting van de golfvoortplanting. Bij stationaire stroming ontstaan er als gevolg van wervelloslating ook krachten dwars op de stromingsrichting (zie Hoofdstuk 5 van Deel A). Gebleken is dat deze fluctuerende liftkracht ook ten gevolge van een oscillerende stroming (golfbeweging) kan ontstaan. De liftkracht is voor een verticale cilinder gedefinieerd als:

$$F_l = C_l \frac{1}{2} \rho D u^2 \quad (B4.7)$$

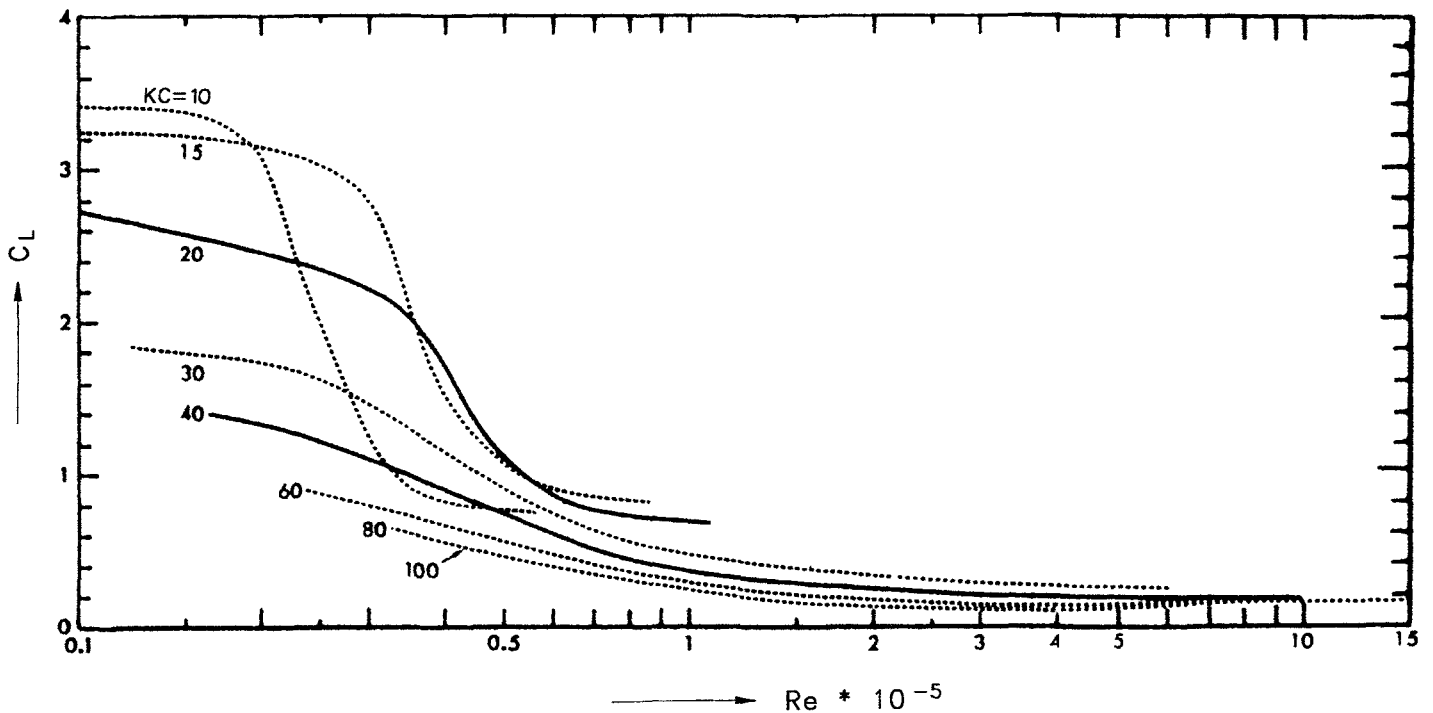
met  $F_l$  = 'liftkracht' per eenheid van lengte in verticale richting  
 $C_l$  = liftcoëfficiënt  
 $u$  = horizontale orbitaalsnelheid in de as van de constructie (berekend alsof de constructie er niet is)

In de berekening wordt voor de snelheid  $u$  de maximale snelheid  $u_m$  aangehouden. De  $C_l$ -coëfficiënt is weer afhankelijk van KC, zoals in Figuur B4.4 uit Sarpkaya en Isaacson (1981) is te zien; deze figuur geldt voor gladde, verticale, cirkelvormige cilinders.



Figuur B4.3:  
Aanbevolen  $C_d$ - en  $C_m$ -coëfficiënten voor ruwe, cirkelvormige cilinders. Golfgetallen:  $KC = 20$  en  $KC = 100$ .  
(Sarpkaya en Isaacson, 1981).





Figuur B4.4:  
 $C_L$ -coëfficiënt als functie van Reynoldsgetal  $Re$ ,  
 voor een gladde, cirkelvormige cilinder  
 (Sarpkaya en Isaacson, 1981).

$C_l$  is evenals  $C_d$  en  $C_m$  afhankelijk van de ruwheid van het cilinderoppervlak.

Voor niet-cirkelvormige cilinders kunnen Formules (B4.2) en (B4.7) worden toegepast mits de bij de betreffende vorm behorende coëfficiënten worden gebruikt. In de literatuur worden voor verschillende vormen de coëfficiënten gegeven.

#### 4.1.2 NIET-SLANKE CONSTRUCTIES

Bij niet-slanke, brede constructies worden de krachten voornamelijk door golf-diffractie en -reflectie bepaald. Om tot een analytische oplossing te komen wordt het diffractie/reflectieprobleem teruggebracht tot een tweedimensionaal probleem. Verondersteld wordt dat de constructie en de kammen van de loodrecht inkomende golven oneindig lang zijn, waardoor het probleem reduceert tot het probleem van een tegen een wand reflecterende golf. Bij loodrechte reflectie ontstaat een staand golfbeeld. Volgens de lineaire golftheorie is de druk in de verticaal staande golven:

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H \cosh k(d+z)}{2 \cosh kd} \cos kx \cos \omega t \quad (B4.10)$$

- met  $z$  = coördinaat in verticale richting (positieve richting omhoog; de oorsprong valt samen met het stilwateroppervlak)
- $x$  = horizontale coördinaat te rekenen vanaf het reflectiepunt (op de wand is  $x = 0$ )
- $H$  = golfhoogte staande golf =  $(1+r)H_i$
- $H_i$  = hoogte van de inkomende golf
- $r$  = reflectiecoëfficiënt
- $k$  = golfgetal =  $2\pi/L$
- $d$  = waterdiepte (stilwater)

Bovenstaande uitdrukking is gebaseerd op een eerste-ordegolfbenadering, dus zonder middenstandsverhoging van het wateroppervlak.

Sainflou was een van de eersten die een analytische uitdrukking voor de golfkracht op een verticale wand ten gevolge van een staande, niet-brekende trochoidale golf afleidden. In deze uitdrukking werd rekening gehouden met een middenstandsverhoging ten opzichte van de stilwaterlijn (tweede-ordebenadering). Het drukverloop werd lineair verondersteld. Uit metingen is gebleken dat de formule van Sainflou een overschatting geeft van de golfdruk in geval van steile golven. De formule is later aangepast door Rundgren (1958) op basis van een gemodificeerde hogere-orde golftheorie van Miche (1944). Ook Iribarren (1954) heeft formules gegeven voor de golfdruk op een verticale wand.

De formules van Sainflou en Miche/Rundgren worden in CERC (1984) gebruikt in grafieken waaruit de golfbelasting op een wand valt af te lezen.

De formules gelden voor niet-brekende golven. Bij brekende golven kunnen zich golfklappen op de wand voordoen. De golfklapdrukken zijn als regel veel hoger dan de quasi-statische golfdrukken. Voor golfklapdrukken wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.

In geval van golfoverslag, dus wanneer de som van middenstandsverhoging en 0-topwaarde van de golf groter is dan het boven de stilwaterlijn uitstekende deel van de wand, kan de golfbelasting worden gereduceerd. In CERC (1984) worden hiervoor reductiefactoren gegeven. Andere effecten kunnen nu echter een rol gaan spelen. Het over de wand heen slaande water kan andere constructiedelen raken en golfklappen geven. Ook kan bij het neerkomen van het overslaande water in het water aan lijkzijde een plotselinge waterbeweging worden gegenereerd, die tot dynamische belastingen aanleiding kan geven. Wanneer aan lijkzijde geen of weinig waterdekking is, is een bodemverdediging wellicht noodzakelijk.

De grafieken in CERC (1984) zijn gebaseerd op relatief eenvoudige, handzame formules. Andere formules voor de golfdruk op verticale wanden zijn opgesteld door onder anderen Minikin (1950) (ook voor brekende golven; in Hoofdstuk 5 wordt hier verder op in gegaan) en Nagai (1973). Meer recentelijk heeft Goda een set universele formules voorgesteld voor de golfdruk op verticale golfbrekers (Goda, 1985 en 1992). De formules bevatten coëfficiënten voor golfrichting, diep-watergolven en ondiep-watergolven. De formules veranderen niet in geval van overslag. De formules van Goda kunnen worden beschouwd als de 'state of the art' van dit moment. In het kader van dit handboek voert het te ver om de formules van Goda verder te behandelen.

Wanneer een eerste globale schatting van de quasi-statische golfbelasting op een verticale wand is gewenst, kan als conservatieve benadering worden aangehouden dat de golfdruk vanaf het vrije wateroppervlak tot op de stilwaterlijn hydrostatisch verloopt en daarna tot op de bodem constant blijft. Dit geeft voor de totale druk ook een hydrostatisch verloop met als grootste respectievelijk kleinste waarde op de bodem:  $p_{\max} = \rho g(d+A)$  en  $p_{\min} = \rho g(d-A)$ , met  $A$  = lokale golfamplitude en  $d$  = waterdiepte. Dit drukverloop komt overeen met het drukverloop bij lange golven; bij lange golven mag het drukverloop bij benadering hydrostatisch worden aangenomen.

Bij lange wanden kan het golfdiffractie/-reflectieprobleem, zoals hierboven aangegeven, worden gereduceerd tot een tweedimensionaal reflectieprobleem met staande golven. Bij constructies met kleinere afmetingen is dit niet mogelijk en moet het diffractieprobleem worden opgelost. Er kan dan gebruik worden gemaakt van de potentiaalstromingstheorie. Golven worden daarbij gelineariseerd en opgevat als een som van harmonische componenten. Voor een verticale ronde cilinder is een analytische oplossing voor het potentiaalprobleem voorhanden, zie bijvoorbeeld Sarpkaya en Isaacson (1981) of Nagai (1973). Voor andere geometrieën kan met numerieke rekentechnieken het golfdiffractieprobleem (potentiaalprobleem) worden opgelost.

## 4.2 NUMERIEKE BEREKENING

De numerieke berekening van quasi-statische golfbelastingen gebeurt met zogenaamde diffractiemodellen. Zie onder anderen Berkhoff (1976). Deze modellen zijn gebaseerd op een lineaire potentiaalstromingsformulering en bevatten dus geen weerstandsterm; ze zijn niet geschikt voor slanke constructies, omdat de weerstandskracht bij slanke constructies van belang is. Vergelijk de formules van Morison (Formule B4.2).

De diffractiemodellen worden daarom gebruikt voor volumineuze constructies waar traagheidskrachten overheersend zijn, zoals schepen, bouwputten en pijlers met grote afmetingen. Ook kan worden gedacht aan constructies onder water en drijvende constructies.

Golfkrachten worden steeds voor één golfrequentie berekend. In geval van een golfspectrum wordt het spectrum vertaald in een som van enkelvoudige golven. Met gebruikmaking van het superpositiebeginsel (dus uitgaande van lineariteit) kan bij een golfspectrum het krachtenspectrum worden berekend. Omdat dit krachtenspectrum geen fase-informatie bevat, kan hieruit niet het verloop van de kracht in de tijd worden bepaald. Wel kan een karakteristieke waarde, bijvoorbeeld een standaardafwijking, van het spectrum worden afgeleid (zie ook Paragraaf 5.7.4 in Deel C).

Diffractiemodellen kunnen worden gebruikt om hydrodynamische coëfficiënten te berekenen (voor hydrodynamische coëfficiënten zie ook Hoofdstuk 2 in Deel A). In feite is dit het inverse golfprobleem: de constructie wordt in één van zijn vrijheidsgraden een gedwongen beweging opgelegd en als gevolg daarvan worden golven uitgezonden. Er wordt een massa-traagheidsterm en een dempingsterm (representatief voor de uitgestraalde golven) gevonden. Deze termen kunnen vervolgens in berekeningen van de responsie van deze constructie op uitwendige krachten (dit kunnen ook golfkrachten zijn) als hydrodynamische interactiekrachten worden meegenomen. Zie ook Hoofdstuk 3 in Deel C voor de berekening van de constructieresponsie.

## 4.3 SCHAALMODELONDERZOEK

Voor constructies met een wat meer complexe vorm zijn de beschikbare analytische en numerieke modellen vooralsnog niet toereikend voor de bepaling van quasi-statische golfbelastingen. Dit geldt met name ook voor onderdelen van de constructie. Schaalmodellen zullen dan als regel uitkomst kunnen bieden. Dit geldt tevens voor

constructies die een zodanige bewegingsvrijheid hebben dat de golfbelastingen door de beweging worden beïnvloed. In Hoofdstuk 5 van Deel C wordt uitvoerig ingegaan op de schaalmodeltechnieken en op de mogelijkheden om meetsignalen te analyseren en verwerkingsresultaten presentabel te maken.

## 4.4 INVLOED VAN STROMING

Golven die in een stromingsveld terechtkomen, worden door de stroming beïnvloed. Bij tegenstroming wordt de voortplantingssnelheid van de golven kleiner en daarmee ook de golflengte (de golfperiode blijft onveranderd). In samenhang daarmee worden de golven hoger; de steilheid van de golven kan zozeer toenemen dat de golven breken. Bij meestroming gebeurt het omgekeerde en worden de golven 'uitgerekt' en lager.

Deze stromingsrefractie-effecten kunnen in numerieke golfmodellen worden meegenomen door een stromingsveld (potentialastroming) in te bouwen. Er kan daarbij ook een dissipatieterm worden meegenomen voor brekende golven en bodemwrijving (zie Hurdle, Kostense en Van den Bosch, 1989).

In riviermonden kan stroming er bijvoorbeeld toe leiden dat de golven naar één zijde worden gedrukt; het effect hiervan kan zijn dat golven verder doordringen dan in de situatie zonder stroming.

Bij slanke constructies kan het effect van stroming op de golfbelasting worden meegenomen door in de Morisonvergelijking de stroomsnelheid vectorieel op te tellen bij de orbitaalsnelheid. Dit levert een goede schatting van de stroom- en golfbelasting; daarbij worden de  $C_d$ - en  $C_m$ -coëfficiënten behorend bij de gecombineerde stroom- en orbitaalsnelheid gebruikt (deze coëfficiënten zijn afhankelijk van het getal van Reynolds en dus van de stroomsnelheid).

Het lokale effect van stroming rond constructies op golven is echter zeer complex en nog weinig voor berekening toegankelijk. In het algemeen zal daarom de combinatie van stroming en golven in een schaalmodel worden onderzocht.

## 4.5 RESPONSIE VAN CONSTRUCTIES OP QUASI-STATISCHE GOLFBELASTING

De responsie van een constructie op dynamische belastingen bestaat uit tijdsafhankelijke vervormingen en verplaatsingen en, daarmee samenhangend, tijdsafhankelijke spanningen in het materiaal en krachten in de ondersteuningspunten.

Wanden, golfbrekers en dergelijke zijn stijve constructies met een groot gewicht en de golfbelastingen worden zonder grote vervormingen overgebracht naar de ondergrond of de (paal)funderingsconstructie. De belangrijkste bezwijkmechanismen zijn kantelen en afglijden over de ondergrond. Bij deze constructies zijn dus vooral de grootte en de plaats van de in de tijd variërende belastingresultante van belang.

Constructies die drijven (al dan niet afgemeerd) of scharnierend zijn bevestigd (bijvoorbeeld scharnierende bodemkleppen die door luchtinblazing aan de vrije zijde

omhoog komen en zo een waterkering vormen) bewegen in meer of mindere mate onder invloed van golven. De golfbelasting is daarbij ook een functie van de mate van bewegen. De mate van responsie van de constructie is nu sterk afhankelijk van de verhouding van de eigenfrequentie van de constructie en de golffrequentie en er kan een parallel getrokken worden met de responsie van massaveersystemen. Zie hiervoor Hoofdstuk 3 van Deel C. De responsie kan zich zowel voordoen in de vorm van totaalbewegingen (verplaatsing als 'star lichaam') als in de vorm van bijvoorbeeld buig- of torsietrillingen (vervorming van het lichaam).

Slanke, ondersteunde constructies vervormen onder invloed van de golfbelasting (buiging, torsie). Ook hier is de responsie sterk afhankelijk van de verhouding van eigenfrequentie en golffrequentie. Naast krachtsfluctuaties in de frequentie van de golven kunnen zich ook hogerefrequente krachtsfluctuaties voordoen als gevolg van wervels in het zog achter de constructie.

Een veel toegepaste methode om de responsie van een constructie bij een gegeven golfspectrum te bepalen is de methode waarbij met behulp van een overdrachtsfunctie een responsiespectrum wordt berekend. De gehanteerde relatie is:

$$G_{yy}(f) = |H(f)|^2 \cdot G_{xx}(f)$$

met  $G_{yy}(f)$  = responsiespectrum  
 $H(f)$  = overdrachtsfunctie (frequentieafhankelijk)  
 $G_{xx}(f)$  = golfspectrum

De functie  $|H(f)|$  bevat de frequentieafhankelijke versterkingsfactor. De overdrachtsfunctie  $H(f)$  bevat ook fase-informatie. Deze is echter niet interessant wanneer men alleen de grootte van de responsie wil leren kennen.

Gebruikelijk is om in een schaalmodel een overdrachtsfunctie te bepalen tussen golfspectrum en responsiespectrum, of tussen golfspectrum en het spectrum van de krachten op de constructie. Dit biedt inzicht in de gevoeligheid van de constructie voor componenten uit het golfspectrum. Wanneer eenmaal een overdrachtsfunctie is bepaald, kan voor willekeurige andere golfspectra de responsie worden berekend. Deze werkwijze kan worden toegepast wanneer de constructie als een lineair, tijds-onafhankelijk systeem mag worden beschouwd. In Hoofdstuk 5 van Deel C wordt nader ingegaan op de overdrachtsfunctie en, meer algemeen, op rekenen in het frequentiedomein.

# 5 GOLFKLAPBELASTING

## 5.1 GOLFKLAPPEN IN RELATIE TOT DE CONSTRUCTIE

Golfklappen treden op wanneer de beweging van het vrije waterspiegeloppervlak plotseling wordt geblokkeerd. In het meest ongunstige geval wordt de impuls van het bewegende water (Engels: momentum) hierbij volledig 'teniet' gedaan en omgezet in een kracht. In de praktijk kan het water echter vrijwel altijd zijdelings wegstromen en krijgt een deel van de impuls dus een andere richting. Een soortgelijk verschijnsel treedt op wanneer een voorwerp op het wateroppervlak neerkomt (in de scheepvaart wordt het neerkomen van een schip op het wateroppervlak slamming genoemd).

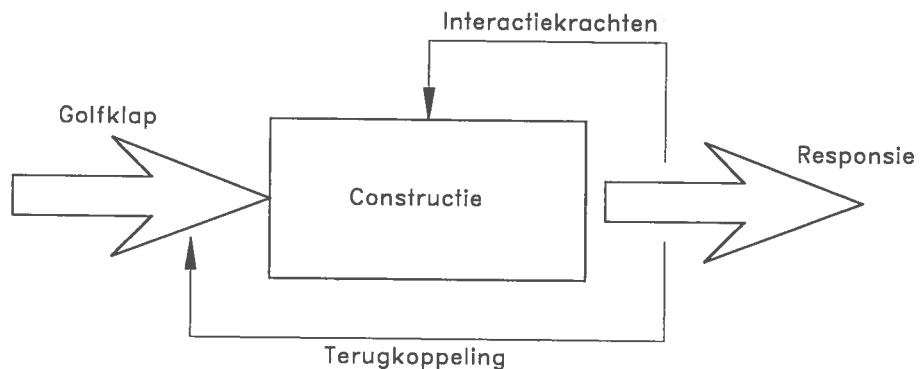
De constructie levert de kracht om het water 'af te stoppen'. Afhankelijk van de stijfheid zal de constructie diensgevolge meer of minder vervormen; gewichtsconstructies (bijvoorbeeld golfbrekers van het caissonstype) kunnen verplaatst worden.

Indien het water plotseling wordt afgestopt en niet zijdelings kan afstromen, zouden - wanneer het water niet samendrukbaar zou zijn - oneindig hoge drukken ontstaan. In de werkelijkheid gebeurt dit niet omdat altijd elastische elementen aanwezig zijn:

- het water zelf is compressibel;
- deze compressibiliteit neemt toe wanneer zich luchtbelletjes in het water bevinden;
- luchtzakken die tussen het waterfront en de constructie worden opgesloten, werken als een verend element;
- de constructie zelf is elastisch.

Het slapste element is bepalend voor de grootte van de klapdruk. Ook is van belang dat een constructie niet altijd gelijktijdig over het gehele aangeslagen oppervlak wordt geraakt; er vindt daardoor een 'uitsmering' van de klap in de tijd plaats, wat tot een langere klapduur en een lagere piekdruk aanleiding geeft.

De vervorming en/of verplaatsing van de constructie (de responsie van de constructie) kan dus van invloed zijn op de grootte van de klapdruk. Dit kan als een vorm



Figuur B5.1:  
Golfklap op constructie (schematisch).

van terugkoppeling worden gezien naar de belasting. De grootte van de constructie-responsie is sterk afhankelijk van de elastische eigenschappen van de constructie. Daarnaast ontstaan bij het responderen van de constructie passieve interactiekrachten (traagheids- en dempingskrachten). In onderstaande figuur is dit schematisch aangegeven.

Golfklappen zijn stootvormige belastingen met een in de tijd snel oplopende belastingsamplitude. Dit soort belastingen doet zich niet alleen bij golven voor, maar kan bijvoorbeeld ook optreden bij plotseling openen of sluiten van afsluiters in leidingen of in niet goed ontluchte leidingsystemen als gevolg van instabiele vloeistofoppervlakken. In het algemeen dus in situaties waarbij waterbewegingen abrupt worden afgestopt of van richting worden veranderd. Belastingen door botsende ijschotsen, schepen of andere drijvende objecten zijn eveneens stootvormig en zijn qua uitwerking vergelijkbaar met golfklapbelastingen.

Golfklappen kunnen tot hoge belastingen aanleiding geven. Als regel zal het streven van een ontwerper er daarom op gericht zijn de constructie zodanig vorm te geven of te plaatsen dat golfklapbelastingen worden vermeden. Wanneer dat niet mogelijk is, zal een afschatting moeten worden gemaakt van de kans van optreden en van de grootte van de klapbelasting. Voor een volledige probabilistische analyse van het golfklapprobleem is nodig dat de fysische relaties tussen de verschillende invloedsgrootheden en bovendien de kansverdelingsfuncties van deze grootheden bekend zijn. Dit is gewoonlijk niet het geval, zodat een probabilistische analyse veelal sterke beperkingen zal kennen.

Een mogelijkheid is wel om aan de hand van analytische modellen een eerste afschatting te maken van de klapbelasting bij een gegeven ontwerp-golf. Deze modellen geven veelal een hoge waarde van de klapbelasting. In Paragraaf 5.4 worden enkele analytische modellen besproken. Controle van de klapbelasting (en van de responsie) of een nadere quantificering van de belasting zal als regel gewenst zijn. Numerieke modellen zijn in ontwikkeling, maar de waarde daarvan voor hydraulische constructies is op dit moment nog te beperkt.

Schaalmodellen lenen zich beter voor een nadere vaststelling van de klapbelasting, maar ook schaalmodellen kennen beperkingen omdat ingesloten lucht aanleiding kan geven tot moeilijk te quantificeren schaaffecten. De manier van werken in het schaalmodel kan dan als volgt zijn: voor een gegeven constructie worden bij gelijk blijvende hydraulische condities de golfklapdrukken gemeten en overschrijdingsverdelingen bepaald. Door variatie van de hydraulische condities (parameter-variatie) kan vervolgens inzicht in het wel of niet optreden van golfklappen en in de klapgrootte worden verkregen. Een principiële moeilijkheid blijft dan de vertaling naar het prototype, maar er kan altijd een bovengrens voor de belasting worden aangegeven.

In de volgende paragrafen wordt de excitatiekant van het golfklapprobleem besproken, in Hoofdstuk 6 volgen de responsiekant en terugkoppelingen. In Hoofdstuk 5 in Deel C wordt nader ingegaan op de schaalmodeltechniek en in Hoofdstuk 4 en 5 in Deel C worden schaaffecten bij golfklaponderzoek besproken.

## 5.2 GOLFKLAPKARAKTERISTIEKEN

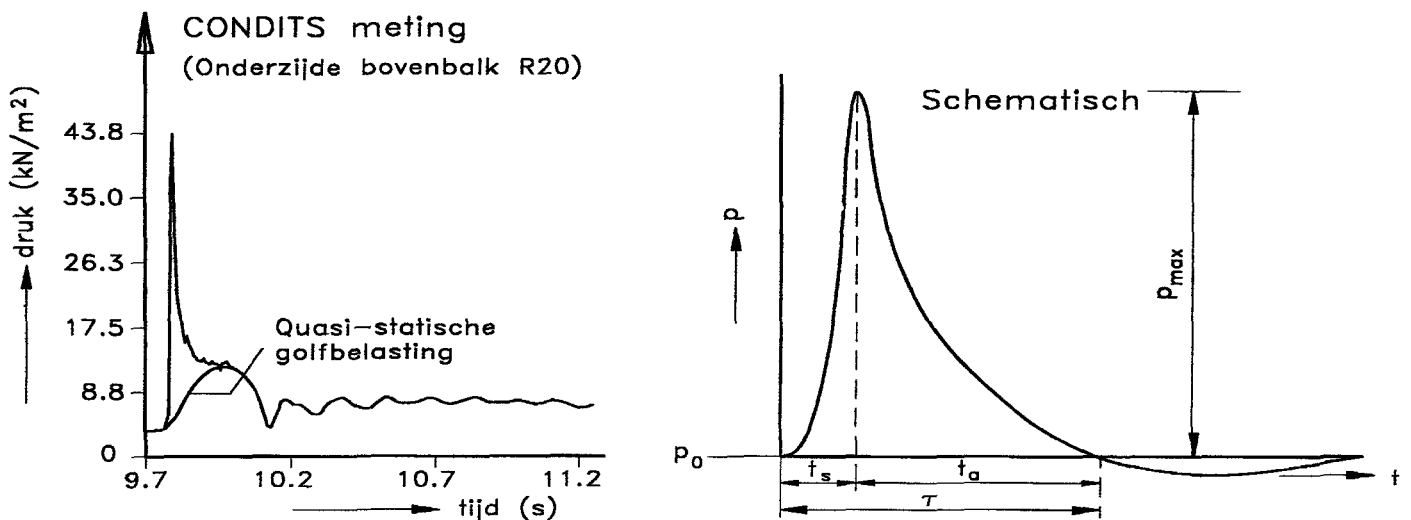
Metingen van golfklapdrukken laten een grote variatie zien in het tijd-drukverloop. Het beeld is soms onduidelijk doordat na het wegvallen van de eigenlijke klap nog een quasi-statische druk overblijft. Wanneer we het quasi-statische deel wegdenken, kunnen er als extremen twee verschillende klapdrukverlopen worden onderscheiden; deze verschillen van elkaar doordat tijdens de klap wel of geen lucht wordt ingesloten. In het algemeen zullen evenwel mengvormen optreden. De extremen zijn:

- Een drukverloop met een tot aan het maximum zeer steil oplopende druk en een weer snel afvallen van de druk (zie Figuur B5.2a, klapdrukverloop type 1; in de figuur rechts is het drukverloop schematisch weergegeven, de figuur links geeft een voorbeeld van het drukverloop zoals gemeten op de onderzijde van een bovenbalk van de stormvloedkering in de Oosterschelde tijdens stormomstandigheden; CONDITS-project). Bij dit type klap wordt geen lucht ingesloten.
- Een drukverloop waarbij de druk minder snel oploopt, het maximum als regel minder hoog is en waarbij sterke oscillaties in de neergaande flank aanwezig zijn. Deze oscillaties zijn het gevolg van insluitingen van lucht tussen het wateroppervlak en de constructie of van luchtbellens in het water (zie Figuur B5.2b, klapdrukverloop type 2; in de figuur rechts is het drukverloop schematisch weergegeven, de figuur links geeft een voorbeeld van het drukverloop zoals gemeten in een schaalmodel van de caissonoplossing voor de stormvloedkering in de Oosterschelde).

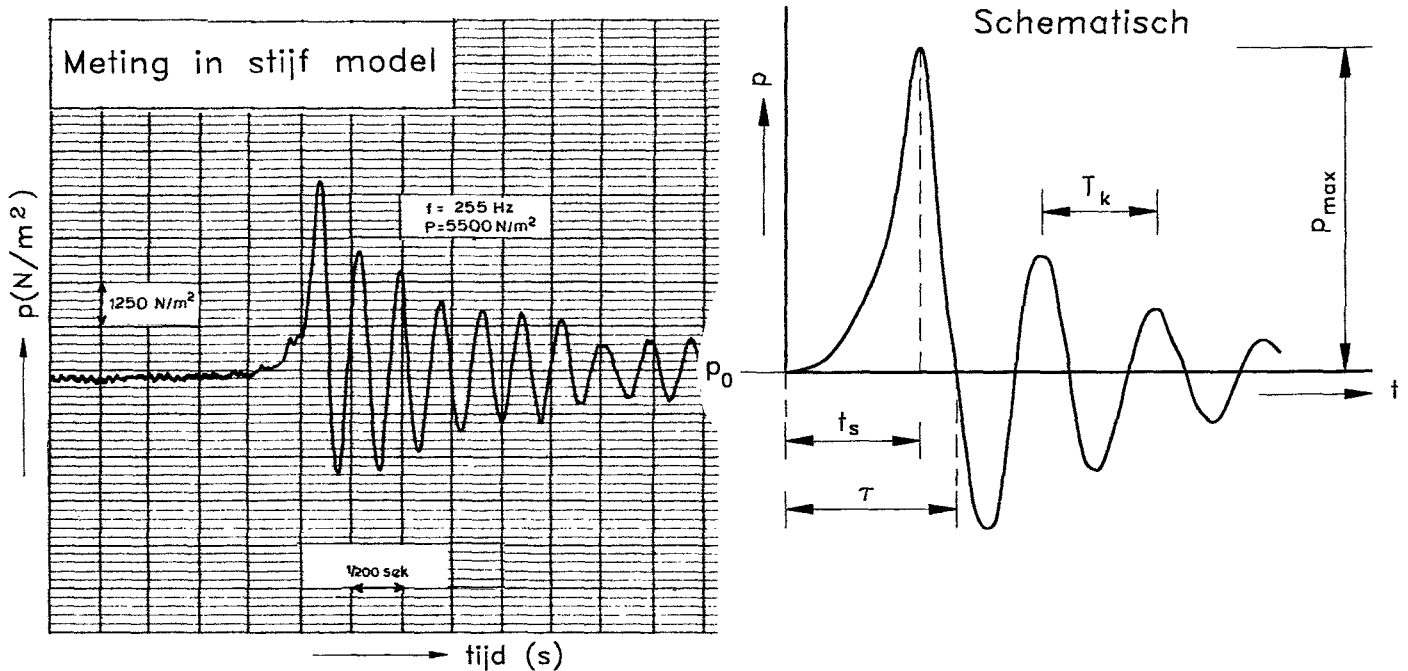
In de figuren zijn karakteristieke grootheden aangegeven, zoals klapduur  $\tau$ , stijgtijd  $t_s$ , afvaltijd  $t_a$ , omgevingsdruk  $p_0$ , maximale klapdruk  $p_{\max}$  en periode  $T_k$  van oscillaties in de dalende flank.

De klapduur  $\tau$  ligt gewoonlijk tussen 10 en 100 ms; uitschieters, vooral naar beneden, tot 1 ms komen evenwel ook voor. Stijgtijden liggen in het algemeen in de range 1 - 30 ms, evenwel ook met uitschieters naar beneden tot een orde van grootte van 0,1 ms. Bij de klappen met luchtinsluiting zijn  $\tau$  en  $t_s$  vrijwel steeds hoger dan bij de klappen zonder luchtinsluiting. De maximale klapdruk  $p_{\max}$  ligt bij extreme condities veelal rond 100 à 150 kN/m<sup>2</sup>, maar lokaal (kleine oppervlakken) kunnen de drukken wel een factor 2 hoger zijn.

Figuur B5.2a:  
Klapdrukverloop type 1.







Figuur B5.2b:  
Klapdrukverloop type 2.

Golfklappen doen zich gewoonlijk niet gelijktijdig over een grote oppervlakte voor; het klapfront verplaatst zich en de belasting op de constructie wordt daarvoor enigszins in de tijd uitgesmeerd. Voor het bepalen van de totale belasting op de constructie is het dus van belang om het ruimtelijke drukbeeld in de tijd te kennen.

De impuls  $I_k$  van een golfklap is gedefinieerd als de integraal van de klapdruk over de klapduur  $\tau$  en over het aangeslagen oppervlak  $A$ :

$$I_k = \int_{\tau} \int_A p(t) dt dA \quad (B5.1)$$

Omdat de klapduur  $\tau$  niet altijd eenduidig aan te geven valt, wordt de impuls in de literatuur ook wel gedefinieerd als de integraal van de druk over de stijgtijd  $t_s$  en het aangeslagen oppervlak  $A$ .

De aldus gedefinieerde impuls is niet gelijk aan de totale impuls  $mv$  ( $m$  = watermassa,  $v$  = watersnelheid) van het bewegende water, maar heeft slechts betrekking op de afname van de component van de impuls loodrecht op het constructieoppervlak; immers, bij een golfklap zal als regel het water niet volledig worden afgestopt (dus resulterende snelheid 0), maar zal een deel van de impuls van richting veranderen en zal het water zijdelings afstromen.

De hoeveelheid water die bij de klap is betrokken, kan worden vertaald in een virtuele watermassa die als geheel een plotselinge vertraging ondervindt bij de klap. Deze virtuele massa is vergelijkbaar met de toegevoegde watermassa bij trillende constructies en kan op dezelfde wijze worden vertaald. In Hoofdstuk 3 van Deel C wordt op de bepaling van de toegevoegde watermassa nader ingegaan.

## 5.3 INVLOEDSFACTOREN

Tal van factoren zijn van invloed op het optreden van golfklappen, op de grootte van de klapdrukken en op het verloop van de klap in tijd en ruimte. Genoemd worden:

Geometrische factoren:

- de vorm van de constructie (in verband met luchtinsluitingen, zijdelings af kunnen stromen van water, grootte van het aangeslagen oppervlak);
- de hoek met en de positie ten opzichte van het gemiddelde wateroppervlak (bijvoorbeeld uitkragingen boven het wateroppervlak, dijkwaluds, wanden);
- de diepte en het verloop van het voorland (in verband met de voortplanting van de golven, refractie en breking).

Factoren samenhangend met de stijfheid (zie ook Paragraaf 5.4):

- de elasticiteit van de constructie en de compressibiliteit van het water;
- de aanwezigheid van luchtzakken tussen wateroppervlak en constructie of van luchtbelletjes in het water.

Factoren samenhangend met de inkomende golf:

- de golfhoogte en de golfperiode (hoe groter de golfhoogte en hoe korter de golfperiode, hoe hoger de snelheid van het wateroppervlak);
- de golfrichting (hoe groter de hoek tussen de normaal op de constructie en de golfrichting, hoe kleiner de kans op golfklappen);
- golfrichtigingspreiding;
- de vorm van de lokale golf, die mede wordt bepaald door teruglopende voorgaande golven.

Factoren gerelateerd aan het water:

- het zoutgehalte van het water (het zoutgehalte is van invloed op de grootte en de verdeling van luchtbelletjes in het water en daarmee op de voortplantingssnelheid van schokgolven (zie Paragraaf 5.4); ook is de soortelijke massa afhankelijk van het zoutgehalte);
- stroming van het water (stroming beïnvloedt het golfveld maar ook de golven lokaal bij de constructie);
- de waterstand.

Of golfklappen zullen optreden is voornamelijk afhankelijk van de geometrie van de constructie en haar omgeving. Tegen een verticale wand zullen zich bijvoorbeeld geen golfklappen voordoen zolang het voorland maar diep genoeg is en er geen veranderingen in bodemligging optreden. Bij een oplopend voorland bestaat de kans dat golven juist in de nabijheid van de constructie willen breken: de steilheid van het golfveld neemt sterk toe en de golftop kan daarbij de constructie treffen.

De geometrische invloedsfactoren zijn dus vooral bepalend voor het wel of niet optreden van golfklappen; golfgrootheden zoals golfhoogte, golfperiode en golfrichting zijn vooral van invloed op de grootte van de impuls. Hoe groter de golfperiode, hoe groter de watermassa die bij de golfklap betrokken is. Golfhoogte en golfperiode zijn beide van invloed op de snelheid van die watermassa. De hoogste golven geven evenwel niet per definitie ook de grootste golfklappen. Van invloed daarop is hoe de voorgaande, teruglopende golven de inkomende golf vervormen. De voortplantingsrichting van het golffront is bepalend voor de richting van de impuls. In het algemeen geldt dat naarmate de hoek van het golffront met het constructievlak toeneemt, de kans op golfklappen afneemt. Bij een hoek groter dan  $20^\circ$  is de kans op zware golfklappen gering doordat het water makkelijk zijwaarts kan afstromen.

Kansrijke golfklapsituaties zijn dus:

- Verticale constructies met een oplopend voorland.
- Uitkragende delen van de constructie die zich in het gebied bevinden met verticale waterbewegingen. Dit kan ook een rioolplafond zijn. Klappen ten gevolge van verticale waterbewegingen zijn het grootst in het gebied waar de verticale snelheid het grootst is, dus in de nabijheid van de stilwaterlijn.
- Constructies waar golven door of onderdoor kunnen lopen en constructies met hun onderkant in het gebied van verticale waterbewegingen.
- Constructies die zo laag zijn dat golven eroverheen slaan waardoor delen van de constructie aan lijzijde door het overslaande water worden getroffen. Het overslaande water kan ook aanleiding zijn van plotselinge waterbewegingen aan lijzijde, die in tweede instantie tot een klapverschijnsel aanleiding kunnen geven.
- Taluds met brekende golven.

Om golfklappen te voorkomen zullen deze situaties zoveel mogelijk moeten worden vermeden.

## 5.4 TYPERING VAN DE GOLFKLAPPEN

Golfklappen worden in navolging van Lundgren (1969) veelal als volgt getypeerd:

- Hammer shocks.  
Dit zijn klappen waarbij het wateroppervlak evenwijdig aan het constructieoppervlak aankomt en waarbij het water niet zijdelings kan afstromen; er wordt ook geen lucht ingesloten tussen het water en de constructie of de luchtinsluiting is klein en lokaal. In de praktijk treden deze klappen nauwelijks op, tenzij op een beperkt deel van het getroffen oppervlak.  
Bij deze klappen zijn de compressibiliteit van het water (die door de aanwezigheid van lucht in het water wordt beïnvloed) en de elasticiteit van de constructie van belang voor de optredende verschijnselen en voor de grootte van de klapdruk. Bij de klap ontstaan schokgolven in het water en in de constructie die zich voortplanten met de geluidssnelheid. De verschijnselen laten zich beschrijven met een schokgolfmodel.

- **Ventilated shocks.**  
Bij deze klappen kan lucht tussen het wateroppervlak en de constructie ontwijken en kan het water zijdelings afstromen. De verschijnselen worden voornamelijk door traagheid en zwaartekracht bepaald; de compressie van het water en de elasticiteit van de constructie spelen geen rol van betekenis meer. De verschijnselen kunnen met een stromingsdrukmodel worden beschreven.
- **Compression shocks.**  
Bij deze klappen wordt lucht tussen het waterfront en de constructie ingesloten en gecompriemd. De luchtbel oscilleert in een eigenfrequentie na en geeft daardoor het karakteristieke oscillerende drukverloop in de dalende flank van de klapdruk. Bij grote bellen verloopt het comprimeren nagenoeg adiabatisch; wanneer er veel kleine belletjes worden ingesloten, is er meer warmte-uitwisseling met het omringende water mogelijk en tendeeft de compressie naar een isotherm proces. Hoe hoger de oscillatiefrequentie, hoe kleiner de ingesloten luchtbel(len). De maximale druk is als regel kleiner dan bij ventilated shocks of hammershocks. Voor dit type klap zijn luchtcompressiemodellen ontwikkeld waarin de luchtbel als een veer wordt beschouwd en waarbij de bij de klap betrokken watermassa via een toegevoegde-watermassaberekening wordt bepaald.

De maximale druk bij een golfklap kan aan de hand van bovengenoemde modellen worden afgeschat wanneer duidelijk is welke factoren dominant zijn. Als regel echter kunnen de drukkbepalende factoren niet zonder meer worden aangegeven. Bovendien zijn afschattingen nodig van bijvoorbeeld de snelheid van het water, de hoeveelheid aan de klapimpuls bijdragende watermassa en de hoeveelheid lucht die in het water is opgelost. Metingen in situ of in schaalmodellen kunnen dan nodig zijn om tot een goede voorspelling te komen van de golfklapbelasting.

## 5.5 ANALYTISCHE BEREKENING VAN KLAPDRUKMAXIMA

Uitgaande van de hiervoor genoemde golfklaptypering zijn golfklapmodellen ontwikkeld waarmee het maximum in de klapdruk kan worden berekend. De uitdrukkingen voor de maximale klapdruk worden hier gegeven. De formules geven in het algemeen (uitgezonderd het luchtcompressiemodel) geen informatie over de klapduur, dus ook niet over de klapimpuls. Omdat de responsie van de constructie afhankelijk is van beide grootheden, zijn onderstaande uitdrukkingen voor de maximale klapdruk dan ook slechts beperkt bruikbaar, tenzij een goede schatting van klapduur en klapimpuls kan worden gemaakt.

Er wordt in deze paragraaf ook in het kort ingegaan op analytische formules voor de golfklapbelasting op verticale wanden.

### *Lineair schokgolfmodel*

Dit model geldt voor een golfklap van het type hammer shock. Verondersteld wordt dat de compressibiliteit van het water en de elasticiteit van de massieve constructie de drukkbepalende factoren zijn. Bij de klap ontstaat zowel in het water als in de constructie een schokgolf. Het model geeft de grootte van de druksprong over het

schokgolffront in het water. Wanneer alleen de compressibiliteit van het water in rekening wordt gebracht, volgt de maximale klapdruk  $p_{\max}$  uit:

$$p_{\max} - p_0 = \rho_w c_w v_0 \quad (\text{B5.2})$$

met  $\rho_w$  = soortelijke massa van het water  
 $c_w$  = voortplantingssnelheid schokgolf in water (bij zuiver water 1430 m/s)  
 $v_0$  = naderingssnelheid van het waterfront  
 $p_0$  = druk in het water vóór de klap, dus vóór het schokgolffront

Deze formule wordt ook gebruikt voor het berekenen van waterslag in leidingen en is als eerste door Von Kármán (1929) gebruikt in golfklapberekeningen. De voortplantingssnelheid  $c_w$  is gerelateerd aan de compressibiliteit en de dichtheid van water volgens:

$$c_w = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{B5.3})$$

met  $K$  = compressiemodulus =  $1/\kappa$  (=  $2,04 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup> voor zuiver water)  
 $\kappa$  = compressibiliteit volgens:  $\kappa = -(\Delta V/\Delta p)/V$ , met  $\Delta p$  = drukverandering,  $V$  = oorspronkelijk volume en  $\Delta V$  = verandering in volume

Wordt ook de elasticiteit van de constructie in rekening gebracht, dan gaat de formule voor de maximale druk over in:

$$p_{\max} - p_0 = \rho_w c_w v_0 \frac{1}{1 + \rho_w c_w / \rho_c c_c} \quad (\text{B5.4})$$

met  $c_c$  = voortplantingssnelheid schokgolf (= geluidssnelheid) in het constructiemateriaal (=  $\sqrt{E/\rho_c}$ )  
 $E$  = elasticiteitsmodulus van het constructiemateriaal  
 $\rho_c$  = soortelijke massa constructie

Deze formule laat zien dat de maximale druk in het water door het in rekening brengen van de elastische eigenschappen van het constructiemateriaal wordt gereduceerd. De geluidssnelheid in het constructiemateriaal is als regel groot ten opzichte van de geluidssnelheid in water. Voor staal geldt bijvoorbeeld  $c_c = 5100$  m/s, voor beton  $c_c = 3500$  m/s. Voor zuiver water geldt  $c_w = 1430$  m/s, maar wanneer zich lucht in het water bevindt, zal de geluidssnelheid aanzienlijk lager zijn. Bij een luchtgehalte van 1% bijvoorbeeld is de geluidssnelheid nog slechts circa 100 m/s. De invloed van de elasticiteit van het constructiemateriaal op de maximale druk wordt dan verwaarloosbaar klein. Bij niet-massieve constructies is de doorbuiging een orde groter dan de elastische inverting van het materiaal; in dat geval kan de elasticiteit van de constructie wel belangrijk zijn.

De maximale klapdruk is - in geval zich lucht in het water bevindt - aanmerkelijk lager dan bij zuiver water. Führböter (1966) heeft voor dit geval een analytische uitdrukking afgeleid. Hier zal in Hoofdstuk 4 in Deel C nader op in worden gegaan.

Het lineaire schokgolfmodel geeft (aannemende dat het water zuiver is en de geluidssnelheid dus 1430 m/s bedraagt) een absolute bovengrens voor de klapdruk. Ook bij aanname van een lagere geluidssnelheid geeft dit model nog zeer hoge, vaak niet-realistische klapdrukken.

#### Stromingsdrukmodel

Dit is het eenvoudigste model dat geldt voor een golfklap van het type ventilated shock. In het model wordt er vanuit gegaan dat het water makkelijk zijdelings kan wegstromen. De maximale druk  $p_{\max}$  wordt via een coëfficiënt uitgedrukt in de stromingsdruk:

$$p_{\max} - p_0 = k \left( \frac{1}{2} \rho v_0^2 \right) \quad (\text{B5.5})$$

met  $k$  = coëfficiënt die de grootte van de klapdruk bepaalt

In de scheepsbouwkunde is het gebruikelijk om met de slammingcoëfficiënt  $c_s$  te werken. Deze is op dezelfde manier gedefinieerd als  $k$ .

De coëfficiënt  $k$  (of  $c_s$ ) is geometriaafhankelijk en kan proefondervindelijk worden bepaald of theoretisch worden afgeleid. Dit laatste levert niet altijd eenduidige resultaten op, zoals uit Figuur B5.4 uit Miller (1980) blijkt. Deze figuur geldt voor een cirkelvormige cilinder, met zijn as parallel aan het wateroppervlak, die het wateroppervlak met snelheid  $v$  raakt. In de figuur is  $c_s$  als functie van  $s/D$  ( $s$  = indompelingsdiepte,  $D$  = cilinderdiameter) uitgezet. De coëfficiënt  $c_s$  varieert met de indompelingsdiepte en is dus in zijn algemeenheid een functie van de tijd:

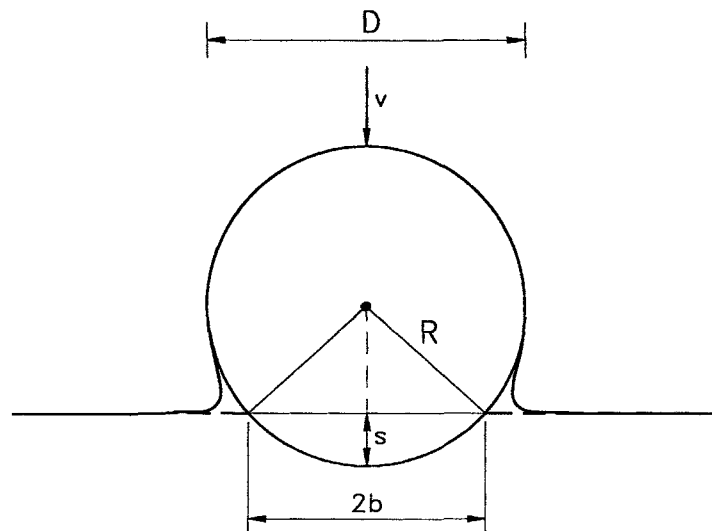
$$c_s = c_0 f(t) \quad (\text{B5.6})$$

met  $c_0$  = slammingcoëfficiënt (maximum) op moment van raken ( $t = 0$ )

$f(t)$  = tijdsafhankelijke functie

Von Kármán (1929) vond voor  $c_0$  de waarde  $\pi$ .

De afleiding van Von Kármán verloopt als volgt (zie ook onderstaande Figuur B5.3):



Figuur B5.3:  
Vallende cilinder op water.

De kracht  $F$  bij botsing is volgens de tweede wet van Newton gelijk aan:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = v \frac{dm}{dt} = v \frac{dm}{ds} \frac{ds}{dt} = v^2 \frac{dm}{ds} \quad (\text{B5.7})$$

met  $m$  = de bij de botsing betrokken hoeveelheid watermassa; deze volgt uit een toegevoegde-watermassa-beschouwing en kan gelijk gesteld worden aan  $\frac{1}{2}\rho\pi b^2$  per eenheid van lengte van de cilinder (overeenkomstig de toegevoegde watermassa van een vallende plaat met breedte  $2b$ )

$v$  = valsnelheid, die constant wordt verondersteld

$s$  = indompelingsdiepte =  $vt$

Met  $b^2 = s(2R-s)$  volgt voor  $F$  per eenheid van cilinderlengte:

$$F = \rho\pi v^2(R-s) \quad (\text{B5.8})$$

Wanneer nu de slamingcoëfficiënt wordt gedefinieerd als:

$$c_s = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 D} \quad (\text{B5.9})$$

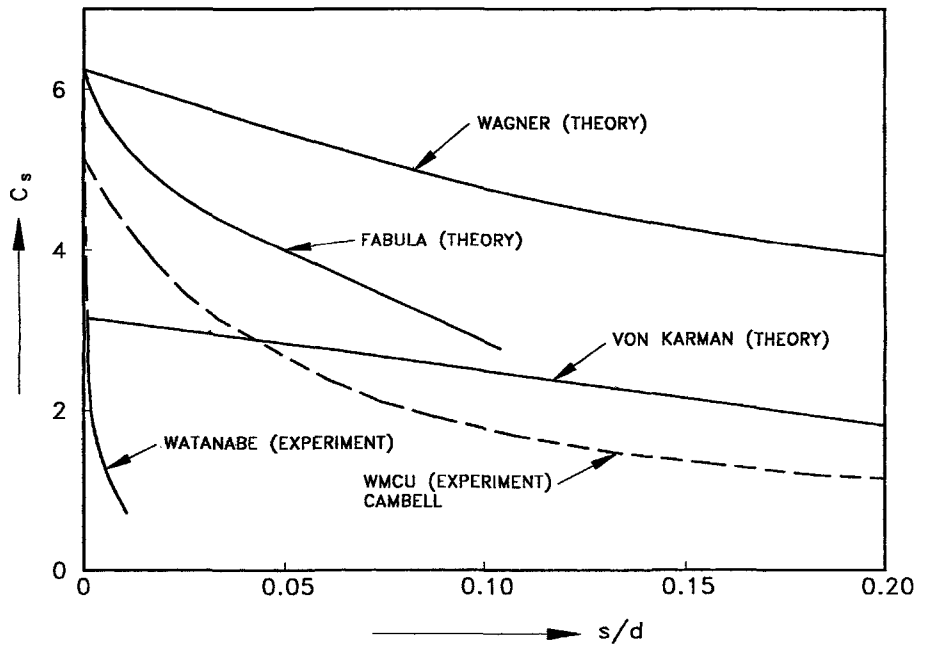
wordt voor  $c_s$  gevonden:

$$c_s = \pi(1-2s/D) = \pi(1-2vt/D) \quad (\text{B5.10})$$

Voor  $t = 0$  wordt de maximale waarde gevonden:  $c_s = c_0 = \pi$ .

De andere door Miller aangehaalde onderzoekers Wagner (1931) en Fabula (1957) geven andere afleidingen (uitgaande van het feit dat het water omhoog komt wanneer de cilinder het wateroppervlak penetreert en uitgaande van een elliptisch ingedompeld cilinderoppervlak) en vinden voor  $c_0$  de waarde  $2\pi$ . Ook de functie-waarde  $f(t)$  is bij deze onderzoekers groter (Figuur B5.4).

De streeplijnen in Figuur B5.4 zijn gebaseerd op experimenten met een vallende cirkelvormige cilinder (Watanebe, 1934) en experimenten met golven tegen een gefixeerde cirkelvormige cilinder (Campbell en Weynberg, 1979). De laatste experimenten zijn bij Wolfson Marine Craft Unit (wmcu) van de Southampton University uitgevoerd. Miller beveelt de wmcu-curve aan met  $c_0 = 5,15$ . Gezien de resultaten van de experimenten lijkt dit een goed uitgangspunt.



Figuur B5.4: Slammingcoëfficiënt  $c_s$  voor een ronde cilinder (Miller, 1980).

In het geval dat de vallende cilinder neerkomt op een wateroppervlak dat zelf in verticale richting beweegt, moet met de relatieve snelheid  $v_{rel}$  worden gerekend. In de praktijk doet deze situatie zich voor bij varende schepen in zeevang en bij andere drijvende objecten in golven.

Van belang voor de grootte van de klapdruk is of het wateroppervlak de constructie al dan niet onder een hoek raakt. De coëfficiënt  $k$  in Formule B5.5 is kleiner naarmate de hoek tussen het wateroppervlak en de constructie groter is. Het stromingsdrukmodel leent zich goed voor een eerste afchatting van de klapdruk.

#### Luchtcompressiemodel

Het luchtcompressiemodel geldt voor een golfklap van het type compression shock en kan dus worden toegepast wanneer lucht wordt opgesloten tussen het water en de constructie. In het luchtcompressiemodel is de opgesloten lucht het belangrijkste element. Er zijn verschillende modellen ontwikkeld. Een bekend model is het lineaire zuigermodel van Bagnold (1939). Het water wordt daarbij onsamendrukbaar verondersteld en de constructie niet-elastisch. De luchtbel tussen water en constructie is het verende element en brengt de klapdruk over naar de constructie. De bij de klap betrokken hoeveelheid water kan met een toegevoegde-watermassa-beschouwing worden bepaald. Het model kan worden vergeleken met een enkelvoudig massaveer-systeem; de oplossing van de drukvergelijking verloopt analoog. Ramkema (1978) heeft een verfijning op het model van Bagnold aangebracht door ook de compressibiliteit van het water mee te nemen. Omdat het model meer explicatie vereist dan de beide hiervoor genoemde modellen, wordt er op deze plaats niet verder op ingegaan. In Hoofdstuk 4 in Deel C wordt het model nader besproken.



### *Klapdruk op verticale wand*

Een van de eerste formules voor golfklapbelastingen door brekende golven op een verticale wand werd opgesteld door Minikin (1950). Zijn formule is gebaseerd op ervaringen met bestaande golfbrekers en experimenten van Bagnold (1939) en heeft brede bekendheid gekregen. De formule wordt ook in het Shore Protection Manual (CERC, 1984) gegeven, met de waarschuwing echter dat de formule tot zeer hoge klapbelastingen aanleiding geeft.

De klapduur is niet in de formule begrepen, zodat de totale golfklapimpuls niet te bepalen is en de uitwerking van de golfklap in termen van een stabiliteitsbeschouwing (afschuifkracht of kantelmoment) niet goed kan worden geschat.

Van recente datum zijn de formules van Goda (1985 en 1992). Deze formules gelden voor verticale golfbrekers en kunnen worden gebruikt voor zowel brekende als niet-brekende (staande) golven.

Oumeraci, Klammer en Partensky (1993) hebben op basis van metingen in een grote golfgoot een classificatie gemaakt van brekende golven en de daarmee samenhangende golfklappen op een golfbreker met een verticale wand. Uit hun onderzoek blijkt dat de plaats waar de golf breekt van groot belang is; deze wordt zowel bepaald door de voorland-geometrie en de vormgeving van de voet van de golfbreker als door de vorm van de individuele golf (die weer wordt bepaald door de 'voorgeschiedenis' in het gebied bij de wand). In het onderzoek werden golfklappen gevonden met kenmerken van het type ventilated shock en compression shock. Het onderzoek bevestigt dat geometrische factoren bepalen of er al dan niet golfklappen optreden.

## 6 RESPONSIE VAN CONSTRUCTIES OP GOLFKLAPPEN

### 6.1 VAN BELANG ZIJNDE EIGENSCHAPPEN VAN DE CONSTRUCTIE

Essentieel bij een golfklap is dat de beweging van een hoeveelheid water bij het treffen van een constructieoppervlak abrupt wordt afgestopt. De constructie moet daartoe een kracht leveren die – volgens de tweede wet van Newton – gelijk is aan de eerste afgeleide naar de tijd van de impuls  $mv$  van de klap:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (\text{B6.1})$$

In deze formule is  $v$  de snelheidscomponent loodrecht op het oppervlak en  $m$  de watermassa die een vertraagde beweging ondergaat. De kracht  $F$  is gelijk aan de belasting die lokaal en loodrecht op de constructie werkt. De constructie kan de belasting alleen opnemen als ze een vervorming ondergaat. Deze vervorming is al dan niet elastisch. Bij zeer stijve constructies, zoals betonnen wanden, is de vervorming uiteraard zeer klein.

De responsie van de constructie bestaat uit het geheel van vervormingen die in de tijd optreden inclusief de daarmee gepaard gaande overdracht van de belasting naar de ondersteuningspunten. De responsie is niet alleen afhankelijk van de grootte en de duur van de golfklapbelasting, maar ook van de dynamische eigenschappen van de constructie. Bij stootvormige belastingen, zoals een golfklap, worden één of meer eigenbewegingen van de elastische constructie aangeslagen; de constructie trilt hierin uit. Van belang voor de responsie is nu hoe de klapduur  $\tau$  zich verhoudt tot de eigentrillingstijd(en)  $T_n$  van de constructie. Ook is van belang hoe groot de demping is. Wanneer de tijdsafhankelijke belasting en de dynamische eigenschappen van de constructie bekend zijn, kan de responsie in het tijdsdomein worden berekend. In Hoofdstuk 3 in Deel C wordt hier verder op ingegaan.

In de volgende paragraaf wordt aan de hand van een enkelvoudig massaveersysteem de invloed nagegaan van klapduur, klapvorm en eigentrillingstijd op de responsie. In de praktijk is de situatie complexer omdat een constructie meestal meerdere vrijheidsgraden heeft. In essentie verandert er echter niet veel: er kunnen in dat geval tegelijkertijd meerdere eigentrillingen worden aangestoten, zodat de responsie dan zal bestaan uit een superpositie van meerdere eigenbewegingen. Daarbij kan ook energieoverdracht plaatsvinden tussen de verschillende eigenbewegingen.

## 6.2 RESPONSIE VAN EEN ENKELVOUDIG MASSAVEERSYSTEEM OP EEN STOOTBELASTING

Het enkelvoudig massaveersysteem heeft een massa  $m$ , een veerstijfheid  $k$  en een vrijheidsgraad  $x$ ; voorlopig gaan we uit van een ongedempt systeem, zie Figuur B6.1. De eigenperiode  $T$  volgt uit:

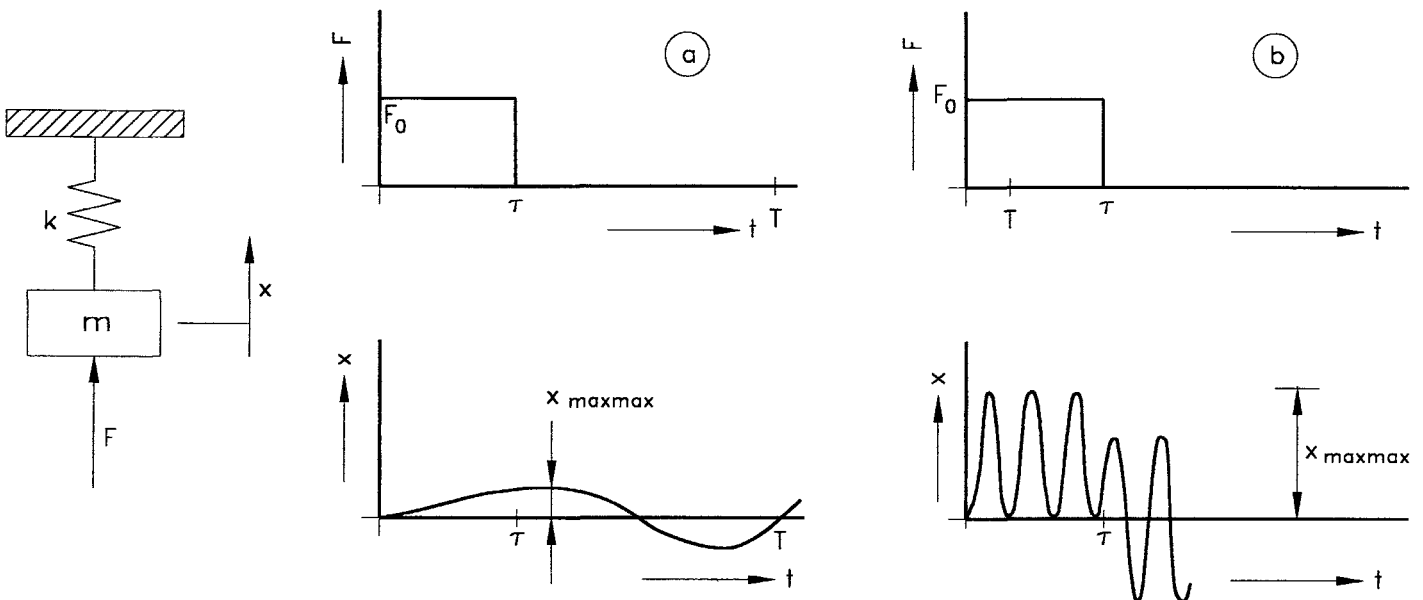
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (\text{B6.2})$$

De hoekfrequentie  $\omega$  is gelijk aan:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{B6.3})$$

Op dit systeem werkt, om een voorbeeld te nemen, een blokvormige belasting met amplitude  $F_0$  en tijdsduur  $\tau$ . De responsie van het systeem, waarvoor de verplaatsing  $x$  van de massa gekozen wordt (voor de reactiekracht in het ophangpunt van de veer geldt overigens hetzelfde), is nu afhankelijk van de verhouding  $\tau/T$ . Ter illustratie worden twee gevallen onderscheiden:

(a)  $\tau \ll T$  (relatief slap systeem) en (b)  $\tau \gg T$  (relatief stijf systeem). In onderstaande Figuur B6.1 is de responsie voor beide gevallen getekend (zie ook Hoofdstuk 2 in Deel A).



Figuur B6.1:  
Responsie ongedempt massaveersysteem  
op blokbelasting.

De verplaatsing  $x(t)$  (responsie) verloopt in beide gevallen volgens:

$$t < \tau: \quad x(t) = \frac{F_0}{k} (1 - \cos \omega t) \quad (\text{B6.4})$$

$$t > \tau: \quad x(t) = 2 \frac{F_0}{k} \sin \frac{\omega \tau}{2} \sin \omega \left( t - \frac{\tau}{2} \right) \quad (\text{B6.5})$$

Voor  $\tau \ll T$  is de responsie gering; de constructie is relatief slap en 'heeft geen tijd' om op de belasting te reageren. Voor  $\tau \gg T$  is de maximale responsie  $x_{\max}$  gelijk aan  $2F_0/k$ , dit wil zeggen gelijk aan  $2x_{\text{stat}}$ , met  $x_{\text{stat}}$  = verplaatsing bij een statische kracht  $F_0$ . De dynamische vergrotingsfactor bedraagt dus maximaal 2 (maar zal veelal kleiner zijn).

De amplitude van de residuele responsie (de responsie die na het wegvallen van de belasting, dus bij  $t > \tau$ , overblijft) is - zoals in bovenstaande Formule B6.5 eenvoudig valt te zien - afhankelijk van de uitwijking van het systeem op het moment dat de blokbelasting terugvalt naar 0.

De responsie  $x_{\max\max}$  is de grootste responsie die tijdens het belasten of na het wegvallen van de belasting optreedt.

Voor verschillende vormen van de belasting is in Figuur B6.2 de genormeerde maximax responsie  $x_{\max\max}$  als functie van de verhouding  $\tau/T$  weergegeven. De grafiek is ontleend aan Harris and Crede (1961).

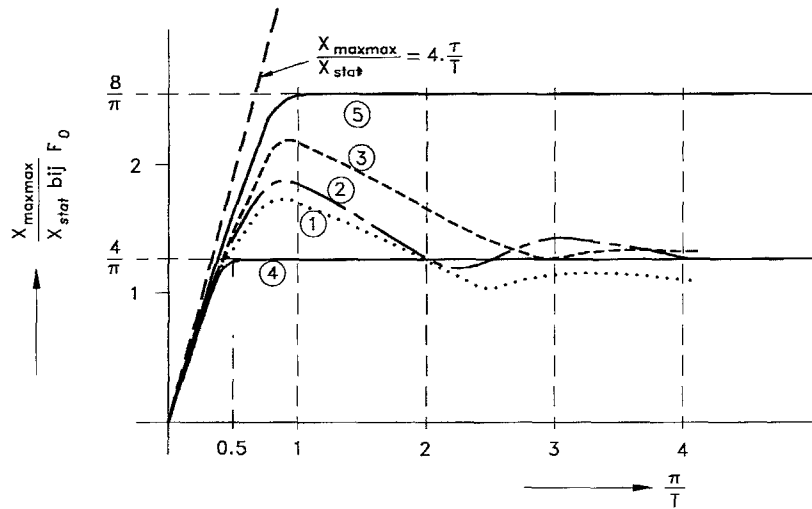
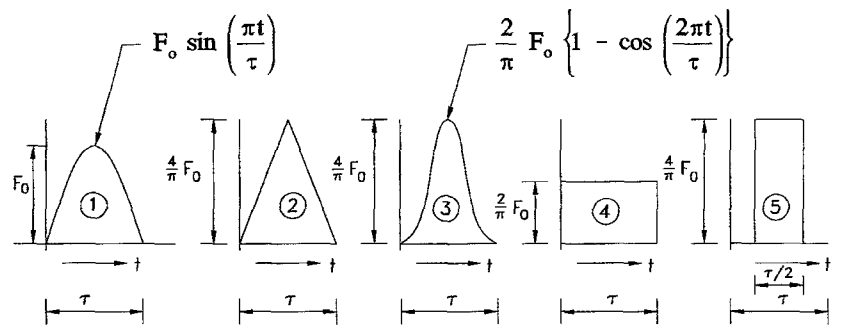
Deze relatief eenvoudige belastingsvormen kunnen goed in een enkelvoudig rekenmodel worden gesimuleerd en zijn zodanig gekozen dat voor de impuls  $I$  geldt:

$$I = \int_{\tau} F dt = \frac{2}{\pi} F_0 \tau \quad (\text{B6.6})$$

De aldus gedefinieerde impuls is gelijk aan het oppervlak van de verschillende belastingsdiagrammen; het eerste diagram bestaat uit een halve sinus met amplitude  $F_0$  en tijdsduur  $\tau$ .

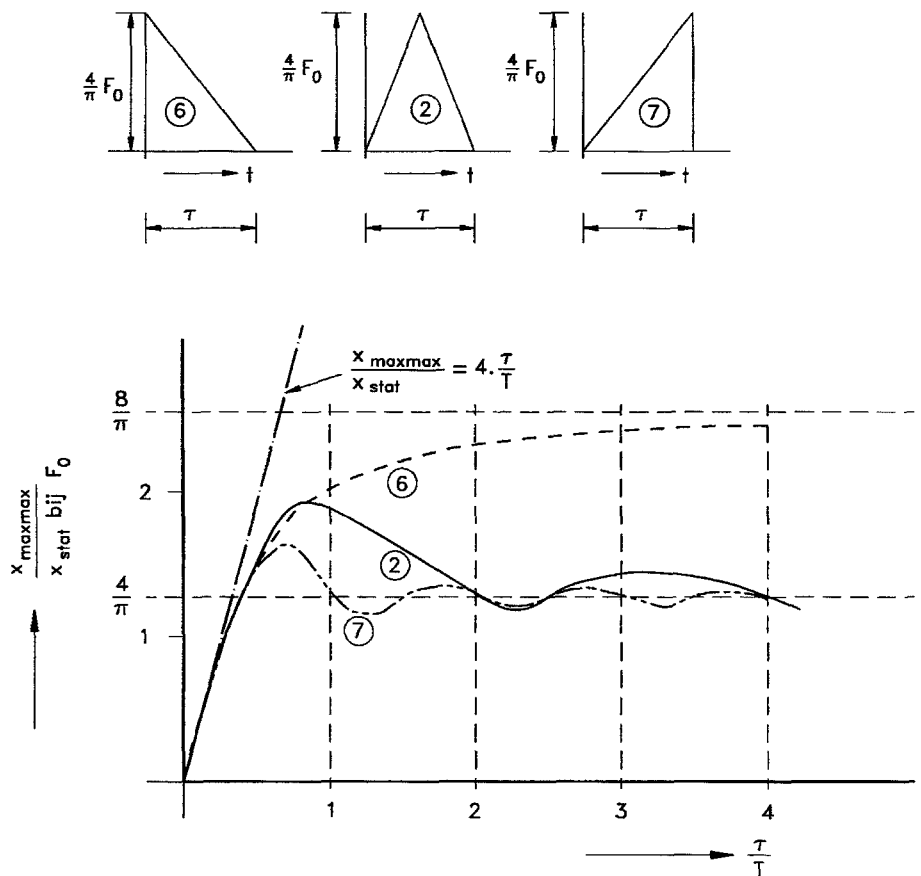
De maximax responsie is genormeerd door te delen door de verplaatsing  $x_{\text{stat}}$  ten gevolge van een statische last  $F_0$ . Uit de grafiek blijkt dat klappen met een gelijke impuls en gelijke klapduur  $\tau$ , maar met een ander verloop in de tijd, een verschillende responsie kunnen opleveren. Bij een relatief slap systeem (in de grafiek bijvoorbeeld bij  $\tau/T < 0,25$ ) zijn de verschillen overigens gering. De lijn  $x_{\max\max}/x_{\text{stat}} = 4\tau/T$  vormt de raaklijn aan alle responsielijnen.

In geen van de gevallen komt de dynamische vergrotingsfactor, gedefinieerd als  $x_{\max\max}$  gedeeld door de verplaatsing bij een statische last ter grootte van de werkelijke amplitude van de klapbelasting, boven de waarde 2 uit. Deze waarde vormt voor ongedempte massaveersystemen een bovengrens. Uit Figuur B6.2 blijkt ook dat de dynamische vergrotingsfactor bij relatief stijve systemen ( $\tau/T > 3$ ) rond de waarde 1 ligt; de belasting is dan als een quasi-statische belasting te beschouwen.



Figuur B6.2:  
Genormeerde maximax responsie bij verschillende  
belastingvormen.

Het werkelijke verloop van een golfklapbelasting is afwijkend van de hierboven getoonde belastingvormen (zie bijvoorbeeld Figuur B5.2 en B5.3). Bij berekeningen kan de klap echter veelal met voldoende nauwkeurigheid worden geschematiseerd als een sinusvormige of driehoekvormige belasting. Daarbij geldt dat de stijgtijd van de klap (dit wil zeggen de steilheid van de voorflank van de klap) eveneens een invloedsfactor is, hetgeen bij waarden van  $\pi/T$  groter dan circa 0,7 tot uiting komt. Dit blijkt uit onderstaande grafiek, die is gemaakt voor een driehoekvormig belastingverloop met verschillende steilheden van de voorflank. De impuls is weer gelijk aan:  $I = 2F_0 \pi / \pi$  en de maximax responsie is genormeerd met  $x_{stat}$  bij een last  $F_0$ .



Figuur B6.3:  
Maximax responsie voor belastingen met  
verschillende stijgtijd.

Een korte stijgtijd blijkt voor relatief stijve systemen ongunstig te zijn.

Maximax responsiecurven kunnen voor ieder willekeurig belastingsverloop worden gemaakt. Daarbij is het mogelijk om de invloed van demping mee te nemen. De respons van een gedempt systeem op een stootvormige belasting is kleiner dan de respons van een ongedempt systeem op dezelfde belasting. Bij een gedempt systeem liggen de maximax responsiecurven dus systematisch lager.

## 6.3 INVLOED VAN DE RESPONSIE OP DE KLAPBELASTING

De vraag is nu of golfklapdrukken door de responsie van de constructie kunnen worden beïnvloed.

Wanneer er lucht tussen de constructie en het wateroppervlak wordt opgesloten, fungeert deze lucht als een elastisch medium en is er een duidelijke invloed op het klapdrukverloop (zie ook Hoofdstuk 5). Er kan nu worden verondersteld dat een terugwijkende constructie een soortgelijk effect kan hebben; de constructie moet daartoe dan wel relatief slap zijn.

In Hoofdstuk 5 is al aangegeven dat een reductie van de maximale klapdruk volgens Von Kármán wordt verkregen wanneer de elastische eigenschappen van het constructiemateriaal (door middel van de geluidssnelheid) worden meegenomen. Dit geldt voor massieve constructies die niet doorbuigen. De formule van Von Kármán

geeft echter een theoretische bovengrens. In de praktijk bereiken klapdrukken deze bovengrens nooit (tenzij wellicht op microschaal) omdat het water zijdelings kan afstromen. Het reducerende effect van de elastische eigenschappen van het constructiemateriaal op de Von Kármánse druk is daarom ondergeschikt aan het reducerende effect van zijdelingse afstroming.

Literatuurgegevens betreffende de invloed van een elastische doorbuiging op de klapdruk zijn zeer schaars. Witte (1988) en Dette, Schulz en Witte (1991) hebben onderzoek verricht aan een verticale elastische plaat, ingeklemd in de bodem. Uit dit onderzoek komt naar voren dat zware klappen met een kleine kans van optreden niet sterk door de buigstijfheid van de wand worden beïnvloed; kleinere klappen met een grotere kans van voorkomen daarentegen worden gereduceerd (het maximum in de klapdruk ligt tot 25% lager). De oorzaak van dit verschil hangt mogelijk samen met het feit dat de zware klappen relatief kort duurden (korte stijgtijd); de responsie van de plaat op deze belasting bleef daardoor beperkt, zodat ook de invloed van de elastische doorbuiging niet groot kon zijn. Het onderzoek geeft wel aan dat er invloed van de responsie van de constructie te verwachten is als  $\tau/T$  voldoende groot is ( $\tau/T > 0,5$ ), dus wanneer de klapduur voldoende groot is of wanneer de eigen trillingstijd voldoende klein is. Bij toenemende stijfheid van de constructie (bijvoorbeeld  $\tau/T > 1,5$ ) worden de doorbuigingen echter steeds kleiner, zodat ook dan het effect van uitwijken van de constructie ten opzichte van het effect van zijdelings wegstromen van het water gering zal zijn. Zeer stijve constructies vervormen niet, zodat er in dat geval geen effect op de klapbelasting te verwachten is.

De constructieresponsie kan dus in sommige gevallen invloed uitoefenen op de grootte van de klapdruk (terugkoppeling). Bij het uittrillen van de constructie na een golfklap ontstaan daarnaast ook interactiekrachten in de vorm van toegevoegde massa- en dempingkrachten. In Hoofdstuk 2 in Deel A is hier al aandacht aan besteed; korthedshalve wordt hier naar terug verwezen. In het algemeen is de situatie in golfomstandigheden gecompliceerder dan in stromend-watersituaties omdat de positie van de vrije waterspiegel varieert als functie van de tijd. In het kader van onderzoek aan de Haringvlietsluizen is gevonden dat de toegevoegde watermassa een functie is van de momentane waterspiegelstand.

## 7 ERVARINGEN MET GOLFKLAPPEN IN PROTOTYPE EN MODEL

In dit hoofdstuk worden de ervaringen van het Waterloopkundig Laboratorium met golfklappen weergegeven die bij enkele onderzoeken in schaalmodellen of bij metingen in het prototype zijn opgedaan.

De geselecteerde constructies zijn:

- Stormvloedkering Oosterschelde. Roosterbalkontwerp (schaalmodelstudie).
- Stormvloedkering Oosterschelde. Caissonontwerp (schaalmodelstudie).
- Stormvloedkering Oosterschelde. Ontwerp met pijlers en hefschuiven (schaalmodelstudies en prototypemetingen).
- Spuisluis Haringvliet (schaalmodelstudies en prototypemetingen).
- Koelwaterinlaat van Alto Lazio kernenergiecentrale (modelstudie).
- Civitavecchia caisson breakwater (modelstudie).
- Asfalttalud (modelstudie).

### 7.1 STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE. ROOSTERBALK-ONTWERP (schaalmodelstudie)

#### OMSCHRIJVING:

Eén van de ontwerpen voor de afsluiting van de Oosterschelde met een beweegbare kering was een ontwerp met zogenaamde roosterschuiven. In dit ontwerp bestaan de schuiven uit twee langs elkaar bewegende roosters; in open stand liggen de horizontale balken van beide roosters 'ruggelings' tegen elkaar en wordt de doorstroomopening gevormd door de openingen tussen de roosterbalken. In gesloten stand zijn de roosters zodanig verschoven dat deze openingen zijn afgesloten. Er zijn varianten met stalen roosterbalken en betonnen roosterbalken onderzocht. De betonnen roosterbalken zijn in een stijf schaalmodel onderzocht op golfklappen.

#### GOLFKLAPZONE:

De roosterbalken hebben in verband met het te keren verval vrij forse afmetingen in horizontale richting. Verticale waterbewegingen kunnen klapverschijnselen geven, met name op de onderzijde van de roosterbalken.

#### CONDITIES:

Onderzoek is verricht bij gesloten schuiven, bij diverse waterstanden en bij loodrecht inkomende, onregelmatige golven. De voorlandgeometrie is gevarieerd. Er zijn metingen verricht naar golfklapdrukken.

#### CONSTATERINGEN:

Golfklappen treden het meest frequent op en zijn het grootst wanneer de gemiddelde waterspiegel net onder de onderkant van een roosterbalk staat. Bij de golfklappen deden zich luchtinsluitingen voor.

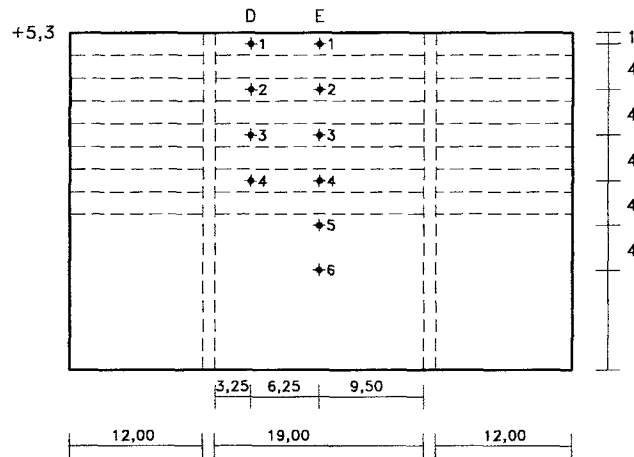
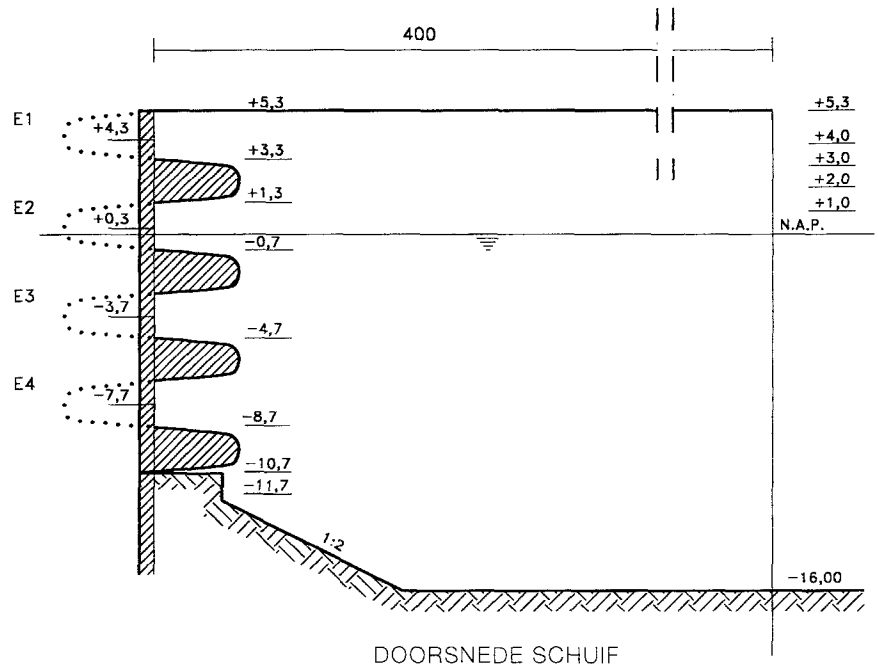


**RESULTAAT:**

Inzicht in ruimtelijke drukverdeling. Constatering dat drukoscillaties zijn gere- lateerd aan luchtinsluitingen. Een niet-lineair luchtcompressiemodel is gebruikt om enkele grote klappen naar het prototype te vertalen. Bij de ontwerpcondities was de maximale piekdruk in model ca 12 kN/m<sup>2</sup>, vertaald naar het prototype 150 kN/m<sup>2</sup>.

**REFERENTIES:**

WL-rapporten M1381-I, M1381-II.



Figuur B7.1:  
Stormvloedkering in de Oosterschelde,  
roosterbalkontwerp.

AANZICHT SCHUIF

peilen t.o.v. N.A.P.  
maten in m.

## 7.2 STORMVLOEDKERING OOSTER-SCHELDE. CAISSONONTWERP (schaalmodelstudie)

### OMSCHRIJVING:

Een alternatief ontwerp voor de stormvloedkering in de Oosterschelde was het caissonontwerp. In ieder caisson bevinden zich in dit ontwerp twee achter elkaar geplaatste stalen hefschuiven. Aan de zeezijde van de hefschuiven bevindt zich boven de N.A.P.-lijn een betonnen balkconstructie. Het ontwerp is in een stijf schaalmodel onderzocht op golfklappen.

### GOLFKLAPZONE:

Golven lopen onder de betonnen balken door tot aan de hefschuiven. Golfklappen kunnen ontstaan tegen de onderzijde van de balken en tegen de schuiven.

### CONDITIES:

Er zijn metingen verricht bij verschillende waterstanden en bij loodrecht inkomende, regelmatige en onregelmatige golven. De bovenbalkconfiguratie en de opening tussen bovenbalk en schuiven zijn gevarieerd. Ook zijn roosters vóór (dit wil zeggen van) de bovenbalk toegepast en is de voorlandgeometrie gevarieerd. Klapdrukken zijn gemeten op de schuiven.

### CONSTATERINGEN:

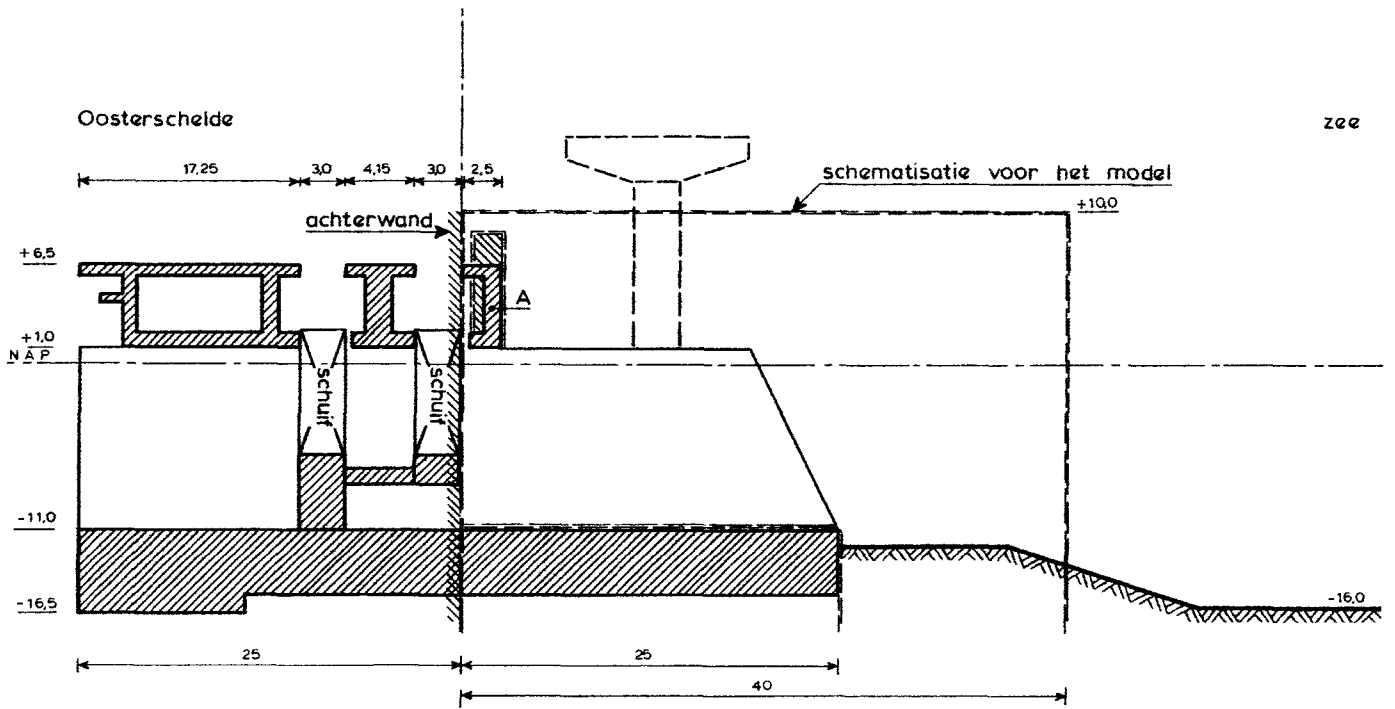
Golfklappen treden het meest frequent op met de gemiddelde waterspiegel net onder het niveau van de bovenbalk. De breedte van de bovenbalk is van invloed: bij toenemende breedte is er eerst een toename en daarna een afname van de klapdrukken. Bij de golfklappen treden luchtinsluitingen op. De opening (buffer) tussen de bovenbalk en de schuif reduceert het aantal en de grootte van de klappen. Regelmatige golven bleken bij deze configuratie ongunstiger resultaten te geven dan onregelmatige golven. In proeven met hogere golven werden grotere klappen gemeten dan in proeven met lagere golven. Statistisch gezien betekent dit dat een spectrum met een hogere  $H_s$  tot grotere klappen aanleiding geeft dan een spectrum met lagere  $H_s$ . Dit verband kon overigens niet voor individuele golven worden aangetoond.

### RESULTAAT:

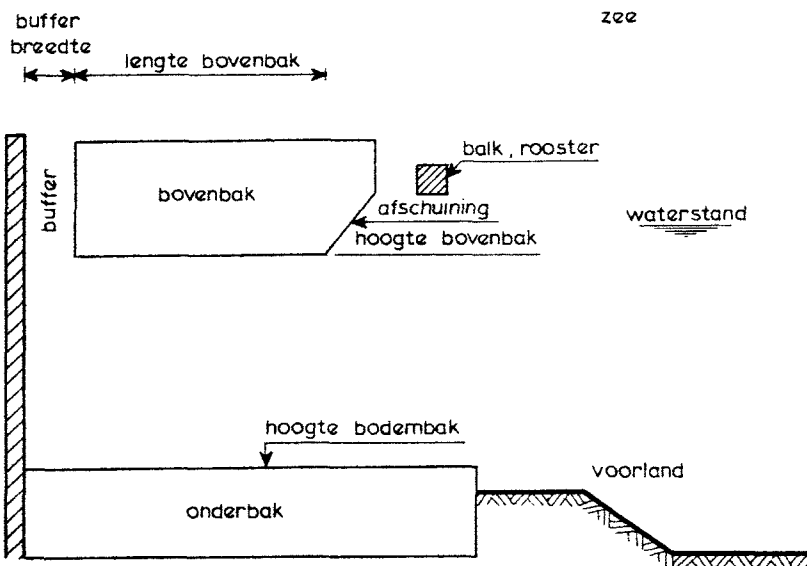
Inzicht in ruimtelijke drukverdelingen, luchtbeloscillaties en overschrijdingswaarden van klapdrukken. Met een niet-lineair luchtcompressiemodel zijn enkele grote klappen vertaald naar het prototype. Er is een luchtcompressiemodel ontwikkeld waarin de samendrukbaarheid van water is meegenomen. Afhankelijk van de ingestelde hydraulische condities en de geometrie van de bovenbalk zijn in het model maximale piekdrukken gemeten tot een orde van grootte van  $20 \text{ kN/m}^2$ . In de situatie met een 3 m brede bovenbalk (zonder spleet tussen bovenbalk en schuif) en een onderbalk op N.A.P.  $-7 \text{ m}$  (mogelijke ontwerpsituatie) bedroeg de maximale piekdruk circa  $8 \text{ kN/m}^2$ . Dit levert vertaald naar het prototype (luchtcompressiemodel) een waarde op van  $80 \text{ kN/m}^2$  met drukoscillatiefrequenties tussen 2,5 en 35 Hz.

### REFERENTIES:

WL-rapporten M1335-I, M1335-II, M1335-III, Ramkema (1978).



MODEL



MODEL (SCHEMATISCH)

Figuur B7.2:  
Stormvloedkering in de Oosterschelde,  
caissonontwerp.

## 7.3 STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE. ONTWERP MET PIJLERS EN HEFSCHUIVEN (modelstudies en prototypemetingen)

### OMSCHRIJVING:

Het definitieve ontwerp van de stormvloedkering in de Oosterschelde is geëvolueerd van een pijlers-op-puttenconstructie met dubbele hefschuiven naar een constructie met afgezonken pijlers op grondverbetering, een enkele rij hefschuiven aan zeezijde, betonnen bovenbalken (1 m boven N.A.P.) en dorpelbalken. De schuiven hadden in eerste opzet een dubbele beplating; dit is later veranderd in een constructie met een enkele beplating. De vollwandliggers bevonden zich daarbij aan de zeezijde. In verband met golfklappen zijn de vollwandliggers vervangen door vakwerkliggers van ronde buizen. Voor alle varianten zijn in schaalmodellen (er zijn zowel stijve modellen als elastische modellen gebruikt) golfklapmetingen verricht. Na de oplevering van de stormvloedkering is een conditiebewakingssysteem (condits) opgezet, dat ook het verrichten van golfklapmetingen op een tweetal schuiven en een bovenbalk omvatte.

### GOLFKLAPZONE:

Golfklapgevoelige onderdelen zijn de bovenbalken, zowel in de situatie met heven als in die met neergelaten schuiven; ook de hefschuiven zelf, met name de horizontale delen, zoals de hoofdliggers van de schuiven en de schotten in de eindkokers.

### CONDITIES:

Bij het schaalmodelonderzoek zijn in alle relevante operationele condities regelmatige dan wel onregelmatige golven ingesteld, al dan niet in combinatie met stroming. Er zijn metingen gedaan van golfklapdrukken, totale golfklapbelastingen en responsies van schuiven en bovenbalken bij golfklappen. Ook zijn er high-speedfilmopnamen gemaakt, vooral met het oog op luchtinsluitingen. Er zijn rekenmodellen gebruikt om golfklapresponsies gemeten in elastische modellen te koppelen aan golfklapbelastingen uit stijve modellen; op deze wijze is een afschatting gemaakt van de grootte van de klappimpuls.

Metingen zijn ook in het prototype (CONDITS) verricht voorafgaande aan en tijdens hoogwatersluitingen (periode 1989 - 1992). Gemeten zijn drukken en versnellingen, krachten in de vakwerkstaven van de hoofdliggers van een schuif en krachten in een oplegblok van een bovenbalk, alsmede lokale waterbewegingen.

### CONSTATERINGEN:

De ongunstigste situatie voor de schuiven is de situatie met de bovenste ligger op het niveau van de zeespiegel. Een tweede beplating schermt de onderkant van de liggers af, maar voorkomt niet dat er klappen optreden op de bovenkant van de schuiven en op de bovenbalk. Statistisch gezien is er een toename van de golfklapdruk met de golfhoogte en met de golfsteilheid. Luchtinsluitingen zijn geconstateerd; bij de vertaling van klapdrukken is voor de piekwaarden evenwel uitgegaan van het ongunstiger geventileerde-golfklapmodel. Golfklappen treden niet gelijktijdig over de gehele lengte van de schuif op, ook niet bij loodrecht inkomende golven. De faseverschillen blijken dan echter klein te zijn. Perforaties in de lijfplaten van de vollwand-

liggers leveren een beperkte reductie van de golfklapdrukken op. De piekdrukken in het model bereikten waarden tot  $100 \text{ kN/m}^2$  (ontwerpcondities), maar lokaal werden piekdrukken tot een orde van grootte van  $250 \text{ kN/m}^2$  gevonden (waarden geschaald met geventileerde-golfklapmodel). De totale klapimpuls, bepaald door koppeling van drukmetingen met responsiemetingen, bleek zodanig hoge spanningen te geven, dat beter overgestapt kon worden op vakwerkliggers voor de schuiven. De totale golfklapbelasting op de ronde vakwerkstaven bleek beperkt te zijn. Bij de in het prototype uitgevoerde metingen op de hoofdstaven van het vakwerk zijn lokale klapdrukken (piekwaarden) tot  $230 \text{ kN/m}^2$  gevonden.

Bij geheven schuiven wordt de onderzijde van de bovenbalken door golfklappen belast; bij neergelaten schuiven wordt de voorzijde (zeezijde) van de balken geraakt. In beide gevallen zijn in het model geen luchtinsluitingen van betekenis geconstateerd. In extreme condities werden in het model piekdrukken tot  $150 \text{ kN/m}^2$  gevonden (schaling volgens het geventileerde-golfklapmodel). Bij het ontwerp is van lagere klapdrukken uitgegaan en wel tot (lokaal) een orde van grootte van  $100 \text{ kN/m}^2$ . De totale klapimpuls is afgeschat door koppeling van drukmetingen met responsiemetingen. Bij schuin inkomende golven zijn de hoeken tussen pijlers en balken golfklapgevaarlijke gebieden.

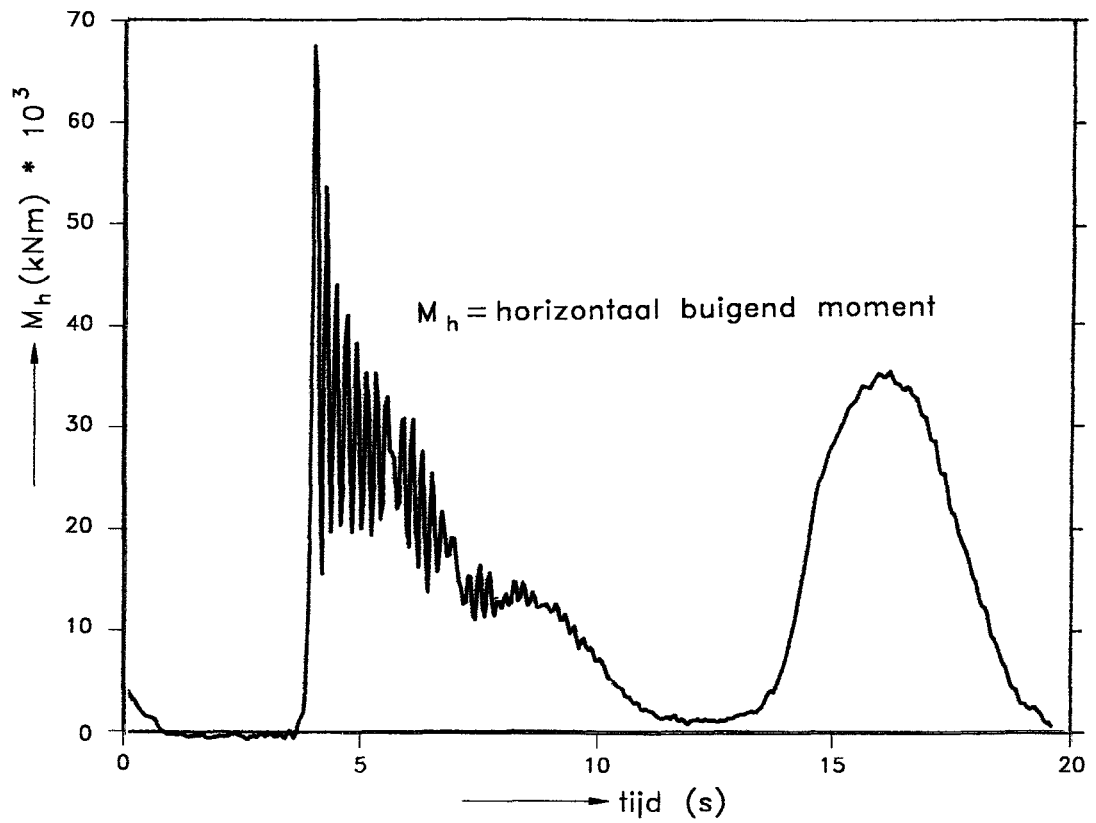
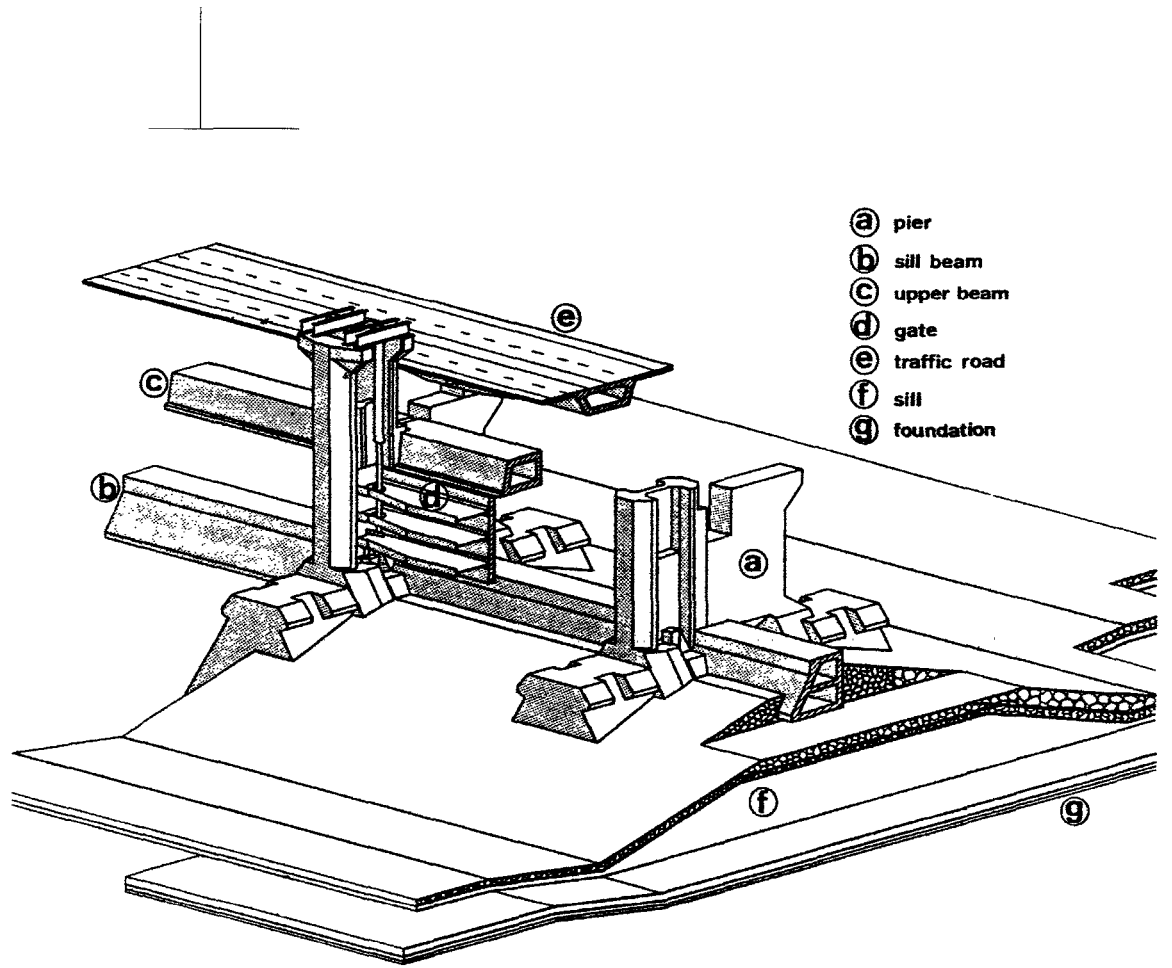
De in het prototype uitgevoerde metingen laten vooral golfklappen zien tegen de onderzijde van de balken bij geheel open kering en bij begin van sluiten. Lokaal zijn piekdrukken tot  $60 \text{ kN/m}^2$  gemeten, maar de ruimtelijke variatie in klapdrukken bleek groot te zijn. De op een wat groter oppervlak optredende gemiddelde klapdruk was daardoor aanzienlijk lager. In de gemeten klapdrukken bleken zich geen oscillaties voor te doen die zouden kunnen worden toegeschreven aan luchtinsluitingen. De opgetreden golfklappen zijn daarom waarschijnlijk van het type 'geventileerde klap' geweest.

#### **RESULTAAT:**

Inzicht in optreden van golfklappen, ontwerp-golfklapbelastingen, aanpassing van het schuifontwerp.

#### **REFERENTIES:**

WL-rapporten M1494, M1504, M1543, M1648-I, M1648-II, M1664, M1687/M1723, M1835, Q298/H326, Q605/H626, De Jong (1982), Klatter (1994).



Figuur B7.3:  
 Stormvloedkering in de Oosterschelde,  
 ontwerp met pijlers en hefschuiven.

RESPONSIE BOVENBAALK OP GOLFKAP

## 7.4 SPUISLUIS HARINGVLIET (schaalmodelstudies en prototypemetingen)

### OMSCHRIJVING:

De spuisluizen in het Haringvliet zijn voorzien van segmentschuiven, zowel aan zeezijde als aan Haringvlietzijde. In gesloten situatie rusten de schuiven op de betonnen vloer van de spuisluizen. Spuien vindt plaats door de schuiven te lichten. Er zijn zowel in een stijf model als in een elastisch model metingen van golfklapbelastingen verricht. Als vervolg daarop zijn er gedurende de jaren 1970 - 1979 in het prototype metingen in stormomstandigheden uitgevoerd.

### GOLFKLAPZONE:

Golfklappen kunnen optreden tegen de cirkelvormig gebogen beplating van de schuiven aan zeezijde.

### CONDITIES:

Schaalmodelonderzoek is verricht bij loodrechte en scheve golfaanval en bij verschillende waterstanden. Er zijn golfklapdrukken gemeten en responsies bij golfklappen. De geometrie van de sluisen is bij het onderzoek gevarieerd. In het prototype zijn op diverse plaatsen drukken, versnellingen en rekken gemeten.

### CONSTATERINGEN:

In het model zijn piekdrukken op de zeeschuiven gemeten van 300 -400 kN/m<sup>2</sup> (geschaald). In het onderzoek bleek de geometrie van de constructie een belangrijke invloedsfactor te zijn. Om hoge klapdrukken in de hoeken tussen zeeschuiven en pijlers te vermijden zijn de schuiven in het vlak van de pijlerkoppen geplaatst. De vloer van de sluis werd aan zeezijde van de zeeschuiven omlaag gebracht, hetgeen tot een reductie van de golfklapbelastingen leidde (zie ook Figuur B7.4). Bij een achterover hellende stand van de zeeschuiven werden geen golfklappen meer geconstateerd; deze stand is overigens niet toegepast. Verlaging van de kruin van de zeeschuiven werkte eveneens reducerend; de zeeschuiven zijn daarom 2 m lager ontworpen dan de schuiven aan Haringvlietzijde.

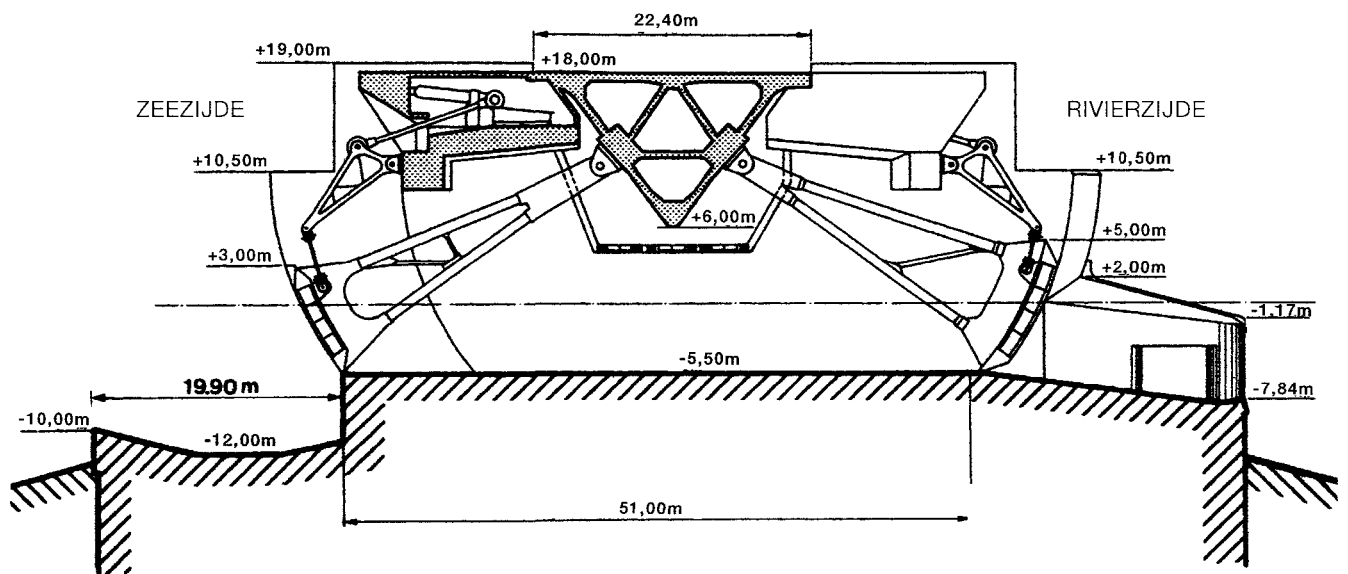
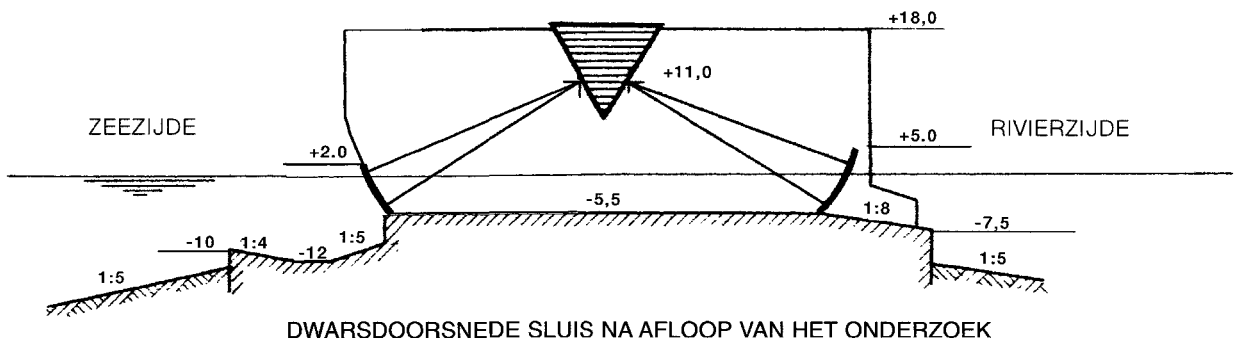
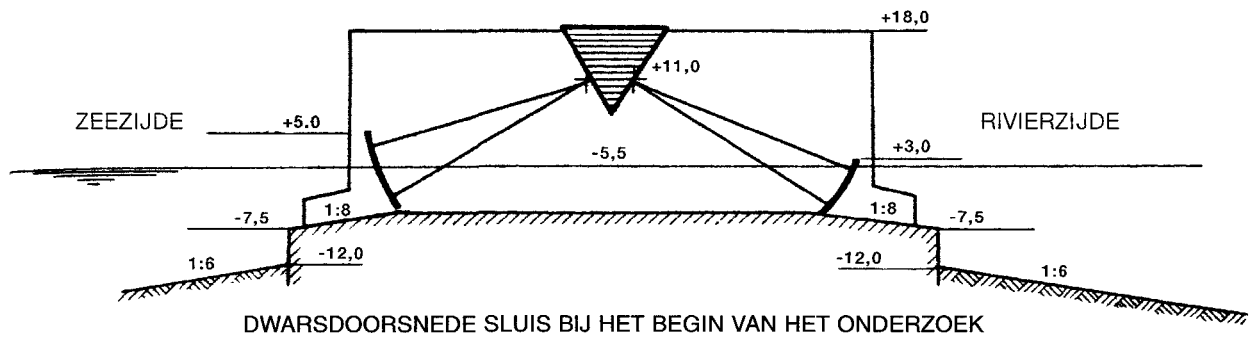
In het prototype zijn minder hoge klapdrukken gemeten dan in het model (maximale klapdruk 75 kN/m<sup>2</sup>). Ook bleek het door de klap getroffen oppervlak in verticale zin minder groot te zijn dan in het model. Een verklaring voor deze verschillen ligt mogelijk in de steilheid van de golven: in model werd een overdreven windbelasting boven het water toegepast met de bedoeling het regelmatige golfbeeld te verstoren en onregelmatiger te maken en om golfcomponenten met kortere periode toe te voegen. De golven waren daardoor in het model relatief steil, hetgeen tot golfklappen op de schuiven leidde (zonder wind traden in het model geen klappen op). In het prototype is bovendien aanzanding opgetreden; hierdoor worden de schuiven meer afgeschermd en is de golfaanval geringer.

### RESULTAAT:

Inzicht in het optreden van golfklappen, aanpassing van de geometrie van de constructie met als resultaat minder hoge klapbelastingen.

### REFERENTIES:

WL-rapporten M399, M754.



Figuur B7.4:  
Spuisluizen Harngvliet.



## 7.5 KOELWATERINLAAT VAN ALTO LAZIO KERNENERGIECENTRALE (modelstudie)

### OMSCHRIJVING:

De koelwaterinlaat van de (geplande) Alto Lazio kernenergiecentrale (Italië) bestaat uit een onder de waterspiegel gelegen onderbouw met inlaatopeningen en daarop een toren voor inspectie en ruimte voor de hefschuiven van de inlaatopeningen (Figuur B7.5). De lokale waterdiepte is 12,5 m. De constructie wordt door golven belast. Golf(klap)belastingen zijn onderzocht in een stijf schaalmodel dat was gemonteerd op een krachtmeetframe. Om tot een reductie te komen van de geconstateerde grote golfklappen is de enkele toren vervangen door drie torens met kleinere afmetingen.

### GOLFKLAPZONE:

Golven ondervinden op de boven de bodem uitstekende onderbouw extra weerstand en voor de toren ontstaan brekers, die de toren belasten.

### CONDITIES:

De constructie is in het schaalmodel bij twee verschillende golfrichtingen onderzocht; golfhoogte en golfperiode zijn gevarieerd ( $H_s$  tussen 3 en 7,5 m,  $T_p$  tussen 8 en 12 s).

### CONSTATERINGEN:

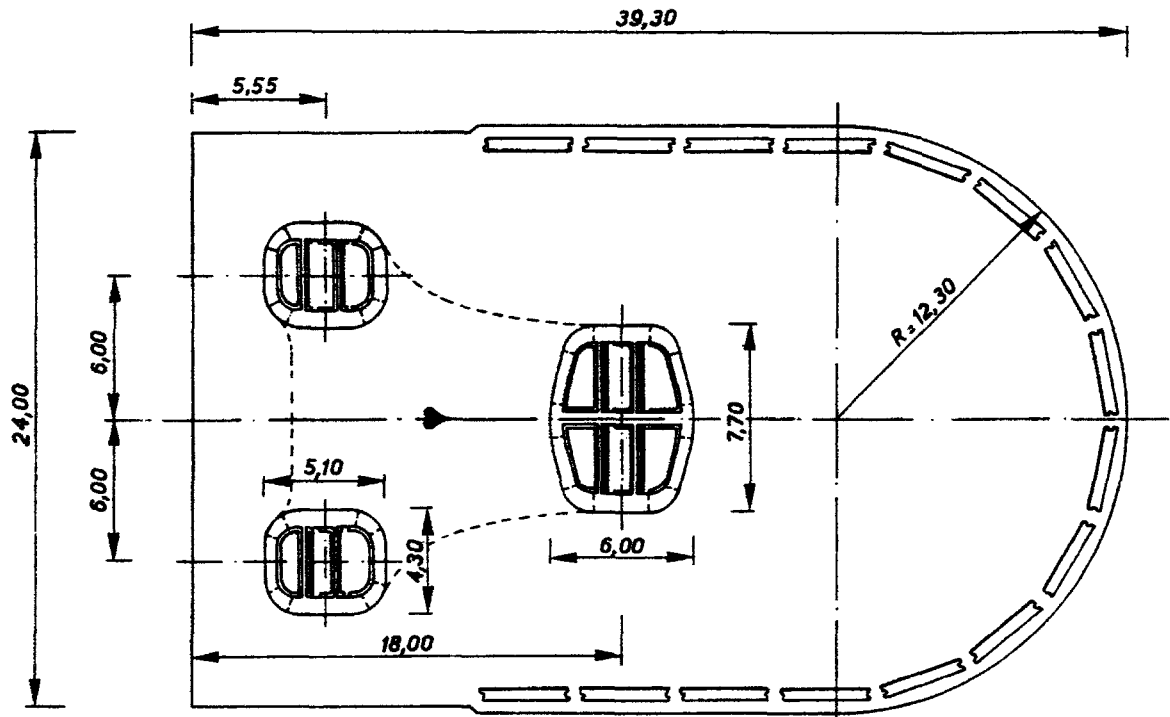
In geval van een enkele, rechthoekige toren zijn grote klapbelastingen gemeten die een factor 2 à 3 groter waren dan de quasistatische belastingen. De grootte van de klapbelasting kon aanzienlijk worden gereduceerd door het gelijktijdig aangeslagen oppervlak te verkleinen, dit wil zeggen door de enkele toren te vervangen door drie kleinere torens die zodanig ten opzichte van elkaar waren gepositioneerd, dat slechts één toren tegelijk kon worden belast.

### RESULTAAT:

Reductie van de klapbelasting.

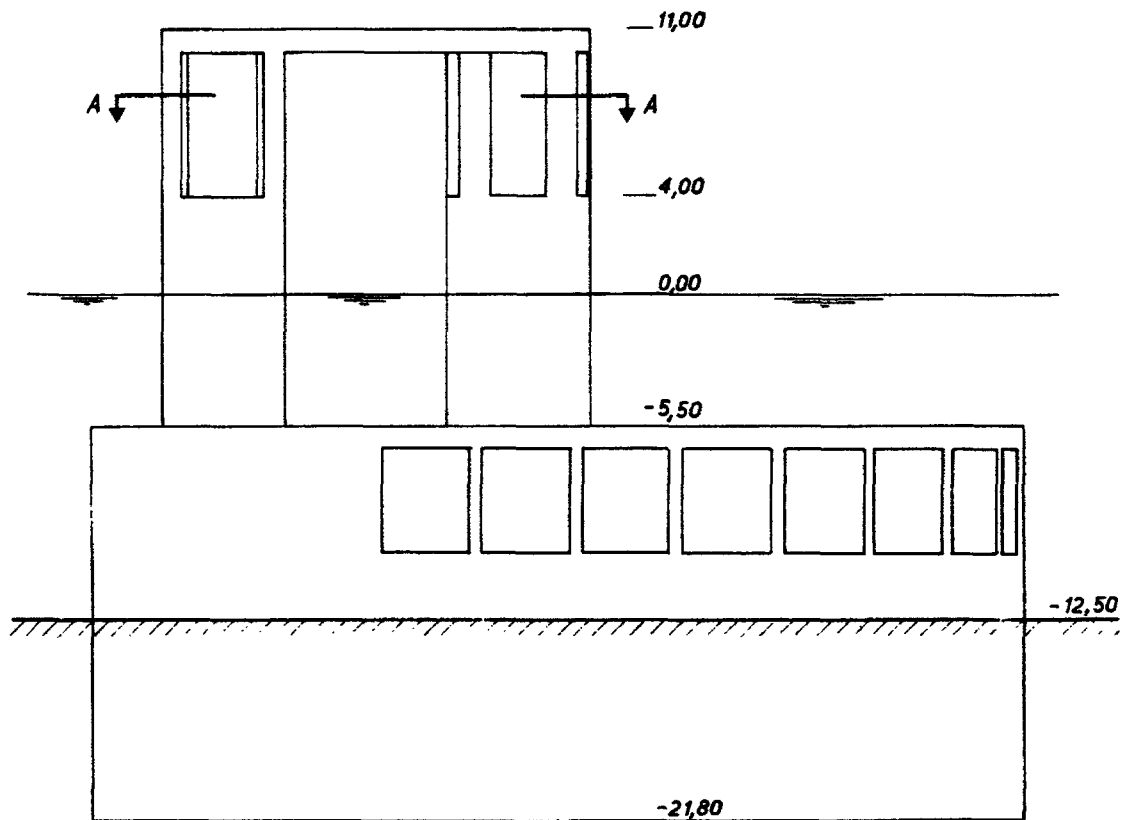
### REFERENTIE:

WL-rapport M1765.



SECTION A-A

HERZIEN ONTWERP



SIDE VIEW

Figuur B7.5:  
Koelwaterinlaat van Alto Lazio kernenergiecentrale.

## 7.6 CIVITAVECCHIA CAISSON BREAKWATER (modelstudie)

### OMSCHRIJVING:

De (geplande) uitbreiding van de bestaande golfbreker bij de Civitavecchia-haven (Italië) bestaat uit naast elkaar geplaatste, cirkelvormige caissons op een onderwaterberm. Over de caissons heen loopt een keerwand met - in dwarsdoorsnede - een gebogen vorm (zie Figuur B7.6). De waterdiepte ter plaatse van de golfbreker is circa 30 m, de onderwaterberm bevindt zich 18,5 m onder de waterspiegel. In een stijf model zijn golfklapdrukken gemeten.

### GOLFKLAPZONE:

De onderwaterberm geeft aanleiding tot brekende golven vlak voor de caissons. De caissons worden door de brekende golven geraakt.

### CONDITIES:

Het schaalmodelonderzoek is verricht in een stijf model met loodrecht inkomende, onregelmatige golven ( $H_s = 8$  m,  $T_z$  (gemiddelde periode) = 11,6 s). Op verschillende plaatsen op het cirkelvormige caisson zijn de optredende golfklapdrukken gemeten. Van de klapverschijnselen zijn high-speedfilmopnamen gemaakt. Er is ook een proef gedaan met een rechthoekige caisson in plaats van een cirkelvormige caisson.

### CONSTATERINGEN:

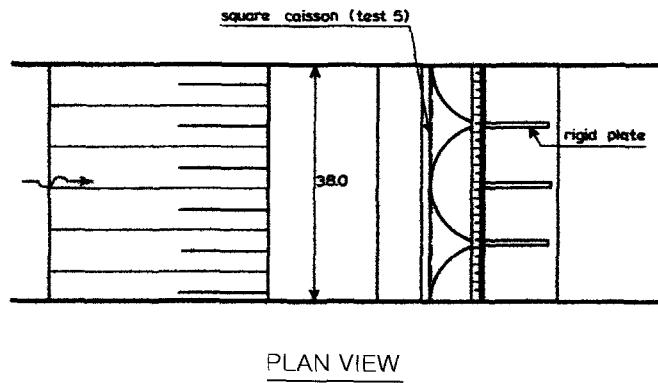
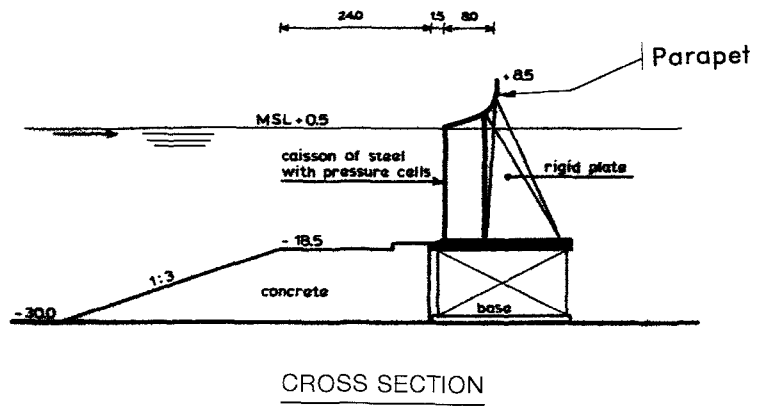
De grootste klapdrukken (tot 45 kN/m<sup>2</sup> bij de maatgevende condities) ontstaan onder de tong van de overslaande golf en op de parapet. In het gebied waar lucht wordt ingesloten, ontstaan luchtbeloscillaties met daaraan gekoppeld drukoscillaties (frequentie tussen 30 en 80 Hz voor de grotere luchtbellens). De klappen veroorzaken drukgolven in het water die ook dieper onder water dynamische belastingen geven op de caisson. De rechthoekige caisson is ongunstiger dan de cirkelvormige caisson: de top van de totale belasting is hoger terwijl ook de totale impuls groter is (het oppervlak waarop de klapbelasting momentaan werkt is groter). Bij de cirkelvormige caisson ontstaan de grootste drukken in de middensectie van de cirkel. De drukken zijn zowel geschaald volgens het stromingsdrukmodel (Froudeschaling) als volgens het isotherme luchtcompressiemodel (dit laatste levert minder hoge drukken op). Wegens de onzekerheid in de toe te passen schaalregels is de Froudeschaling in het advies aangehouden.

### RESULTAAT:

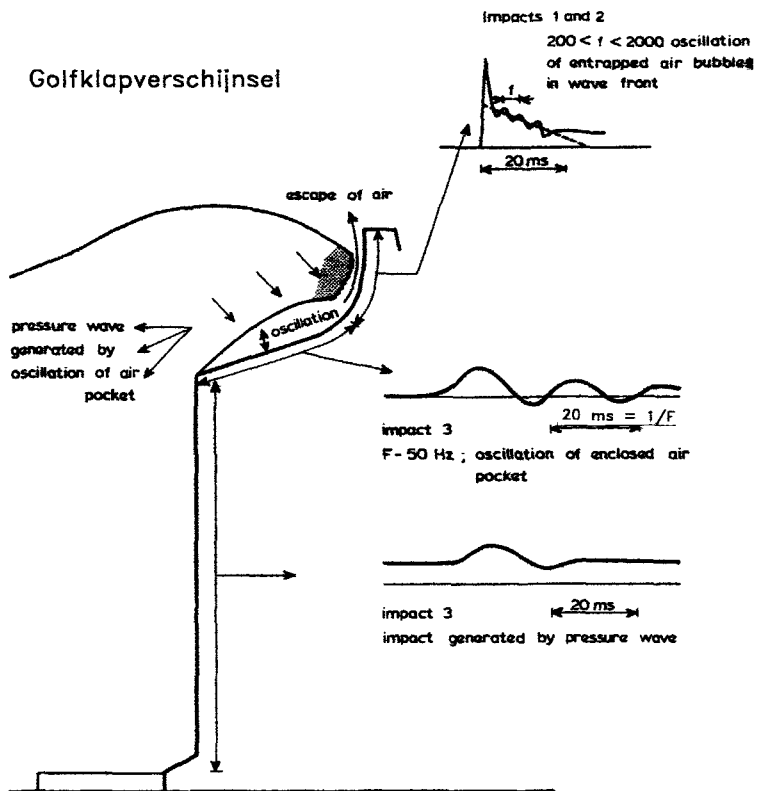
Inzicht in het optreden van golfklappen en ontwerp golfklapbelastingen (zowel lokale als totale belastingen).

### REFERENTIES:

WL-rapport M1869-III, Van der Meer en Benassai (1984).



Figuur B7.6:  
Civitavecchia caisson breakwater: stijf model.



Figuur B7.7:  
Golfklapverschijnselen.

## 7.7 ASFALTTALUD (modelstudie)

### OMSCHRIJVING:

In het kader van een onderzoekprogramma van Rijkswaterstaat betreffende taludbekledingen van asfaltbeton is er in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium een onderzoek uitgevoerd aan een asfalttalud onder 1:4 op een ondergrond van zand. Doel van het onderzoek was het meten van golfklapbelastingen en het bepalen van het deformatiegedrag van het asfalttalud bij deze golfklappen, en voorts het volgen van de schadeontwikkeling na een kunstmatig aangebrachte initiële schade.

### GOLFKLAPZONE:

Golfklappen treden op in een gebied nabij de stilwaterlijn, daar waar de brekende golven het talud raken.

### CONDITIES:

Er zijn proeven gedaan met regelmatige en onregelmatige golven. Bij regelmatige golven werd de golfhoogte gevarieerd tussen 1 en 2 m, bij onregelmatige golven lag de significante golfhoogte tussen 1 en 1,5 m. De (piek)periode lag tussen 4 en 9 s. Gemeten zijn drukken op het talud, verplaatsingen van de asfaltbekleding en rekken van het asfalt.

### CONSTATERINGEN:

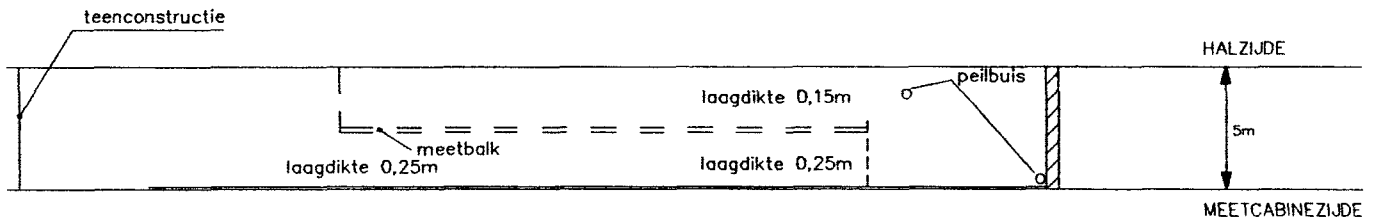
Golven geven zowel een quasi-statische component als een dynamische (klap)-component. Het maximum in de klapdruk blijkt in het algemeen niet in de tijd samen te vallen en daardoor niet eenduidig te koppelen met maxima in rekken en deflecties van het asfalt. Dit vindt zijn oorzaak in de materiaaleigenschappen van het asfalt. Binnen een tijdsvenster rond het klapdrukmaximum kan een beter verband worden gelegd met maxima in rekken en deflecties. Een belangrijke invloedsfactor voor het vervormingsgedrag is naar verwachting de ruimtelijke spreiding van de klap. In het vervormingsgedrag speelt ook de quasi-statische belasting een rol. Bij de onderzochte golfcondities was de hoogste piekdruk circa  $75 \text{ kN/m}^2$ .

### RESULTAAT:

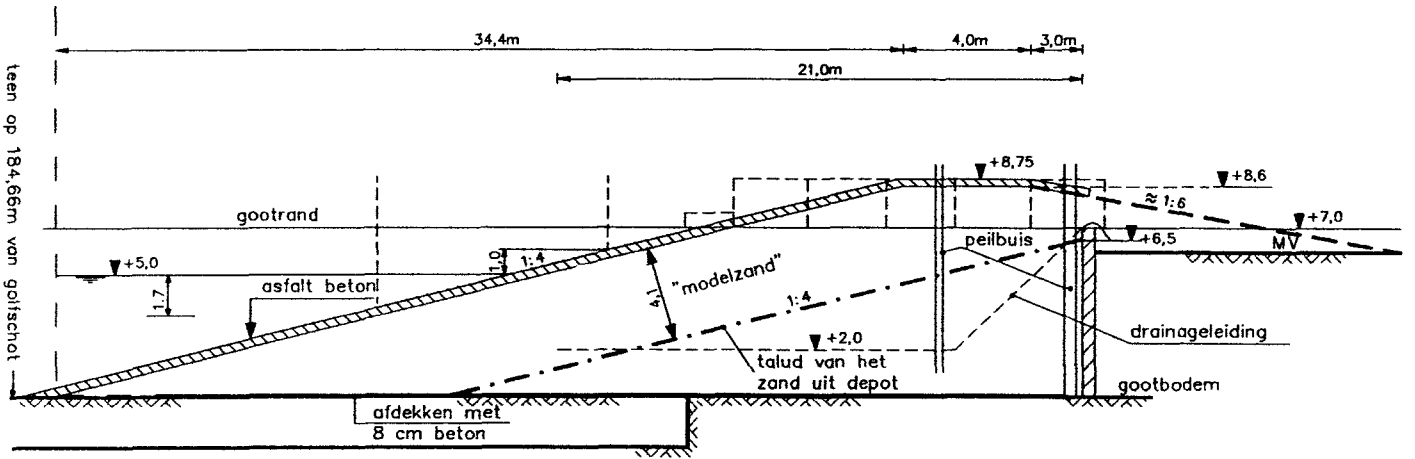
Inzicht in de relatie tussen golfklapbelasting en vervormingsgedrag van het asfalttalud.

### REFERENTIES:

WL-rapporten H1480 en H1702.

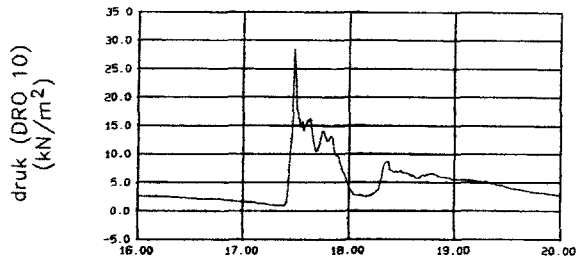


BOVENAANZICHT



VERTICALE DWARSDOORSNEDE

Figuur B7.8:  
Asfalttalud in de Deltagoot.



Gemeten klapdruk  
(voorbeeld)

## 8 ALGEMENE RICHTLIJNEN BIJ HET ONTWERPEN

Golfklappen kunnen aanleiding geven tot hoge drukken op de constructie; soms zijn de klapdrukken vele malen groter dan de quasi-statische drukken. Niet altijd hoeven deze hoge klapdrukken ook tot hoge spanningen in de constructie te leiden: met name is dat het geval wanneer de klapduur zeer kort is in relatie tot de eigen-trillingstijd van de constructie. Ook zullen hoge klapdrukken als regel niet gelijktijdig op een groot deel van de constructie werkzaam zijn. Desalniettemin is het verstandig om bij het ontwerpen van een constructie als uitgangspunt te hanteren dat golfklapbelastingen zoveel mogelijk moeten worden voorkomen of beperkt moeten blijven.

Vanuit de golven geredeneerd zou aan de volgende maatregelen kunnen worden gedacht:

- Voorkom dat golven de constructie bereiken. Dit zou kunnen worden bereikt door de constructie in een golfvrij gebied te plaatsen of door de constructie af te schermen, bijvoorbeeld door gebruik te maken van natuurlijke wallen of door bijvoorbeeld golfbrekers of (gedeeltelijk open) schermen te bouwen. Een dergelijke maatregel zou met name voor kleinere constructies kunnen gelden.
- Voorkom dat golven in de onmiddellijke nabijheid van wanden breken; staande, niet-brekende golven veroorzaken immers geen klapbelastingen op verticale constructies die geen uitstekende delen hebben. Golven kunnen breken op een olopend voorland, op onderwaterbermen, op de onderbouw van de constructie en andere onder-waterconstructies. Niet altijd zal een effectieve oplossing mogelijk zijn; gedacht kan dan nog worden aan het laten breken van de golven op voldoende afstand van de constructie.

Genoemde maatregelen vereisen aanzienlijke waterbouwkundige werken. Het zal daarom als regel voordeliger zijn om het ontwerp van de constructie zelf zodanig aan te passen dat het effect van golfklappen beperkt blijft of dat golfklappen niet kunnen optreden:

- Voorkom dat horizontale of hellende constructiedelen zich in het gebied bevinden waarbinnen de waterspiegel op en neer beweegt. Met name geldt dit voor het gebied rond de gemiddelde waterlijn, omdat de verticale snelheden daar het grootst zijn.
- Wanneer dit niet mogelijk is, dient de constructie zo open mogelijk gemaakt te worden (bijvoorbeeld door toepassing van vakwerkconstructies). Perforaties in plaatconstructies reduceren de grootte van het aangeslagen oppervlak; de klapdrukken zelf worden er evenwel niet sterk door gereduceerd. Niet-plaatvormige constructies, zoals constructies samengesteld uit buizen, hebben het voordeel dat het bewegende water beter om de constructie heen kan stromen, waardoor de klapbelasting lager is en er een uitsmering van de klapbelasting in de tijd plaatsvindt (omdat het klapfront zich langs de constructie moet verplaatsen). Dit laatste effect zal bij plaatvormige constructies overigens als regel ook optreden omdat het wateroppervlak zelden perfect parallel is aan het plaatoppervlak; de kans op een parallel naderen is bij vlakke constructies echter steeds aanwezig.

In geval van (mee)stroming door de constructie worden golven als regel lager, hetgeen gunstig is in verband met golfklappen; bij tegenstroming kunnen de golven lokaal steiler worden en daardoor ongunstiger uitwerken.

- Bij schuiven met horizontale liggers aan de golfzijde kan een tweede verticale beplating worden toegepast om de liggers af te schermen.
- In geval van een schuif in een koker is het wenselijk om vóór de schuif een schacht toe te passen; hierdoor heeft het water de mogelijkheid om naar boven uit te wijken, waardoor klappen kunnen worden voorkomen of gereduceerd. Ook kan een extra geperforeerde buitenbeplating voor de schuif worden overwogen.
- De ingang naar een koker kan soms zo laag worden gesitueerd dat de (toppen van de) golven niet de koker in kunnen lopen.
- Voorkomen dient te worden dat er hoeken zijn waar de golven inlopen; het water kan daar namelijk niet zijdelings wegstromen, hetgeen tot hoge klapbelastingen aanleiding kan geven.
- Luchtinsluitingen tussen wateroppervlak en constructie werken als een veer; afhankelijk van de grootte van de luchtbel ontstaan er meer of minder hoogfrequente beloscillaties, die lokale eigentrillingen van de constructie kunnen aanslaan. De luchtbel is aanzienlijk slapper dan de constructie zelf; het effect hiervan kan zijn dat de responsie van de constructie kleiner is dan wanneer geen luchtbel aanwezig zou zijn. Vanwege de moeilijke voorspelbaarheid van het effect van luchtbellens is het overigens niet aan te bevelen om hierop te ontwerpen.
- De responsie van de constructie op de klapbelasting is afhankelijk van de verhouding van klapduur  $\tau$  en eigentrillingstijd  $T$ ; manipulatie van de stijfheid van de constructie of van de massa biedt dus in principe mogelijkheden tot reductie van de responsie. Een relatief lage stijfheid en/of hoge massa (dus grote eigentrillingstijd) leidt tot een geringe responsie, maar vanwege stijfheids- en sterkte-eisen (statische en quasi-statische belastingen!) is dit vaak geen reële optie. In het algemeen zal er daarom naar gestreefd kunnen worden om de stijfheid zo hoog mogelijk op te voeren ( $\tau/T > 2$  à  $3$ ); de klapbelasting wordt dan min of meer als een quasi-statische belasting gevoeld. Veel speelruimte zal de ontwerper, gelet op een economisch verantwoord ontwerp, echter niet hebben en de ontwerper kan zich daarom beter richten op een vormgeving waarbij zich geen klappen voordoen.
- De responsie is ook afhankelijk van de dempingseigenschappen van de constructie. Demping (zowel vanuit de constructie als vanuit het water) kan effectief zijn in het beperken van de totale responsie van de constructie. Lokaal, met name in laag gedempte plaatvelden, is het effect veelal beperkt.

Resumerend kan worden gesteld dat maatregelen in de sfeer van het zo gunstig mogelijk plaatsen en vormgeven van de constructie het meest effectief zullen zijn.



# 9 REFERENTIES

## 9.1 WL-RAPPORTEN

Hieronder wordt een overzicht gegeven van WL-rapporten die zijn geselecteerd op relevante informatie over golfklapbelastingen op constructies.

- M399I/IV    Golfaanval Haringvlietsluizen. Verslagen modelonderzoek. 1960/1961, ir. M.A. Aartsen, ir. E. Allersma.
- M423A    Golfkrachten op bruggen te Delfzijl. Verslag modelonderzoek. 1958, ir. E. van Marle.
- M654    Golfdrukken op de hefdeuren van de Lauwerszeesluizen. Verslag modelonderzoek. 1977, ir. P.A. Zijderveld.
- M754    Buitenmetingen spuisluis Haringvliet. Verslag metingen. 1981, ir. J.D. van den Bunt, ir. A.C.M. Vermeer.
- M1057    Schaafeffecten bij golfklappen op een talud. Verslag modelonderzoek. 1979, ir. Th. van Doorn.
- M1138    Piombino thermal power plant. Wave forces on intake structure. Verslag modelonderzoek. 1972, ir. R.J. van Dijk.
- M1187III    Radareiland. Golfbelastingen. Verslag modelonderzoek. 1976, ir. J.D. van den Bunt, ir. R. Maaten.
- M1320IV    Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek naar de golfklapgevoeligheid van de pijleroplossing met dubbele kering. Voorlopig verslag modelonderzoek. 1976, ir. E. van Hijum.
- M1335I    Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen op de schuif in de Oosterschelde-caisson. Verslag modelonderzoek. 1977, ir. C. Ramkema.
- M1335II    Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen: een zuigermodel met samen-drukbaar water. Verslag modelonderzoek. 1979, ir. C. Ramkema, ir. C. Flokstra.
- M1335III    Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen: een literatuuroverzicht en schaafeffecten in modelonderzoek. Verslag bureaustudie. 1979, ir. C. Ramkema.
- M1381I    Golfklappen op stalen roosterschuiven in de stormvloedkering van de Oosterschelde. Nota modelonderzoek. 1976, ir. C. Ramkema.
- M1381II    Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen tegen betonnen roosterschuiven. Verslag modelonderzoek. 1978, ir. C. Ramkema.
- M1396III    Stormvloedkering Oosterschelde. Belasting in gesloten toestand; oriënterend onderzoek golfklappen scheve golfaanval. Verslag modelonderzoek. 1982, ir. J.C. Stans.

- M1494 Stormvloedkering Oosterschelde. Vooronderzoek m.b.v. een stijf sectiemodel naar stroom- en golfbelasting op dorpelbalken, bovenbalken en plaatliggerschuiven. Verslag modelonderzoek. 1981, ir. T.H.G. Jongeling.
- M1504 Stormvloedkering Oosterschelde. Oriënterend onderzoek naar golfklappen op de plaatliggerschuiven, sectie R15, loodrechte golfaanval en aanstroming. Verslag modelonderzoek. 1982, ir. R.M. Korthof.
- M1543 Stormvloedkering Oosterschelde. Belasting bij gesloten en weigerende schuif, sectie R15, h.o.h. afstand pijlers 45 m, scheve golfaanval. Verslag model-onderzoek. 1981, ir. J.C. Stans.
- M1648I Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek m.b.v. een elastisch gelijkvormig model naar het responsiegedrag van de bovenbalken bij golfklapbelasting. Berekening van golfklapdrukken m.b.v. een wiskundig massaveer-systeem model. Verslag modelonderzoek en bureaustudie. 1981, ir. T.H.G. Jongeling.
- M1648II Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek m.b.v. een elastisch gelijkvormig model naar het responsiegedrag van de plaatliggerschuiven bij golfklapbelastingen. Berekening van optredende krachten in de bewegingswerken van de schuiven. Verslag modelonderzoek en bureaustudie. 1981, ir. T.H.G. Jongeling.
- M1664 Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen op de hefschuiven; optimalisering plaatliggerschuif. Verslag modelonderzoek. 1980, ir. J.C. Stans.
- M1723/M1687 Stormvloedkering Oosterschelde. Verticale golfbelastingen op de vakwerkschuiven, loodrechte golfaanval. Verslag modelonderzoek. 1982, ir. R.M. Korthof.
- M1765 Alto Lazio nuclear power plant. Wave forces on the cooling water intake structure. Verslag modelonderzoek. 1982, ir. R.M. Korthof.
- M1835 Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen op de eindkokers. Verslag modelonderzoek. 1982, ir. R.M. Korthof.
- M1869III Civitavecchia harbour, Italy. Wave impacts on a circular and square caisson. Verslag modelonderzoek. 1983, ir. J.W. van der Meer.
- M2040 Regelmatige-golfklapmetingen Deltagoot, talud 1:6, analyse tijdsafhankelijke drukverdeling op een vaste plaats langs het talud. Verslag modelonderzoek. 1984, R.J.H. Stive.
- R765 Golfklappen op het uitwateringsriool bij Lomé, Togo. Verslag bureaustudie. 1972, ir. J.K. Kostense.
- R1359 Oil jetty St Eustatius, west coast. Breaking wave forces on vertical piles. Verslag bureaustudie. 1978, ir. R.M. Korthof.
- R1440II Randvoorwaarden bij het ontwerp van pijpleidingen. Golf- en stroomkrachten op pijpleidingen. Verslag literatuurstudie. 1979, ir. J. Bosma.

- R2279 Stormvloedkering Oosterschelde. Bovenbalken: nadere beschouwing golfklapbelastingen en responsie bovenbalken bij golfklappen. Notitie bureaustudie. 1985, ir. T.H.G. Jongeling, ir. E. van Meerendonk.
- Q298/H326 Conditiebewaking stormvloedkering Oosterschelde. Meetsysteem op schuiven S13 en R21 en bovenbalk R20. Verslag ontwerp en realisatie meetsysteem. 1988, ir. T.H.G. Jongeling.
- Q490 Spuisluizen afsluitdijk Den Oever. Dynamisch gedrag hefschuiven bij golfbelastingen. Verslag prototype metingen. 1990, ir. H.W.R. Perdijk, ir. T.H.G. Jongeling.
- Q605/H626 Conditiebewaking stormvloedkering Oosterschelde. Meting tijdens hoogwatersluiting 14 febr. 1989. Verslag buitenmetingen. 1990, ir. T.H.G. Jongeling.
- Q1299 Golfbelasting op draaibruggen van de Afsluitdijk. Verslag bureaustudie. 1991, ir. A. Vrijburcht.
- H231 Duinafslag tijdens superstormvloed op Walcheren. Analyse golf(klap)belasting op asfalt zandlichaam aan duinvoet. Verslag onderzoek. 1986, ir. R.J.H. Stive.
- H463 Second order wave forces; a literature survey. Verslag bureaustudie. 1989, ir. S.T. Schuurmans.
- H976 Literature survey to wave impacts on dike slopes. Verslag bureaustudie. 1990, ir. G. Ph. van Vledder.
- H1256 Waterbeweging op gladde taluds: invloed van berm en ondiep voorland op golfdrukken, golfoploop, golfoverslag en snelheden. Verslag modelonderzoek. 1991, ir. J.P. de Waal, ir. J.J. Veldman.
- H1480 Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval. Verslag modelonderzoek. 1992, ing. H. Derks, ir. M. Klein Breteler.
- H1702 Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval. Relatie tussen belasting en rek. Verslag bureaustudie, H1702. ir. J.P. de Waal.
- H1942 Handboek voor hydraulische belastingen op waterbouwkundige constructies. In voorbereiding. ir. M. Klein Breteler.

## 9.2 OVERIGE LITERATUUR

- Bagnold, R.A. (1939): "Interim report on wave pressure research", Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol 12, London, England.
- Battjes, J.A. (1988): "Korte golven", Collegehandleiding b76, Faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- Battjes, J.A. (1992): "Windgolven", Collegehandleiding b78, Faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- Berkhoff, J.C.W. (1976): "Mathematical models for simple harmonic linear water waves. Wave diffraction and refraction.", WL publikatie no 163.
- Campbell, I.M. and Weynberg, P.A. (1979): "Slam load histories on cylinders", in Int. Conference on Environmental Forces on Engineering Structures, Imperial College, London, England.
- CERC (1984): Shore Protection Manual (1984). Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, U.S.A.
- Detle, H.H., Schulz, K.P., Witte, H.H. (1991): "Experiments on wave-induced loadings on rigid and elastic walls", Leichtweiss Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Deutschland. (In het kader van het Europese Marine Science and Technology programma MAST G6, Coastal structures.)
- Fabula, A.G. (1957): "Ellipse-fitting approximation of two-dimensional normal symmetric impact of rigid bodies on water" in Proc. of 5th Midwestern Conference on Fluid Mechanics, pp 299-315, University of Michigan, USA.
- Führböter, A. (1966): "Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen." Mitteilungen des Frazius Instituts, Heft 28, Technische Universität Hannover, Deutschland.
- Führböter, A. (1969): "Laboratory investigation of impact forces", in Proc. of Symposium on Research on Wave Action, Vol 2, paper 6, Delft Hydraulics, Delft.
- Goda, Y. (1985): "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo Press, Japan.
- Goda, Y. (1992): "The Design of Upright Breakwaters", in Proc. of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures, pp 547-568, Venice, Italy, ICCE'92.
- Groen, P. en Dorrestein, R. (1976): "Zeegolven", Staatsdrukkerij en uitgeverijbedrijf, 's Gravenhage.
- Harris, C.M., Crede, C.E. (1961): "Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Hurdle, D.P., Kostense, J.K. and Bosch, P. van der (1989): "Mild-slope model for the wave behaviour in and around harbours and coastal structures in areas of variable depth and flow conditions", in Proc. of 2nd Int. Symp. on Water Modelling and Measurements.
- Iribarren Cavanilles, R. (1954): "Obras Maritimas", Madrid 1954.
- Isaacson, M. (1979): "Wave-Induced Forces in the Diffraction Regime", in Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders, pp 68-89, ed. T.L. Shaw, Pitman, London, England.

- Jong, R.J. de, Korthof, R.M., Perdijk, H.W.R. (1982): "Response studies of the storm surge barrier of the Eastern Scheldt.", WL publikatie no 284.
- Kármán, T.L. von, Wattendorf, F. (1929): "The impact on seaplane floats during landing", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), TN 321, Washington, USA.
- Klatter, L., Janssen, H., Dijkman, M. (1994): "Wave impacts on the Eastern Scheldt Barrier. Evaluation of five years field measurements", in Proc. of ICCE '94, Japan.
- Klopman, G., Kostense, J.K. (1989): "The loading on a vertical cilinder in random waves at high Reynolds numbers.", WL publikatie no 426.
- Kolkman, P.A. (1981): "Maximale golfdrukken volgens stromingsdrukmodel, schokgolffmodel en waterpistonmodel", Notitie SL1 in Notities van P.A. Kolkman in de periode 1969 - 1990, Waterloopkundig Laboratorium (1992).
- Lundgren, H. (1969): "Wave shock forces: An analysis of deformation and forces in the wave and in the foundation", in Proc. of Symposium on Research on Wave Action, Vol 2, paper 4, Delft Hydraulics, Delft.
- Meer, J.W. van der (1988): "Rock slopes and gravel beaches under wave attack.", WL publikatie no 396.
- Meer, J.W. van der, Benassai, E. (1984): "Wave forces and impacts on a circular and square caisson.", in Proc. of 19th Conference on Coastal Engineering, Houston, USA.
- Meer, J.W. van der, Heydra, G. (1990): "Rocking armour units: number, location and impact velocity.", WL publikatie no 435.
- Méhauté, B. Le (1976): "An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves", Springer-Verlag, New York, U.S.A.
- Miche, R. (1944): "Mouvements ondulatoires de la mer in profondeur constante ou décroissante", Annales des Ponts et Chaussées, Vol 114, Paris, France.
- Miller, B.L. (1980): "Wave Slamming on Offshore Structures", report no R81, National Maritime Institute, Feltham, England.
- Minikin, R.R. (1950): "Winds, waves and maritime structures", Griffin, London, England.
- Nagai, S. (1973): "Wave Forces on Structures", in Advances in Hydrosience, Vol 9, pp 253-324, Academic Press, New York, U.S.A.
- Oumeraci, H., Klammer, P., Partenscky, H.W. (1993): "Classification of breaking wave loads on vertical structures" in Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol 119, no 4.
- Ramkema, C. (1978): "A model law for wave impacts on coastal structures.", WL publikatie no 207.
- Rundgren, L. (1958): "Water wave forces", Bulletin no 54, Royal Institute of Technology, Division of Hydraulics, Stockholm, Sweden.
- Sarpkaya, T. and Isaacson, M. (1981): "Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures", Van Nostrand Reinhold Company, New York, U.S.A.
- Stive, R.J.H. (1984): "Wave impact on uniform steep slopes at approximately prototype scale", IAHR Symposium on scale effects in modeling hydraulic structures, Esslingen am Neckar, Deutschland.
- Vreugdenhil, C.B. (1969): "On the effect of artificial-viscosity methods in calculating shocks.", WL publikatie no 71.
- Vrijer, A. (1983): "Fender forces caused by ship impacts.", WL publikatie no 309.

- Wagner, H. (1931): "Landing of seaplanes", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), TM 622, Washington, USA.
- Watanabe, S. (1934): "Impact resistance on water - Part IV, cilinder", Scientific papers of the Institute of Physical and Chemical Research, Vol 23, Tokyo, Japan.
- Wijdieks, J. (1983): "Waterhammer. Practice - criteria - provisions - mathematical descriptions - examples.", WL publikatie no 310.
- Witte, H.H. (1988): "Druckschlagbelastung durch Wellen in deterministischer und stochastischer Betrachtung" in Mitteilungen Heft 102/1988, Leichtweiss Institut für Wasserbau, Technische Universität, Braunschweig, Deutschland.

# INDEX OP ONDERWERP (DEEL B)

Breken van golven: blz. 10.

Compression shocks(luchtcompressiemodel): blz. 43.

Constructies:

- slanke constructies: blz. 23 t/m 28.
- niet-slanke constructies: blz. 28 t/m 30 (Paragraaf 4.1.2).

Deining: blz. 7 en 8.

DiffRACTIE: blz. 16 t/m 18.

Drukverdeling golf over verticaal: blz. 12.

Ervaringen in prototype: blz. 55 t/m 59 (Paragraaf 7.3 en 7.4).

Ervaringen in schaalmodellen: blz. 51 t/m 65 (Paragraaf 7.1 t/m 7.7).

Golfbelasting:

- quasi-statisch: blz. 22 t/m 31 (Paragraaf 4.1 t/m 4.4).
- dynamisch: zie golfklap.

GolfdiffRACTIE: blz. 16 t/m 18.

Golfenergie: blz. 11 en 12.

Golfgetal: blz. 10.

Golfgroei: blz. 18.

Golfkarakteristieken:

- lange golf/korte golf: blz. 10 t/m 12.
- golfgetal: blz. 10.
- spectrum: blz. 14.
- voortplantingssnelheid: blz. 10.

Golfklap:

- maximale golfdruk: blz. 39 t/m 44 (Paragraaf 5.5).
- golfklapkarakteristieken: blz. 35 en 36 (Paragraaf 5.2).
- typering: blz. 38 en 39 (Paragraaf 5.4).

Golfreflectie: blz. 16 en 17.

Golfrefractie: blz. 17.

Golfspectrum:

- JONSWAPspectrum: blz. 15.
- Pierson-Moskowitzverdeling: blz. 14.
- Rayleighverdeling: blz. 13 en 14.

Golfvoorspelling: blz. 18 (Paragraaf 2.2.4).

Hammer shock: blz. 38.

Hoogwatergolf: blz. 8.

JONSWAPspectrum: blz. 15.

Korte (niet-slanke) constructies: blz. 28 t/m 30 (Paragraaf 4.1.2).

Korte golf: blz. 10 t/m 12 (Paragraaf 2.2.1).

Lange golf: blz. 8.

Luchtcompressiemodel (compression shocks): blz. 43.

Massaveersysteem: blz. 46 t/m 49 (Paragraaf 6.2).

Ontwerprichtlijnen: blz. 66 en 67 (Hoofdstuk 8).

Piekversterkingsfactor: blz. 15.

Pierson-Moskowitzverdeling: blz. 14.

Prototype: blz. 55 t/m 59 (Paragraaf 7.3 en 7.4).

Quasi-statische golfbelasting: blz. 22 t/m 32 (Paragraaf 4.1 t/m 4.5).

Rayleighverdeling: blz. 13 en 14.

Reflectie: blz. 16 en 17.

Refractie: blz. 17.

Responsie:

- responsie eigenschappen van de constructie: blz. 45.
- responsie op quasi-statische golfbelasting: blz. 31 en 32 (Paragraaf 4.5).
- responsie van een enkelvoudig massaveersysteem op een stootbelasting: blz. 46 t/m 49 (Paragraaf 6.2).
- invloed van responsie op klapbelasting: blz. 49 en 50 (Paragraaf 6.3).

Reynoldsinvloed: blz. 25.

Richtlijnen bij het ontwerpen: blz. 66 en 67 (Hoofdstuk 8).



Schaalmodellen: blz. 30, 31 en 51 t/m 65 (Paragraaf 7.1 t/m 7.7).

Schaalregels: zie Deel C.

Schokgolfmodel: blz. 39 en 40.

Seiches: blz. 8.

Slammingcoëfficiënt: blz. 42.

Slanke constructies: blz. 23 t/m 28.

Stochastisch proces: blz. 12 t/m 16.

Stootbelasting: blz. 46 t/m 49 (Paragraaf 6.2).

Stormvloed: blz. 8.

Stromingsinvloed op golven: blz. 31 (Paragraaf 4.4).

Stromingsdrukmodel: blz. 41 t/m 43.

Translatiegolf: blz. 8.

Typering van golfklappen: blz. 38 en 39 (Paragraaf 5.4).

Ventilated shocks: blz. 39.

Voorspelling van windgolven: blz. 18 (Paragraaf 2.2.4).

Voortplantingssnelheid: blz. 10.

Windgolven:

- stochastiek: blz. 12 t/m 16.
- voorspelling: blz. 18 (Paragraaf 2.2.4).

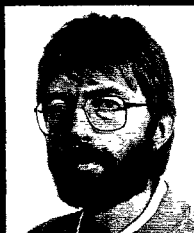
## LEVENSBESCHRIJVING AUTEURS



Dr. ir. P.A. Kolkman, geboren in 1932, is afgestudeerd aan de TU Delft in 1956 en gepromoveerd in 1976 op het onderwerp trillingen bij afsluitingsmiddelen.

Hij is gedurende zijn gehele loopbaan werkzaam geweest bij het Waterloopkundig Laboratorium. Van 1968 tot 1990 was hij bovendien in deeltijd werkzaam als wetenschappelijk medewerker bij de TU Delft.

Dr. Kolkman is betrokken geweest bij het ontwerp van vrijwel alle grote Nederlandse schutsluizen, rivierstuwen en stormvloedkeringen en heeft geadviseerd bij grote buitenlandse waterbouwkundige werken. Van zijn hand verschenen diverse toonaangevende publicaties. Vooral zijn werk op het gebied van trillingsbestrijding bij schuiven en afsluiters heeft internationaal bekendheid gekregen. Hij is medeauteur van een aantal Engelstalige boeken, onder andere op het gebied van zout-zoetscheidingsystemen bij schutsluizen en afvoerrelaties bij kunstwerken. Thans is hij hoofdredacteur van het tijdschrift van de 'International Association of Hydraulic Research (IAHR)'.



Ir. T.H.G. Jongeling is geboren in 1947 en in 1976 afgestudeerd in de Toegepaste Mechanica aan de TU Delft. Hij is werkzaam geweest bij HBG en IBBC-TNO en is sinds 1977 in dienst van het

Waterloopkundig Laboratorium.

Ir. Jongeling heeft zich gespecialiseerd in de dynamica van waterbouwkundige constructies en heeft onderzoeks- en adviesopdrachten uitgevoerd, voor met name de grote afsluitwerken in Nederland en in het buitenland, op het gebied van trillingen en golfklappen. Daarnaast heeft hij bijgedragen aan het ontwerp van tal van grote en kleinere waterbouwkundige werken. Van zijn hand zijn diverse publicaties op het gebied van constructie-trillingen verschenen. Inmiddels is ir. Jongeling ook werkzaam op het gebied van irrigatiesystemen.

Dienst Weg-en Waterbouwkunde  
Bouwdienst Rijkswaterstaat

Waterloopkundig Laboratorium