

Zijaanslagen schuiven Oosterscheldekering

krachten zijaanslagen



Zijaanslagen schuiven Oosterscheldekering krachten zijaanslagen

Auteur(s)

Caroline Gautier

Paul van Steeg

Zijaanslagen schuiven Oosterscheldekering krachten zijaanslagen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat, PPO
Contactpersoon	Dhr. A. van Dijke
Referenties	Aanvraag RWS: "Zijaanslagen OSK", zaaknummer 31168680 RWS-2021/12864, 13 april 2021 Offerte Deltares: 11206859-001-HYE-0002, 26 april 2021 Opdrachtbrief RWS: RWS-2021/15385, 6 mei 2021
Trefwoorden	Oosterscheldekering, schuiven, golfbelastingen, zijaanslagen, massa-veersysteem

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	21-12-2021
Projectnummer	11206859-002
Document ID	11206859-002-HYE-0003
Pagina's	86
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

C. Gautier		
P. van Steeg		

Samenvatting

Rijkswaterstaat is voornemens om de zijaanslagen op de kopse kanten van de schuiven van de Oosterscheldekering te vervangen en heeft Deltares gevraagd om Rijkswaterstaat te adviseren met betrekking tot de dimensionering van de zijaanslagen. In het destijds gebruikte rekenmodel (WLDelft, 1984a,b) is het dynamische krachtenspel geschematiseerd als massa-demper-veersysteem en de vraag was ook of dit rekenmodel ook op basis van huidige inzichten nog steeds geschikt is. In deel 2 van de huidige studie is de methodiek van destijds beschreven – inclusief de beperkingen en onzekerheden – en in het voorliggende document beschrijven we de nieuwe berekeningen met het rekenmodel en de resultaten daarvan.

Een belangrijk verschil met de aanpak ten tijde van het ontwerp van de Oosterscheldekering zijn de gehanteerde uitgangspunten welke leiden tot een significant hogere golfbelasting. Aangezien de resulterende botskrachten in de berekeningen van WLDelft (1984a,b) toen ook al niet binnen de toegestane waarde van 1800kN bleven, is het niet verrassend dat dat nu met zwaardere hydrodynamische condities als uitgangspunt ook niet lukt.

We hebben een relevante casus gedefinieerd die als representatief wordt gezien voor een zwaar aangevallen schuif (Roompot 16) in combinatie met hydraulische condities gebaseerd op RWS (2018). Dit betreft een hoge schuif in hoge positie (zijaanslag op NAP+2.5 m), een waterstand van NAP + 3,54 m, een H_{\max} van 6,4 m met 10 s periode (steilheid 4%) inkomend onder een hoek van 27° met de normaal op de kering (ofwel 303°N). Deze golfrichting is overgenomen van WLDelft (1984a,b). Voor deze casus en nog een aantal andere hebben we de dwars- en langskrachten op de schuif berekend en vervolgens de botskrachten die optreden in de zijaanslagen. De destijds gebruikte methodiek om de langs- en dwarskrachten van golven die inwerken op de schuiven te bepalen was niet meer te achterhalen. In het huidige project is daarom een nieuwe uitwerking van een methode gemaakt om de golfkrachten op de schuiven te berekenen voor gegeven inkomende golfcondities. Onze methode reproduceert bij gelijke condities de dwarskrachten uit WLDelft (1984a,b) heel goed, maar levert veel hogere langskrachten. De door ons bepaalde botskrachten komen daardoor ook significant hoger uit.

Een uitgebreide gevoeligheidsanalyse laat zien dat de botskracht gevoelig is voor diverse invoerparameters van het rekenmodel op basis van een massa-demper-veersysteem. De speling tussen schuif en pijler is van groot belang, maar ook de golfinvalshoek, de langskracht en de veerconstante van de zijaanslag.

Vanwege de niet-lineair schalende gevoeligheid van de botskracht voor diverse parameters dient men voorzichtig te zijn met het hanteren van robuustheidstoelagen om zo waarden 'naar boven toe' bij te stellen. Zo kan bijvoorbeeld een hogere veerstijfheid tot zowel een toe- als afname van de botskrachten leiden vanwege de dynamische wisselwerking tussen zijaanslag en schuifbewegingen.

We raden aan om nader uit te zoeken in hoeverre het diffuse karakter van de optredende combinatie van diverse golfcomponenten (verschillende richtingen, hoogtes en frequenties) kan leiden tot reductie van de botskracht. Het uitgangspunt om alle golfenergie in één richting en periode te schematiseren is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid en is waarschijnlijk conservatief. Het zou daarbij praktisch zijn om de losse onderdelen voor het bepalen van de botskrachten (vertaling van golven naar krachten, vertaling van golven en waterstanden naar diverse sponningsparameters, berekenen van resulterende krachten en bewegingen met rekenmodel op basis van het massa-demper-veersysteem) om te vormen

tot één gebruiksvriendelijk model. Dat zou dan mogelijk gebruikt kunnen worden voor een spectrale benadering of voor een probabilistische methode.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Projectcontext	9
1.2	Doelstelling	10
1.3	Leeswijzer	10
2	Uitgangspunten en eisen	11
3	Vaststellen kenmerkende condities	12
3.1	Inleiding: de Waterwet	12
3.2	Hydraulische condities	12
3.2.1	Praktische uitwerking Waterwet	12
3.2.2	Bepaling kenmerkende waterstand, golfhoogte en golfperiode	14
3.2.3	Bepaling kenmerkende golfinvalshoek	15
3.3	Bepaling kenmerkende schuiven en schuifstanden	18
3.3.1	Inleiding	18
3.3.2	Keuze representatieve schuif	18
3.3.3	Keuze representatieve positie van de schuif	20
3.3.4	Keuze spelingsruimte tussen zijaanslag en pijler	21
3.4	Samenvatting gekozen casussen	21
3.5	Overige parameters benodigd voor het rekenmodel	22
4	Resultaten	24
4.1	Inleiding	24
4.2	Vergelijking berekeningen met L37 van WLDelft (1984a)	24
4.3	Resultaten van de doorgekende casussen	25
4.4	Gevoeligheidsanalyse	25
5	Discussie modelonzekerheden en gevoeligheid rekenuitkomsten	29
5.1	Inleiding	29
5.2	Te hanteren veiligheidsfilosofie en daaruit volgende belasting en sterktecomponenten	29
5.3	Schematisatie massa-demper-veersysteem en bijbehorende invoerparameters	29
5.3.1	Inleiding	29
5.3.2	Golven en golfkrachten	29
5.3.3	Hydrodynamische parameters	30
5.4	Overige aspecten en uitgangspunten	30
5.5	Gevoeligheid invoerparameters	31
6	Conclusies en aanbevelingen	32

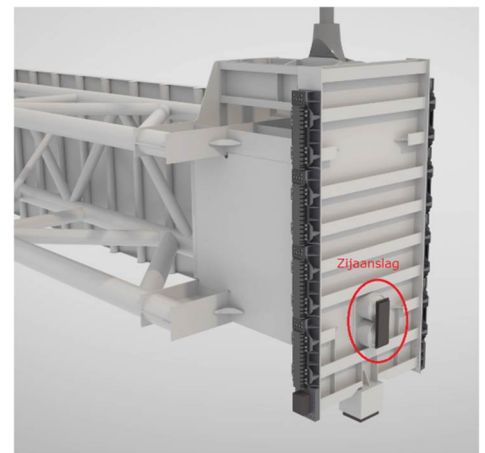
6.1	Conclusies	32
6.2	Aanbevelingen	33
	Referenties	36
A	Golven	37
A.1	SWAN-modelresultaten	37
A.2	Resultaten Hydra-NL	39
A.2.1	Resultaten bij terugkeertijd van 1000 jaar	40
A.2.2	Resultaten bij terugkeertijd van 30000 jaar	41
A.2.3	Conclusie	41
B	Toegestane krachten op pijler	43
B.1	Inleiding	43
B.2	Achtergrond	43
B.3	Vergelijking berekening WLDelft (1984a) met toelaatbare waarden botskrachten	45
B.4	Conclusies en aanbevelingen	47
C	Methodiek voor bepalen golfkrachten op schuif en eindhar	49
C.1	Inleiding	49
C.2	Definities	49
C.3	Golfkrachten op schuif	50
C.3.1	Golfkracht op schuif per eenheid van breedte	50
C.3.2	Golfkracht op individuele pijler	51
C.3.3	Resultante kracht op pijlers in normaalrichting	52
C.4	Golfkrachten op eindhar	54
C.4.1	Algemeen	54
C.4.2	Krachten op eindhar vanuit de Noordzee ($F_{NZ,N}$ en $F_{NZ,Z}$)	54
C.4.3	Krachten op eindhar vanuit de sponning ($F_{sp,N}(t)$ en $F_{sp,Z}(t)$)	54
D	Gevoeligheidsanalyse	56
D.1	Inleiding en conclusie	56
D.2	Effect van variaties op cases 1b, 2, 3	56
D.3	Effect van variaties op cases 1b, 2, 3 met lagere waarden voor k_2	64
D.4	Gevoeligheid voor algemene invoerparameters (k_2 , c_2 , k_6 , m_2 , speling)	69
D.5	Gevoeligheid voor langskrachten (amplitude B, frequentie ω_2)	70
D.6	Gevoeligheid voor dwarskrachten (F_{H0} , A, frequentie Ω_1 , φ)	71
D.7	Gevoeligheid voor (niet) uniforme speling aan weerszijde van de schuif	73
D.8	Overweging bij keuze van de waarden van c_2 , k_6 , en m_2 voor de gevoeligheidsanalyse	74
D.8.1	Parameter c_2	74
D.8.2	Parameter m_2 (m_{water})	75
D.8.3	Parameter k_2	76
D.8.4	Parameter k_6 (k_{6a})	76
D.8.5	Parameter s_1 en s_2	77

E	Schematisatie loodrechte kracht	78
F	Vergelijking methode Deltares en methode Deltadienst / WLDelft	80
F.1	Inleiding	80
F.2	Krachten als gevolg van loodrechte golfkracht op de schuif	80
F.3	Krachten in langsrichting	81
F.4	Faseverschuiving	83
F.5	Uitkomsten massa-demper-veersysteem	83
G	Rekenmodel met evanescent modes	85

1 Inleiding

1.1 Projectcontext

Aan beide kapse kanten (de 'eindharnen') van elk van de totaal 62 schuiven van de Oosterscheldekering bevindt zich een zogenaamde zijaanslag (rechter paneel van Figuur 1.1) die als functie heeft om bij grote zijwaartse bewegingen van de schuif de langskracht¹ op pijler en schuif op te nemen. Die langskrachten ontstaan vooral door een waterstandsverschil over de gesloten zijwanden van de schuiven ten gevolge van schuin invallende golven. De zijaanslagen werken op een soortgelijke manier als fenders bij afgemeerde schepen. De zijaanslagen zijn rubberen elementen die door indrukking een kracht opnemen en daarmee de snelheid gecontroleerd uit de schuif zullen halen om zo piekbelastingen door hard stoten zoveel mogelijk te vermijden.



Figuur 1.1. Impressie van de Oosterscheldekering, de schuif met eindhar en de zijaanslag.

In het kader van het onderhoudsplan voor de Oosterscheldekering heeft Rijkswaterstaat gepland om de zijaanslagen te vervangen en Deltares is gevraagd om te bepalen op basis van welke krachten het ontwerp gedimensioneerd moet worden. De wettelijke norm voor de hydraulische belastingen is sinds de bouw van de Oosterscheldekering in de jaren '80 gewijzigd. Bovendien was voorafgaand aan het huidige project onzeker of het destijds gebruikte rekenmodel (WL, 1984a,b) ook naar huidige inzichten en maatstaven nog steeds valide is.

De opdracht betreft het bepalen van de krachten die de zijaanslagen van de schuiven van de Oosterscheldekering moeten kunnen opnemen aan de hand van de volgende drie vragen.

- 1) Wat is de kracht in langsricting van de schuif werkend op de pijler vanuit de schuif, bij de door de opdrachtgever gehanteerde uitgangspunten?
- 2) Is het tijdens de bouw van de kering gebruikte rekenmodel voor het ontwerp van de huidige zijaanslagen nog van toepassing en gelden de gebruikte parameterwaarden nog?

¹ In deze rapportage is de dwarsrichting gedefinieerd als loodrecht op de oriëntatie van de Oosterscheldekering en de langsricting als parallel aan de oriëntatie van de Oosterscheldekering (in de lengtericting van een schuif).

- 3) Hoe heeft destijds verificatie plaats kunnen vinden, dan wel welke metingen zouden nu uitgevoerd kunnen worden om onzekerheden in het antwoord op vraag één en twee te verkleinen?

Elk van deze drie vragen wordt in een aparte rapportage behandeld. Het voorliggende rapport heeft betrekking op vraag 1. Vraag 2 en vraag 3 worden behandeld in Deltares (2021a,b).

Dit rapport is zodanig opgesteld dat wordt verondersteld dat de lezer bekend is met de rapportage van Deltares (2021a). Dit document is derhalve ook bedoeld om gecombineerd met de andere twee rapportvolumes uit dit project ingezet te worden.

1.2 Doelstelling

Het doel van voorliggend rapport is om Rijkswaterstaat te adviseren bij de benodigde veer karakteristiek (k_2 waarde) als input voor het dimensioneren van de nieuwe zijaanslagen van de schuiven van de Oosterscheldekering teneinde te voldoen aan de door de opdrachtgever gestelde eisen.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden de uitgangspunten en eisen benoemd waaraan het ontwerp van de zijaanslagen moeten voldoen. In Hoofdstuk 3 wordt een kenmerkende situatie onderbouwd welke wordt doorgerekend. De resultaten van de berekening worden gepresenteerd in Hoofdstuk 4 en bediscussieerd in Hoofdstuk 5. Tot slot worden de conclusies en aanbevelingen weergegeven in Hoofdstuk 6.

NB: Om de hoofdtekst leesbaar te houden is veel informatie in de bijlagen opgenomen.

2 Uitgangspunten en eisen

De volgende uitgangspunten, en daaruit volgende eisen, worden gehanteerd bij het uitrekenen van de maatgevende (bots)krachten voor het ontwerp van de nieuwe zijaanslagen:

- De botskracht in langsrichting tussen de schuif en de pijler moet zowel door de pijler als de schuif opgenomen kunnen worden.
 - o De maximum toegestane belasting op de pijler vanuit de zijaanslag is 1800 kN. Deze eis is van toepassing op het deel van de pijler boven een niveau van NAP+2.5 m. Onder dit niveau is de toegestane botskracht significant groter en daarom ook niet relevant. Een onderbouwing van deze eis is gegeven in Bijlage B.
 - o De toegestane botskracht voor de schuif (via de zijaanslag) is niet a priori bekend en hangt af van de nog te maken definitieve keuze van het type en de afmetingen van de zijaanslag. Er wordt aangenomen dat dit een hogere waarde is dan de maximaal toegestane botskracht op de pijler en dus niet maatgevend.
- De vervorming van de zijaanslag mag niet te groot zijn.
 - o De maximum toegestane indrukking van de zijaanslag is 130 mm (bron: persoonlijke communicatie met opdrachtgever).
- De versnelling van de schuif in langsrichting mag niet te groot zijn.
 - o De maximum toegestane versnelling van de schuif in langsrichting is, vanwege de maximale toegestane belasting op het bewegingswerk, gelijk aan 3 m/s^2 (RWS, 2003, pag. 127)
- Er dient te worden voldaan aan de Waterwet (zie Paragraaf 3.1).
 - o Omdat de Waterwet nog niet eenduidig is geïmplementeerd voor de complexe situatie bij de Oosterscheldekering wordt hier praktisch mee omgegaan door te stellen dat aan bovengenoemde eisen moet worden voldaan voor een vast te stellen set kenmerkende hydraulische condities, schuiven en schuifstanden welke is gebaseerd op een door Rijkswaterstaat gehanteerd uitgangspunt (zie Paragraaf 3.1 en Paragraaf 3.2).
- Om de optredende krachten in de zijaanslagen en op pijlers te bepalen wordt het door WLDelft (1984a,b) opgestelde rekenmodel en invoerparameters gehanteerd zoals is beschreven in Deltares (2021a) en door PTStructural is geprogrammeerd in een Python model. In Deltares (2021a) is geconcludeerd dat, onder voorwaarde van juiste inzet en passende invoerparameters, het rekenmodel zoals oorspronkelijk ingezet ten tijde van het ontwerp van de kering ook nu nog van toepassing is en inzetbaar is voor het berekenen van de orde van grootte van de krachten in de zijaanslagen.
- Om de golfkrachten op de schuif en de eindhar te bepalen wordt gebruik gemaakt van lineaire golftheorie zoals beschreven in Bijlage C. De optredende golfkrachten worden geschematiseerd tot enkele invoerparameters welke in het Python rekenmodel kunnen worden ingevoerd.

3 Vaststellen kenmerkende condities

3.1 Inleiding: de Waterwet

Voorafgaand aan het maken van berekeningen met het model (uitkomsten beschreven in Hoofdstuk 1) moet eerst vastgesteld worden wat kenmerkende condities zijn die als invoer voor het rekenmodel moeten dienen. Een logisch uitgangspunt daarvoor is de relevante informatie uit de Waterwet over te nemen. Echter, die informatie is niet voldoende compleet in relatie tot de context van het huidige project.

De Waterwet stelt een overstromingskans per jaar aan een dijktraject. De Oosterscheldekering vormt Traject 218 en valt onder de categorie 'voorliggende kering'. In de Regeling Veiligheid Primaire Waterkeringen 2017 (hierna RVPW genoemd), Bijlage I (Paragraaf 6.2.3) is de volgende tekst weergegeven:

“De Oosterscheldekering is een bijzondere kering. Voor deze kering is het niet mogelijk om de kans op niet sluiten uit te drukken in een enkel getal, omdat het keringen met meerdere schuiven betreft. (...)

De beoordeling van de Oosterscheldekering bestaat uit twee onderdelen:

- Is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet, en*
- Wordt voldaan aan de afspraken die zijn gemaakt over de prestatiepeilen in het achterland, die zijn gehanteerd bij het afleiden van de hydraulische belasting?*

Voor het tweede deel van de beoordeling van de Oosterscheldekering zijn geen generieke voorschriften beschikbaar. Daarom moet een toets op maat worden uitgevoerd.”

Het eerst genoemde onderdeel betreft de gesloten toestand. Voor de zijaanslagen zal die toestand nooit maatgevend zijn omdat de schuif dan op de onderdorpel rust en de kans op grote langsbeweging en botskrachten is in dat geval verwaarloosbaar.

Het uitwerken van het tweede onderdeel vergt een probabilistische analyse waarbij het (nog onbekende) faalmechanisme van de zijaanslagen vertaald zou moeten worden naar het prestatiepeilenmodel. Dit valt buiten de scope van de huidige studie. Daarom heeft Rijkswaterstaat gekozen voor een pragmatische oplossing welke in de volgende paragrafen is beschreven.

3.2 Hydraulische condities

3.2.1 Praktische uitwerking Waterwet

Omdat de aanpak conform de Waterwet ten aanzien van de zijaanslagen nog niet mogelijk is kiest Rijkswaterstaat voor een pragmatische oplossing: Rijkswaterstaat stelt dat de zijaanslagen zodanig ontworpen dienen te worden dat zij de krachten kunnen weerstaan die veroorzaakt worden door hydraulische condities die een overschrijdingskans hebben van 1:30.000ste per jaar (persoonlijke communicatie).

Het rekenmodel dat wordt gehanteerd beschouwt regelmatige golven (oftewel: een enkele sinuscomponent). De hydraulische condities aan de zeezijde van de kering worden daarom in het rekenmodel geschematiseerd tot de volgende parameters:

- waterstand (h)
- representatieve golfhoogte (H)

- representatieve golfperiode (T)
- representatieve golfinvalshoek (β)

In werkelijkheid treden er geen regelmatige golven op maar een golfveld bestaande uit meerdere golfcomponenten met diverse richtingen, hoogtes en periodes. Een dergelijk golfveld wordt met spectrale golfparameters beschreven. Kenmerkend daarbij zijn de spectrale golfhoogte H_{m0} , spectrale golfperiode $T_{m-1.0}$, en de gemiddelde golfrichting.

In RWS (2018) zijn voor diverse normfrequenties de hydraulische belastingen beschreven ter plaatse van de schuiven van de Oosterscheldekering. Er is daarbij zoveel mogelijk rekening gehouden met de voorschriften vanuit het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI). We beschouwen in deze studie de waarden uit die rapportage ter plaatse van locatie Roompot 16 omdat die over het algemeen de hoogste waarde heeft en een normfrequentie van 1:30.000 jaar, zie Tabel 3.1. In hiernavolgende paragrafen wordt ook verder onderbouwd waarom voor de schuif ter plaatse van Roompot 16 is gekozen. Overigens is recent een update van RWS (2018) beschikbaar gekomen (RWS, 2021) met over het algemeen iets lagere waarden maar qua planning kon daar in het voorliggende rapport geen gebruik meer van worden gemaakt.

Tabel 3.1: Waterstand, spectrale golfhoogte en spectrale golfperiode voor uitvoerpunt Roompot 16, behorende bij een 1:30.000 jaar overschrijdingskans (bron: RWS, 2018, pag. 9, 11 en 13). Opgemerkt wordt dat de waarden in deze tabel ter illustratie zijn gegeven maar niet zijn gehanteerd in de casussen.

Parameter	Waarde
waterstand h [m+NAP]	5.91
spectrale golfhoogte H_{m0} [m]	4.47
spectrale golfperiode $T_{m-1.0}$ [s]	7.01
golfinvalshoek β [° t.ov. normaal]	Niet gegeven

De in Tabel 3.1 gegeven waarden zijn gebaseerd op marginale statistiek per parameter, dat wil zeggen dat deze waarden los van elkaar gezien moeten worden. Bij het gelijktijdig optreden ervan zou een andere kans horen.

Deze waarden zijn echter niet één-op-één inzetbaar voor de zijaanslagen omdat de kering hoogstwaarschijnlijk gesloten is als ze optreden. Voor het bepalen van de relevante hydraulische belastingen dient men zich te realiseren dat juist tijdens het openen en sluiten de zijaanslagen het zwaarst belast zullen worden (zie ook de analyse in Bijlage B). In RWS (2018) zijn voor een aantal schuiven de hydraulische belastingen gegeven voor de volgende kenmerkende momenten:

1. Het moment van begin sluiten.
2. Het moment van einde sluiten.
3. Het moment van begin openen.
4. Het moment van einde openen.
5. Het moment waarop de hoogste waterstand optreedt.
6. Het moment waarop het hoogste verval optreedt.
7. Het moment waarop de hoogste golfhoogte optreedt.

Hiertoe is in RWS (2018) een verzameling van 450.000 stormgebeurtenissen opgesteld bestaande uit waterstanden berekend met Implic en de aan die waterstand en wind gekoppelde golven op basis van SWAN modelresultaten. Uit die verzameling konden in die studie met het prestatiepeilenmodel (Prespeil-OSK) voor diverse herhalingstijden de maatgevende waarden bepaald worden.

Niet voor elke schuif zijn deze maatgevende waarden bepaald. Van de beschikbare uitvoerlocaties bleek Roompot 16 over het algemeen de hoogste waarden te geven zodat we die vooral in deze studie beschouwen. Ter informatie is in Bijlage A weergegeven wat de variatie in golfhoogte voor de diverse schuiven is.

Zoals later zal blijken (Paragraaf 3.3) is het kenmerkende moment ten aanzien van de zijaanslag het moment waarop de zijaanslag ter hoogte van de verjonging van de pijler is, dus het deel waar de pijler 'dunner' wordt en de ruimte tussen schuif en pijler groter (zie ook het linker paneel in Figuur 3.5). Dat is dus 'ergens' tussen Moment 1 en Moment 2 (sluiten) en 'ergens' tussen Moment 3 en Moment 4 (openen). De hydraulische parameters behorende bij 1:30.000 jaar condities voor deze vier momenten zijn weergegeven in Tabel 3.2. Deze waarden zijn rechtstreeks overgenomen van RWS (2018). Let wel, de waarden zijn in RWS (2018) los van elkaar op basis van de marginale statistieken bepaald. Hier is de verhouding tussen H_{m0} en H_{max} geen constante. De reeks van H_{max} die ten grondslag ligt aan de hier gepresenteerde waarden voor H_{max} is bepaald door een omrekenfactor op H_{m0} toe te passen. Die factor is afhankelijk van de duur waarover men H_{max} wil berekenen. Bij een duur van 3 uur is de factor $H_{max}/H_{m0} = 1,94$ (Deltares, 2018). Bij een kortere duur is de factor lager. Zo is voor 'begin openen' een duur aangehouden van 30 minuten met een factor $H_{max}/H_{m0} = 1,64$.

Tabel 3.2. Waterstand, spectrale golfhoogte en spectrale golfperiode behorende bij een 1:30.000 jaar overschrijdingskans met kenmerkend moment ter plaatse van R16 in de Roompot (RWS, 2018, pag. 17)

parameter	1. begin sluiten	2. einde sluiten	3. begin openen	4. einde openen
waterstand h (m+NAP)	3.54	4.18	3.24	2.89
spectrale golfhoogte H_{m0} (m)	3.17	3.22	3.00	2.89
maximum golfhoogte H_{max} (m)	6.42	6.51	5.10	5.80
spectrale golfperiode $T_{m-1.0}$ (s)	6.60	6.50	6.30	6.10
golfinvalshoek β	onbekend	onbekend	onbekend	onbekend

In de volgende paragrafen wordt op basis van deze set aan waarden een keuze gemaakt voor de kenmerkende condities om in te zetten voor de berekeningen.

3.2.2 Bepaling kenmerkende waterstand, golfhoogte en golfperiode

Er worden drie cases beschouwd waarvoor de botskrachten, uitwijking en versnelling worden berekend: Casus 1b, Casus 2 en Casus 3. Deze drie casussen representeren niet per se de ontwerpcondities maar worden gebruikt om de orde van grootte af te schatten.

Casus 1b is gebaseerd op de berekening 'L37' (die een golfhoogte van 1.6 m en een waterstand van NAP+2.5 m had) uit WLDelft (1984a,b), maar dan met een hogere waterstand (NAP+3,54 m in plaats van NAP+2,5 m; daarom de aanduiding 'b'), overeenkomend met een kenmerkende waterstand bij begin sluiten (zie Tabel 3.2).

Bij Casus 2 wordt - ten opzichte van Casus 1b - een tweemaal zo grote golfhoogte gekozen ($H = 3,2$ m en gelijkblijvende golfsteilheid), vrijwel overeenkomend met de 1:30.000 jaar waarde voor de significante golfhoogte H_{m0} uit Tabel 3.2 voor de kenmerkende momenten.

Bij Casus 3 is de golfhoogte nogmaals verdubbeld tot 6,4 m, vrijwel overeenkomend met de 1:30.000 jaar waarde voor de maximum golfhoogte H_{max} uit Tabel 3.2. De reden hiervoor is dat voor het dimensioneren van de zijaanslagen niet de significante golf maar de maximale optredende golf in een golfveld tijdens een storm van belang is. De maximum golfhoogte is

gebaseerd op een storm met een duur van 3 uur (Deltares, 2018), waarbij een factor $H_{max}/H_{m0} = 1,94$ is gehanteerd. Bij kortere stormduur zou die factor lager kunnen zijn. Ook kan deze factor veranderen bij een andere ontwerpfilosofie aangezien deze factor ook afhankelijk is van de kans van voorkomen van een golfhoogte in een beschouwde tijdreeks.

Casus 3 wordt in deze studie gezien als de hoofdcasus.

Overigens had Casus L37 een veel lagere golfhoogte ($H = 1,6$ m) dan de golfhoogtes welke door RWS (2018) worden gerapporteerd. Dit wordt verklaard door het verschil in uitgangspunten welke destijds en recentelijk zijn gehanteerd. Er wordt daarom benadrukt dat Casus 1b niet kan worden gezien als een relevante situatie om kenmerkende krachten op de zijaanslagen te bepalen. Het doel van het hanteren van Casus 1b is enerzijds om een vergelijking met de berekening 'L37' te kunnen maken en anderzijds om het effect te zien van het hanteren van zwaardere golven (merk op dat de golven in Casus 2 twee keer zo groot zijn als in Casus 1b en dat de golven in Casus 3 twee keer zo groot zijn als in Casus 2).

Bij het definiëren van de drie casussen is de golfsteilheid in alle drie de casussen gelijk gehouden (4%). Uitgaande van de geselecteerde golfhoogte is op die manier de bijpassende golflengte vastgesteld en daarmee de corresponderende golfperiode. Ook de invalshoek van de golven wordt gelijk gehouden aan die van L37: 27° ten opzichte van de normaal (hiermee wordt overigens nog wel gevarieerd in een gevoeligheidsonderzoek, zie Paragraaf 4.4 en Bijlage D).

Bij Casus 2 is dus impliciet aangenomen dat de spectrale golfhoogte H_{m0} als een representatieve golfhoogte H_{rep} in het rekenmodel kan worden ingezet. Dit is vrijwel zeker een onderschatting omdat die golfhoogte – bij benadering – het gemiddelde van de hoogste 1/3 van de golven in een golfveld weergeeft. Er komen dus hogere golven in een golfveld voor dan de waarde H_{m0} . Casus 2 dient daarom als ondergrens in relatie tot de golfhoogte te worden gezien. Bij Casus 3 is aangenomen dat de maximum golfhoogte H_{max} als een representatieve golfhoogte in het rekenmodel kan worden ingezet. Dat is mogelijk, maar niet zeker, een conservatieve benadering. De gekozen waarden van de drie casussen zijn weergegeven in Tabel 3.3. Naar aanleiding van de bovenstaande beschouwing wordt Casus 3 als hoofdcasus gezien.

Vooralsnog is geen rekening gehouden met het verval over de schuif.

Tabel 3.3. Gedefinieerde cases welke in voorliggend rapport zijn doorgerekend.

parameter	Casus 1b	Casus 2	Casus 3
waterstand h (m+NAP)	3.54	3.54	3.54
representatieve golfhoogte H_{rep} (m)	1.60	3.20	6.40
golfperiode T (s)	5.00	7.07	10.00
golfinvalshoek β	27°	27°	27°
verval (m)	0,00	0,00	0,00

3.2.3 Bepaling kenmerkende golfinvalshoek

Zoals hierboven is aangegeven is de golfinvalshoek bij de condities beschreven in RWS (2018) niet gespecificeerd. Daarom zijn verschillende waarden voor deze parameter doorgerekend. Het is daarbij zinnig om fysische boven- en ondergrenzen te bepalen van de mogelijke golfinvalshoek en daarmee de range van waarden van de golfinvalshoek te verkleinen. Dit is op twee manieren grofstoffelijk uitgevoerd:

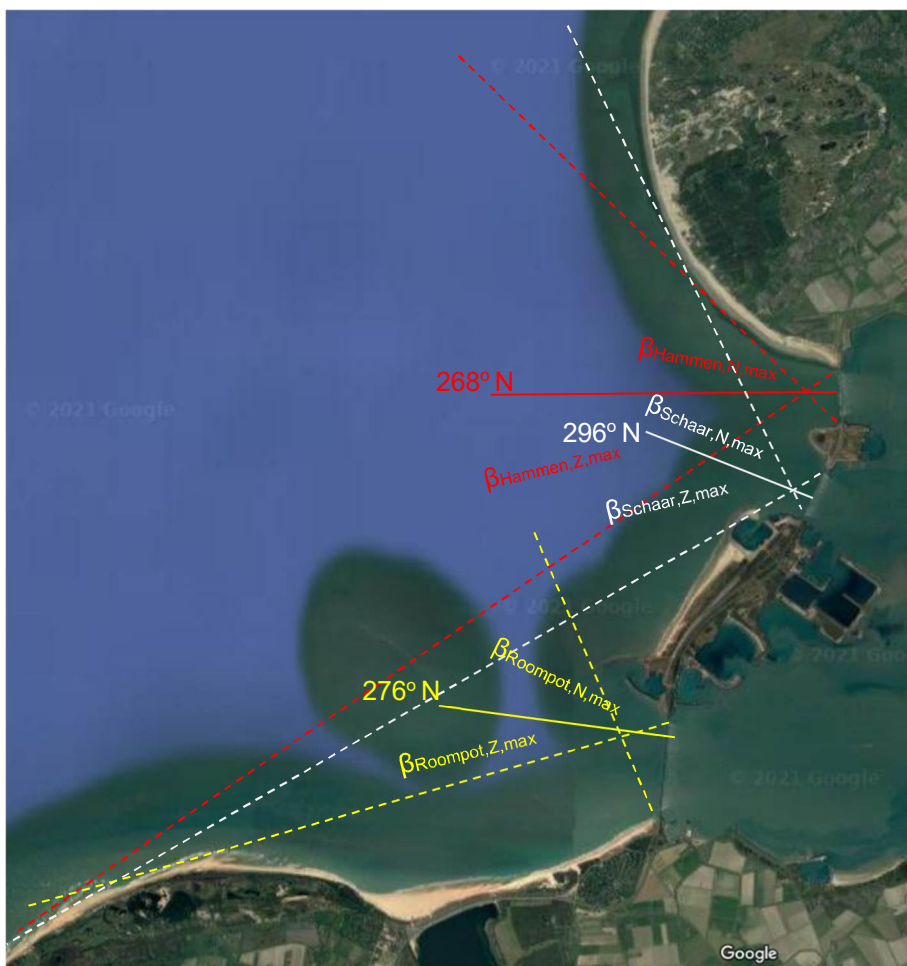
- 1) Door middel van het grafisch uitzetten van golfrichtingen langs de kusten van Walcheren en Schouwen-Duiveland (Figuur 3.1). Een uitzondering is de richting vanuit het noorden bij Roompot: daar is de golfbreker op het eiland Neeltje Jans de beperkende factor. Vervolgens is de richting ten opzichte van de normaal op de kering (zie Figuur 3.1) afgelezen. Bij deze aanpak wordt refractie, diffractie etc. niet meegenomen.
- 2) Door de resultaten uit de SWAN-database OSK_218_v04 (HKV, 2021) die de basis is voor Hydra-NL te beschouwen, zie Bijlage A.

De resultaten van beide methoden staan weergegeven in Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Bepaling maximum golfinvalshoek voor Hammen, Schaar en Roompot

	Maximum golfinvalshoek t.o.v. de normaal β [°]	
	O.b.v. Figuur 3.1	O.b.v. Swan database
Hammen, Noord	-45	-34
Hammen, Zuid	35	28
Schaar, Noord	-45	-33
Schaar, Zuid	50	56
Roompot, Noord	-63	-50
Roompot, Zuid	25	24

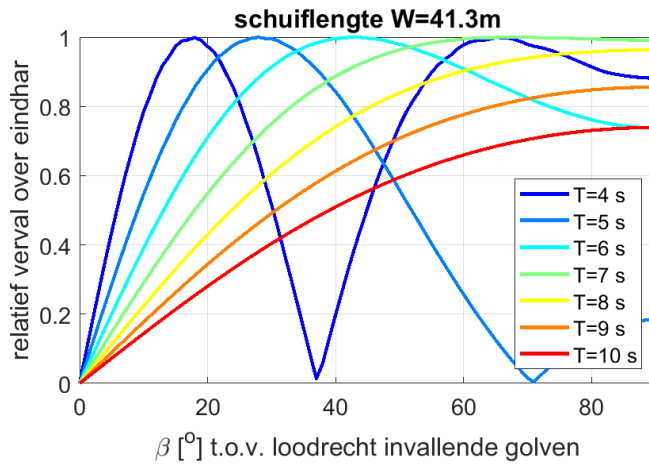
De golfrichtingen zoals opgenomen bij de drie cases zijn vooralsnog gebaseerd op Roompot. De minimum en maximum golfinvalshoek ten opzichte van de normaal (= loodrecht op de kering) is respectievelijk -50° en 24° . Aangezien Casus 1b is gebaseerd op de berekening van WLDelft (1984a,b) en daar destijds een golfinvalshoek van 27° is gehanteerd wordt het bereik van de drie cases iets vergroot naar -52° en 27° . (Er is gerekend met stapgroottes van 5° . Redenerend vanuit 27° met deze stapgroottes is 52° verkregen in plaats van de 50° welke in Tabel 3.4 is weergegeven). Aangezien er qua berekening geen onderscheid is tussen golven uit het noorden of uit het zuiden – vanwege aangenomen symmetrie van de schuifweergave in het rekenmodel – wordt er rekenkundig gerekend met een hoek tussen 0° en 52° .



Figuur 3.1. Globale bepaling maximum golfinvalshoeken voor Hammen (rood), Schaar (wit) en Roompot (geel). De lijn loodrecht op de kering is aangegeven met een doorgetrokken lijn, de meest extreme hoeken zijn aangegeven met onderbroken lijnen. Deze analyse is aangescherpt met een SWAN berekening welke in de tekst boven deze figuur is toegelicht.

Het is goed om te realiseren dat de golfinvalshoek een groot effect op de botskracht heeft, zoals later wordt getoond in de gevoeligheidsanalyse van Appendix D (zie ook Paragraaf 4.4).

Als een schuin invallende golf bij een eindhar een top heeft en op hetzelfde moment bij de andere eindhar een dal dan is de langskracht op de schuif maximaal. Dit gebeurt als de op de golfrichting geprojecteerde afstand tussen linker- en rechterpijler precies gelijk is aan een halve golflengte (of 1,5, 2,5... golflengtes). Onderstaande figuur geeft per golfperiode aan bij welke golfinvalshoek de aandrijvende kracht maximaal is. De aandrijvende kracht is daarbij gedefinieerd als het genormaliseerde waterstandsverschil over de twee eindharren. Bij $T = 5$ s gaat het dus om 27° (zoals toegepast in WLDelft, 1984) maar bij langere periodes is de aandrijvende kracht pas bij grotere hoeken maximaal, en die zullen – vanwege refractie – minder vaak voorkomen. De figuur laat ook zien dat kleinere invalshoeken resulteren in een aanzienlijk kleinere aandrijvende kracht. Voor bijvoorbeeld een golf met een periode van 7 s (groene lijn) halveert het relatieve verval over de twee eindharren bij een invalshoek van ongeveer 18° . En bij een hoek van bijvoorbeeld 12° (zie Appendix A) is die kracht nog iets minder.



Figuur 3.2. Relatief verval over de twee eindharren als functie van de golfperiode en golfinvallshoek β . Hierbij is uitgegaan van de golflengte op diep water

3.3 Bepaling kenmerkende schuiven en schuifstanden

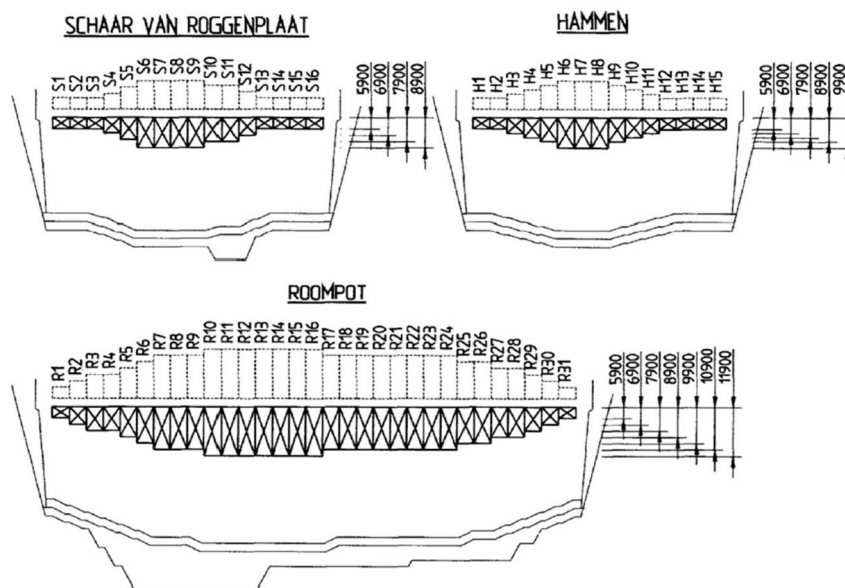
3.3.1 Inleiding

De Oosterscheldekering heeft 62 schuiven met iedere schuif een unieke combinatie van eigenschappen zoals schuifhoogte, speling tussen zijaanslag en pijler en kenmerkende hydraulische belastingen. Wanneer er meerdere schuifhoogtes doorgerekend zouden worden zou dit een grote hoeveelheid exercities betekenen (bij vijf schuifposities voor alle 62 schuiven zijn dit 310 berekeningen). Aangezien het bepalen van de benodigde invoer per casus arbeidsintensief is en er wellicht een gebrek aan overzicht zou ontstaan is besloten om dit op een andere manier aan te pakken waarbij de te berekenen combinaties terug worden gebracht naar berekeningen voor één representatieve schuif en één representatieve schuifhoogte. Dit wordt in onderstaande paragrafen verder uitgewerkt.

3.3.2 Keuze representatieve schuif

Inleiding

Een overzicht van de schuiven en hun kerende hoogte is weergegeven in Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Overzicht schuiven en hun kerende hoogte (mm) (overgenomen uit RWS, 2003, pag. 62)

Het type schuif (locatie, hoogte, waterdiepte) heeft invloed op:

- de hydraulische randvoorwaarden die voor de schuif van toepassing zijn
- de aandrijvende kracht op de schuif gegeven de hydraulische randvoorwaarden
- de respons van de schuif gegeven de externe krachten

Deze drie punten worden hieronder verder uitgewerkt.

Hydraulische randvoorwaarden

De hydraulische randvoorwaarden zijn per schuif anders. Een overzicht van de variatie over de schuiven is weergegeven in Bijlage A. Wij beschouwen in deze studie de golven bij Roompot 16 (zie ook Sectie 3.2.1).

Aandrijvende kracht op schuif gegeven de hydraulische randvoorwaarden

De aandrijvende kracht op de schuif (via de eindharren) gegeven de hydraulische randvoorwaarden is afhankelijk van de indompelingsdiepte van de schuif en de waterdiepte voor de schuif. De waterdiepte voor de schuif heeft namelijk invloed op de drukverdeling in de waterkolom (orbitaalbeweging). Dit kan worden uitgedrukt in een reductiefactor voor de druk als functie van de diepte (symbool α). Op de stilwaterlijn is de druk maximaal ($\alpha = 1$) en deze neemt af dieper onder water ($\alpha < 1$) volgens (Deltares, 2021a):

$$\alpha = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)}$$

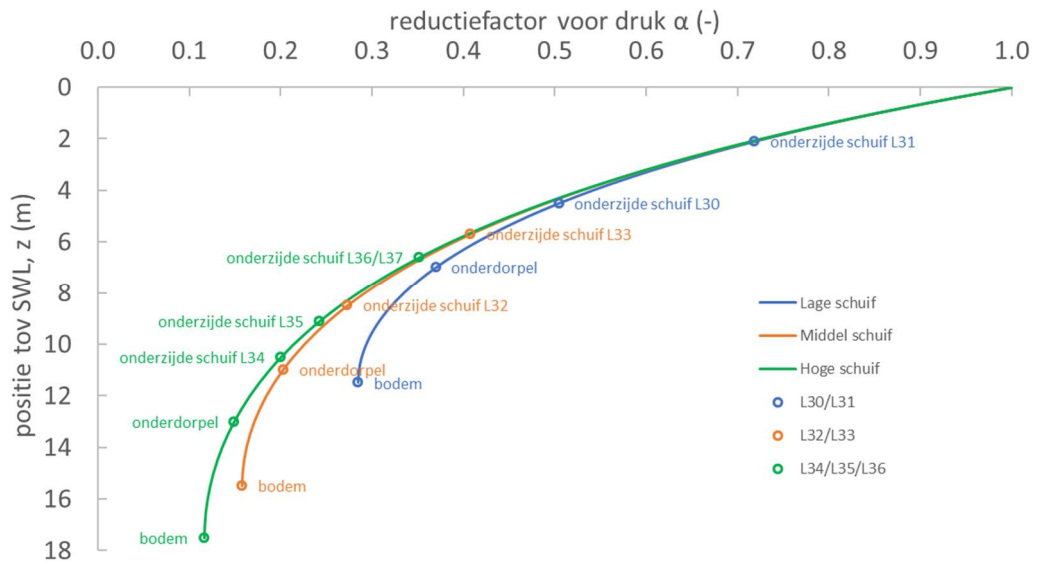
Waarbij z de positie van de beschouwde locatie ten opzichte van de stilwaterlijn (negatief onder water) [m], k het golfgetal [rad/m] en h de waterdiepte [m].

Door het verloop van de waarde van α over de waterkolom te beschouwen voor drie verschillende schuifhoogtes kan de invloed van die parameter worden ingeschat (Tabel 3.5). Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.4. Daarbij wordt opgemerkt dat daarbij een andere waterstand is aangehouden dan de waterstand in de drie eerder genoemde cases aangezien ten tijde van het opstellen van deze grafiek de te hanteren waterstand in de cases nog niet was vastgesteld.

Voor de te hanteren diepte dient een representatieve waterdiepte te worden aangehouden. Vooralsnog wordt aangenomen dat de waterdiepte voor de onderdorpel als representatieve waterdiepte kan worden gehanteerd. Mogelijk wordt de grafiek iets anders is wanneer een andere diepte als representatieve diepte wordt aangenomen (het is bijvoorbeeld op enige afstand voor de onderdorpel al significant dieper). Er wordt ingeschat dat voor het doel van deze exercitie, namelijk het vergelijken van schuiven met een verschillende hoogte, deze invloed niet significant is.

Tabel 3.5. Drie beschouwde typen schuiven (bij een beschouwde waterstand van 2,5 m +NAP). Als waterdiepte is de diepte direct zeewaarts van de onderdorpel aangehouden.

Type schuif	Schuifhoogte h_{schuif} (m)	Waterdiepte h (m) zeewaarts van onderdorpel
Laag	5.9	11.5
Middel	9.9	15.5
Hoog	11.9	17.5



Figuur 3.4. Reductiefactor op druk inwerkend op een schuif (α) als functie van de beschouwde positie in de waterkolom (z). De hoogteposities van de verschillende relevante onderdelen (bodem, onderdorpel en onderzijde schuif) zijn tevens aangegeven voor de zeven beschouwde cases in WLDelft (1984a,b) (aangegeven met de door WLDelft gehanteerde codering van L30-L37)

De interesse ligt alleen in het verschil tussen de verschillende schuifhoogtes. Het grootste verschil ligt (vanzelfsprekend) tussen de hoge schuif (groene lijn) en de lage schuif (blauwe lijn). De lijnen zijn getekend tot de bodem maar zijn alleen relevant tot de positie van de bovenzijde van de onderdorpel aangezien de schuif niet verder zal komen dan die positie. Te zien valt dat in het relevante hoogtebereik er geen noemenswaardige afhankelijkheid is van de schuifhoogte ten aanzien van de reductiefactor α . Daarmee is er dus ook geen noemenswaardige afhankelijkheid van die parameter te verwachten bij een gelijke indompelingsdiepte en gelijke hydraulische belasting. In de berekeningen wordt die parameter daarom ook niet gevarieerd.

Respons van de schuif gegeven de externe krachten

In WLDelft (1984a,b) zijn drie cases met verschillende schuifhoogten doorgerekend waarbij de positie van de zijaanslag van iedere cases gelijk was en waarbij de hydraulische condities gelijk waren. Daaruit bleek dat de grootste krachten tussen de pijler en de zijaanslag optraden bij de hoogste schuif. Die schuifhoogte is daarom geselecteerd voor de berekeningen.

Eindconclusie

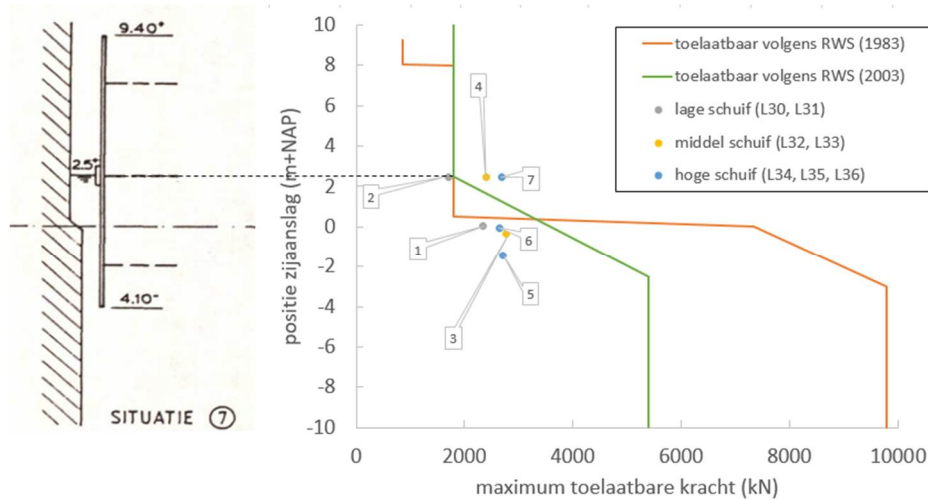
Op basis van bovenstaande wordt als uitgangspunt voor een representatieve casus Roompot 16 gekozen (R16). Dit is de hoogste schuif (een hoogte van 11,9 m) en van de schuiven met een hoogte van 11,9 m (R10 t/m R16) is dit de zwaarst belaste schuif (uitgaande van een overschrijdingswaarde behorende bij 1:30.000 van H_{m0} op basis van RWS, 2018, pag. 11).

3.3.3 Keuze representatieve positie van de schuif

In Bijlage B is samengevat wat de toegestane krachten op de pijler zijn volgens de in de jaren 70/80 uitgevoerde analyses. Deze toegestane kracht die een zijaanslag op een pijler mag uitoefenen is een functie van de hoogtepositie van de zijaanslag ten opzichte van de pijler. Boven de verjonging van de pijler is de toegestane kracht fors minder dan onder de verjonging van de pijler. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 3.5. In het geval van de schuif bij Roompot 16 liggen de onderzijde van de schuif (schaalbeplating) en de onderzijde van de eindhar respectievelijk 6,20 m en 6,55 m lager dan het hart van de zijaanslag (zie ook de

tekening in RWS, 1988). Opgemerkt wordt dat bij de berekeningen in WLDelft (1984a,b, berekening L36/L37) een indompelingsdiepte van de eindhar van 6,6 m is gehanteerd en een waterstand van +2,5 m+NAP. Hierdoor lag de zijaanslag op een hoogte +2,5m+NAP (overigens variëren de botskrachten in WLDelft (1984a,b) niet veel wanneer de indompelingsdiepte wijzigt). Waarschijnlijk is door WLDelft (1984a,b) voor deze waarde gekozen omdat dit de meest ongunstigste waarde is. Ook in de analyse in dit rapport wordt de kenmerkende hoogte van de zijaanslag op 2,5 m + NAP voor de drie cases aangehouden.

Opgemerkt wordt dat er een verschil is tussen de door RWS (1983) en RWS (2003) gerapporteerde krachtsverloop. Het is onduidelijk waardoor dit verschil komt.



Figuur 3.5. Links: schematisatie van Berekening L36/L37 (= Situatie 7) uit WLDelft (1984a,b) waarbij de onderzijde van de eindhar, de zijaanslag en de waterstand op respectievelijk -4,1 m + NAP, +2,5 m + NAP en +2,5 m + NAP liggen. Rechts: Vergelijking van de toelaatbare krachten volgens RWS (1983, 2003) en de door WLDelft (1984a) berekende krachten voor de zeven daarin beschouwde situaties (markers).

3.3.4 Keuze spelingsruimte tussen zijaanslag en pijler

Er wordt een spelingsruimte van 5 cm aangehouden tussen de noordelijke pijler en de schuif en tussen de zuidelijke pijler en de schuif (zie Appendix D7.5). In de gevoeligheidsanalyse in Bijlage D is deze parameter gevarieerd.

3.4 Samenvatting gekozen casussen

Een samenvatting van de gekozen parameters is weergegeven in Tabel 3.6. Daarbij is casus 3 gebaseerd op een significante golfhoogte met een signaleringsnorm van 1:30.000^e per jaar en zijn de waterstand, maximum optredende individuele golfhoogte (H_{max}) en golfperiode daarbij zo goed mogelijk ingeschat. De casussen representeren niet per se de ontwerpcondities maar we gebruiken ze hier als voorbeeld om de orde van grootte af te schatten en het effect van variaties te kunnen kwantificeren.

Het betreft één schuiftype (de hoogste schuif) waarbij de positie van de zijaanslag op een niveau van +2,5 m + NAP ligt en een waterstand van NAP + 3,54 m wordt aangehouden.

Tabel 3.6. Samenvatting gekozen parameters.

	Casus 1b	Casus 2	Casus 3
representatieve golfhoogte $H_{rep}(m)$	1.60	3.20	6.40
golfperiode $T(s)$	5.00	7.07	10.00
golfinvalshoek $\beta (^{\circ})$	27*	27*	27*
waterstand (m + NAP)	3.54	3.54	3.54
schuifhoogte (m)	11.90	11.90	11.90
indompelingsdiepte $h_0 (m)$	7.64	7.64	7.64
waterdiepte (m)	18.5	18.5	18.5
niveau zijaanslag (m+NAP)	2.5	2.5	2.5
zijwaartse speling per zijde (m)	0.05*	0.05*	0.05*

* deze parameters zijn gevarieerd in de gevoeligheidsanalyse beschreven in Bijlage D.

3.5 Overige parameters benodigd voor het rekenmodel

Het rekenmodel beschrijft een massa-demper-veersysteem met 29 invoerparameters die in Deltares (2021a) systematisch zijn beschouwd en gecontroleerd. De 29 parameters worden hier als volgt samengevat:

- Vijf parameters (parameters B , $FH0$, A , Ω_1 , ϕ) beschrijven de langskrachten en de dwarskrachten op de schuif als gevolg van de golfcondities. Hoewel de oorspronkelijke afleiding van deze parameters niet meer terug is gevonden is een rekenmodel opgesteld om deze parameters vast te stellen (Bijlage C). Met dit nieuw afgeleide rekenmodel worden vrijwel dezelfde waarden gevonden voor de loodrechte krachten (parameters $FH0$, A , Ω_1), dus haaks op de schuiflengte, als de waarden die door WLDelft (1984a,b) zijn gerapporteerd. Echter ten aanzien van de langskrachten (parameter B) worden aanzienlijk hogere waarden gevonden. En juist die zijn hier het meest van belang. De vergelijking van de parameters zoals deze door Deltares zijn afgeleid en door WLDelft (1984a,b) zijn gepresenteerd is gerapporteerd in Bijlage F. In dit rapport wordt de in dit project nieuw afgeleide methode (zie Bijlage C) gehanteerd.

De bevindingen ten aanzien van de overige 24 beschouwde invoerparameters zijn, conform Deltares (2021a), als volgt:

- Er zijn 14 invoerparameters succesvol gecontroleerd;
- De veerstijfheid van de zijaanslag k_2 dient bij de inzet van het rekenmodel ook beschouwd te worden als een uitvoerparameter (middels iteratie) en levert het gezochte antwoord van de benodigde veerstijfheid van de zijaanslagen (sterkte-capaciteit). Daarbij wordt opgemerkt dat de schematisatie van de werkelijkheid naar de parameter k_2 en vice versa aandacht behoeft. Dit is toegelicht in Deltares (2021a);
- Twee invoerparameter (speling s_1 en s_2) zijn – binnen praktische en geometrische grenzen – ontwerpkeuzes. Voor de hier te beschouwen casussen is een waarde van $s_1 = s_2 = 0,05$ m gekozen. In de gevoeligheidsanalyse in Bijlage D is hiermee gevarieerd;
- Over drie parameters (hydrodynamische coëfficiënten k_6 en c_2 en massa m_2) is gereede twijfel ten aanzien van de juiste schematisatie / aangehouden parameterwaarde. In de drie casussen die hier worden doorgerekend wordt de door

WLDelft gehanteerde aanpak ongewijzigd aangehouden. Daarbij is in Bijlage D een gevoeligheidsstudie uitgevoerd voor (onder andere) die drie parameters;

- Vier parameters ten aanzien van de wrijving van de schuifaanslagen (a , b_1 , b_2 , c) zijn door Deltares (2021a) globaal beschouwd maar niet in een dermate hoog detail dat de conclusies ten aanzien van de te hanteren waarden is onderschreven. Bij de drie casussen die hier worden doorgerekend wordt de aanbeveling van Deltares (2021a) gevolgd om de door WLDelft (1984) gehanteerde waarden toe te passen.

Samenvattend bekend dit het volgende. De 24 laatstgenoemde parameters voor het massademper-veersysteem zijn bepaald conform de methodiek beschreven in Deltares (2021a). De vijf eerstgenoemde parameters zijn bepaald met de methode uit Bijlage C. De gehanteerde getallen zijn weergegeven in Tabel 3.7.

Tabel 3.7. Invoerparameters voor Casus 1b, Casus 2 en Casus 3 (zie voor nadere achtergrondinformatie Deltares, 2021a).

nr	type		beschrijving	Casus 1	Casus 2	Casus 3	
1	massa	m1	kg	representatief deel van de massa van de pijler incl. toegevoegde watermassa	1.0E+07	1.0E+07	1.0E+07
2		m2	kg	massa van de schuif + een zekere hoeveelheid toegevoegde watermassa	1.08E+06	1.18E+06	1.18E+06
3		m3	kg	n.v.t. voor zijaanslagen	1000	1000	1000
4		m4	kg	massa schuifaanslag	1000	1000	1000
5	stijf heden	k1	N/m	veerstijfheid van de pijler waar de schuif tegenaan botst (lineair)	1.E+10	1.E+10	1.E+10
6		k2	N/m	veerstijfheid van de zijaanslag (lineair)	1.8.10 ⁴ *	1.8.10 ⁴ *	1.8.10 ⁴ *
7		k3	N/m	n.v.t. voor zijaanslagen	1.E+09	1.E+09	1.E+09
8		k4	N/m	stijfheid van de rubber aanslagen van de schuifaanslag (lineair)	4.25E+07	4.25E+07	4.25E+07
9		k5	N/m	Extra stijfheid in geval de staalplaten in de rubber schuif aanslagen aanliggen tegen de stootblokken	1.9E+10	1.9E+10	1.9E+10
10		k6	N/m	Hydrodynamische stijfheid bij bewegen schuif in lengterichting	760000	890000	890000
11	dempers	c1	kg/s	lineaire demper pijler	4.4E+08	4.4E+08	4.4E+08
12		c2	kg/s	hydrodynamische demping bij bewegen schuif in lengterichting	2.39E+04	3.71E+04	3.71E+04
13		c3	kg/s	n.v.t. voor zijaanslagen	2E+06	2E+06	2E+06
14		c4	kg/s	demper is niet toegepast in uiteindelijke ontwerp	0	0	0
15	spelings-ruimte	s1	m	speling tussen pijler en zijaanslag aan de rechterkant van de schuif	0.05*	0.05*	0.05*
16		s2	m	speling tussen pijler en zijaanslag aan de linkerkant van de schuif	0.05*	0.05*	0.05*
17		t1	m	speling in de schuifaanslagen	0.035	0.035	0.035
18		t2	m	speling in de schuifaanslagen	0.035	0.035	0.035
19	Wrijvingscoëfficiënten	a	(-)	dynamische wrijvingscoëfficiënt, d.w.z. de wrijvingscoëfficiënt die optreedt bij hogere snelheid	0.1	0.1	0.1
20		b1	(-)	statische wrijvingscoëfficiënt, d.w.z. de wrijvingscoëfficiënt die optreedt bij stilstand	0.3	0.3	0.3
21		b2	(-)	statische wrijvingscoëfficiënt bij een 2e of volgende keer belasten in dezelfde richting	0.125	0.125	0.125
22		c	(m/s)	snelheid waarbij de wrijvingscoëfficiënt ongeveer constant wordt	0.005	0.005	0.005
23	FH// (=FHpar)	B	(N)	amplitude van de tot sinus geschematiseerde belasting	1.26E+06	2.34E+06	3.23E+06
24		Ω	(rad/s)	fasehoek	1.26	0.89	0.63
25		FH0	(N)	constante deel van de belasting (verval en stromingsbelasting)	1.43E+06	4.65E+06	1.09E+07
26		A	(N)	amplitude van het tot een sinus geschematiseerde variërende deel van de belasting (golfbelasting)	4.92E+05	2.20E+06	6.10E+06
27	FH (=FHperp)	Ω	(rad/s)	hoekfrequentie van het variërende deel	2.5	1.75	1.25
28		ϕ	(rad)	fasehoek tussen het variërende deel van de horizontale belasting loodrecht op de schuif en het variërende deel van de horizontale belasting evenwijdig aan de schuif	0.52pi*	0.57pi*	0.56pi*
29	Voorspankracht	FVS	(N)	voorspankracht in schuifaanslagen	0	0	0

* in de gevoeligheidsanalyse in Bijlage D is deze parameter gevarieerd

4 Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de berekeningen gepresenteerd. Eerst wordt in Paragraaf 4.2 op basis van casus 'L37' de nieuwe aanpak voor het afleiden van golfkrachten op de schuiven vergeleken met de oorspronkelijk door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarden. Vervolgens worden in Paragraaf 4.3 de resultaten van de drie casussen (casus 1b, 2 en 3) gepresenteerd en tot slot wordt de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse (in detail beschreven in Bijlage D) samengevat in Paragraaf 4.4.

4.2 Vergelijking berekeningen met L37 van WLDelft (1984a)

In Bijlage F is zo goed als mogelijk de oorspronkelijke Deltadienst / WLDelft (1984a,b) en de in dit project nieuw uitgewerkte aanpak ten aanzien van het bepalen van de langskrachten op de schuif en dwarskrachten op de pijlers (benodigd voor het bepalen van de tegenwerkende wrijvingskracht) vergeleken. Daarbij wordt opgemerkt dat achtergrondinformatie over de aanpak van de Deltadienst / WLDelft niet meer beschikbaar is maar dat alleen enkele figuren en kenmerkende getallen beschikbaar zijn. De vergelijking is uitgevoerd op basis van casus L37 zoals deze in WLDelft (1984a,b) is gerapporteerd.

De dwarskrachten op de pijlers (Bijlage F.2) zijn de krachten op de pijlers als gevolg van de golfkrachten loodrecht op de schuif. Deze zijn van belang om de wrijvingskracht tussen de pijlers en de schuifaanslagen te bepalen. De dwarskrachten worden beschreven door een sinusbeweging welke wordt gekarakteriseerd door een offset (FH_0) een amplitude (A) en een fasehoek (Ω_1). De door Deltares in dit project nieuw afgeleide getallen komen redelijk goed overeen met de door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde getallen.

De langskrachten op de schuiven (Bijlage F.3) worden beschreven door een sinusbeweging welke wordt gekarakteriseerd door een amplitude (B) en een fasehoek (Ω_2). De door Deltares nieuw berekende amplitude B is significant groter (orde 50%) dan de door WLDelft (1984a,b) gehanteerde krachtsamplitude. Voor dit verschil is geen verklaring gevonden. Dit komt voornamelijk doordat de onderbouwing van de waarde welke door WLDelft (1984a,b) is gehanteerd niet meer is teruggevonden. De fasehoek Ω_2 welke door Deltares nieuw is bepaald is vrijwel gelijk aan de fasehoek welke door WLDelft (1984a,b) is gehanteerd.

Het faseverschil tussen de langskracht en de dwarskracht op de schuif (ϕ) (Bijlage F.4) welke door Deltares in dit project nieuw is bepaald is anders dan de door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarde. Daarbij wordt opgemerkt dat er een sterk vermoeden is dat de methode welke door de Deltadienst / WLDelft is gehanteerd inconsistent zou kunnen zijn. Dit wordt nader toegelicht in Bijlage F.4.

De berekende dwarskrachten en langskrachten zijn in het massa-demper-veersysteem als forcering ingevoerd. De resulterende botskrachten en indrukking van de zijaanslagen zijn orde 50% groter dan destijds bepaald op basis van de hydrodynamische forcering volgens de Deltadienst / WLDelft. De optredende versnelling is orde 25% groter dan destijds op basis van de oorspronkelijke forcering is vastgesteld. Wat dit betekent voor de huidige adviesvraag wordt in Hoofdstuk 5 nader uitgewerkt.

4.3 Resultaten van de doorgerekende casussen

De resultaten van de doorgerekende casussen zijn samengevat weergegeven in de 3^e tot en met de 5^e rij van Tabel 4.1. De berekende uitwijking u is overall in dit rapport exclusief eventuele speling. Om de indrukking te bepalen moet men de speling aftrekken van de uitwijking. De maximum toegestane waarden zijn weergegeven in de tweede rij (Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Resultaten berekeningen (met veerconstante $k_2 = 18 \cdot 10^6$ en speling $s_1 = s_2 = 0.05$ m)

Casus	golf-hoogte H (m)	golf-periode T (s)	Golf-hoek β (°)	max botskracht F (kN)	max. versnelling a (m/s ²)	max. uitwijking u (m)
threshold	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1800	3.00	0.13
1b	1.6	5.00	27	2948	1.80	0.21
2	3.2	7.07	27	3520	1.59	0.25
3	6.4	10.00	27	3740	3.08	0.26

Als uitgangspunt is Casus 3 aangehouden. Te zien valt dat voor die casus zowel de maximaal toegestane botskracht tussen de pijler en de zijaanslag, de maximaal toegestane versnelling van de schuif en de maximaal toegestane indrukking van de zijaanslag wordt overschreden.

4.4 Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheidsanalyse is gepresenteerd in Bijlage D. De resultaten van enkele relevante varianten zijn in onderstaande tabellen opgenomen. Tabel 4.2 geeft de hoofdcasussen weer indien de veerconstante geen $18 \cdot 10^6$ N/m maar $9 \cdot 10^6$ N/m bedraagt of met een speling van 0 cm.

Tabel 4.2 Resultaten van enkele gevoeligheidsberekeningen. Ten opzichte van Tabel 4.1 is de waarde van k_2 en s_1 en s_2 gewijzigd.

Casus	max F (kN)	max a (m/s ²)	max u (m)	max F (kN)	max a (m/s ²)	max u (m)	max F (kN)	max a (m/s ²)	max u (m)
	$k_2 = 18 \cdot 10^6; s_1, s_2 = 0.05$ m			$k_2 = 9 \cdot 10^6; s_1, s_2 = 0.05$ m			$k_2 = 18 \cdot 10^6; s_1, s_2 = 0.00$ m		
1b	2948	1.80	0.21	2308	0.75	0.31	1609	0.77	0.09
2	3520	1.59	0.25	3532	1.61	0.44	3239	1.56	0.18
3	3740	3.08	0.26	3382	2.69	0.43	3362	3.09	0.19

In Tabel 4.3 zijn enkele varianten weergegeven waarbij de representatieve golfhoogte en golfinvalshoek zijn gewijzigd. Daarbij is een waarde van $k_2 = 9 \cdot 10^6$ N/m gehanteerd. Echter, ook deze varianten voldoen niet aan alle toelaatbare waarden voor botskracht, versnelling en uitwijking (behalve 1b zonder speling). Het hangt echter sterk van de uitgangspunten af in hoeverre ze representatief zijn.

Tabel 4.3 Resultaten van enkele gevoeligheidsberekeningen

Casus	k_2 [10^6 N/m]	$s_1=s_2$ [m]	golf- hoogte H (m)	golf- periode T (s)	Golf- hoek β (°)	max botskracht F (kN)	max. versnelling a (m/s ²)	max. u (m)
threshold	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1800	3.00	0.13
3	18	0.05	6.4	10.00	27	3740	3.08	0.26
3k9	9	0.05	6.4	10.00	27	3382	2.69	0.43
3 β 12k9	9	0.05	6.4	10.00	12	2125	3.32	0.29
3 β 12H3.2k9	9	0.05	3.2	10.00	12	1429	1.44	0.21
3 β 12H3.2k9s0	9	0.00	3.2	10.00	12	1445	1.32	0.16

Hieronder volgt een samenvatting van Bijlage D.

Aan de hand van de gevoeligheidsanalyse laten we zien wat het effect is van variatie in de waarden voor de invoerparameters op de berekende botskrachten. We hebben daartoe de waarden van diverse invoerparameters in het Pythonscript dat de botskrachten berekend gevarieerd. De volgende parameters komen daarbij aan bod voor de hierboven genoemde casussen (cases 1b, 2 en 3):

- speling (s_1 en s_2)
- faseverschuiving tussen langs- en dwarskracht (φ)
- golfhoogte (H)
- golfsteilheid (s)
- golfinvalshoek (β)
- waterstand
- veerconstante (k_2).

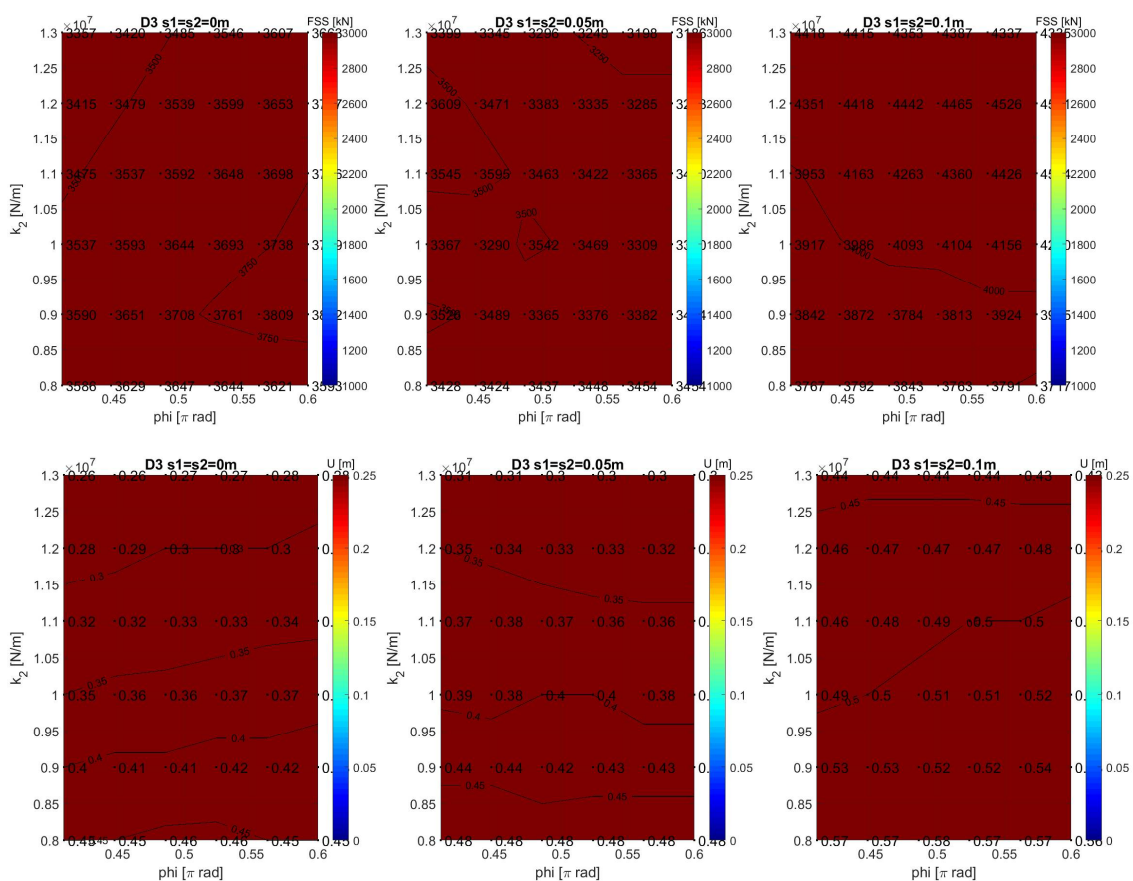
Er is tevens een aantal parameters gevarieerd waarbij de casus 'L36/L37' als basis is genomen. Daarbij is de gevoeligheid onderzocht van:

- speling (s_1 en s_2)
- veerconstante (k_2)
- hydrodynamische parameter c_2 (gerelateerd aan verdringing van het water in de sponning)
- hydrodynamische parameter k_6 (gerelateerd aan verdringing van het water in de sponning)
- massa van de schuif en toegevoegd water (m_2).

Omdat het rekenmodel complex is en het aantal invoerparameters groot, blijken de effecten vaak niet eenduidig te zijn. De belangrijkste conclusie is dat de met het Python-rekenmodel berekende botskrachten over het algemeen gevoelig zijn voor de invoer. Die gevoeligheid is zelden eenduidig. Als voorbeeld wordt hier genoemd dat in sommige gevallen de botskracht toeneemt bij toenemende veerconstante, in andere gevallen juist afneemt. Dat is een illustratie van het gekoppelde forcerings/reactiesysteem waarin ook de eigenschappen van de zijaanslag een integraal onderdeel vormen (toegelicht in Deltares, 2021a,b).

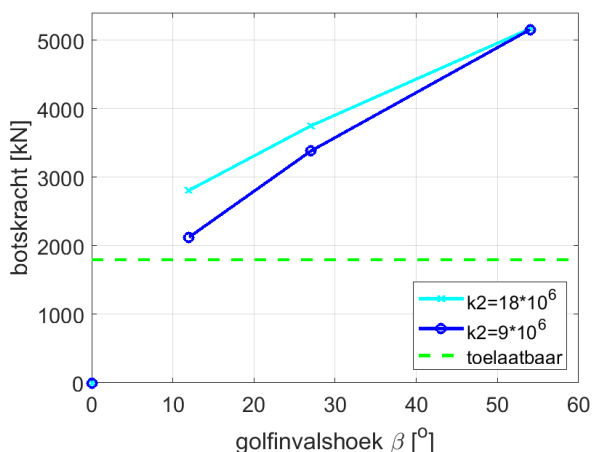
De speling tussen schuif en pijler (s_1 en s_2) blijkt een belangrijke invloedsfactor te zijn. Ook de invalshoek van de golven (β) is van belang. Toch geldt hier ook weer dat dit geen algemeenheid is en alleen voor bepaalde combinaties en cases geldt. De maximale botskracht blijkt niet heel gevoelig voor de waarde van de hydrodynamische sponningsparameter c_2 .

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat voor Casus 3 geen combinatie van φ en k_2 (met een golfinvalshoek van 27°) denkbaar is waarbij de kracht kleiner is dan de toegestane botskracht van 1800 kN. Er is geen situatie gevonden met een botskracht kleiner dan 3000 kN, zelfs niet bij een speling van $s_1 = s_2 = 0,00$ m. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 4.1.



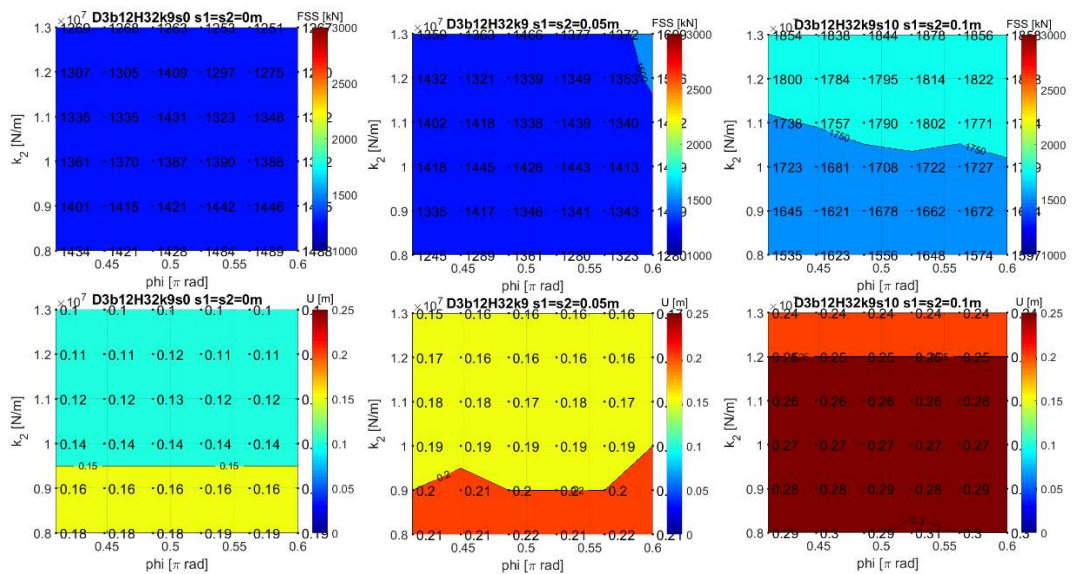
Figuur 4.1. Botskracht tussen de zijanslag en de pijler (boven) en uitwijking (onder) als functie van het faseverschil tussen de langs- en dwarskracht (φ) en de veerconstante van de zijanslag (k_2).
 Links: $s_1 = s_2 = 0,00$ m. Midden: $s_1 = s_2 = 0,05$ m. Rechts: $s_1 = s_2 = 0,10$ m

De afhankelijkheid van de golfvalshoek is groot, zoals ook al uit Figuur 3.2 bleek. Voor Casus 3 is die afhankelijkheid grafisch weergegeven in Figuur 4.2. Hieruit blijkt dat voor de in die casus gehanteerde condities de golfvalshoek beduidend kleiner moet zijn dan 12° om een toelaatbare botskracht te verkrijgen.



Figuur 4.2. Botskracht als functie van de golfvalshoek (voor Casus 2 met $k_2 = 1.8 \cdot 10^6$ en $k_2 = 9 \cdot 10^6$). De stippellijn geeft de maximale toegestane botskracht aan.

Om enigszins in de buurt te komen van de toelaatbare waarden voor botskracht (<1800kN) en indrukking van de zijaanslag (<0.13 m) zou men niet alleen de speling maar ook de golfinvalshoek en de golfhoogte moeten verkleinen. Dit hangt direct samen met de toe te passen uitgangspunten en de te hanteren uitwerking van de veiligheidsfilosofie. Daarnaast draagt het verlagen van de waarde van k_2 vaak wel bij aan het verlagen van de botskracht maar resulteert het juist wel weer in een grotere indrukking van de zijaanslag. Als voorbeeld geven we hier de resultaten van de berekening waarbij dat allemaal is toegepast, dus een golfinvalshoek van 12° en een verlaging van de representatieve golfhoogte naar 3,2 m. Bij een veerconstante van $k_2 = 9 \cdot 10^6$ en een speling van 0 cm zou de botskracht dan onder de limiet van 1800 kN blijven, en de uitwijking is dan 0.16 m. Let wel, dit is niet per se de maatgevende situatie!



Figuur 4.3 Botskracht (boven) tussen de zijaanslag en de pijler en uitwijking (onder) als functie van het faseverschil tussen de langs- en dwarskracht (ϕ) en de veerconstante van de zijaanslag (k_2). Links: $s_1 = s_2 = 0,00$ m. Midden: $s_1 = s_2 = 0,05$ m. Rechts: $s_1 = s_2 = 0,10$ m

5 Discussie modelonzekerheden en gevoeligheid rekenuitkomsten

5.1 Inleiding

Rondom het gehanteerde model bestaan verschillende onzekerheden die van invloed zullen zijn op de wijze van inzet van de rekenuitkomsten. Die onzekerheden worden in dit hoofdstuk nader uitgewerkt. Deze uitwerking is opgesplitst naar:

- de te hanteren veiligheidsfilosofie in relatie tot de Waterwet en daaruit (in samenhang) volgend:
 - o het bepalen van representatieve (sets van) hydraulische randvoorwaarden
 - o de maximaal toegestane botskrachten
- de schematisatie van het massa-demper-veersysteem en de bijbehorende invoerparameters
 - o schematisatie van golfkrachten
 - o hydrodynamische parameters
- overige aspecten en uitgangspunten
- gevoeligheidsanalyse

Deze punten worden in de onderstaande alinea's puntsgewijs uitgewerkt.

5.2 Te hanteren veiligheidsfilosofie en daaruit volgende belasting en sterktecomponenten

Het kader waarin gewerkt dient te worden is de Waterwet (Paragraaf 3.1). Hier is door Rijkswaterstaat voornamelijk een pragmatische keuze gemaakt welke is beschreven in Paragraaf 3.2.1. Het is goed denkbaar dat deze pragmatische aanpak conservatief is. De verwachting is dat wanneer dit kader op een andere manier wordt uitgewerkt hydraulische randvoorwaarden aanzienlijk lager kunnen zijn. Mogelijk is dit ook het geval voor de te hanteren toegestane botskrachten op de pijler (zie Bijlage B). Aanbevolen wordt om ten aanzien van de toegestane botskrachten een faalpadanalyse op te stellen. Daarbij wordt benadrukt dat de norm van toepassing is op het falen van de kering en niet op het beschadigen van de kering. Mogelijk dat daaruit hogere toegestane botskrachten volgen.

5.3 Schematisatie massa-demper-veersysteem en bijbehorende invoerparameters

5.3.1 Inleiding

Het massa-demper-veersysteem is een schematisatie van de werkelijkheid (zoals ieder model dat is). Daarbij zijn verschillende aandachtspunten welke zijn beschreven in Deltares (2021a). Hieronder worden de belangrijkste aandachtspunten opgesomd.

5.3.2 Golven en golfkrachten

In het model wordt een regelmatige langkammige lineaire golf aangenomen. In werkelijkheid is er sprake van onregelmatige, kortkammige, niet-lineaire golven (en dus ook variatie van golfparameters in de tijd).

In de schematisatie voor het omzetten van golfcondities naar model-invoerparameters wordt aangenomen dat de maximum optredende golf (H_{max}) in het onregelmatige golfveld gelijk is aan een representatieve regelmatige golf welke in het model kan worden gehanteerd.

Vooralsnog wordt ingeschat dat in de context van het beschikbare rekenmodel dit een passende benadering is.

Er is, conform de aanpak van WLDelft (1984a,b), uitgegaan van lineaire golftheorie. Echter, bij de golfcondities welke hier als uitgangspunt zijn genomen is er sprake van sterk niet-lineaire golven; tijdens de gekozen condities zijn de golven hoog en steil. Hierdoor wordt mogelijk een deel van de golfkracht op de schuiven gemist. Ook is het mogelijk dat in het spectrale domein een herverdeling van de energie over de frequenties plaatsvindt.

Ten aanzien van reflecties wordt aangenomen dat 100% van de golfenergie wordt gereflecteerd; dit resulteert in een verdubbeling van de uitwijking van de waterspiegel direct voor de eindhar en schuif. Dit is dezelfde aanname als welke door WLDelft (1984a,b) is gehanteerd.

In de schematisatie wordt aangenomen dat de waterstand en de drukken bij de eindhar volgen uit de aanname dat de golfinvloed per golfcomponent uniform is langs de schuif (quasi 2DV = 2 dimensionaal in de verticaal), hetgeen vooral bij de eindharren waarschijnlijk niet het geval is. Het sterke 3D karakter van wat er nabij de eindharren gebeurt wordt in het rekenmodel verwaarloosd. Bijvoorbeeld reflectie-diffractiepatronen rondom de eindharren bij scheef invallende golven worden niet beschouwd. Het is niet bekend wat het effect hiervan op de berekende krachten in de zijaanslagen zou zijn.

De golfrichting is, in combinatie met de golfperiode (en lengte van de schuif), van sterke invloed op de forcering op en respons van de schuif. Mogelijk kan deze golfrichting door middel van een geavanceerde probabilistische analyse worden aangescherpt naar specifieke waarden die lokaal bij de schuiven te verwachten zijn en die mogelijk anders zijn dan de hier gekozen waarden.

5.3.3 Hydrodynamische parameters

Over drie invoerparameters van het massa-demper-veersysteem (hydrodynamische coëfficiënten k_6 en c_2 en massa m_2) was gerede twijfel ten aanzien van de juiste schematisatie / aangehouden parameterwaarde (Deltares, 2021a). De gevoeligheidsanalyse beschreven in Bijlage D toont aan dat de invloed van de parameter c_2 op de botskracht klein is. Voor de andere twee hydrodynamische parameters (k_6 en m_2) is dat niet zo duidelijk vast te stellen op basis van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse. De waarden van die parameters zoals ingezet in de in dit rapport gepresenteerde casussen sluiten zoveel mogelijk aan bij de waarden die zijn gebruikt in WLDelft (1984a,b). Het zijn echter niet dezelfde getallen omdat voor de geselecteerde cases rekening gehouden diende te worden met andere waterstanden die weer leiden tot andere waarden van bijvoorbeeld de toegevoegde watermassa of demping binnen de sponning, zie ook Sectie D.7 in Bijlage D.

5.4 Overige aspecten en uitgangspunten

De hier gepresenteerde rekenuitkomsten zijn representatief voor de schuif bij Roompot 16. Mogelijk dat de toegestane waarden ten aanzien van de maximale botskracht tussen de zijaanslag en de pijler, de maximale versnelling van de schuif en de maximale indrukking van de zijaanslag niet worden overschreden bij andere schuiven, indien beschouwd in het rekenmodel.

De speling tussen de zijaanslag en de pijler (parameter s_1 en parameter s_2) heeft een grote invloed op de optredende maximale botskrachten. Mogelijk ligt de ontwerpopplossing niet zozeer in het aanpassen van het ontwerp van de zijaanslagen maar wel (deels) in het verkleinen van de speling tussen de zijaanslag en de pijler. Daarbij wordt opgemerkt dat, voor de in dit rapport gehanteerde uitgangspunten, en volgens de uitkomsten van het

rekenmodel onder de aangenomen condities, het verkleinen van de speling niet tot een acceptabele oplossing zal leiden. Mogelijk dat dit wel tot een oplossing kan leiden indien dit in combinatie met andere oplossingsrichtingen wordt gehanteerd.

De golfcondities die in dit rapport als uitgangspunt zijn gekozen zijn veel hoger dan de golven welke door WLDelft (1984a,b) zijn gebruikt; in dit rapport is een representatieve golfhoogte van 6,4 m gekozen, door WLDelft (1984a,b) is een representatieve golfhoogte van 1,6 m gehanteerd. Ook is de waterstand welke in voorliggend rapport is gehanteerd ruim een meter hoger dan de waterstand welke door WLDelft (1984a,b) is gehanteerd. Mogelijk leidt dit in die situaties in de praktijk tot zogenoemde secundaire effecten waarbij gedacht kan worden aan bijvoorbeeld:

- er slaat water over de schuiven heen.
- het golfdal is dermate laag dat de sponningsruimte wordt 'droog getrokken'.
- er slaat water over de eindhar heen waardoor de sponning wordt gevuld.

Bovenstaande drie genoemde aspecten worden niet beschreven in het rekenmodel en zijn niet aanvullend gecontroleerd. Het is ook niet bekend wat de invloed van die effecten is in relatie tot de krachten die optreden in de zijaanslagen indien dit optreedt.

5.5 Gevoeligheid invoerparameters

De gevoeligheidsanalyse van Bijlage D toont aan dat de met het Python-rekenmodel berekende botskrachten over het algemeen gevoelig zijn voor de toegepaste set aan invoerwaarden en instellingen. Die gevoeligheid is zelden eenduidig; zo neemt bijvoorbeeld in sommige gevallen de botskracht toe bij toenemende veerconstante maar in andere gevallen juist af. Dat komt door het dynamische samenspel van schuif en zijaanslag en waarbij een stijvere zijaanslag mogelijk voorkomt dat een schuif grotere bewegingen gaat vertonen waar hogere krachten uit voort zouden kunnen komen (immers: kracht = veerconstante x indrukking). Het is dan ook niet goed mogelijk om aan te geven hoe eventuele robuustheidsfactoren ingebouwd zouden moeten worden; de rekenuitkomsten geven aan dat er niet simpelweg een zijaanslag met hogere of lagere waarde van k_2 ingezet kan worden.

De speling tussen schuif en pijler blijkt een belangrijke invloedsfactor te zijn. Ook de invalshoek van de golven is van belang. Toch geldt hier ook weer dat dit geen algemeenheid is en alleen voor bepaalde combinaties en cases geldt: zo kan de optredende kracht bij een toenemende hoek zowel af als toenemen; dit is afhankelijk van de combinatie van golfperiode, golfinvalshoek en breedte van de schuif, zie ook Figuur 3.2. De amplitude van langskracht is maximaal wanneer de nettokracht op de zuidelijke eindhar in fase is met de nettokracht op de noordelijke eindhar.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De berekeningen en analyses die in deze rapportage staan beschreven hebben geleid tot de volgende belangrijkste conclusies:

- Ten tijde van het ontwerp van de Oosterscheldekering is een rekenmodel op basis van een massa-demper-veersysteem ingezet om de botskrachten van de zijaanslagen van de schuiven te berekenen. Die methode is in de huidige studie succesvol opnieuw ingezet, mede naar aanleiding van de evaluatie van de methode beschreven in Deltares (2021a). Er zijn echter meerdere aandachtspunten die bij de inzet van het rekenmodel naar voren zijn gekomen (hieronder en in Paragraaf 6.2 nader beschouwd).
- Een grote onbekende bij de input voor het rekenmodel is de weergave van de golfkrachten die op de schuiven werken. De aanpak beschreven in de oorspronkelijke rapportage (WLDelft, 1984a) kon niet ingezet worden vanwege ontbrekende beschrijvingen. In dit rapport (Bijlage C) is daarom een opnieuw afgeleide methode gepresenteerd om op basis van gegeven golfcondities een inschatting te maken van de hydraulische krachten op de schuiven van de Oosterscheldekering. Deze krachten zijn, samen met verschillende andere parameters die in Deltares (2021a) zijn beschreven, als invoer gebruikt in een bestaand rekenmodel van een massa-demper-veersysteem waarmee de respons van de schuif kan worden bepaald.
- We hebben zo goed mogelijk de methode van WLDelft (1984a) voor het afleiden van de golfkrachten op de schuif gevolgd en kunnen de door WLDelft (1984) gepresenteerde dwarskrachten op de schuif, en daarmee op de pijlers, goed reproduceren. Voor de langskrachten is dat echter niet gelukt en komen we voor casus L37 uit WLDelft (1984a,b) orde 50% hoger uit. Daarmee komt de berekende maximale botskracht in de zijaanslagen ook hoger uit. De onderbouwing van de door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarden is echter niet meer te achterhalen waardoor het niet mogelijk is om dit verschil te kunnen verklaren.
- Op basis van een door Rijkswaterstaat gehanteerd uitgangspunt in relatie tot de Waterwet waarbij uitgegaan dient te worden van golfcondities behorende bij een norm van 1:30.000^e, zijn drie sets hydraulische condities (waterstand en golfcondities) vastgesteld en beschouwd in het rekenmodel, inclusief het afleiden van de bijbehorende golfkrachten op de schuiven en de bewegingsrespons van de schuiven. Belangrijke uitkomsten uit het model die afgewogen moeten worden tegen criteria voor maximaal toelaatbare waarden zijn de botskracht tussen de zijaanslag en de pijler, de versnelling van de schuif en de mate van indrukking van de zijaanslag.
- Voor de hier gekozen representatieve casus (Casus 3) worden de toegestane waarden voor elk van de drie te beoordelen parameters overschreden. Ook bij de casussen met een significant lagere golfbelastingen worden de toegestane waarden ten aanzien van de maximaal optredende botskracht en veerweglengte overschreden.
- Zelfs voor een breed bereik van de veer karakteristiek (k_2 waarde) van $16 \cdot 10^6$ tot $26 \cdot 10^6$ N/m wordt de toegestane botskracht overschreden in de beschouwde casussen (zie Bijlage D). Bij lagere waarden van de veer karakteristiek daalt de botskracht maar wordt de toelaatbare uitwijking overschreden.

- Het reduceren van de speling tussen schuif en zijaanslag kan bijdragen aan het verlagen van de botskracht. Praktische uitvoerbaarheid is wel een aandachtspunt.
- Gezien de aanwezige onzekerheid omtrent passende waarden van diverse parameters en vanwege de ontwerpvrijheid in sommige andere parameters is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van verschillende parameters. Het blijkt dat de berekende maximale krachten in de zijaanslagen sterk afhankelijk zijn van deze parameters. Hier wordt op teruggekomen bij de aanbevelingen (Paragraaf 6.2).
- Er wordt opgemerkt dat ook de situatie die door WLDelft (1984a,b) is doorgerekend (casus L37) destijds al niet voldeed aan de hier en toen gestelde eisen (zie Bijlage F.5). Het is dus niet verrassend dat nu met zwaardere hydrodynamische condities als uitgangspunt, die leiden tot 4x hogere golfhoogtes (6,4 m in plaats van 1,6 m), de toegestane botskrachten ook overschreden worden.
- Vanwege de niet-lineair schalende gevoeligheid van de botskracht voor diverse parameters dient men voorzichtig te zijn met het hanteren van robuustheidstoelagen om zo parameterwaarden 'naar boven' bij te sturen. Zo kan bijvoorbeeld een hogere veerstijfheid van de zijaanslag (k_2) zowel tot een toe- als afname van de botskrachten leiden. Dit is het gevolg van het gekoppelde dynamische systeem van schuif en zijaanslagen en waarbij de stijfheid van een zijaanslag mede bepaalt welke kracht er in de zijaanslag optreedt.
- De ontwerper van de zijaanslagen zal een interpretatie van de rekenuitkomsten moeten maken, waarbij men kan kiezen voor verschillende conservatieve en niet-conservatieve instellingen. Die keuzes kunnen deels tegen elkaar afgewogen worden, eventueel in combinatie met veiligheidsfactoren. Echter, de onzekerheden in de relevante maatgevende hydrodynamische condities en in sommige van de invoerparameters in het rekenmodel vraagt eerst nadere uitwerking en validatie van de aanpak. Hiervoor worden hieronder meerdere aanbevelingen gedaan.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van de uitkomsten van deze studie wordt aanbevolen om:

- een degelijke veiligheidsfilosofie op te stellen binnen de kaders van de Waterwet op basis waarvan een eenduidige set kenmerkende hydraulische condities kan worden vastgesteld. Er wordt aanbevolen om dit integraal te doen voor de gehele kering en daarmee ook voor andere onderdelen van de Oosterscheldekering. Mogelijk leidt dit tot significant lagere kenmerkende hydraulische condities welke kunnen worden gehanteerd om de botskrachten tussen de zijaanslag en de pijlers te bepalen;
- een lagere waarde van de golfvalshoek geeft een significante reductie op de botskrachten. Daarom wordt aanbevolen om, binnen de hierboven aanbevolen op te stellen veiligheidsfilosofie, gericht te zoeken naar een onderbouwing voor het reduceren van de te hanteren golfvalshoek door nog beter rekening te houden met de kansen op optreden van bepaalde golfrichtingen in combinatie met de golfhoogte en -periodelfhoogte. Idealiter zou men daar een probabilistische aanpak voor gebruiken. Een enigszins eenvoudiger aanpak zou zijn om eerst voor een flink aantal (orde $5 \times 5 \times 5 \times 3 \times 2 = 750$) relevante combinaties van golfhoogte, golfperiode, invalshoek, waterstand en veerconstante de botskracht te bepalen en grafisch weer te geven zoals is gedaan in Figuur 3.2. Vervolgens zal dan een inschatting gemaakt moeten worden

bijvoorbeeld met een Monte Carlo simulatie wat de kans van voorkomen is van de relevante combinaties.

- nader uit te zoeken op welke manier het diffuse karakter van de optredende combinatie van diverse golfcomponenten (verschillende richtingen, hoogtes en frequenties) in de berekening meegenomen zou kunnen worden. Vervolgens kan op basis van het aangepaste model berekend worden in hoeverre het meenemen van die effecten kan leiden tot reductie van de botskracht zoals tot nu toe kon worden berekend. Het uitgangspunt om alle golfenergie in één richting en periode te schematiseren is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid en waarschijnlijk conservatief.
- de losse rekenonderdelen voor het bepalen van de botskrachten (vertaling van golven naar krachten inwerkend op de schuif, vertaling van golven en waterstanden naar diverse sponningsparameters, de schematisatie van het massa-demper-veersysteem) om te vormen tot één gebruiksvriendelijk model. Dat zou dan mogelijk gebruikt kunnen worden voor een spectrale benadering (als invulling van het vorige punt) of voor een probabilistische methode (rakend aan het eerste punt van de aanbevelingen).
- te heroverwegen om 'eenvoudige stootkussens' conform de eerdere ontwerpen zoals gerapporteerd in WLDelft (1984a) toe te passen in plaats van Shockcells (die een lagere veerconstante hebben). Op basis van de analyse in dit rapport lijkt er geen significante meerwaarde te zijn door de wijziging van de waarde van de parameter k_2 welke gepaard gaat met de keuze tussen Shockcells of een stootkussen. Deze conclusie is overigens niet noodzakelijkerwijs in tegenspraak met de door WLDelft (1984a) getrokken conclusie waarin wordt gesteld dat 'de nieuwe afschuiffender in combinatie met een kleinere speling tussen schuif en pijler het gewenste effect van een lagere botskracht opleveren'. Het is onduidelijk in hoeverre dit komt door de verkleining van de speling of door de toepassing van de Shockcell in plaats van het oorspronkelijke stootkussen. In dit rapport is geen analyse uitgevoerd naar de voor- en nadelen van het wel of niet toepassen van Shockcells of stootkussens. Aanbevolen wordt om dit gedurende het verdere ontwerpproces wel te doen;
- te overwegen om de krachtscapaciteit van de zijaanslagen, net als in de huidige situatie, te differentiëren naar de verschillende schuiven. Dit heeft als voordeel dat een eventueel benodigd zwaarder type of complex ontwerp (bijvoorbeeld geavanceerde Shockcells) voor de maatgevende schuif niet hoeft te worden toegepast op alle schuiven. Een nadeel is dat het beheer en mogelijk onderhoud hierdoor complexer kan worden;
- te overwegen om de oplossingsrichting van het ontwerp van de zijaanslagen niet alleen te zoeken in de shockcells of het aanscherpen van het rekenmodel maar ook in het (onderbouwd) verhogen van de toelaatbare botskracht op de pijlers. Zo is het wellicht mogelijk om deze afhankelijk te laten zijn van het type pijler of een nadere analyse uit te voeren op de toelaatbare botskracht.
- om botskrachten te beperken dient de speling tussen de pijlers en de schuif op het niveau hoger dan NAP + 2,5 m minimaal te zijn. Die kleine speling zorgt er voor dat de schuif niet 'op gang kan komen' en dat de resulterende bewegingen sterk geremd worden, waardoor uiteindelijk ook de resulterende botskrachten in de zijaanslagen beperkt worden. De speling op een niveau lager dan NAP + 2,5 m is waarschijnlijk veel minder maatgevend vanwege de grotere krachtscapaciteit van de pijlers op die hoogte. Bij het 'instellen' van de speling kan hier mogelijk rekening mee worden gehouden. Omdat de pijlers niet perfect verticaal staan zal de gewenste speling voor een specifieke hoogtepositie van de schuif ingesteld moeten worden.

- te verkennen in hoeverre het mogelijk is om de belastingen en bijbehorende beweging van de schuif en bijbehorende botskrachten, versnellingen en indrukkingen van de zijaanslag op een aanvullende manier te onderzoeken dan middels het numerieke model van het massa-demper-veersysteem. Daarbij valt een fysiek modelonderzoek of, m.b.t. de optredende drukken op eindhar en schuif, een CFD model te overwegen, zie ook Deltares (2021b). Gezien de complexe materie wordt aanbevolen om eerst een vooronderzoek naar deze methoden te doen, inclusief een voorontwerp van de modelaanpak (modelschaal, te testen layout, meetaanpak), alvorens dit daadwerkelijk uit te voeren.
- Om enigszins in de buurt te komen van de toelaatbare waarden voor botskracht ($< 1800\text{kN}$) en indrukking ($< 0,13\text{ m}$) zou men niet alleen de speling maar ook de golfinvalshoek en de golfhoogte moeten verkleinen. Dit hangt direct samen met de toe te passen uitgangspunten en de veiligheidsfilosofie. Daarnaast draagt het verlagen van de veerconstante k_2 vaak wel bij aan het verlagen van de botskracht maar resulteert het juist ook in een grotere uitwijking.

Referenties

Deltares, 2018 Maximale golfhoogte bij de Oosterscheldekering dd 6 juni 2018. ref 11202561-000-HYE-0002

Deltares, 2021a, Zijaanslagen schuiven Oosterscheldekering, Beoordeling oorspronkelijk rekenmodel voor het bepalen van krachten bij de zijaanslagen, Deltares rapport met kenmerk 11206859-002-HYE-0002

Deltares, 2021b. Zijaanslagen schuiven Oosterscheldekering. Advies voor verificatie van berekeningen maatgevende krachten. Deltares rapport met kenmerk 11206859-002-HYE-0001, versie 0.2, 25 augustus 2021

HKV, 2021 Herziening WBI golvendatabase Oosterscheldekering dd 5 maart 2021. ref PR4039.30, door Vincent Vuik.

RWS, 1982. Stand van zaken langsbelasting op schuiven. Notitie 6 PROBU-M-82188, 9 december 1982

RWS, 1983. Uitgangspunt voor berekening zijaanslag, Notitie 6 PROBU-M-83103, 19 september 1983

RWS, 1988a. Vakwerkschuif met 2 regels. ZLWD-1988-59362 A81481

RWS, 1988b. Vakwerkschuif met 3 regels, ZLWD-1988-59362 A81482

RWS, 2003. Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde. Boek 4: De sluitingsmiddelen. Bijlage bij memo van Rijkswaterstaat Directie Zeeland (ing. S.J.P. Vereeke) d.d. 22 januari 2003 met als onderwerp 'Ontwerpnota Boek 4 Sluitingsmiddelen', kenmerk 529.

RWS (2018). Hydraulische belastingen Oosterscheldekering 2018; Uitbreiding op de memo Hydraulische randvoorwaarden Oosterscheldekering 2017. datum 1 december 2018, uitgevoerd door Krijn Saman en Veerle Sperber

RWS (2021). Hydraulische belastingen Oosterscheldekering 2023; datum 3 december 2021; versie 2.0, uitgevoerd door Krijn Saman, Veerle Sperber en Wilbert Huibregtse

WLDelft, 1984a. Stormvloedkering Oosterschelde. Pijleroplossing. M1648 deel III, tekst, juli 1984

WLDelft, 1984b. Stormvloedkering Oosterschelde. Pijleroplossing. M1648 deel III, tabellen, figuren, juli 1984

A Golven

A.1 SWAN-modelresultaten

Speciaal voor de Oosterscheldekering is een WBI golfrandvoorwaardendatabase opgesteld door HKV (HKV, 2021) met daarin voor een grote hoeveelheid combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand, de golfparameters vlak voor elke schuif. De database heet OSK_218_v04.sqlite.

Op basis van die database tonen de onderstaande figuren (Figuur A.1) voor een extreme windsnelheid van 38 m/s en een waterstand van NAP+3.0 m de SWAN-resultaten van de significante golfhoogte en spectrale golfperiode voor iedere schuif van de Oosterscheldekering. Let wel, dit betreft puur de SWAN-resultaten voor de gegeven conditie zoals beschouwd en zegt dus niets over de kansen van voorkomen. Overigens bevat de SWAN database een beperkt aantal waterstanden, en dus niet precies de NAP+3.54 die bij casus 1b, 2 en 3 wordt beschouwd. Bij andere waterstanden en windsnelheden zijn de figuren net iets anders, maar de strekking is gelijk.

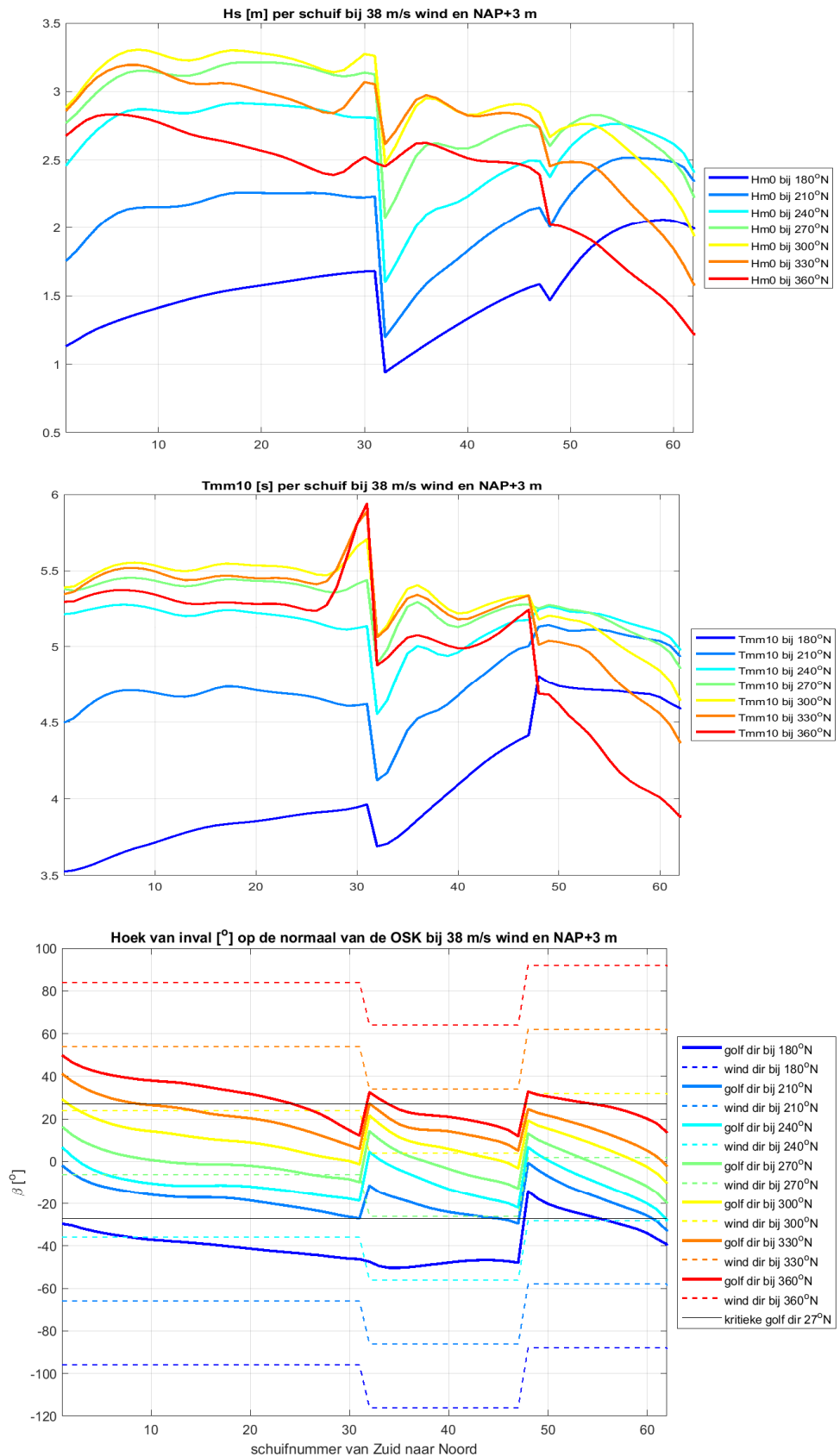
De figuren laten zien dat de hoogste golven optreden in de zuidelijke geul - de Roompot- en dat die onder de beschouwde windconditie een significante golfhoogte van orde 3.3 m hebben. Die golven horen bij een windrichting van 300°N. De gewogen spectrale golfperiode is daarbij orde 5.5 s. Het onderste paneel laat zien wat de bijbehorende golfrichting is ten opzichte van de normaal (van zuid naar noord: Roompot 276°N; Schaar 296°N; Hammen 268°N).

We zien dat de hoogste golven (gele en groen lijn 300°N en 270°N) een kleinere hoek met de normaal maken (< circa 20°) dan de lagere golven (uit noord (rood) en zuid (blauw)) die bij de kering een grotere hoek hebben dan de door WL (1984) gehanteerde 27°. Dit komt doordat de golven bij wind uit 270° en 300° een grote strijklengte hebben en min of meer rechtstreeks op de kering afkomen. De golven bij noordelijke en zuidelijke wind zijn lager omdat de Oosterscheldekering enigszins beschut ligt voor deze windrichtingen. De strijklengtes zijn dus korter. De stippellijnen in de onderste paneel van Figuur A.1 geven de windrichting weer. Door refractie liggen de golfinvalshoeken nabij de kering veel dichter bij elkaar en bij 0° ten opzichte van de normaal op de kering dan de oorspronkelijke diepwater golfrichting, die gelijk is aan de windrichting. Het is onwaarschijnlijk dat hoge golven heel schuin invallen, zie ook Figuur A.2 waarin grotere invalshoeken overeenkomen met relatief lage golfhoogtes. Het is echter eventueel wel mogelijk dat de golfperiode behorende bij de lagere golfhoogtes vanwege 'optimaal' faseverschil tussen noordelijke en zuidelijke har, grotere langskrachten en botskrachten oplevert (zie ook Figuur 3.2).

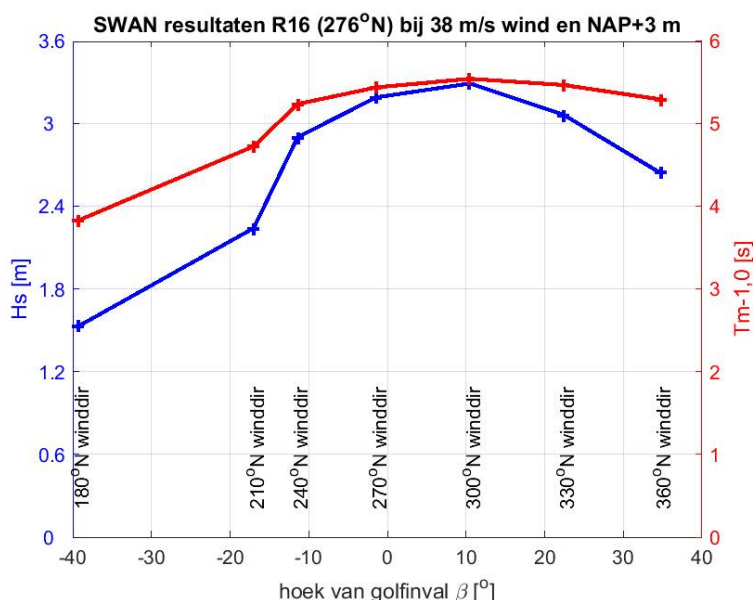
Conclusies:

Waarschijnlijk heeft de hoge golfhoogte van Casus 3 een kleinere invalshoek dan de gehanteerde 27° (zie onderste paneel van Figuur A.1). Het is onzeker of een hoek van 27° met een lagere golfhoogte hogere botskrachten oplevert dan een hoge golf met een kleinere invalshoek, zie ook de gevoeligheidsanalyse in Bijlage D.

Over het algemeen zijn de golfhoogtes op de Roompot het hoogst, afhankelijk van de windrichting. Roompot 16 is één van de zwaarst aangevallen schuiven waarmee het een veilige keuze is om als uitgangspunt te nemen (zie Tabel 3.2 uit de hoofdttekst).



Figuur A.1 Resultaten (golfhoogte, golfperiode, golfinvalshoek) van het SWAN-golfmodel voor zeven windrichtingen, ter plaatse van de Noordzeezijde van de 62 schuiven van de OSK (x-as), bij een windsnelheid van 38 m/s en een waterstand van NAP+3 m



Figuur A.2: SWAN resultaten bij waterstand van NAP+3 m en windsnelheid van 38 m/s

A.2 Resultaten Hydra-NL

Hydra-NL is een probabilistisch model waarmee voor diverse faalmechanismen van dijken de maatgevende condities bepaald kunnen worden, maar ook de marginale statistiek van hydraulische parameters zoals waterstanden, golfperiode en golfhoogte. Daarbij is ook te zien welke windrichtingen bijdragen aan de totale kansruimte. Hydra-NL bevat echter geen faalmechanismen voor de Oosterscheldekering zelf.

We laten hier voor locatie HK_3_218_kw01_00018 (voor schuif nummer 18 gerekend vanaf het zuiden; één van de zwaarst belaste locaties van de Roompot) de uitvoer van Hydra-NL zien voor een herhalingstijd van 1.000 jaar en 30.000 jaar. Dit is niet per se direct bruikbaar voor het afleiden van de relevante krachten voor de zijaanslagen omdat het daarbij nodig is om er rekening mee te houden dat bij gesloten kering de zijaanslagen nauwelijks belast worden. De reden waarom we toch deze Hydra-NL resultaten hier presenteren is om - slechts indicatief - te laten zien welke waarden voor de significante golfhoogte optreden onder verschillende extreme condities en vooral welke windrichtingen daarbij relevant zijn (dik gedrukt weergegeven). De windrichting wordt aangegeven met 'r' en is gegeven ten opzichte van het noorden. Waarden voor de meest relevante windrichtingen zijn vetgedrukt weergegeven.

Invoerdatabase	=	
C:\MyPrograms\Hydra-		
NL271\werkmap\OSK_218_v04\Copy_OSK_218_v04.sqlite		
Locatie	=	
HK_3_218_kw01_00018		
X-coördinaat	=	36887
(m)		
Y-coördinaat	=	403602
(m)		
Berekeningstype	=	
Significante golfhoogte		

Terugkeertijd (jaren)	Significante golfhoogte (m)
10	2.579
30	2.781
100	2.994
300	3.184
1000	3.382
3000	3.557
10000	3.742
30000	3.909
100000	4.085

A.2.1 Resultaten bij terugkeertijd van 1000 jaar

Illustratiepunten bij significante golfhoogte 3.38 (m) en terugkeertijd 1000 (jaar)

Locatie = HK_3_218_kw01_00018 (36887,403602)
 Berekeningstype = Significante golfhoogte
 Significante golfhoogte = 3.38 (m)
 Terugkeertijd = 1000 (jaar)
 Overschrijdingsfrequentie = 1.00E-03 (per jaar)

r	zeews. m+NAP	windsn. m/s	Hm0 m	bijdrage ov. freq (%)
30.0	--	--	--	0.0
60.0	--	--	--	0.0
90.0	--	--	--	0.0
120.0	--	--	--	0.0
150.0	--	--	--	0.0
180.0	--	--	--	0.0
210.0	--	--	--	0.0
240.0	3.77	35.3	3.38	0.3
270.0	3.84	28.6	3.38	23.9
300.0	4.37	30.4	3.38	70.7
330.0	4.47	27.2	3.38	5.1
360.0	4.85	34.4	3.38	0.0

Uitsplitsingen over de windrichting

richting [graden]	bijdrage
30.0	0.000%
60.0	0.000%
90.0	0.000%
120.0	0.000%
150.0	0.000%
180.0	0.000%
210.0	0.000%
240.0	0.314%
270.0	23.866%
300.0	70.731%
330.0	5.078%
360.0	0.011%
som	100.00%

A.2.2 Resultaten bij terugkeertijd van 30000 jaar

Illustratiepunten bij significante golfhoogte 3.91 (m) en terugkeertijd 30000 (jaar)

Locatie = HK_3_218_kw01_00018 (36887,403602)
Berekeningstype = Significante golfhoogte
Significante golfhoogte = 3.91 (m)
Terugkeertijd = 30000 (jaar)
Overschrijdingsfrequentie = 3.33E-05 (per jaar)

r	zeews. m+NAP	windsn. m/s	Hm0 m	bijdrage ov. freq (%)
30.0	--	--	--	0.0
60.0	--	--	--	0.0
90.0	--	--	--	0.0
120.0	--	--	--	0.0
150.0	--	--	--	0.0
180.0	--	--	--	0.0
210.0	--	--	--	0.0
240.0	2.41	50.6	3.91	0.0
270.0	4.64	35.3	3.91	16.4
300.0	4.66	32.3	3.91	80.1
330.0	5.57	32.5	3.91	3.4
360.0	5.87	42.0	3.91	0.0
som				100.0

Locatie = HK_3_218_kw01_00018 (36887,403602)
Berekeningstype = Significante golfhoogte
Significante golfhoogte = 3.91 (m)
Terugkeertijd = 30000 (jaar)
Overschrijdingsfrequentie = 3.33E-05 (per jaar)

Uitsplitsingen over de windrichting

richting [graden]	bijdrage
30.0	0.000%
60.0	0.000%
90.0	0.000%
120.0	0.000%
150.0	0.000%
180.0	0.000%
210.0	0.000%
240.0	0.034%
270.0	16.428%
300.0	80.086%
330.0	3.449%
360.0	0.003%
som	100.00%

A.2.3 Conclusie

Volgens de Hydra-NL uitkomsten is de kansbijdrage van windrichtingen 270° en 300° veel groter dan van de overige richtingen. Aangezien de normaal op de kering bij Roompot 276° is, is de windrichting niet meer dan ongeveer 24°. Zoals te zien is in het onderste paneel van Figuur A.1 is (door refractie) de golfinvalshoek nog kleiner onder die condities; waarschijnlijk

20° of minder bij de Roompot, bij Roompot 16 orde 12° (daarom wordt 12° ook beschouwd bij de gevoeligheidsanalyse, zie Bijlage D).

B Toegestane krachten op pijler

B.1 Inleiding

In WLDelft (1984a, pag. 98) worden de volgende eisen (bewerkt) gesteld ten aanzien van de zijdelingse beweging die de schuiven van de Oosterscheldekering kunnen maken:

- de botskracht moet zowel door pijler als schuif opgenomen kunnen worden;
- de vervorming van het stootblok* mag niet te groot zijn;
- de optredende versnellingen mogen, vanwege de daarbij optredende horizontale massa-traagheidskrachten op de hefcilinders, de maatgevende waarde van 3 m/s^2 (RWS, 2003, pag. 127) niet overschrijden.

* het was destijds nog niet duidelijk dat het toentertijd beoogde stootblok in het ontwerp zou worden vervangen door een shockcell.

In RWS (2003, pag. 82) is gesteld dat optredende botsbelastingen *voor de schuif* niet maatgevend waren. Hieruit wordt vooralsnog afgeleid dat, ten aanzien van de eisen met betrekking tot de botskrachten, de pijler maatgevend is. In RWS (2003, pag. 82) wordt gesteld dat de grootste langsbelastingen optreden tijdens openen of sluiten bij schuifstanden waarbij de zijaanslagen zich op NAP+0,0 m bevinden.

Deze memo gaat dieper in op de toelaatbare botskrachten op de pijler door informatie uit meerdere bronnen bijeen te brengen en die te interpreteren in relatie tot de huidige modeltoepassing.

B.2 Achtergrond

Door WLDelft (1984a) is een zevental cases (situatie 1-7 met als id. L30-L36) doorgerekend. Dit betreft twee situaties met een lage schuif, twee situaties met een middelschuif en drie situaties met een hoge schuif. De situaties per schuif onderscheiden zich door de hoogtepositie van de schuif. Een overzicht is gegeven in Bijlage A van Deltares (2021a). Bij de zeven berekeningen van WLDelft (1984a) is uitgegaan van een eerder ontwerp van de zijaanslagen; dit betrof stootblokken welke uiteindelijk niet zijn toegepast. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel B.1. Een achtste berekening (L37) betrof een nieuwe berekening waarbij een nieuw ontwerp van de zijaanslag (shockcell) in de studie uit 1984 is gehanteerd.

Tabel B.1. Overzicht resultaten van berekeningen welke zijn uitgevoerd door WLDelft (1984a, pag. 145)

Sit.	ber.	bel. ampl. B (N)	botskracht FSS (max) (N)		vergrotingsfaktor V = FSS/B		bijbehorende versn. u (m/s ²)		bijbehorende indr.stootblok (m)	
			links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
1	L30	6.10 ⁵	2,33.10 ⁶	2,19.10 ⁶	3,9	3,7	2,85	2,53	7,8.10 ⁻²	7,3.10 ⁻²
2	L31	3,9.10 ⁵	1,70.10 ⁶	7,57.10 ⁵	4,4	1,9	3,03	1,02	6,8.10 ⁻²	3,0.10 ⁻²
3	L32	8.10 ⁵	2,77.10 ⁶	1,26.10 ⁶	3,5	1,6	2,06	0,82	9,2.10 ⁻²	4,2.10 ⁻²
4	L33	6,4.10 ⁵	2,40.10 ⁶	1,34.10 ⁶	3,8	2,1	2,30	1,24	9,6.10 ⁻²	5,4.10 ⁻²
5	L34	8,2.10 ⁵	2,71.10 ⁶	2,05.10 ⁶	3,3	2,5	1,82	1,17	8,2.10 ⁻²	6,2.10 ⁻²
6	L35	7,65.10 ⁵	2,64.10 ⁶	2,15.10 ⁶	3,5	2,8	1,98	1,40	8,8.10 ⁻²	7,2.10 ⁻²
7	L36	7,25.10 ⁵	2,68.10 ⁶	2,04.10 ⁶	3,7	2,8	2,34	1,64	10,7.10 ⁻²	8,2.10 ⁻²

WLDelft (1984a) concludeert, na uitvoering van berekening L30-L36 het volgende:

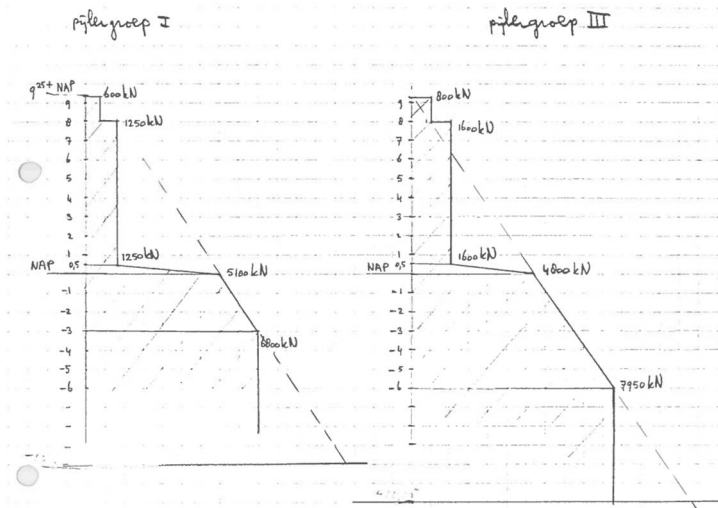
“De berekende botskrachten blijken, na een vergelijking met hetgeen toelaatbaar is in de betreffende situatie, in het merendeel van de gevallen opneembaar te zijn door de pijlers. Alleen in de situaties 4 en 7 (situaties met gegeven schuif) wordt de toelaatbare botskracht overschreden.”

Dit is opvallend aangezien in RWS (1983) het volgende staat vermeldt:

“De extreme belasting, welke de zijaanslag op de pijler uitoefent, mag derhalve niet hoger zijn dan 1,2 x 1500 = 1800 kN. Deze belasting wordt als uitgangspunt aangehouden voor het berekenen van de vereiste veerstijfheid van alle zijaanslagen”

De in WLDelft (1984a) gerapporteerde waarden overschrijden niet alleen in Situatie 4 en Situatie 7 de waarde van 1800 kN (= 1,8*10⁶ N) maar ook in Situatie 1 (beide pijlers), Situatie 3 (linkerpijler), Situatie 5 (beide pijlers) en Situatie 6 (beide pijlers). Dit lijkt dus niet overeen te komen met de conclusie zoals beschreven in WLDelft (1984a).

Mogelijk is dit een gevolg van een onduidelijkheid: uit RWS (1983, Bijlage 1) lijkt de maximaal toelaatbare botskracht niet één vaste waarde te zijn maar afhankelijk van het type ‘Pijlergroep’ (Pijlergroep I en Pijlergroep III) en de verticale positie van de botskracht op de pijler. Dit is schematisch weergegeven in Figuur B.1. De aldaar gegeven waarden zijn door RWS (1983) tweemaal met een factor 1,2 vermenigvuldigd. Het is niet geheel duidelijk hoe dit door RWS (1983) is onderbouwd maar dit lijkt enerzijds te maken te hebben met de vertaalslag van een toelaatbare karakteristieke stootbelasting naar een toelaatbare extreme belasting en anderzijds doordat de belastingduur zeer kort is (RWS, 1983). In het huidige rapport wordt deze aanpak niet gecontroleerd en voor waarheid aangenomen.



Figuur B.1. Maximaal toelaatbare botskracht in schuifspanning volgens RWS (1983). Integraal overgenomen uit RWS (1983). In RWS (1983) wordt beredeneerd dat de toelaatbare extreme belasting met een factor 1,2 mag worden verhoogd.

Op basis van de beschikbare informatie is getracht de door RWS destijds gevolgde redeneerlijn af te leiden aan de hand van een rekenvoorbeeld. In het geval van Pijlergroep I en een hoogte van de zijaanslag op +2,0 m + NAP geldt volgens Figuur B.1 een toelaatbare karakteristieke stootbelasting van 1250 kN. De toelaatbare extreme belasting bedraagt dan $1,2 \times 1250 \text{ kN} = 1500 \text{ kN}$. Na nogmaals een verhoging van een factor 1,2 verkrijgt men $1,2 \times 1500 \text{ kN} = 1800 \text{ kN}$. Er wordt benadrukt dat dit de redeneerlijn is die door RWS (1983) lijkt te zijn aangehouden maar waarvan de onderbouwing vooralsnog niet is teruggevonden.

Aangenomen dat de hierboven genoemde redeneerlijn correct is dan is er dus geen sprake van een vaste waarde voor de maximale botskracht voor alle hoogteposities van de zijaanslag maar is deze afhankelijk van de positie van de schuif. Omdat in RWS (1983) wordt gesteld dat de waarde van 1800 kN bij alle zijaanslagen als criterium is gehanteerd, wordt in het hiernavolgende alleen uitgegaan van Pijlergroep I (waaruit de waarde van 1800 kN indirect is afgeleid).

De waarde van 1800 kN is blijkbaar gerelateerd aan een overschrijdingskans van $2,5 \times 10^{-4}$ ($=1/4000^e$) (RWS (2003), pag. 144):

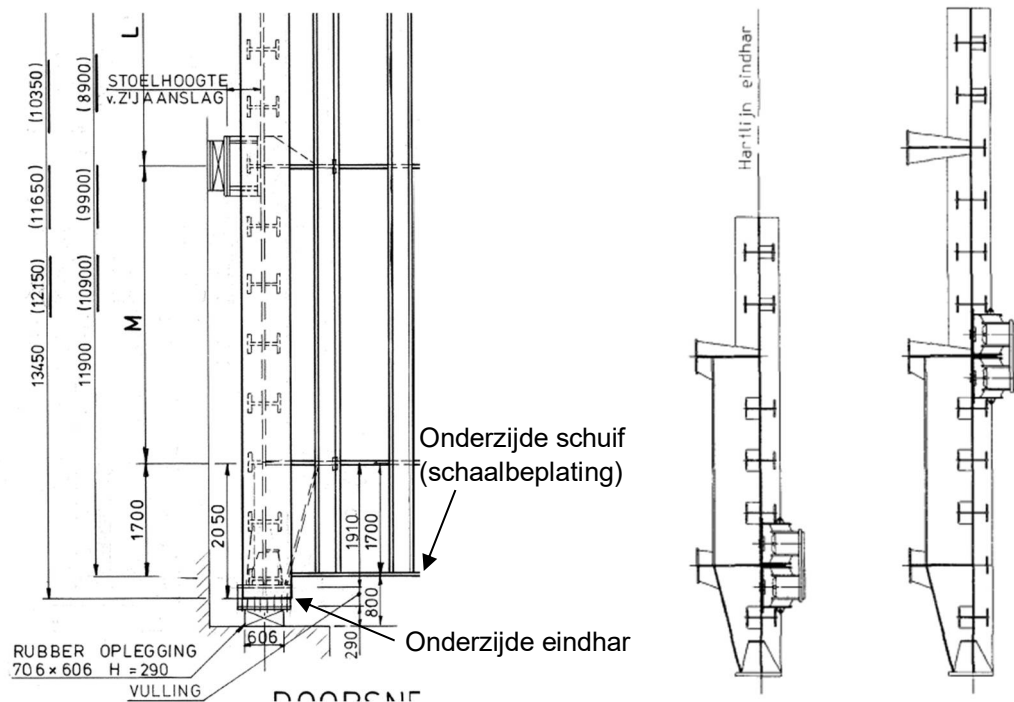
“Het betreft hier extreme belastingen met een berekende overschrijdingskans van $2,5 \times 10^{-4}$. De aan deze overschrijdingskans gerelateerde sterkte van de pijlerwand onder N.A.P. -2,5 m is 5400 kN en boven N.A.P.+2.5m 1800 kN. In het gebied van N.A.P.-2,5 m tot N.A.P.+2,5 m verloopt de sterkte van de pijlerwand lineair”

Dit lijkt te suggereren dat als de aangehouden overschrijdingskans (norm) wijzigt dan dat ook de toelaatbare waarde van de botskracht wijzigt. Daarnaast wordt opgemerkt dat het verloop van de toegestane belasting over de hoogte van de pijler in RWS (2003) anders is omschreven dan in RWS (1983).

B.3 Vergelijking berekening WLDelft (1984a) met toelaatbare waarden botskrachten

De berekeningen van WLDelft (1984a) worden hier vergeleken met de toelaatbare waarden volgens RWS (1983) en RWS (2003). Hiertoe is het nodig om de positie van de zijaanslagen voor de zeven in WLDelft (1984a) beschouwde situaties af te leiden. Op basis van de

beschikbare technische tekeningen van de vakwerkschuiven (RWS, 1988a,b), zie ook Figuur B.2, is eerst de totale verticale afstand tussen onderzijde van de eindhar en de zijaanslag bepaald als de som van een vaste waarde (2050 mm) en een variabele waarde (M) die afhangt van de hoogte van de schuif. De hoogtepositie van de zijaanslag is vervolgens een simpele optelling van die totale afstand en de hoogtepositie van de onderzijde van de schuif.



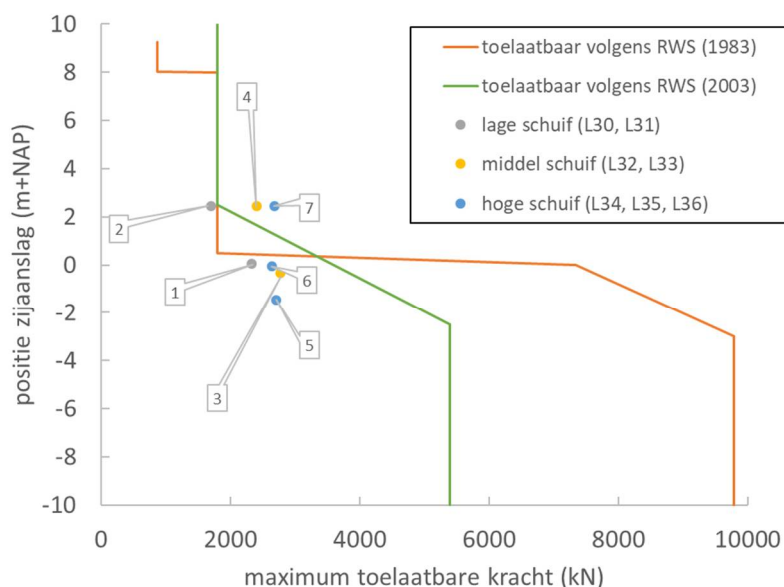
Figuur B.2. Links: detail van constructietekening van een drieregelige schuif (RWS, 1988a). De waarde van “M” is afhankelijk van het type schuif. Rechts: overzichtstekening van een tweeregelige schuif en een drieregelige schuif.

Een overzicht van de door WLDelft (1984) doorgerekenede cases is weergegeven in Tabel B.2.

Tabel B.2. Overzicht cases welke door WLDelft (1984a) zijn doorgerekend. De kleuren komen overeen met die van de datapunten in Figuur B.3.

case / situatie	hoogte schuif (m)	positie onderzijde eindhar (m+NAP)	2 of 3 regelige schuif	positie zijaanslag				kracht Fss,max (kN)	
				vast (m+onderzijde schuif)	M	totaal (m+NAP)	totaal (m+NAP)		
L30	1	5.9	-2.00	2	2.05	0	2.05	0.05	2330
L31	2	5.9	0.40	2	2.05	0	2.05	2.45	1700
L32	3	9.9	-6.00	3	2.05	3.6	5.65	-0.35	2770
L33	4	9.9	-3.20	3	2.05	3.6	5.65	2.45	2400
L34	5	11.9	-8.00	3	2.05	4.5	6.55	-1.45	2710
L35	6	11.9	-6.60	3	2.05	4.5	6.55	-0.05	2640
L36	7	11.9	-4.10	3	2.05	4.5	6.55	2.45	2680

De data van Tabel B.2 is grafisch weergegeven in Figuur B.3. Daarbij is de voor de cases berekende botskracht als functie van de positie van de zijaanslag weergegeven. In deze figuur zijn tevens de toelaatbare krachten volgens RWS (1983) en RWS (2003) weergegeven.



Figuur B.3. Vergelijking van de toelaatbare krachten volgens RWS (1983) en volgens RWS (2003) en de door WLDelft (1984a) berekende krachten (markers)

In Figuur B.3 valt te zien dat alleen Situatie 4 (L33) en Situatie 7 (L36) een botskracht op de pijler hebben welke hoger is dan de toelaatbare kracht. Dit is in lijn met de conclusie welke door WLDelft (1984a) is getrokken. Dit verklaart tevens waarom WLDelft (1984a) concludeerde dat de andere vijf cases voldeden ondanks dat de waarde van 1800 kN werd overschreden.

B.4 Conclusies en aanbevelingen

Het volgende wordt geconcludeerd naar aanleiding van de nadere interpretatie van maximaal toelaatbare botskrachten op de pijlers:

- De grootte van de botskrachten in de zijaanslagen is het meest kritisch bij hoge posities van de schuif (een niveau hoger dan NAP + 2,5 m uitgaande van RWS 2003). Dit komt doordat de toelaatbare botskracht voor hogere posities significant lager is dan voor lagere posities. Dit is gerelateerd aan het smallere bovenste deel van de pijler.
- Van de zeven door WLDelft (1984a) doorgerekende situaties voldoen Situatie 4 (L33) en Situatie 7 (L36) niet aan de destijds gestelde eisen ten aanzien van de toelaatbare botskracht. Dit betreft respectievelijk een schuif met een hoogte van 9,9 m en een schuif met een hoogte van 11,9 m. In beide gevallen is het niveau van de zijaanslag op NAP+2,5 m. Een relatief kleine schuif in hoge positie (Situatie 2, L31) voldoet net wel aan de gestelde eis. Dit bevestigt de conclusies uit WLDelft (1984a) welke aan het begin van deze bullet is gegeven.
- De toelaatbare kracht op de pijler is, wanneer de redeneerlijn van RWS (1983, 2003) juist is gereconstrueerd, afhankelijk van drie aspecten:
 - o de locatie van de kracht op de pijler
 - o het type pijler (grootte-klasse)
 - o de overschrijdingskans van de extreme belasting

Het volgende werd aanbevolen ten aanzien van het uitvoeren van de uit te voeren berekeningen (inclusief gevoeligheidsstudie) in dit rapport:

- Bij het uitvoeren van gevoeligheidsstudies dient vooralsnog te worden uitgegaan van een toelaatbare botskracht van 1800 kN en impactlocaties van de zijaanslag op de

pijler op een niveau hoger dan NAP + 2,5 m. Daarbij dient beseft te worden dat de waarde van de toelaatbare botskracht in een latere fase, op basis van voortschrijdend inzicht, nog kan worden gewijzigd.

- Bij het uitvoeren van gevoeligheidsstudie waarbij de door WLDelft (1984a) gehanteerde cases als uitgangspunt worden genomen dient de focus te liggen op Situatie 2 (L31), Situatie 4 (L33) en Situatie 7 (L36). De overige cases hebben nauwelijks een toegevoegde waarde omdat de optredende kracht hier fors lager is dan de toelaatbare waarde.

Generiek wordt het volgende aanbevolen:

- Rijkswaterstaat kan overwegen om de oplossingsrichting van het ontwerp van de zijaanslagen niet alleen te zoeken in de shockcells of het aanscherpen van het rekenmodel maar ook in het (onderbouwd) verhogen van de toelaatbare botskracht. Zo is het wellicht mogelijk om deze afhankelijk te laten zijn van het type pijler of een nadere analyse uit te voeren op de toelaatbare botskracht.
- Er wordt aanbevolen om te bepalen wat de toelaatbare kracht is bij de in dit project in overleg met Rijkswaterstaat aangehouden norm; afgaande op de documentatie van RWS (2003) is deze toelaatbare kracht mede afhankelijk van de overschrijdingskans van de extreme belasting (nog te verifiëren op basis van constructieve eisen).
- Om botskrachten te beperken dient de speling tussen de pijlers en de schuif op het niveau hoger dan NAP + 2,5 m minimaal te zijn. Die kleine speling zorgt er voor dat de schuif niet 'op gang kan komen' en dat de resulterende bewegingen sterk geremd worden, waardoor uiteindelijk ook de resulterende botskrachten in de zijaanslagen beperkt worden. De speling op een niveau lager dan NAP is waarschijnlijk veel minder maatgevend. Bij het 'instellen' van de speling kan hier mogelijk rekening mee worden gehouden. Omdat de pijlers niet perfect verticaal staan zal de gewenste speling voor een specifieke hoogtepositie van de schuif ingesteld moeten worden.
- De overige eisen dienen gecontroleerd te worden:
 - o Zijn de optredende krachten kleiner dan de toelaatbare krachten op de schuif? (voorliggende bijlage memo beschouwt de optredende krachten op de pijler). Het is denkbaar dat voor lagere posities van de schuif de toelaatbare kracht op de schuif maatgevend is en niet meer de toelaatbare kracht op de pijler.
 - o Zijn de optredende versnellingen kleiner dan de toelaatbare versnellingen en is de onderbouwing van deze toelaatbare versnellingen afdoende?
 - o Zijn de indrukingswaarden van de zijaanslag acceptabel en is de onderbouwing van deze toelaatbare indrukking afdoende?

C Methodiek voor bepalen golfkrachten op schuif en eindhar

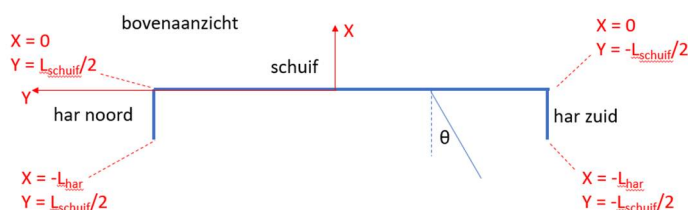
C.1 Inleiding

Deze bijlage beschrijft een in het huidige project nieuw afgeleide methode voor het afleiden van de golfkrachten op de schuif en op de eindharren. Daarbij wordt uitgegaan van lineaire golftheorie en langkammige golven. Deze nieuwe methode moest afgeleid worden om inzicht in de omrekening van golfcondities naar golfkrachten op een schuif te krijgen aangezien de details en achtergrond van de oorspronkelijk aangehouden methode (RWS Bouwdienst / WLDelft) verloren zijn gegaan sinds die oorspronkelijke studies.

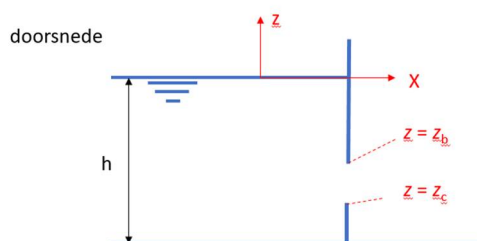
Allereerst worden de basisdefinities beschreven in Paragraaf C.2. Vervolgens worden de methoden voor vaststellen van de golfkrachten op de schuif (Paragraaf C.3) en van die op de eindharren (Paragraaf C.4) beschreven.

C.2 Definities

De volgende definities en assenstelsel worden aangehouden:

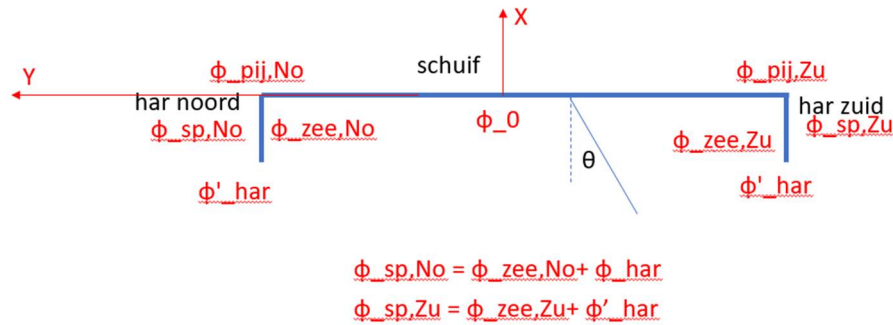


Figuur C.1. Gehanteerde definities en assenstelsel (bovenaanzicht)



Figuur C.2. Gehanteerde definities en assenstelsel (doorsnede)

Waarbij h de waterdiepte (m), z_b de onderzijde van de schuif of har ten opzichte van de stilwaterlijn (m) en z_c de bovenzijde van de onderdorpel ten opzichte van de stilwaterlijn (m). Zowel de waarde van z_b als de waarde van z_c zijn onder water negatief. θ is de golfinvalshoek ten opzichte van de normaal op de schuif ($^\circ$). L_{schuif} is de lengte van de schuif (m) en L_{har} is de lengte van de eindhar (m) haaks op de schuiflengte.



Figuur C.3. Definities van faseverschillen

De faseverschillen op verschillende locaties zijn ten opzichte van de positie $(x,y) = (0,0)$. Daarbij worden de volgende indices gehanteerd:

- pij = pijler
- sp = spanningzijde
- har = eindhar
- zee= zeezijde
- No = noordelijk (pijler, spanningzijde of zeezijde van de eindhar)
- Zu = zuidelijk (pijler, spanningzijde of zeezijde van de eindhar)

Zo is bijvoorbeeld $\phi_{sp,Zu}$ het faseverschil van de waterbeweging op de zuidelijke spanning (t.o.v. $(x,y) = (0,0)$).

Het faseverschil ϕ'_{har} is een lokale faseverschil tussen de waterbeweging aan de noordzeezijde van de har en de spanningzijde van de har. Het faseverschil in de spanning ten opzichte van $(x,y) = (0,0)$ is als volgt:

$$\phi_{sp,No} = \phi_{zee,No} + \phi'_{har}$$

$$\phi_{sp,Zu} = \phi_{zee,Zu} + \phi'_{har}$$

C.3 Golfkrachten op schuif

C.3.1 Golfkracht op schuif per eenheid van breedte

Allereerst wordt de kracht per eenheid van breedte op een deels geheven schuif bepaald.

De druk op de stilwaterlijn wordt bepaald met:

$$p(z=0) = \rho g a \tag{1}$$

Met ρ = dichtheid van het water (kg/m^3), g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2) en a de amplitude van de golf voor de schuif (m). Aangezien er 100% reflectie wordt aangenomen en lineaire golftheorie wordt gehanteerd geldt $a = 2a_{\text{inkomend}} = H_i$ ofwel:

$$p(z=0) = \rho g H_i \tag{2}$$

De druk p op positie z wordt bepaald door gebruik te maken van de reductiefactor met betrekking tot de orbitaalbeweging van de golf:

$$\alpha(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \tag{3}$$

Met k = golfgetal (rad/m), h = waterdiepte (m), z = beschouwde positie (m).

$$p(z) = \alpha(z) \cdot p(z=0) \text{ oftewel} \quad (4)$$

$$p(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \cdot \rho g H_i \quad (5)$$

De kracht op de schuif per eenheid van breedte wordt bepaald door de druk over de hoogte van de schuif te integreren tussen Positie B (onderzijde schuif) en Positie A (stilwaterlijn):

$$F_{\text{schuif}} = \int_{z_B}^{z_A} p dz \quad (6)$$

Waarbij F_{schuif} de kracht per eenheid van breedte (N/m)

Wanneer bovenstaande vergelijkingen worden gecombineerd volgt:

$$F_{\text{schuif}} = \frac{\rho g H_i}{k \cosh(kh)} (\sinh(k(h+z_A)) - \sinh(k(h+z_B)))$$

Met $z_A = 0$ geldt:

$$F_{\text{schuif}} = \frac{\rho g H_i}{k \cosh(kh)} (\sinh(kh) - \sinh(k(h+z_B))) \text{ (kracht p.e.v. breedte [N/m}^1\text{])}$$

Er wordt benadrukt dat de kracht boven de stilwaterlijn in bovenstaande niet is meegenomen. Indien hier wel voor zou worden gekozen dan kan dit vereenvoudigd (onder aanname van een quasi-statisch effect) worden benaderd door:

$$F_{\text{schuifbovenSWL}} = \frac{1}{2} \rho g H_i^2$$

C.3.2 Golfkracht op individuele pijler

De amplitude van de druk op de schuif is als volgt gedefinieerd (kracht per oppervlakte-eenheid):

$$p_{\text{schuif}} = \rho g H \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \exp(-ik_y y) \quad (7)$$

met $k_y = \sin(\theta)k$ (θ is golfhoek t.o.v. normaal) de golfgetalcomponent langs de schuif en y de horizontale coördinaat langs de schuif (positief van Zuid naar Noord), zo gekozen dat $y = 0$ overeenkomt met het midden van de schuif. Om de kracht op de noordelijke pijler en de zuidelijke pijler verkrijgen wordt Vgl. (7) enerzijds gewogen met een functie die van Zuid naar Noord lineair van 0 tot 1 loopt (i.e., $f = 1/2 + y/w_{\text{schuif}}$, met w_{schuif} de breedte van de schuif) en anderzijds met een functie die van Zuid naar Noord lineair van 1 tot 0 loopt (i.e., $f = 1/2 - y/w_{\text{schuif}}$). Integratie van Vgl. (7) met deze wegingen over de schuif geeft de krachten op de noordelijke pijler en de zuidelijke pijler in een richting haaks op de schuif:

$$\begin{aligned}
F_{schuif,N} &= \int_0^{z_B} \int_{-w_{schuif}/2}^{w_{schuif}/2} p_{schuif} \left(1/2 + y/w_{schuif}\right) dy dz \\
&= \frac{\rho g H}{k \cosh(kh)} \left(\sinh(kh) - \sinh(k(h + z_B))\right) \\
&\quad \times \int_{-w_{schuif}/2}^{w_{schuif}/2} \exp(-ik_y y) \left(1/2 + y/w_{schuif}\right) dy
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
F_{schuif,S} &= \int_0^{z_B} \int_{-w_{schuif}/2}^{w_{schuif}/2} p_{schuif} \left(1/2 - y/w_{schuif}\right) dy dz \\
&= \frac{\rho g H}{k \cosh(kd)} \left(\sinh(kh) - \sinh(k(h + z_B))\right) \\
&\quad \times \int_{-w_{schuif}/2}^{w_{schuif}/2} \exp(-ik_y y) \left(1/2 - y/w_{schuif}\right) dy
\end{aligned} \tag{9}$$

C.3.3 Resultante kracht op pijlers in normaalrichting

De invoer voor het massa-demper-veersysteem zijn de parameters FH_0 , A , Ω_1 en ϕ . Deze worden als volgt gebruikt:

$$FH \perp (t) = FH_0 + A \sin(\Omega_1 t + \phi) \tag{10}$$

Waarbij volgens WLDelft (1984):

- FH_0 de kracht op de schuif als gevolg van stromings- en vervalkrachten (N). Door de opdrachtgever is aangegeven dat deze vooralsnog gelijk kan worden gesteld aan $FH_0 = 0$ waarbij wordt opgemerkt dat dit mogelijk een conservatieve benadering is aangezien het verval kan leiden tot een effectieve wrijving tussen de pijler en schuifaanslag.
- A de amplitude van de loodrechte kracht op de schuif als gevolg van (quasi-stationaire) golfkrachten (N). Piekdrukken worden niet beschouwd.
- Ω_1 is de hoekfrequentie van de belasting loodrecht op de schuif.
- ϕ is het faseverschil t.o.v. de evenwijdige kracht ($F//$).

Uit de analyse in Bijlage D blijkt dat bovenstaande niet blijkt te kloppen en dat FH_0 geen kracht op de schuif als gevolg van de stromings- en vervalkracht is maar een andere parameter welke is benodigd om de wrijvingskracht in de schuifaanslagen te kunnen schematiseren.

In het uiteindelijk te gebruiken massa-demper-veersysteem wordt Vgl. (10) gehanteerd.

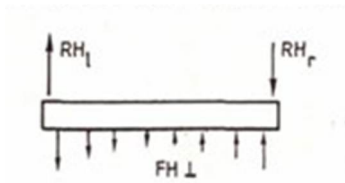
De loodrechte kracht wordt uiteindelijk gebruikt om de wrijvingskracht tussen de schuif en de twee pijlers te bepalen in geval van een over de gehele schuiflengte positief verval:

$$FW = f \cdot (RH_{Noord} + RH_{Zuid}) \tag{11}$$

Waarbij:

FW de wrijvingskracht (N), RH_{Zuid} de horizontale reactiekracht op de zuidelijke pijler, RH_{Noord} de horizontale reactiekracht op de noordelijke pijler en f een wrijvingscoëfficiënt.

Het is echter denkbaar dat er over een deel van de schuiflengte een negatieve horizontale kracht op een pijler optreedt. In dat geval wordt de schuif in ieder geval aan één uiteinde tegen de Noordzeezijde van de pijler gedrukt maar is er toch sprake van een (positieve) wrijvingskracht. Dit is schematisch weergegeven in Figuur C.4.



Figuur C.4. Positieve en negatieve krachten op de pijlers (uit: bron).

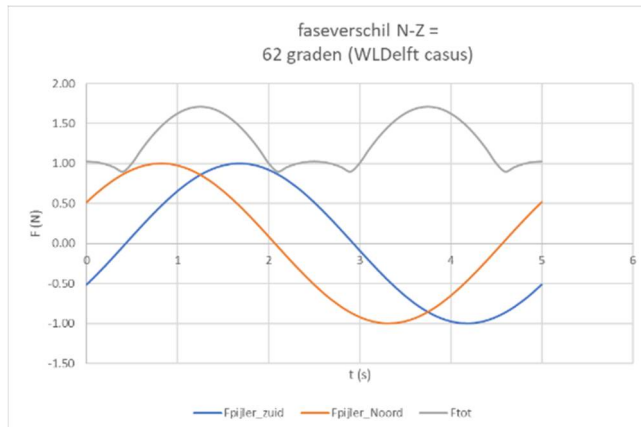
Formeel betekent dat de volgende formule voor de wrijvingskracht opgaat:

$$FW(t) = f \cdot \{ |RH_{Noord}(t)| + |RH_{Zuid}(t)| \} \quad (12)$$

In de door WLDelft (1984) beschreven cases bleek echter de waarde van FH_0 altijd groter te zijn dan de waarden van A (waarbij A de amplitude van het variërende deel van de geschematiseerde belasting). Het hierboven beschreven fenomeen en tekeninvloed is bij die cases daarom dan ook niet opgetreden. In de nieuwe door PTStructural opgestelde programmatuur (Python code) is dit fenomeen daarom ook niet opgenomen; in de bestaande Python code is dus gebruik gemaakt van Vgl. (11) en van de volgende vergelijking:

$$RH(t) = |FH_{\perp}(t)| \quad (13)$$

Aangezien $FH_0 = 0$ in de huidige studie als uitgangspunt wordt gehanteerd is het toepassen van Vgl. (11) en Vgl. (13) niet meer correct en daarom is het toepassen van Vgl. (12) noodzakelijk. Een fictief voorbeeld is gegeven in Figuur C.5.



Figuur C.5. Voorbeeld waarbij de absolute waarden van de pijlers worden opgeteld.

Te zien valt dat, door het gebruik van de absolute waarden per pijler, er geen sprake meer is van een sinusvormig verloop van de horizontale reactiekracht van twee pijlers tezamen. Hoe hier praktisch mee wordt omgegaan bij het inzetten van de rekenresultaten is beschreven in Bijlage D.

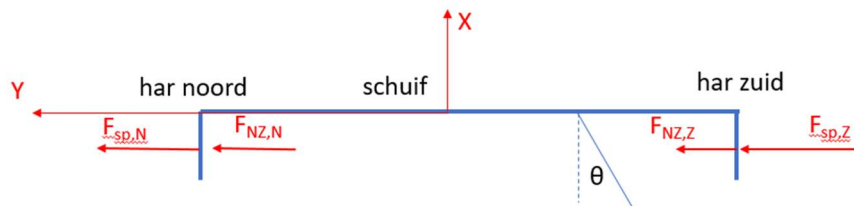
C.4 Golfkrachten op eindhar

C.4.1 Algemeen

De kracht evenwijdig op de schuif (en loodrecht op de eindharren) is afhankelijk van vier krachten te weten de krachten aan de sponningszijde en aan de Noordzee zijde van beide eindharren (zie ook Figuur C.6):

- Zuidelijke eindhar, Noordzeezijde $F_{NZ,Z}$
- Noordelijke eindhar, Noordzeezijde $F_{NZ,N}$
- Zuidelijke eindhar, sponningszijde $F_{sp,Z}$
- Noordelijke eindhar, sponningszijde $F_{sp,N}$

$$FH // (t) = F_{NZ,Z}(t) + F_{NZ,N}(t) + F_{sp,Z}(t) + F_{sp,N}(t) \quad (14)$$



Figuur C.6 Krachten op de twee eindharren (bovenaanzicht)

C.4.2 Krachten op eindhar vanuit de Noordzee ($F_{NZ,N}$ en $F_{NZ,Z}$)

De kracht op de Noordzeezijde aan de zuidelijke eindhar en de noordelijke eindhar wordt gegeven door (hydrostatische kracht buiten beschouwing gelaten):

$$F_{NZ,Z}(t) = -F_{ampl} \sin(\Omega t + \phi_{NZ,Z}) \cdot B_{har}$$

$$F_{NZ,N}(t) = -F_{ampl} \sin(\Omega t + \phi_{NZ,N}) \cdot B_{har}$$

Met:

$$F_{ampl} = \frac{\rho g H_i}{k \cosh(kh)} (\sinh(k(h + z_A)) - \sinh(k(h + z_B)))$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}$$

Waarbij

z_B gelijk is aan $-h_0$

z_A gelijk is aan 0

$$F_{ampl} = \frac{\rho g H_i}{k \cosh(kh)} (\sinh(kh) - \sinh(k(h - h_0)))$$

C.4.3 Krachten op eindhar vanuit de sponning ($F_{sp,N}(t)$ en $F_{sp,Z}(t)$)

De waterstand aan de sponningszijde h_{sp} wordt als volgt bepaald (hydrostatische kracht buiten beschouwing gelaten):

$$h_{sp,N}(t) = B_{sp} \sin(\Omega t + \phi_{sp,N}) \quad (15)$$

$$h_{sp,Z}(t) = B_{sp} \sin(\Omega t + \phi_{sp,Z}) \quad (16)$$

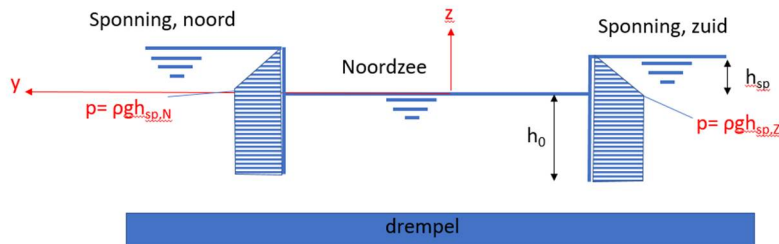
Waarbij

h_s	=	waterstand aan de sponningszijde (t.o.v. stilwaterlijn)	(m)
B_{sp}	=	de amplitude van de waterstand in de sponning	(m)
Ω	=	hoekfrequentie van de regelmatige golf	(rad/s)
ϕ	=	faseverschil met de inkomende golf aan de zeezijde	(s)

Vervolgens kan de kracht op de eindhar aan de sponningszijde als volgt worden berekend:

$$F_{sp,N}(t) = -\frac{1}{2} \rho g (h_{sp,N}^2 + 2h_{sp,N}h_0) \cdot B_{har} \quad (17)$$

$$F_{sp,Z}(t) = \frac{1}{2} \rho g (h_{sp,Z}^2 + 2h_{sp,Z}h_0) \cdot B_{har} \quad (18)$$



Figuur C.7. Schematisatie krachten op eindharren (doorsnede)

Om de waterbeweging in de sponning te bepalen is het nodig om de parameters B_{sp} en ϕ_{sp} te bepalen. Hoe dit kan worden gedaan is beschreven in Bijlage C van Deltares (2021a). De aldaar beschreven (naar huidige maatstaven en inzichten betrekkelijk omslachtige) methode heeft verschillende inputparameters nodig waaronder de amplitude van de golfbeweging voor de schuif. In de methode van WLDelft (1984) is 100% reflectie aangenomen en daarmee is de amplitude gelijk aan de golfhoogte H (= $2x$ de amplitude).

D Gevoeligheidsanalyse

D.1 Inleiding en conclusie

Aan de hand van de gevoeligheidsanalyse laten we in deze bijlage zien wat het effect is van variatie in de waarden voor de invoerparameters op de berekende botskrachten. We hebben daartoe variaties aangebracht in de waarden van diverse invoerparameters in het Pythonscript dat de botskrachten berekend. Het bereik van de variaties is binnen bekende realistische bereiken per parameter toegepast, zie paragraaf D.8. Omdat het rekenmodel complex is, en het totale aantal invoerparameters groot, blijken de effecten vaak niet eenduidig te zijn. Daarom kan niet voor elke parameter eenduidig een conservatieve aanbeveling gedaan worden.

In de volgende paragraaf variëren we specifiek in de eerder genoemde casussen 1b, 2 en 3 (zie Hoofdstuk 3; hier voortaan D1b, D2 en D3 genoemd). De volgende parameters komen daarbij aan bod:

Speling in langsrichting tussen schuif en pijler, faseverschuiving φ tussen langs- en dwarskracht, golfhoogte, golfsteilheid, golfinvalshoek, waterstand, veerconstante k_2 . Deze laatste parameter is de weergave van de stijfheid van de mogelijk in te zetten zijaanslag.

De daaropvolgende paragrafen zijn algemener van opzet, met casus L36/L37 als basisgeval (afgezien van speling en k_2 die hier beide juist gevarieerd worden, zijn casus L36 en L37 gelijk aan elkaar). Daarbij wordt de gevoeligheid onderzocht van – naast speling en veerconstante – c_2 en k_6 (beide gerelateerd aan verdringing van het water in de sponning) en m_2 (massa van de schuif en toegevoegd water).

De belangrijkste conclusie is dat de met het rekenmodel berekende botskrachten over het algemeen gevoelig zijn voor specifieke parameterwaarden in de invoer. Die gevoeligheid is zelden rechtlijnig. Een voorbeeld daarvan is dat in sommige gevallen de botskracht toeneemt bij toenemende veerconstante, in andere gevallen juist afneemt.

De speling tussen schuif en pijler blijkt een belangrijke invloedsfactor te zijn. Ook de invalshoek van de golven is van belang. Toch geldt hier ook weer dat dit geen algemeenheid is en alleen voor bepaalde combinaties en cases geldt. De botskracht blijkt niet heel gevoelig voor de waarde van c_2 .

D.2 Effect van variaties op cases 1b, 2, 3

Onderstaande tabel geeft voor diverse varianten de berekende botskracht op de pijler, de indrukking van de zijaanslag en de versnelling van de schuif. Als invoer voor het model zijn veelal de waarden gebruikt uit WLDelft (1984a,b) behalve waar die moeten veranderen vanwege de andere invoer. Zo heeft de waterstand bijvoorbeeld ook effect op de meebewegende massa, die is daarom dan ook aangepast. De golfgerelateerde parameters zoals de langs- en dwarskrachten op de schuif zijn door Deltares bepaald volgens de nieuw uitgewerkte 'simpele' methode (zie Bijlage C). De berekeningen betreffen een periode van 30 s (300.000 rekentijdstappen), in WLDelft (1984a,b) werd 10 s doorgerekend. Deze paragraaf geeft duiding aan de getallen uit onderstaande tabel. Let wel, de bovenste twee berekeningen die gebaseerd zijn op case 'L37' uit WL1984 zijn daar niet direct vergelijkbaar mee omdat we hier andere speling hanteren en een langere duur doorrekenen.

Tabel D.1: Invoer en resultaten gevoeligheidsanalyse van varianten op case 1b, 2 en 3. s_1 en s_2 zijn de speling rechts en links; β de golfinvalshoek ten opzichte van de normaal; φ de faseverschuiving tussen langs- en dwarskracht waarbij...*)de eerst genoemde waarden (out) uit de 'simpele' methode zijn afgeleid en de tweede (in) als invoer in het Pythonscript zijn gebruikt. FSS is de maximale botskracht, u de verplaatsing van de zijaanslag in de langsrichting van de schuif, dus inclusief indrukking (** zonder rekening te houden met speling) en a de versnelling.

	s_1, s_2 [m]	H [m]	T [s]	golf steilheid [%]	β [°]	wl [m+N AP]	k_2 $\cdot 10^3$ [kN/ m]	$\varphi^* \pi$ [rad] (out)	$\varphi^* \pi$ [rad] (in)*	FSS [kN]	u^{**} [m]	a [m/s ²]
L37WLsp05	0.05	1.6	5.0	4.1	27	2.5	18	0.40	0.41	1736	0.15	1.15
L37WLsp05 φ	0.05	1.6	5.0	4.1	27	2.5	18	0.56	0.56	1749	0.15	1.18
L37Delsp05	0.05	1.6	5.0	4.1	27	2.5	18	0.56	0.56	2838	0.21	1.79
D1b	0.05	1.6	5.0	4.1	27	3.54	18	0.52	0.52	2948	0.21	1.8
D2	0.05	3.2	7.07	4.1	27	3.54	18	0.57	0.56	3520	0.25	1.59
D2 β 52	0.05	3.2	7.07	4.1	52	3.54	18	0.57	0.56	4446	0.30	1.66
D3	0.05	6.4	10.0	4.1	27	3.54	18	0.56	0.56	3740	0.26	3.08
D3 β 52	0.05	6.4	10.0	4.1	52	3.54	18	0.56	0.56	5173	0.34	2.46
D3 β 12	0.05	6.4	10.0	4.1	12	3.54	18	0.56	0.56	2809	0.21	3.76
D3 β 12H3.2	0.05	3.2	10.0	2.05	12	3.54	18	0.60	0.60	1792	0.15	1.85
D3k24	0.05	6.4	10.0	4.1	27	3.54	24	0.56	0.56	3751	0.21	3.25
D3k16	0.05	6.4	10.0	4.1	27	3.54	16	0.56	0.56	3473	0.27	2.88
D3 φ	0.05	6.4	10.0	4.1	27	3.54	18	0.40	0.40	3419	0.24	2.68

De belangrijkste bevindingen op basis van bovenstaande uitkomsten:

- Omdat run 'L37Delsp05' het startpunt van de gevoeligheidsanalyse is vergelijken we die eerst met de nieuwe basis casus 'D1b'. Het effect van een hogere waterstand is te zien in de uitkomsten voor deze beide condities. De waterstandstoename van ongeveer 1 m resulteert in iets hogere botskracht (2948 i.p.v. 2813kN).
- Het effect van een hogere golfhoogte (3,2 m in plaats van 1,6 m) bij gelijke golfsteilheid (dus ook toename van de golfperiode) is te zien in run 'D1b' vs. 'D2'. Verdubbeling van de golfhoogte leidt in dit geval tot een toename in botskracht van circa 20% (van 2948kN naar 3520kN). De verdere verdubbeling van 3,2 m naar 6,4 m ('D3'), in combinatie met een langere periode teneinde dezelfde golfsteilheid weer te geven, zorgt echter voor slechts 6% toename in botskracht (van 3520kN naar 3740kN). Deze beperkte toename komt vermoedelijk door de beperkende invloed van de speling naast de schuif.
- Het effect van een hogere golfhoogte (6,4 m in plaats van 3,2 m) bij gelijke golfperiode (dus ook toename van de golfsteilheid) is te zien in run 'D3 β 12' vs. 'D3 β 12H3.2'. De botskracht neemt in dat geval toe van 1792kN naar 2809kN, ofwel ruim 50%.
- Het effect van golfinvalshoek β is te zien in run 'D2' versus 'D2 β 52'. De grotere invalshoek (52° i.p.v. 27°) geeft grotere botskrachten (4446kN ten opzichte van 3520kN, dat is een toename van 25%). Bij 'D3' naar 'D3 β 52' zien we een grotere procentuele toename, namelijk 38%. Die uitkomst is een weergave van een grotere hoek van inval, die voor de beschouwde golfperiode ervoor zorgt dat de invloed van de inkomende golven groter wordt. Als de golven meer loodrecht invallen, bijvoorbeeld onder een hoek van 12° in plaats van 27°, dan is er minder invloed van de golf in de langsrichting van de schuif en neemt de botskracht af van 3749kN ('D3') naar 2809 ('D3 β 12'), dat is circa 30%.

Bovengenoemde berekeningen zijn ook uitgevoerd met variatie in veerconstante k_2 en faseverschuiving φ . De resultaten daarvan zijn terug te vinden in onderstaande figuren.

Elk paneel geeft de botskracht weer voor 36 berekeningen (weergegeven met de zwarte puntjes en de getalswaarden), te weten zes waarden voor k_2 op de y-as en zes waarden voor de faseverschuiving φ op de x-as. De reden om ook de gevoeligheid voor de faseverschuiving te beschouwen is dat we daarvoor op andere waarden uitkomen dan in WLDelft (1984a,b) gehanteerd. De kleuren en contourlijnen zijn geïnterpoleerd tussen de 36 berekeningen. In de linkerkolom met panelen is een speling van 0 m gehanteerd, de midden en rechterkolom hebben een speling van respectievelijk 0,05 m en 0,10 m, zowel voor de linker als de rechter pijler. De rijen hebben betrekking op de cases, te weten L37WLsp05, D1b, D2, D2β52, D3, D3β52, D3β12, D3β12Hs3.2.

Het valt direct op dat alle varianten van D2 en D3 – met uitzondering van de gevallen waarbij de golfvalshoek 12° bedraagt – ruim boven de toegestane botskracht van 1800 kN uitkomen. Zelfs bij een speling van 0,00 m zijn de botskrachten te hoog. Het toepassen van een andere waarde voor de veerconstante k_2 heeft wel invloed maar kan de botskracht bij lange na niet voldoende reduceren. Overigens is er geen rechte trend tussen veerconstante en botskracht; in sommige gevallen neemt de botskracht toe bij toenemende veerconstante, in andere gevallen juist af.

In deze figuren blijkt het effect van k_2 groter te zijn dan van de hoekverschuiving φ , maar men dient zich te realiseren dat het gehanteerde bereik van φ waarbinnen gevarieerd is klein is.

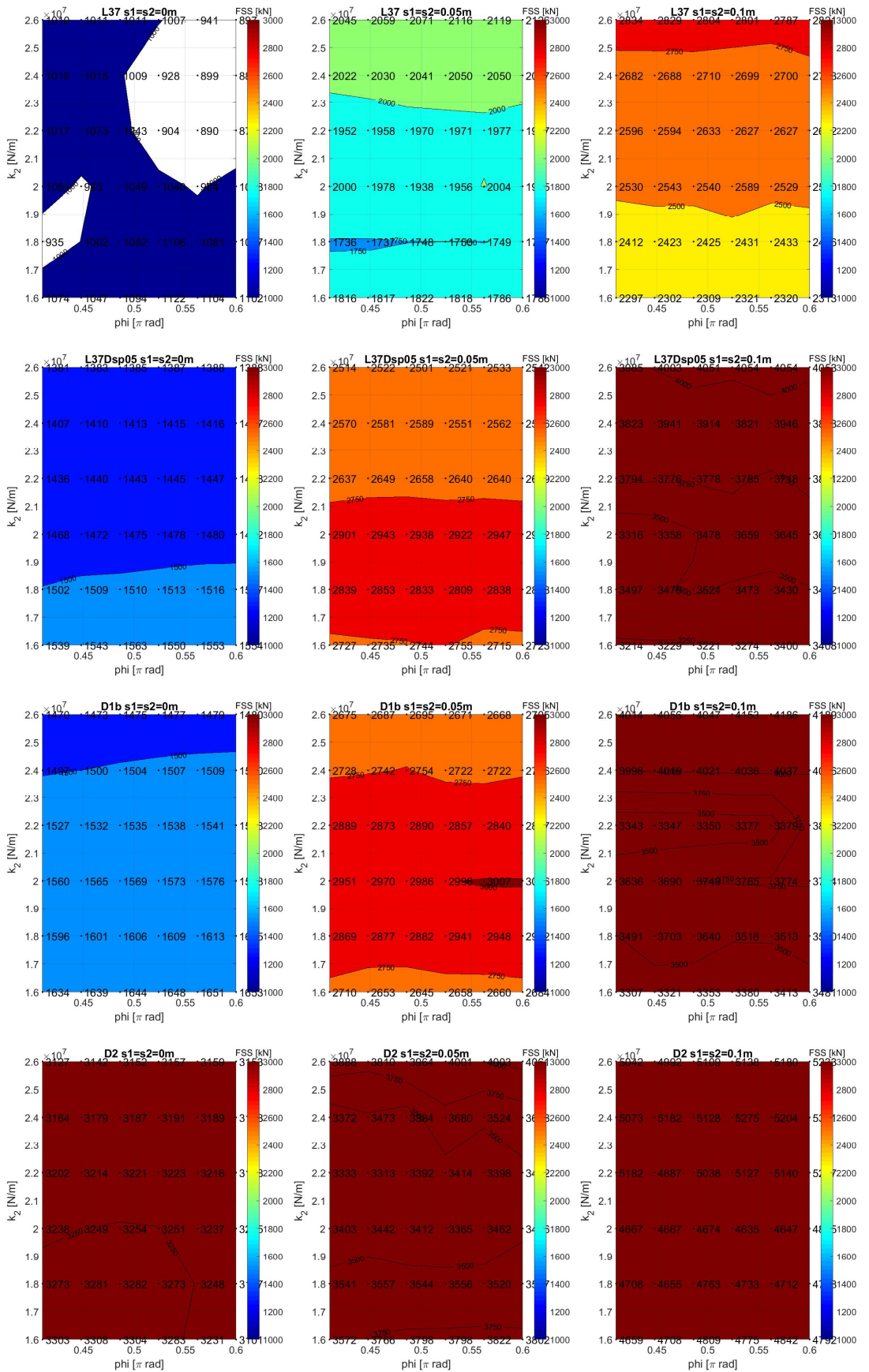
De onderste twee rijen bieden enigszins perspectief op lagere botskrachten maar de waarde van $H = 3.2$ m is slechts als voorbeeld gegeven en is te laag om representatief te zijn voor een H_{\max} in 1/30.000 jaar-condities.

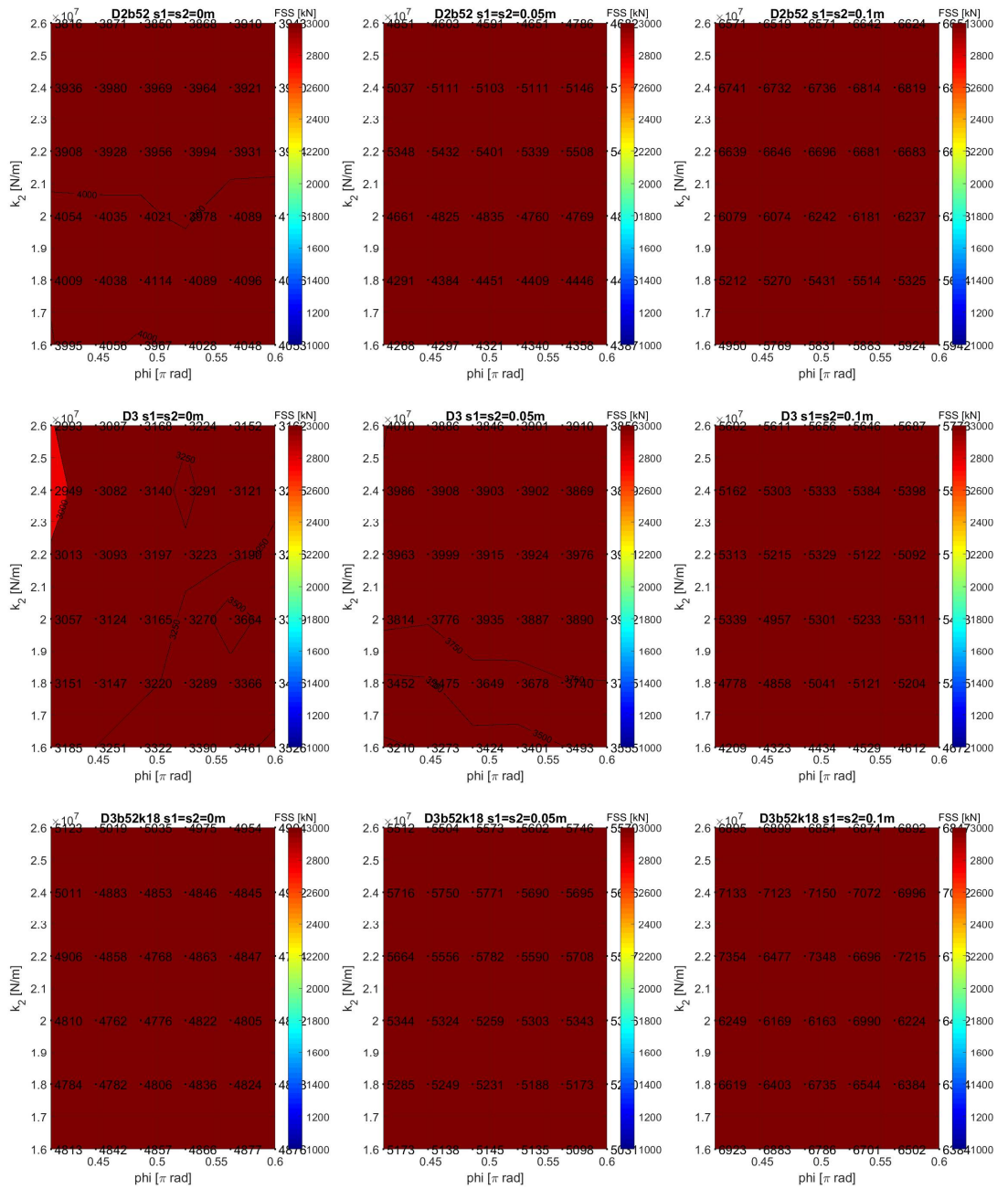
Vergelijkbare figuren voor een lager bereik van veerconstante k_2 zijn te vinden in Bijlage D.3.

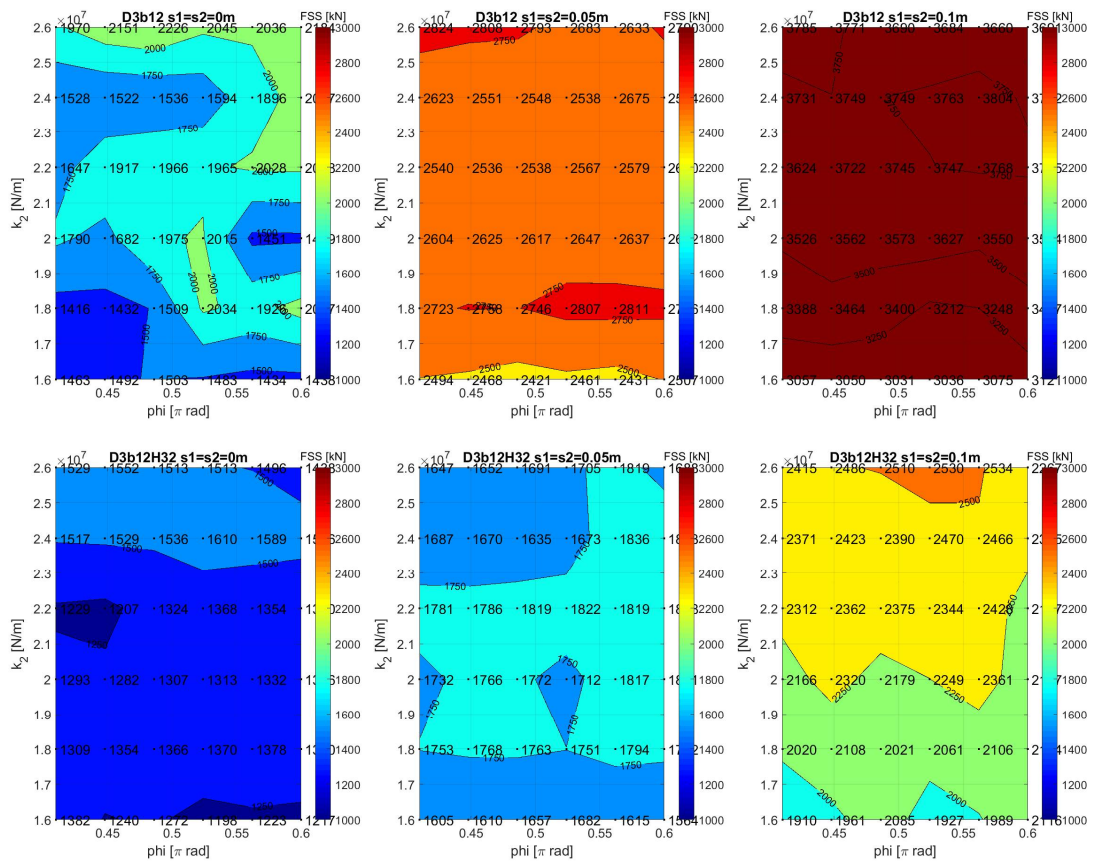
Ter informatie is in onderstaande tabel aangegeven met welke invoerparameters de berekeningen zijn uitgevoerd.

Tabel D.2: Invoerparameters voor diverse cases, bepaald via de 'simpele methode' om golfkrachten uit golfparameters te bepalen. *)de eerst genoemde waarden (out) zijn uit de 'simpele' methode afgeleid en de tweede (in) als invoer in het script gebruikt

	B [N]	Ω_2 [rad/s]	FH0 [N]	A [N]	Ω_1 [rad/s]	phi_out* [*π rad]	phi_in* [*π rad]
L37WLsp05	725000	1.23	1430000	365000	2.46	0.41	0.41
L37WLsp05fi	725000	1.23	1430000	365000	2.46	0.56	0.56
L37Dsp05	1190200	1.23	1324800	453200	2.5	0.56	0.56
D1b	1257500	1.26	1434100	492100	2.5	0.52	0.52
D2	2336000	0.89	4652900	2200900	1.75	0.57	0.56
D2β52	3552700	0.89	3944700	1408500	1.75	0.57	0.56
D3	3234800	0.63	10884000	6095200	1.25	0.56	0.56
D3β52	5173200	0.63	10307800	5264700	1.25	0.56	0.56
D3β12	1528500	0.63	11108400	6442800	1.25	0.56	0.56
D3β12H3.2	781300	0.63	5554200	3221400	1.25	0.60	0.60

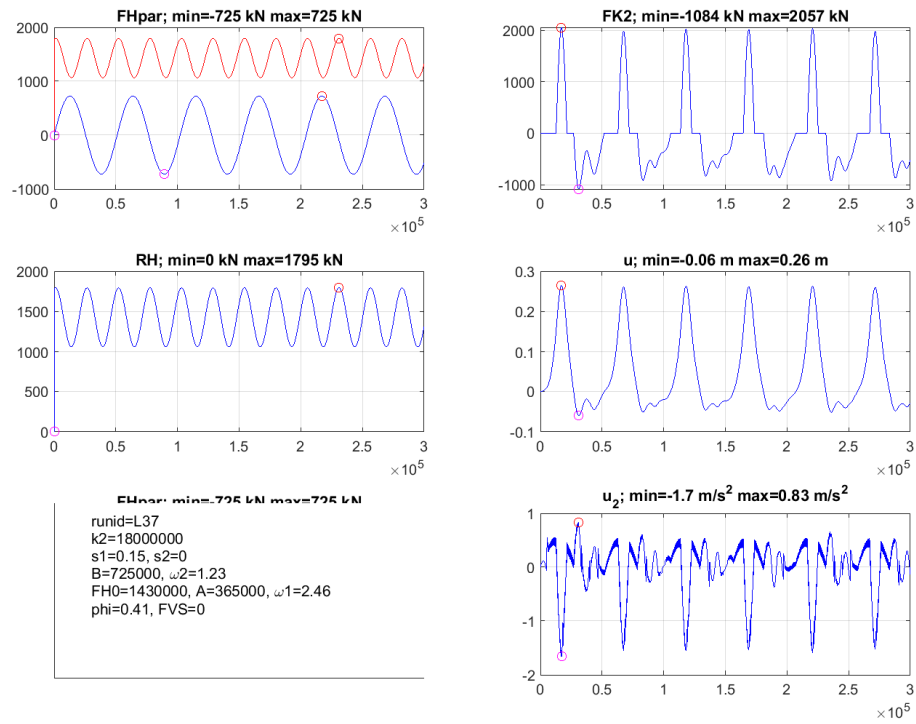




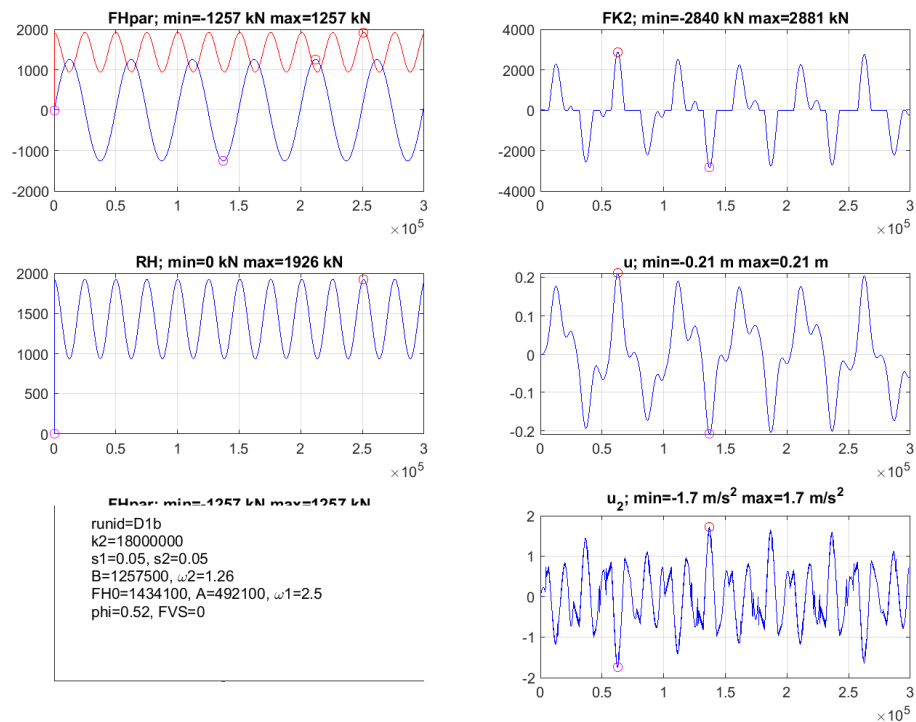


Figuur D.1: Effect van veerconstante k_2 en faseverschuiving ϕ op de botskracht bij drie waarden voor de speling (kolommen) voor acht varianten (rijen) van case 1b, 2 en 3

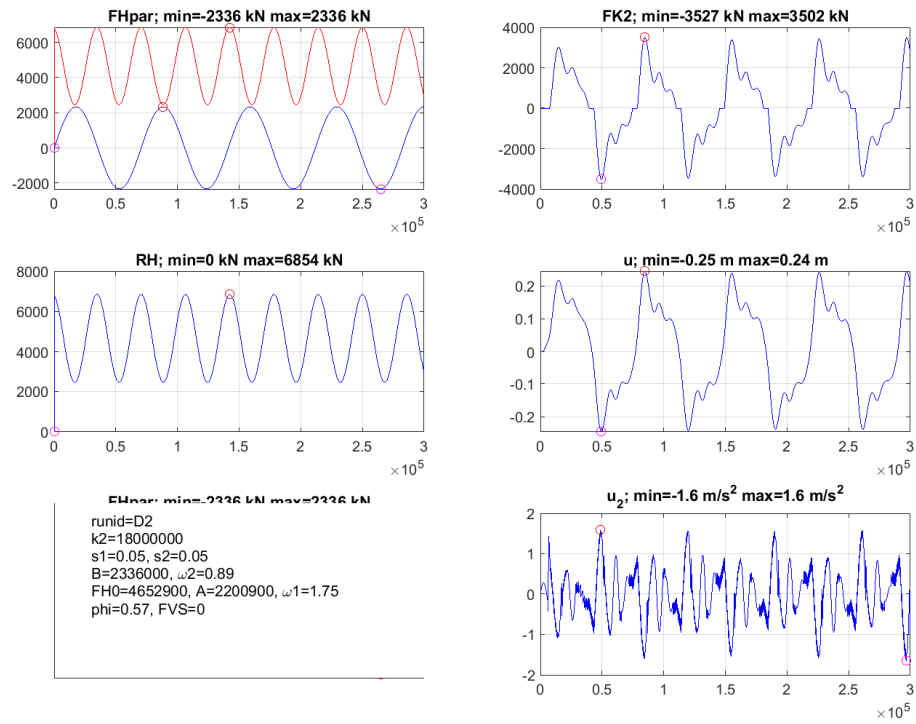
Voor de volledigheid tonen we voor de drie basis-cases de resultaten van de botskracht berekening met het massa-demper-veersysteem. Ter controle is ook case L37 meegenomen die dezelfde resultaten als WLDelft, 1984 geeft.



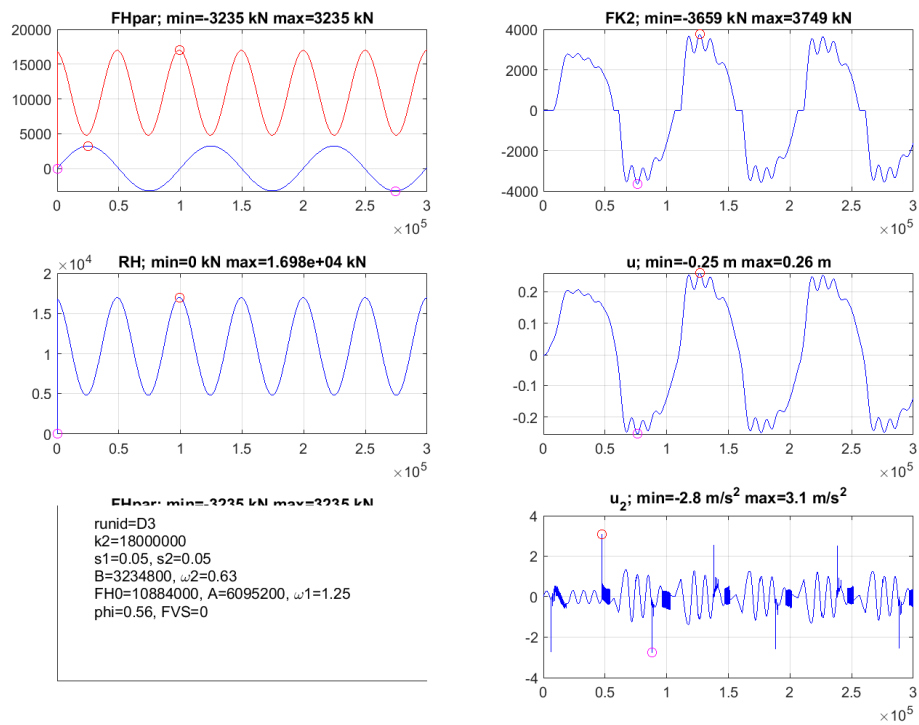
Figuur D.2: In- en uitvoer rekenmodel massa-demper-veersysteem case L37 (FK2 is botskracht; u is uitwijking en u_2 is de versnelling. de rode lijn is $F_{loodrecht}$)



Figuur D.3: In- en uitvoer rekenmodel massa-demper-veersysteem casus D1b (FK2 is botskracht; u is uitwijking en u_2 is de versnelling. de rode lijn is $F_{loodrecht}$)



Figuur D.4: In- en uitvoer rekenmodel massa-demper-veersysteem casus D2 (FK2 is botskracht; u is uitwijking en u_2 is de versnelling. de rode lijn is $F_{loodrecht}$)



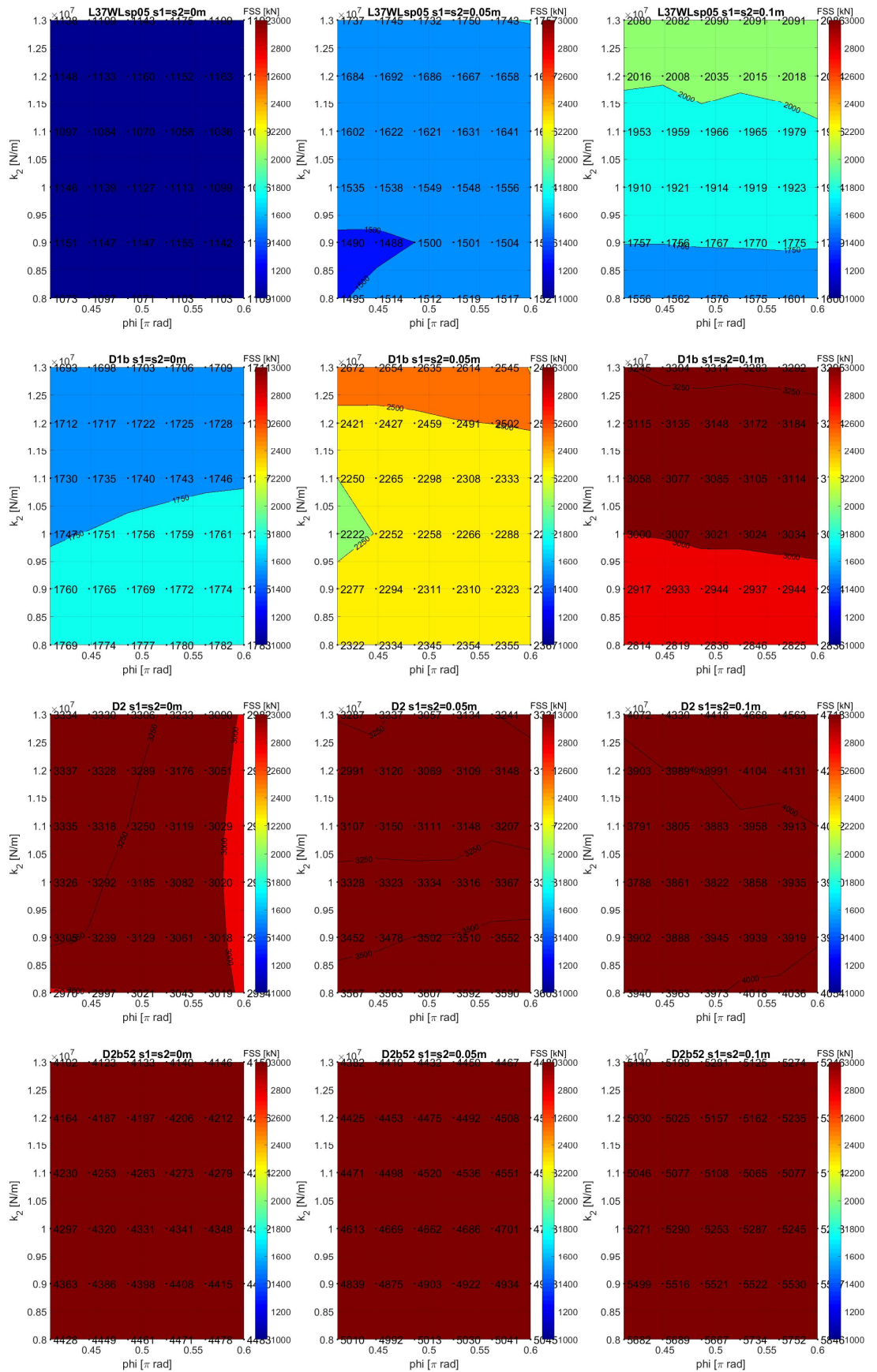
Figuur D.5: In- en uitvoer rekenmodel massa-demper-veersysteem case D3 (FK2 is botskracht; u is uitwijking en u_2 is de versnelling. de rode lijn is $F_{loodrecht}$)

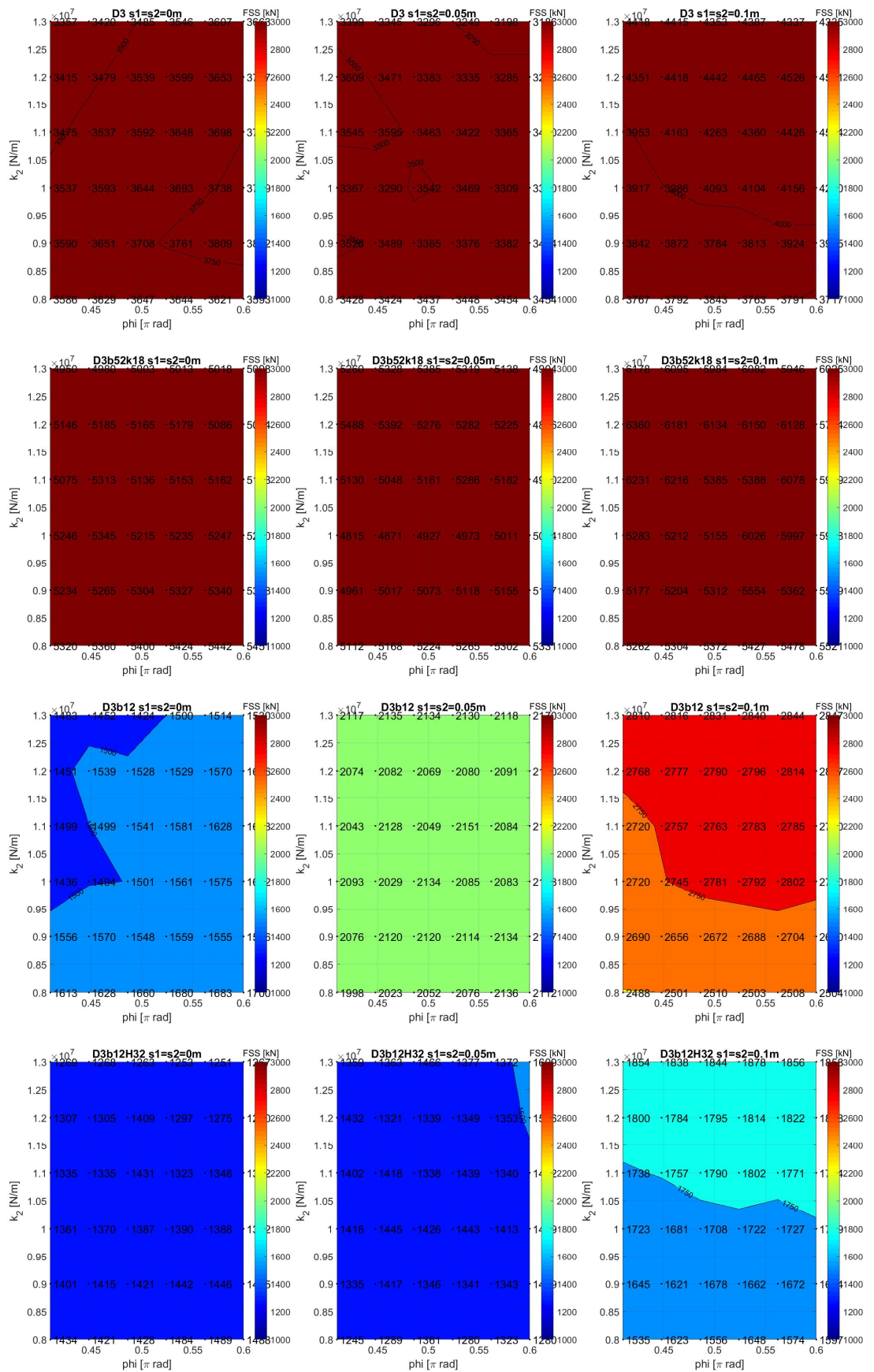
D.3 Effect van variaties op cases 1b, 2, 3 met lagere waarden voor k_2

Aanvullend zijn dezelfde berekeningen als uit de vorige paragraaf ook uitgevoerd met lagere waarden voor de veerconstante k_2 . Enkele resultaten zijn hieronder weergegeven. Over het algemeen neemt bij een lagere waarde voor k_2 de botskracht af maar de uitwijking toe.

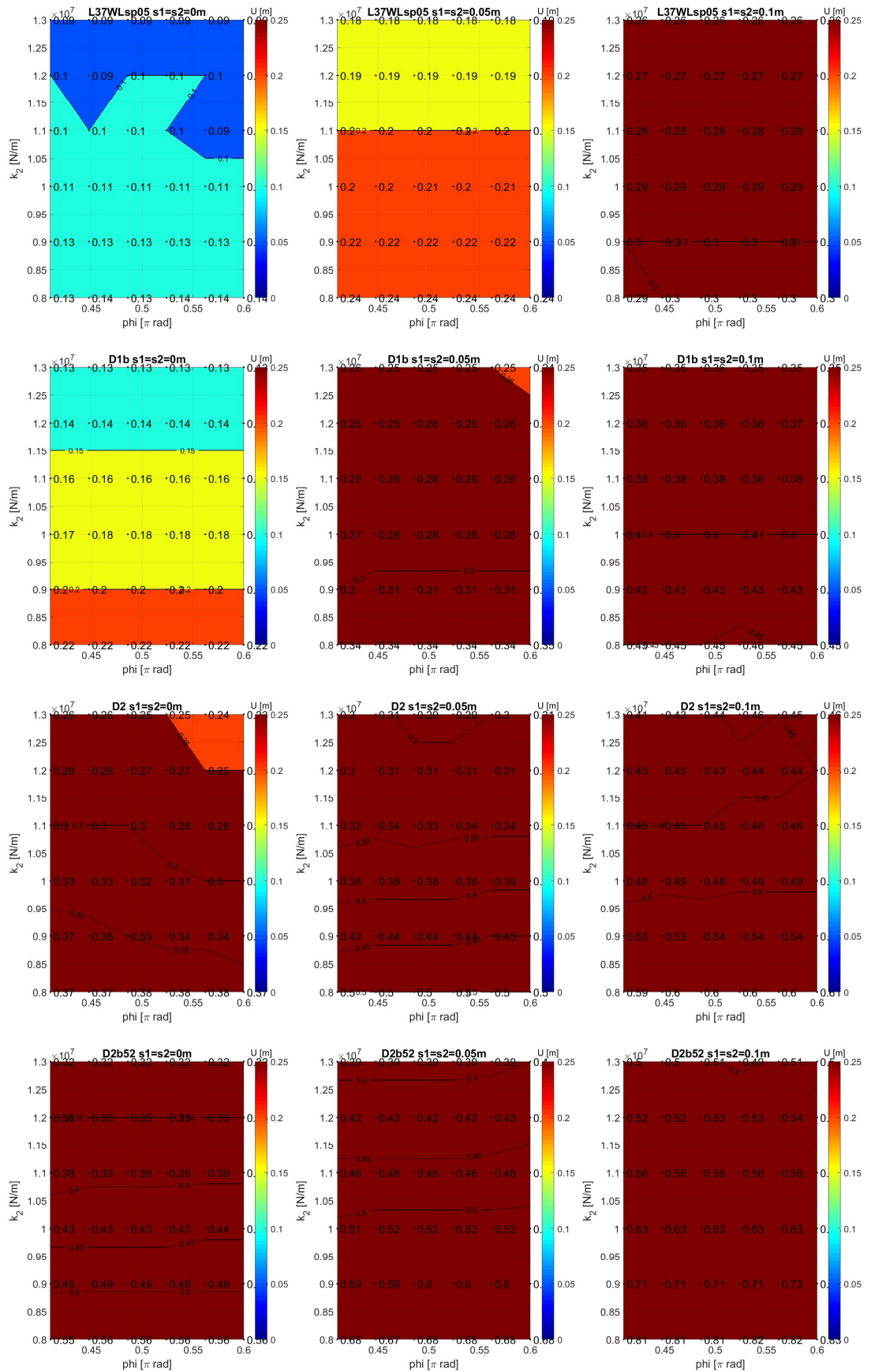
Tabel D.3. Resultaten gevoeligheidsberekeningen met lagere k_2 -waarde.

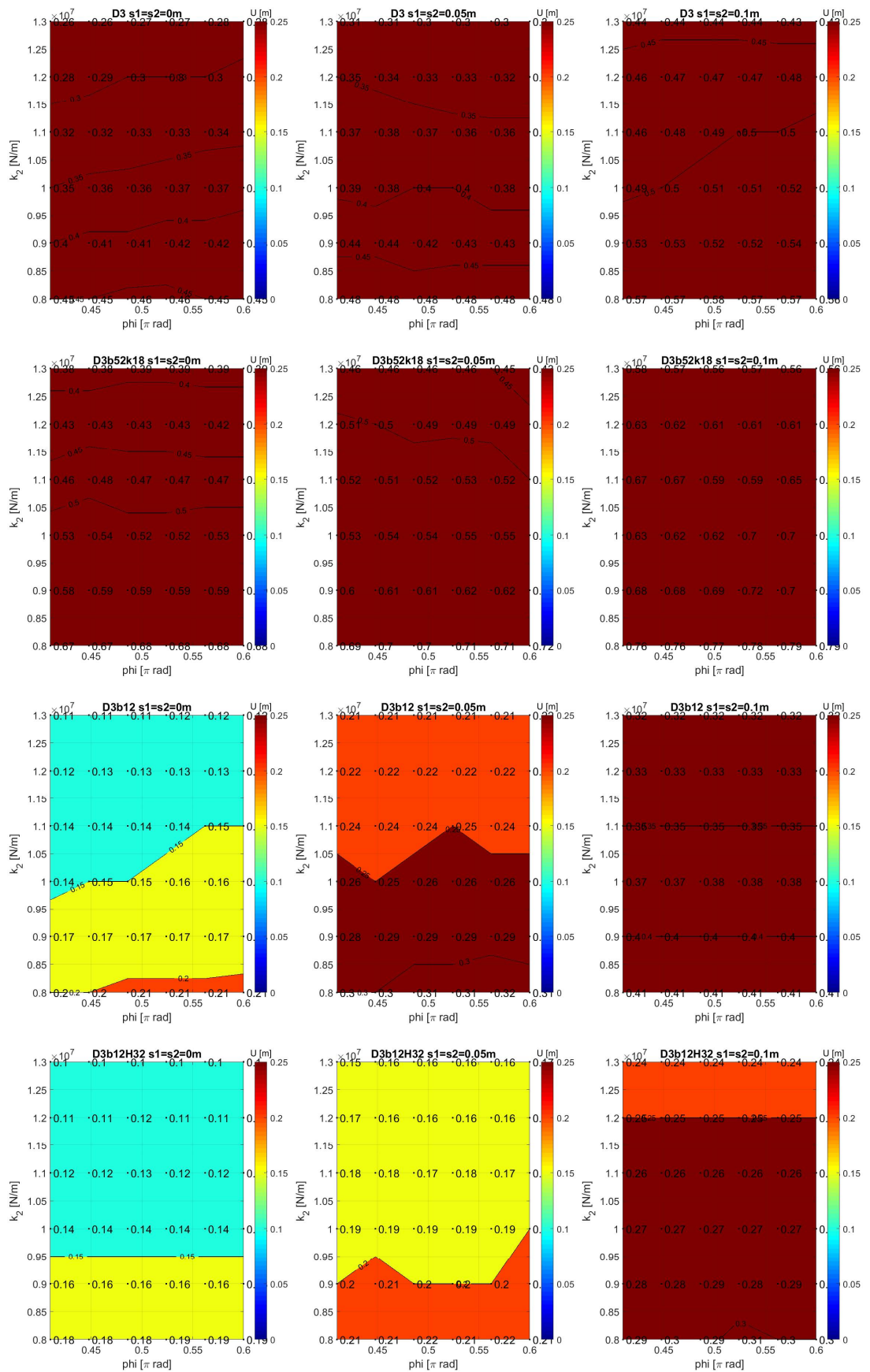
	s1,s2 [m]	H [m]	T [s]	golf steilheid [%]	β [°]	wl [m+N AP]	k_2 $\cdot 10^3$ [kN/ m]	$\varphi^*\pi$ [rad] (out)	$\varphi^*\pi$ [rad] (in)*	FSS [kN]	u** [m]	a [m/s ²]
L37WLsp05	0.05	1.6	5.0	4.1	27	2.50	18	0.41	0.41	1736	0.15	1.15
D1b	0.05	1.6	5.0	4.1	27	3.54	18	0.52	0.52	2948	0.21	1.80
D2	0.05	3.2	7.07	4.1	27	3.54	18	0.57	0.56	3520	0.25	1.59
D3	0.05	6.4	10.0	4.1	27	3.54	18	0.56	0.56	3740	0.26	3.08
D3β12	0.05	6.4	10.0	4.1	12	3.54	18	0.56	0.56	2809	0.21	3.76
D3β12H3.2	0.05	3.2	10.0	2.05	12	3.54	18	0.60	0.60	1792	0.15	1.85
L37WLsp05	idem						9	idem		1490	0.22	0
D1b							9			2308	0.31	0.75
D2							9			3532	0.44	1.61
D3							9			3382	0.43	2.69
D3β12							9			2125	0.29	3.32
D3β12H3.2							9			1429	0.21	1.44





Figuur D.6: Effect van veerconstante k_2 en faseverschuiving ϕ op de botskracht bij drie waarden voor de speling (kolommen) voor case D3 β 12





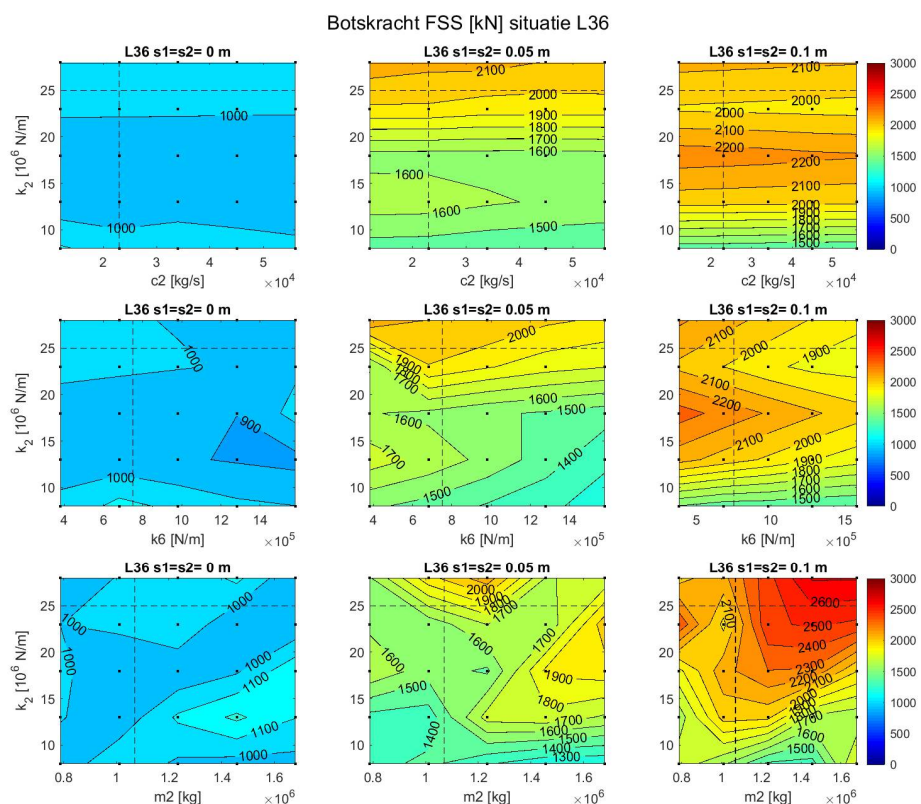
Figuur D.7: Effect van veerconstante k_2 en faseverschuiving ϕ op de uitwijking bij drie waarden voor de speling (kolommen)

D.4 Gevoeligheid voor algemene invoerparameters (k_2 , c_2 , k_6 , m_2 , speling)

In onderstaande figuur is de gevoeligheid van de botskracht voor vijf invoerparameters te zien. Dat zijn naast de veerconstante k_2 :

- parameter c_2 . Dit is een parameter welke de verdringing van het water in de sponning schematiseert tot een demperconstante, zie ook Paragraaf B.13 van Deltares (2021a).
- k_6 met als deelparameter k_{6a} . Dat is een parameter welke de verdringing van het water in de sponning schematiseert tot een veerstijfheid, benodigd om de invoerparameter k_6 te bepalen, zie ook Paragraaf B.11 van Deltares (2021a).
- m_2 met als deelparameter m_{water} . Dit is een parameter welke de toegevoegde watermassa schematiseert. Deze parameter is benodigd om de invoerparameter m_2 te bepalen, zie ook Paragraaf B.3 van Deltares (2021a).
- Parameters s_1 en s_2 . Dit zijn de parameters welke de spelingsruimten aan de noordzijde en aan de zuidzijde van de schuif representeren. Een kleinere spelingsruimte leidt naar verwachting tot significant lagere belastingen op de pijler maar is waarschijnlijk in de praktijk lastiger realiseerbaar over het gehele hoogtebereik van de schuiven vanwege het niet perfect verticaal staan van sommige van de pijlers.

De variatie in waarden voor deze parameters is bewust gekozen. Uitleg daarover is te vinden in Sectie 0.



Figuur D.8: Effect van c_2 (bovenste rij), k_6 (middelste rij) en m_2 (onderste rij) op de botskracht bij drie waarden voor de speling en diverse waarden voor veerconstante k_2 , voor situatie L36/L37

Elk paneel in Figuur D.8 geeft de botskracht weer voor 25 berekeningen (weergegeven met de zwarte puntjes), te weten vijf waarden voor k_2 op de y-as en vijf waarden voor respectievelijk c_2 , k_6 en m_2 op de x-as. De basisberekening waar de varianten van zijn afgeleid is L36, weergegeven met het kruispunt van de streepjeslijnen in elk paneel (opgemerkt wordt dat de waarde van k_2 bij L37 lager is, nl. $18 \cdot 10^6$). De kleuren en contourlijnen zijn geïnterpoleerd tussen de 25 berekeningen. In de linkerkolom is een speling van 0,00 m gehanteerd, de midden en rechterkolom hebben een speling van respectievelijk 0,05 m en 0,10 m, zowel voor de linker als de rechter pijler. Verder zijn de waarden gebruikt uit WLDelft (1984a,b), dus ook voor de golfgerelateerde parameters zoals de langskracht, dwarskracht en het faseverschil daartussen.

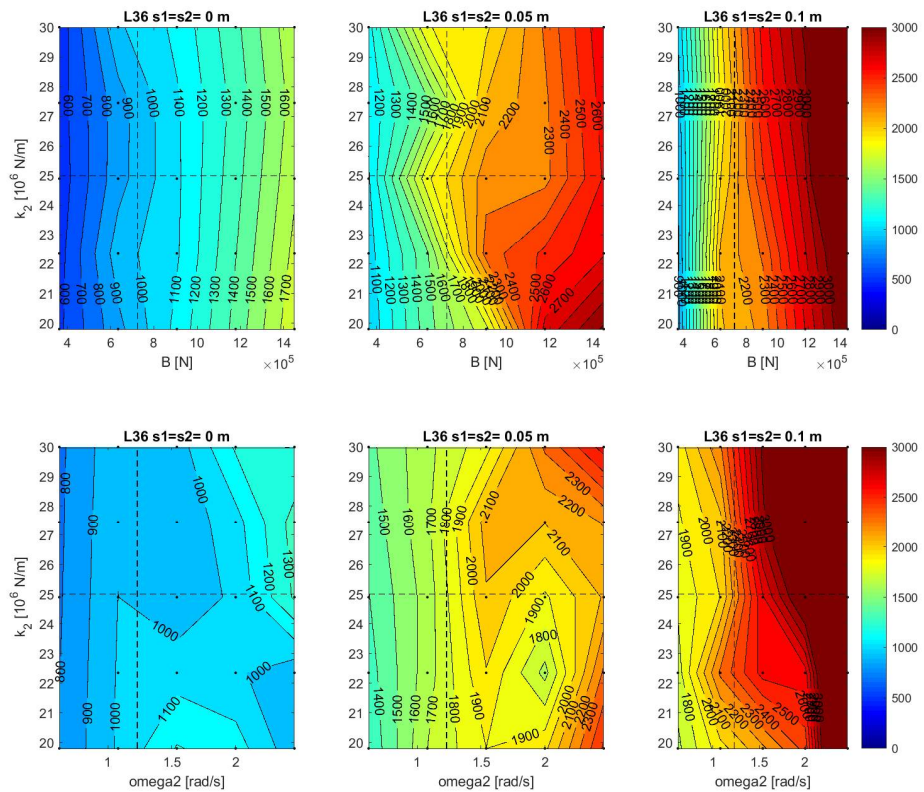
De belangrijkste bevindingen op basis van deze figuren voor L36/L37:

- Bij grotere speling zien we grotere botskrachten (vergelijk kolom 2 en 3)
- Ook bij 0,00 m speling treden er significante krachten op (zie linker kolom), zij het wel kleiner dan bij grotere spelingsvarianten
- Over het algemeen neemt de botskracht toe bij toenemende veerstijfheid k_2 (zie binnen een paneel oplopende kleuren van beneden naar boven), maar dit geldt niet voor alle berekende combinaties.
- Het effect van c_2 op de berekende botskracht is klein (zie de redelijk horizontaal lopende contourlijnen in de bovenste rij)
- Het effect van k_6 is bij lage veerconstanten minder dan bij hoge veerconstanten. Over het algemeen neemt de botskracht toe bij toenemende waarden van k_6 (zie rij 2)
- Het effect van m_2 is niet rechtlijnig (zie rij 3)
- De gehanteerde variatie in c_2 , k_6 en m_2 is grofweg 50%-200%, de resulterende botskrachten variëren tussen 1000kN en 2600kN.
- Op basis van deze figuur is niet te zeggen of de effecten voor andere casussen vergelijkbaar zijn.

D.5 Gevoeligheid voor langskrachten (amplitude B, frequentie ω_2)

In onderstaande figuur is de gevoeligheid van de botskracht voor de golf-langskracht-gerelateerde parameters B en Ω_2 te zien, bij drie spelingsvarianten en diverse waarden voor k_2 .

B is de amplitude van de sinusvormige langskracht. De frequentie Ω_2 is gelijk aan de golffrequentie. Voor casus L36/L37 is de waarde voor B 725kN, en $\Omega_2 = 1,23$ rad/s (met een golfperiode van 5 sec geldt: $2\pi/5s = 1.23$ rad/s). Die uitgangssituatie is in de panelen weergegeven met de stippellijnen. De opbouw van de figuur is daarmee vergelijkbaar met die van de vorige paragraaf.



Figuur D.9: Effect van B , Ω_2 op de botskracht bij drie waarden voor de speling (kolommen) en diverse waarden voor veerconstante k_2 , voor situatie L36. Bovenste rij beschrijft variaties in B en de onderste rij variaties in Ω_2 .

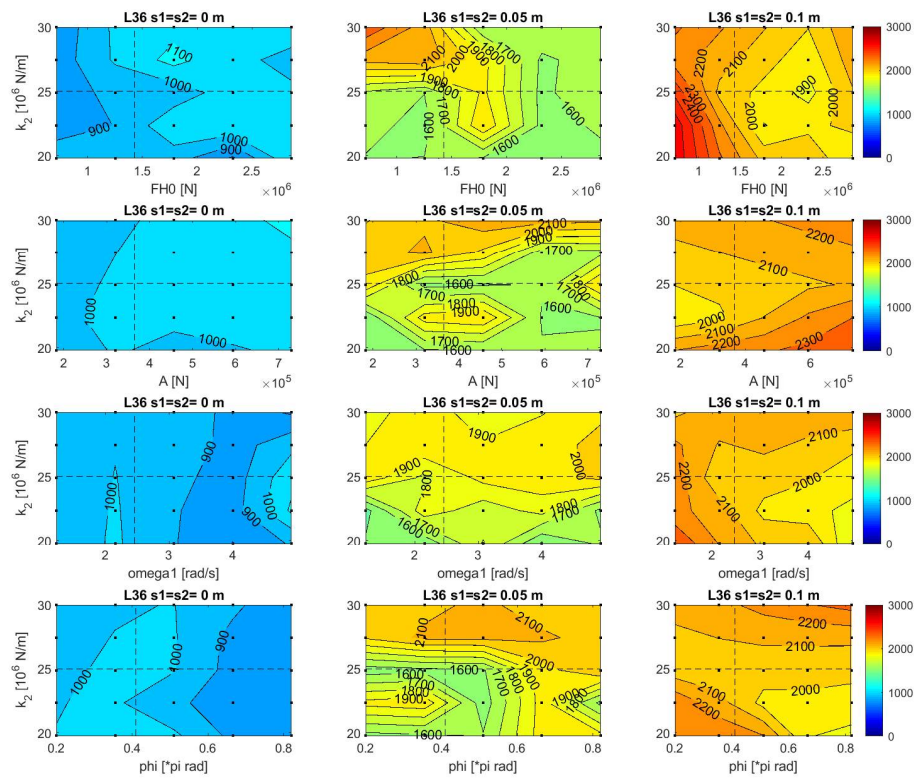
De belangrijkste bevindingen op basis van deze figuren voor L36/L37:

- Er is een duidelijk effect dat een grotere langskracht tot een grotere botskracht leidt (bovenste rij), ongeacht de waarde voor k_2 .
- Toenemende frequentie Ω_2 (afnemende golfperiode, in combinatie met constant gehouden golfhoogte) leidt in dit geval veelal tot een zwaardere botskracht. Dit beeld is echter niet helemaal rechtlijnig.

D.6 Gevoeligheid voor dwarskrachten (FH0, A, frequentie Ω_1 , φ)

In onderstaande figuur is de gevoeligheid van de botskracht voor de golf-dwarskracht-gerelateerde parameters te zien, bij drie spelingsvarianten en diverse waarden voor k_2 .

De dwarskracht (dwars op de schuif) wordt beschreven als de som van een constant deel (FH0) en een sinusvormig deel met amplitude A en frequentie Ω_1 . De fasehoek φ representeert de verschuiving tussen langs- en dwarskracht. De dwarskracht zorgt vooral voor wrijving tegen de schuifaanslagen en beperkt daarmee de bewegingen van de schuif en de grootte van de botskrachten. De opbouw van de figuur is vergelijkbaar met die van de vorige paragraaf.

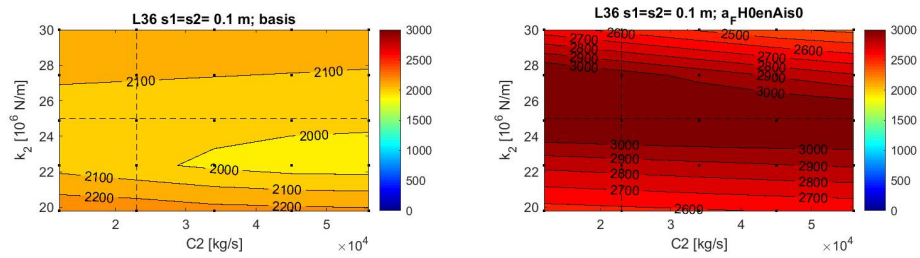


Figuur D.10: Effect van FH0 (bovenste rij), A (tweede rij), omega1 (derde rij) en phi (onderste rij) op de botskracht bij drie waarden voor de speling en diverse waarden voor veerconstante k2, voor situatie L36

De belangrijkste bevindingen op basis van deze figuren voor L36/L37:

- De botskracht blijkt gevoelig voor alle dwarskracht-gerelateerde parameters, maar er is geen eenduidige toe- of afname van de botskracht bij toenemende waarden voor die parameters. Er is daarbij ook afhankelijkheid van k2.
- Op basis van dit figuur in combinatie met de vorige figuur kunnen we stellen dat de gevoeligheid voor de langskracht sterker is dan voor de dwarskracht. Dit is conform de verwachting omdat de langskracht directer doorwerkt in het massa-demper-veersysteem dan de dwarskracht en daaruit volgende wrijving in langsricting via de schuifaanslagen.

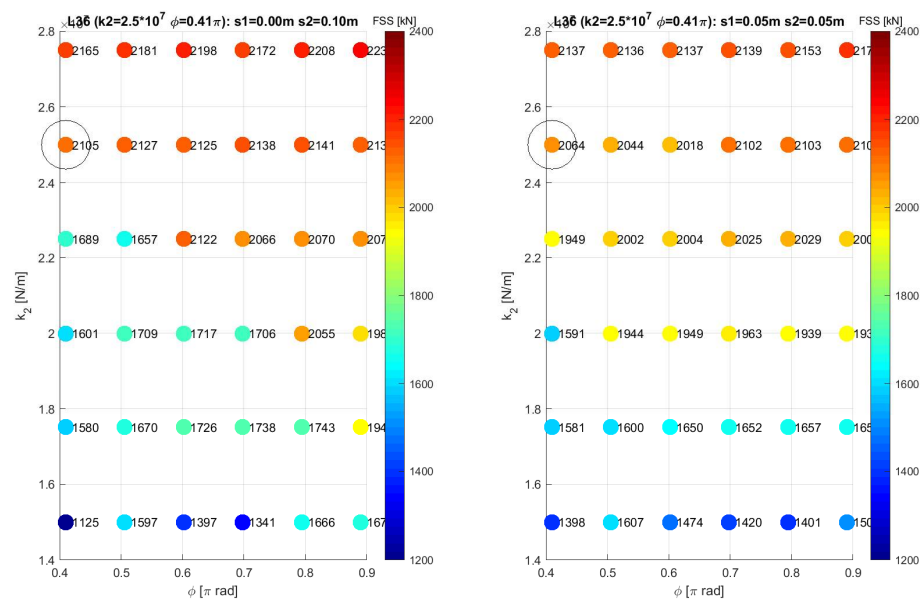
We hebben ook een aantal berekeningen gedaan waarbij de dwarskracht wordt weggelaten ($FH0=A=0$), zie onderstaande figuur waarbij de linkerkolom bepaald is met dwarskrachten en de rechterkolom zonder. Het is duidelijk dat het effect van de dwarskracht op de botskracht niet te verwaarlozen is.



Figuur D.11: Effect van het weglaten van dwarskracht op de botskracht bij speling $s_1 = s_2 = 0.1$ m en diverse waarden voor veerconstante k_2 , voor situatie L36. Links met invloed dwarskrachten; rechts zonder.

D.7 Gevoeligheid voor (niet) uniforme speling aan weerszijde van de schuif

Onderstaande figuur laat het verschil in botskracht zien tussen spelingssituatie A ($s_1 = 0,00$ m, $s_2 = 0,10$ m) en spelingssituatie B ($s_1 = s_2 = 0,05$ m) voor diverse waarden van k_2 en faseverschuiving ϕ , voor case L36. Bij de basisparameters van L36, weergegeven door de cirkel, is het verschil beperkt en zien we bij een gelijke verdeling van de speling over de linker en rechterzijde van de schuif iets lagere botskrachten ontstaan. Echter, er zijn combinaties van k_2 en ϕ waarbij spelingssituatie A hogere botskrachten oplevert maar het omgekeerde gebeurt ook. Hier is dus geen eenduidige conclusie te trekken.



Figuur D.12: Effect van verdeling van de speling: links $s_1=0$ m, $s_2=0.10$ m, rechts $s_1=s_2=0.05$ m en diverse waarden voor veerconstante k_2 en faseverschuiving ϕ , voor situatie L36

D.8 Overweging bij keuze van de waarden van c_2 , k_6 , en m_2 voor de gevoeligheidsanalyse

Een aantal invoerparameters voor het Python rekenmodel is onzeker (c_2 , m_2 , k_6 , s_1 , s_2 , FH0) en daarvoor is door Deltares (2021a) een gevoeligheidsstudie aanbevolen. Daarbij wordt opgemerkt dat de parameter m_{water} een parameter is welke benodigd is om m_2 te bepalen en dat de parameter k_{6a} een parameter is om de parameter k_6 te bepalen. De onderbouwing van te hanteren variatie van de eerste drie genoemde parameters wordt in de volgende paragrafen beschreven.

De overige parameters (FH0, A, Ω_1 , Φ) hebben verschillende waarden overeenkomstig de verschillende beschouwde situaties. Dit komt doordat langs- en dwarskrachten bij deze situaties verschillen (m.n. als gevolg van andere inkomende golfcondities per situatie). Aanbevolen wordt om deze parameters per situatie toe te passen op basis van de voor die situatie geldende inkomende golfcondities.

D.8.1 Parameter c_2

De parameter c_2 (Deltares, 2021 Bijlage B.13) representeert de rekenkundige demping als gevolg van de aanwezigheid van het water in de sponning. In de schematisatie van WLDelft (1984a) wordt dit water onder- of bovenlangs verdrongen als de schuif in de richting van de sponning beweegt en geldt de volgende vergelijking:

$$c_2 = \alpha \rho \frac{b^3 h_0^3}{4A^2} \dot{u}$$

α	= 0,75	vormparameter voor het drukverloop (WLDelft, 1984, pag. 143)
ρ	= 1025 kg/m ³	dichtheid van het water
A		gemiddelde horizontale oppervlakte sponningsruimte [m ²]. WLDelft, 1984a, pag. 143) geeft waarden per situatie.
b	= 4 m	breedte eindhar (WLDelft, 1984a, pag. 143)
h_0		waterkolom in de sponning t.o.v. onderkant schuif [m]. WLDelft (1984a, pag. 143) geeft waarden per situatie.
\dot{u}	= 0,1 m/s	gemiddelde snelheid. Zie grafieken uit Bijlage D van Deltares (2021a) en de opmerking in WL Delft, 1984a (blz 143) dat in verband met het lineariseren van c_2 een gemiddelde waarde gekozen is van 0.1 m/s.

De waarden van α en \dot{u} achten we onzeker en daarom variëren we deze en bepalen de bijbehorende waarde van c_2 . Bovendien beschouwen we de dubbele en halve waarde van de oorspronkelijk door WL Delft (1984) gehanteerde c_2 . Op basis van die variaties doen we in Tabel D.6 een voorstel voor minimale en maximale waarden van c_2 om te beschouwen in de gevoeligheidsanalyse

Tabel D.4: Invoerparameters ter bepaling van c_2 volgens WLDelft, 1984, pag. 143

	situatie uit WL 1984	c_2 [*10 ⁵ kg/s]	α [-]	b [m]	h_0 [m]	A1 [m ²]	A2 [m ²]	A [m ²]	\dot{u} [m/s]
L31	2	0.01	0.75	4	2.1	5	3	5	0.1
L33	4	0.15			5.7			3.9	
L36	7	0.23			6.6			3.8	

Tabel D.5: Variatie in c_2 t.b.v. gevoeligheidsonderzoek [$\cdot 10^5$ kg/s]

	situatie uit WL 1984	$\dot{u}=0.2$	c_2 bij $\dot{u}=0.2$ $\alpha=0.85$	c_2 bij $\dot{u}=0.08$ $\alpha=0.65$	$c_2 \cdot 2$	$c_2/2$	c_2 min	c_2 max
L31	2	0.005	0.01	0.003	0.01	0.002	0.002	0.01
L33	4	0.30	0.34	0.10	0.30	0.07	0.07	0.34
L36	7	0.49	0.56	0.17	0.49	0.12	0.12	0.56

D.8.2 Parameter m_2 (m_{water})

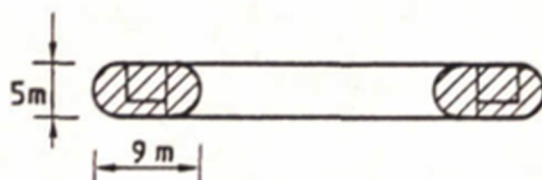
Massa m_2 bestaat uit de massa van de schuif (m_{schuif}) + de toegevoegde watermassa (m_{water})

$$m_2 = m_{schuif} + m_{water} \quad (19)$$

De massa van de schuif m_{schuif} is bekend voor de drie gegeven situaties. Deze waarden zijn weergegeven in Tabel D.6.

De massa van het water is afhankelijk van de indompelingsdiepte (h_0). De waarde van de indompelingsdiepte is weergegeven in Tabel D.6. Door WLDelft (1984a, pag. 116) is de volgende vergelijking voorgesteld (ondersteund door Figuur D.13):

$$m_w = 2 \cdot 5m \cdot 9m \cdot 1000kg / m^3 \cdot h_0 = 90.000h_0 \quad (20)$$



Figuur D.13 Boven-aanzicht schuif t.b.v. ruwe schatting toegevoegde watermassa volgens WLDelft (1984a, pag. 105)

Voor achtergronden met betrekking tot deze formule wordt verwezen naar Deltares (2021a, Bijlage B.3). Het is echter onzeker in hoeverre dit een correcte inschatting is. Om die reden wordt een gevoeligheidsanalyse aanbevolen met een boven- en ondergrens van de toegevoegde watermassa welke een factor twee kleiner en een factor twee groter is:

$$m_{water,min} = 0,5m_{water} = 45.000h_0 \quad (21)$$

$$m_{water,max} = 2m_{water} = 180.000h_0 \quad (22)$$

Dit kan vervolgens worden omgerekend naar de totale watermassa m_2 . Een overzicht van de waarden voor de specifieke cases is weergegeven in Tabel D.6.

Tabel D.6. Overzicht parameters gerelateerd aan m_2 ($=m_{schuif} + m_{water}$)

Casus	h_0 (m)	m_{schuif}^* (kg)	$m_{water,inschatting}$ (kg)	$m_{water,min}$ (kg)	$m_{water,max}$ (kg)	m_2 inschatting (kg)	m_2 min (kg)	m_2 max (kg)	m_{2max}/m_{2min} (-)
L31 (Situatie 2)	2.1	2.77E+05	1.89E+05	9.45E+04	3.78E+05	4.66E+05	3.72E+05	6.55E+05	1.8
L33 (Situatie 4)	5.7	4.26E+05	5.13E+05	2.57E+05	1.03E+06	9.39E+05	6.83E+05	1.45E+06	2.1
L36/L37 (Situatie 7)	6.6	4.90E+05	5.94E+05	2.97E+05	1.19E+06	1.08E+06	7.87E+05	1.68E+06	2.1

Voor de gevoeligheidsanalyse dient de waarde van invoerparameter m_2 gevarieerd te worden tussen m_{2min} en m_{2max} zoals is aangegeven in Tabel D.6. Dit zijn dus per casus andere

waarden. In de presentatie van de resultaten dient echter niet m_2 te worden gepresenteerd maar de waarden van m_{water} , dit is immers de parameter waarover de gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd.

D.8.3 Parameter k_2

De parameter k_2 representeert de rekenkundige gelineariseerde veerstijfheid van de zijaanslag. Bij de drie situaties met de oorspronkelijk voorziene 'stootkussen' was door WLDelft (1984a) een waarden van $k_2 = 2,5 \cdot 10^7$ N/m aangehouden (berekening L31, L33 en L36). Toen bleek dat het ontwerp niet voldeed is een nieuwe zijaanslag ontworpen; dit betrof een zogenoemde shockcell waarbij een rekenkundige gelineariseerde veerstijfheid van $k_2 = 1,8 \cdot 10^7$ N/m is aangehouden.

Hoewel het lastig is om de uiterste grenzen van deze waarden in te schatten wordt het volgende bereik op basis van een inschatting aanbevolen:

$1,5 \cdot 10^7$ N/m < k_2 < $2,5 \cdot 10^7$ N/m. Echter, bij nader inzien is de wens van de opdrachtgever om ook lagere waarden te beschouwen nabij: $0,9 \cdot 10^7$ N/m, dit is in Bijlage D.3 gebeurd.

D.8.4 Parameter k_6 (k_{6a})

De parameter k_6 is een rekenkundige veerstijfheid gegeven door de som van

- k_{6a} : verdringing van het water in de sponning (ook wel $k_{6\text{water}}$ genoemd (blz 144 van WLDelft, 1984) en
- k_{6b} : pendeleffect (ook wel k_p genoemd blz. 144 van WLDelft, 1984)

$$k_{6A} = \beta \cdot 2 \rho g \frac{b^2 h_0^2}{A_s} \quad k_{6b} = \frac{G}{l}$$

β	= 0.167	coëfficiënt die aangeeft welk deel van het water naar boven of naar beneden toe wegstroomt (WLDelft, 1984, pag. 143 en 117)
ρ	= 1025 kg/m ³	dichtheid van het water
g	= 9.81 m/s ²	zwaartekrachtversnelling
b	= 4 m	breedte eindhar (WLDelft, 1984a, pag. 143)
h_0		waterkolom in de sponning t.o.v. onderkant schuif [m] (blz 143 uit WL Delft (1984a) geeft waarden per situatie)
A_s	= 6.3 m	bruto doorsnede van de sponningsruimte t.p.v. waterspiegel (WLDelft, 1984, pag. 117)
G	=	gewicht van schuif (WLDelft, 1984, pag. 144) ofwel massa _{schuif} *g
l	=	lengte van de ophanging van de schuif (WLDelft, 1984, pag. 144)

De waarden van β en G achten we enigszins onzeker en daarom variëren we ze. De onzekerheid in G zelf is beperkt maar de manier van schematiseren en achterwege laten van wrijving, extra watermassa etc. maakt gevoeligheidsanalyse nuttig. Bovendien bepalen we de dubbele en halve waarde van k_6 . In Tabel D.7 zijn de invoerparameters welke door WLDelft (1984a,b) zijn gehanteerd weergegeven. In Tabel D.8 doen we een voorstel voor minimale en maximale waarden van k_6 om te beschouwen in de gevoeligheidsanalyse

Tabel D.7: Invoerparameters ter bepaling van k_6 volgens WLDelft, 1984, pag. 116/117

	situatie uit WL 1984	k_6 [*10 ⁶ N/m]	k_{6a} [*10 ⁶ N/m]	k_{6b} [*10 ⁶ N/m]	β [-]	b [m]	h_0 [m]	A_s [m ²]	G [N]	l [m]
L31	2	0.42	0.05	0.37	0.167	4	2.1	6.3	2.72	7.32
L33	4	0.65	0.28	0.37			5.7		4.18	11.21
L36	7	0.75	0.36	0.39			6.6		4.81	12.28

Tabel D.8: Variatie in k_6 t.b.v. gevoeligheidsonderzoek [$\cdot 10^6$ N/m]

k_6	situatie uit WL 1984	$\beta=0.5$ $G=G*1.25$	$\beta=0.125$ $G=G*0.75$	$k_6/2$	k_6*2	k_6 min	k_6 max
L31	2	0.58	0.38	0.20	0.82	0.20	0.82
L33	4	1.28	0.54	0.32	1.30	0.32	1.30
L36	7	1.58	0.63	0.38	1.52	0.38	1.58

D.8.5 Parameter s_1 en s_2

De parameters s_1 en s_2 representeren de speling tussen de zijaanslag en de sponning. Dit zijn twee waarden omdat er speling is aan de noordzijde van de schuif en aan de zuidzijde van de schuif. De verwachting is dat deze parameters een grote invloed hebben op de maximale botskrachten.

RWS heeft een zeer uitgebreid Excel-bestand (Deformatiemetingen_OSK_Tussenafst_2020_v3.8.xlsx) met Deltares gedeeld met daarin per schuif en per zijde de op diverse hoogtes gemeten speling tussen schuif en pijler. De grootste speling (uitgaande van lage stand) bedraagt ter plaatse van de zijaanslag voor schuiven met een hoogte van 5.9 7.9, 8.9/9.9, 10.9/11.9 m hoogte: **30 mm, 43 mm, 72 mm, 65 mm**. Die 72 mm zit bij Schaar 7 en 8.

In de gevoeligheidsberekeningen gaan we uit van 0, 5 en 10 cm als representatieve en realistische waarden.

E Schematisatie loodrechte kracht

Deze bijlage gaat verder in op de schematisatie van de loodrechte kracht en kan worden gezien als een nadere uitwerking van Bijlage C. Het doel van deze bijlage is om de schematisatie van de optredende krachten op de pijler beter te doorgronden. De loodrechte krachten op de schuif zijn van belang om de wrijvingskrachten te bepalen. De loodrechte krachten op de schuif zijn in WLDelft (1984) gedefinieerd als:

$$FH_{\perp}(t) = FH_0 + A \sin(\Omega_1 t + \phi) \quad (23)$$

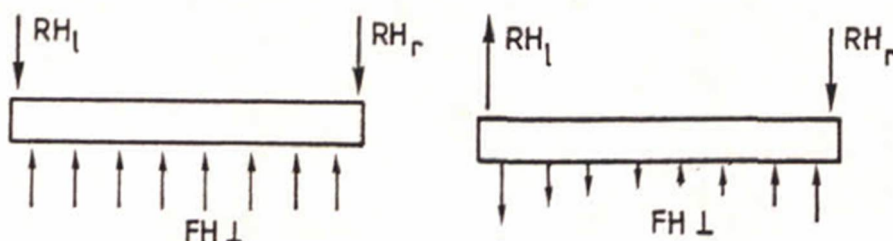
In WLDelft (1984a, pag. 100) was de wrijvingskracht in eerste instantie gedefinieerd als:

$$FW(t) = f \cdot |RH(t)| \quad (24)$$

Waarbij RH de horizontale reactie kracht welke gelijk is aan de horizontale belasting loodrecht op de schuif:

$$RH(t) = FH_{\perp}(t) \quad (25)$$

Echter, zoals door WLDelft (1984a, pag. 100) ook met de absoluut-tekenen is aangegeven in Vgl. (24) is alleen geldig wanneer de twee componenten van RH, nl. RH_l en RH_r hetzelfde teken hebben. Dit is geïllustreerd in Figuur E.1.



Figuur E.1. Links: RH_l en RH_r hebben hetzelfde teken, zowel VGL equation reference goes here. Rechts RH_l en RH_r hebben niet hetzelfde teken (Bron: WLDelft, 1984)

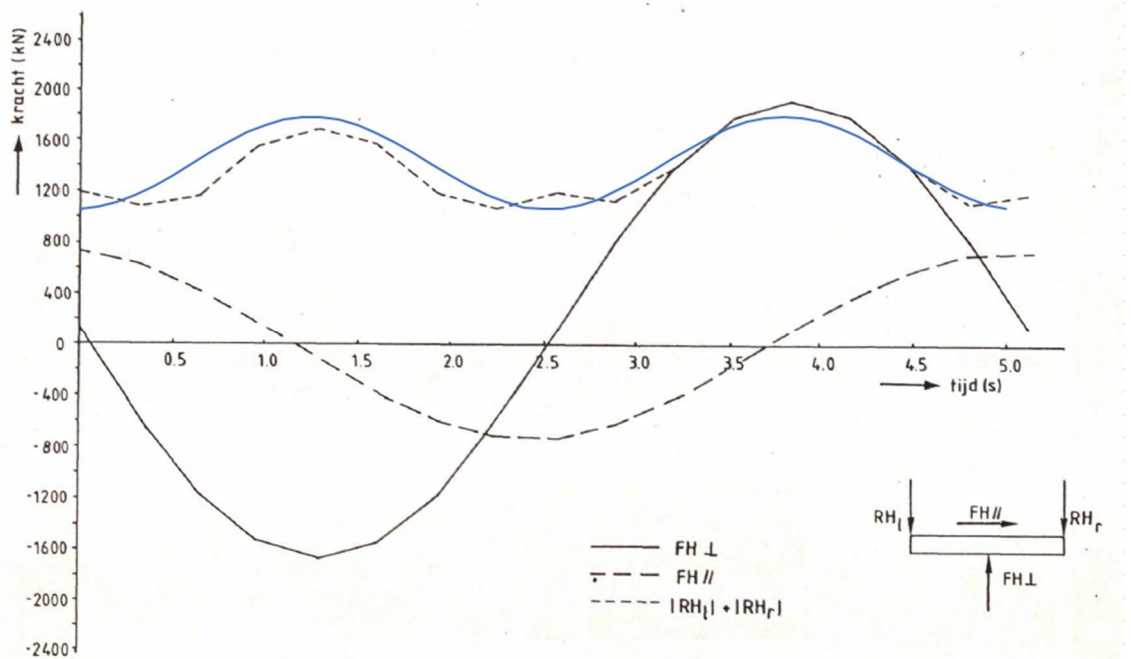
In het geval dat het teken niet gelijk is met de wrijvingskracht wordt de wrijvingskracht gedefinieerd als:

$$FW(t) = f \cdot (|RH_l(t)| + |RH_r|) \quad (26)$$

Bij de berekeningen L30-L36 van WLDelft (1984) is er ook uitgegaan van Vgl. (26) (zie WLDelft, 1984, pag. 141). Daarbij is door WLDelft (1984a, pag. 142) aangegeven dat de som van de horizontale oplegreacties links en rechts van de schuif (absoluut) is aangegeven in bijbehorende figuren en dat deze tot een sinus zijn geschematiseerd in het rekenmodel. Een voorbeeld is hieronder gegeven voor Situatie 7 (L36). Daarbij is de volgende input volgens WLDelft (1984b, Tabel 5) van toepassing.

$$\begin{aligned} FH_0 &= 1430 \text{ kN} \\ A &= 365 \text{ kN} \\ \Omega_1 &= 2.46 \text{ rad} \\ \phi &= +0.41\pi \text{ rad} \end{aligned}$$

De bovenstaande input is toegepast op Vgl. (23). Het resultaat is de blauwe lijn in Figuur E.2. Daar zijn tevens de resultaten uit WLDelft (1984b, Fig. 49 g) aan toegevoegd.



Figuur E.2. Horizontale krachten. De zwarte lijnen zijn overgenomen uit WLDelft (1984b, Fig. 49g). De blauwe lijn is de lijn gebaseerd op de door WLDelft (1984b, tabel 5) gerapporteerde waarden van FH_0 , A en Ω_1 en Vgl. (23)

Er valt te zien dat de blauwe lijn (Vgl. (23)) en de door WLDelft (1984b, Tabel 5) gehanteerde invoerparameters de tot sinus geschematiseerde parameter van $|RH_l| + |RH_r|$ is. Daarmee is aangetoond dat FH_0 niet meer als constante stromings- of vervalparameter is gehanteerd maar alleen als 'fitparameter', namelijk de verticale offset. De invoergetallen FH_0 , A , Ω_1 en ϕ zijn dus niet van toepassing op het bepalen van FH_{\perp} maar op $|RH_l| + |RH_r|$.

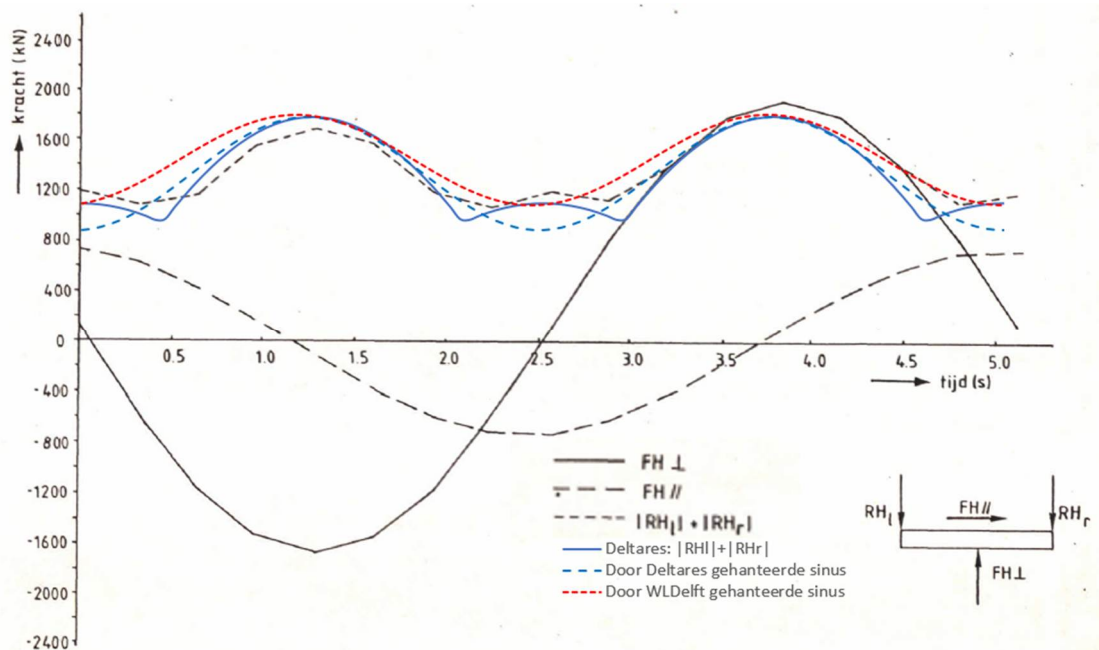
F Vergelijking methode Deltares en methode Deltadienst / WLDelft

F.1 Inleiding

In deze bijlage wordt de door Deltares (dit rapport) gehanteerde methode vergeleken met de door WLDelft (1984a,b) gepresenteerde uitkomsten. Dit wordt gedaan voor casus L37 van WLDelft (1984a,b). Daarbij zijn alle 29 invoerparameters van het massa-demperveersysteem gelijk gehouden met uitzondering van de parameters gerelateerd aan de langskrachten (B en Ω_2) en de parameters gerelateerd aan de loodrechte krachten (FH_0 , A , Ω_2 en ϕ). De manier waarop de door WLDelft (1984a,b) gehanteerde parameters zijn bepaald is helaas niet meer terug te vinden, wel zijn de gehanteerde waarden teruggevonden. In onderstaande paragrafen worden de langskrachten en de loodrechte krachten door golven inwerkend op de schuiven van WLDelft (1984a,b) en zoals deze in dit rapport (Bijlage C) zijn afgeleid met elkaar vergeleken.

F.2 Krachten als gevolg van loodrechte golfkracht op de schuif

Een impressie van het krachtsverloop zoals bepaald door WLDelft (1984a,b) en zoals in voorliggend rapport is afgeleid is grafisch weergegeven in Figuur F.1. Zoals in Bijlage E is aangegeven ligt de primaire interesse in de waarde $|RH_l| + |RH_r|$.



Figuur F.1. Vergelijking van de door Deltares en WLDelft (1984b, Fig. 49g) berekende krachten op de pijlers.

In Figuur F.1 zijn verschillende krachten weergegeven:

- De (bovenste) zwarte stippellijn is de door de Deltadienst (bron: WLDelft, 1984b, Fig. 49g) bepaalde waarde van de som van de absolute waarden op de pijlers: $(|RH_l| + |RH_r|)$.
- De rode stippellijn is de door WLDelft (1984a) gehanteerde geschematiseerde sinusvorm van $(|RH_l| + |RH_r|)$ waarbij de sinusvorm is geconstrueerd met behulp van de

door WLDelft (1984b) gerapporteerde waarden van FH_0 , A en Ω_2 . Daarbij geldt:
 $FH_{\text{loodrecht}} = FH_0 + A \sin(\Omega_2 t + \varphi)$.

- De blauwe doorgetrokken lijn is de door Deltares berekende waarde van de som van de absolute waarden op de pijlers: $(RH_l + |RH_r|)$.
- De onderbroken blauwe lijn is een geschematiseerde sinusvorm hier afgeregeld als benaderde weergave van de blauwe doorgetrokken lijn. Uit deze sinusvorm zijn de te hanteren waarden van FH_0 , A en Ω_2 afgeleid.
- De (voorlopige) waarde van φ is voor de methode van Deltares zodanig gekozen dat de tot sinus geschematiseerde lijn (blauwe stippellijn) zo goed mogelijk overeenkomen met de bovenste zwarte stippellijn.

De waarden van de offset (FH_0), de amplitude (A), de fasehoek (Ω_1) en de faseverschuiving (φ) van de hier afgeleide methode (blauwe stippellijn) is weergegeven in Tabel F.1.

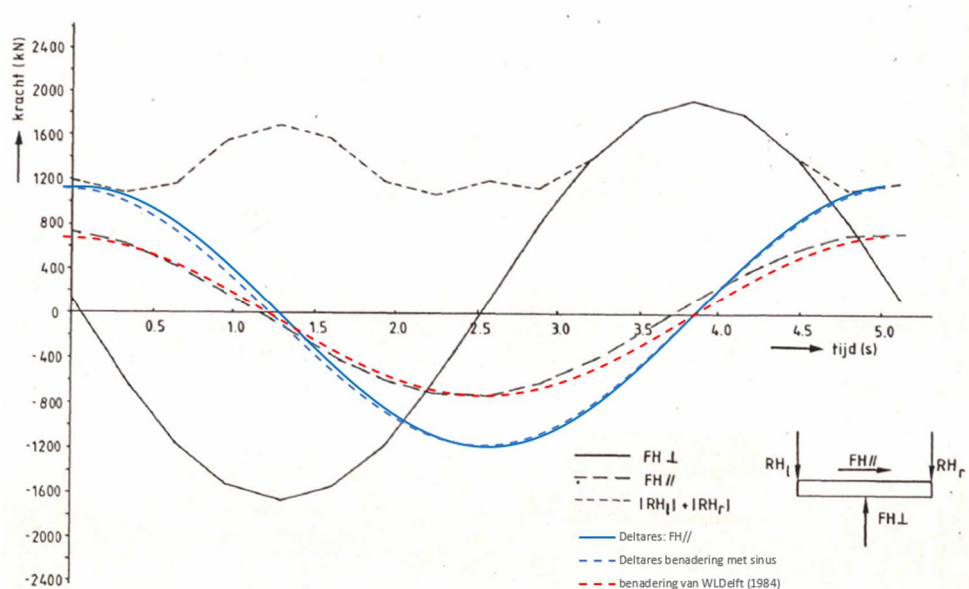
Tabel F.1. Door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarden en door Deltares (voorliggend rapport) bepaalde waarden voor te hanteren sinusvorm voor de normaalkracht: $F = FH_0 + A \sin(\Omega_1 + \varphi)$

		WLDelft (1984a,b)	Deltares (dit rapport)
FH_0 (N)	offset	$1.43 \cdot 10^6$	$1.32 \cdot 10^6$
A (N)	amplitude	$3.65 \cdot 10^5$	$4.53 \cdot 10^5$
Ω_1 (rad/s)	fasehoek	2.46	2.50
φ (rad)	faseverschuiving	+0.41pi	-0.41pi

Wij concluderen op basis van deze resultaten dat de bepaling van de parameters FH_0 , A en Ω_2 goed overeen komt met de door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarden. Een uitzondering daarop is de faseverschuiving (φ) welke apart wordt beschreven in Paragraaf F.4.

F.3 Krachten in langsrichting

Een impressie van het krachtsverloop in langsrichting zoals bepaald door WLDelft (1984a,b) en zoals in voorliggend rapport is afgeleid is grafisch weergegeven in Figuur F.1.



Figuur F.2 Vergelijking van de door Deltares en WLDelft (1984a,b) berekende langskrachten op een schuif. De dwarskracht-waarden uit de oorspronkelijke studie die ook in deze afbeelding staan wordt hier niet beschouwd.

In Figuur F.2 zijn verschillende krachten weergegeven:

- De (onderste) zwarte stippellijn is de door de Deltadienst (bron: WLDelft, 1984b, Fig. 49g) bepaalde waarde van de langskracht.
- De rode stippellijn is een benadering van bovengenoemde langskracht door middel van het gebruik van een sinusfunctie. Daarbij is de sinusfunctie gebaseerd op de door WLDelft (1984b, tabel 5) gerapporteerde waarden van de amplitude (B) en fasehoek Ω_2 . De faseverschuiving (φ) is zodanig gekozen dat deze zo goed mogelijk overeenkomt met de door WLDelft (1984b, Fig. 49g) weergegeven lijn (i.e. de zwarte stippellijn).
- De blauwe doorgetrokken lijn is de door Deltares berekende waarde van de langskracht.
- De blauwe onderbroken lijn is de benadering van bovengenoemde langskracht door middel van het gebruik van een sinusfunctie

De waarden van de amplitude (B), de fasehoek (Ω_2) en de faseverschuiving (φ) van de hier afgeleide methode (blauwe stippellijn) en de door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarden zijn weergegeven in Tabel F.2.

Tabel F.2. Door WLDelft (1984a,b) gerapporteerde waarden en door Deltares (voorliggend rapport) bepaalde waarden voor te hanteren sinusvorm voor de langskracht: $F_{//} = B \sin(\Omega_2)$

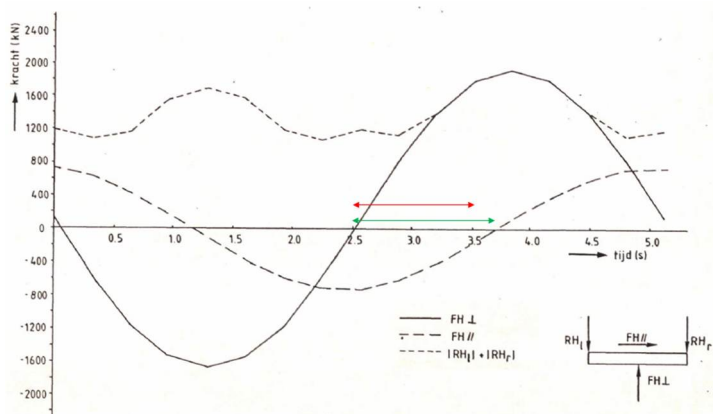
		WLDelft (1984a,b) (rode stippellijn)	Deltares (dit rapport) (blauwe stippellijn)
B (N)	amplitude	$7.25 \cdot 10^5$	$11.8 \cdot 10^5$
Ω_2 (rad/s)	fasehoek	1.23	1.23
φ (rad)	faseverschuiving	0.5pi	0.5pi

Te zien valt dat de waarden van de amplitude van de langskracht (B) zoals in de huidige studie is afgeleid aanzienlijk hoger is dan de waarde welke door WLDelft (1984a,b) is gerapporteerd. Hiervoor is geen verklaring gevonden; zoals eerder genoemd is de onderbouwing van de kracht zoals deze door WLDelft (1984a,b) is gerapporteerd niet teruggevonden, waardoor die afleiding niet kan worden gecontroleerd.

F.4 Faseverschuiving

De faseverschuiving φ is volgens WLDelft (1984, pag. 101) als volgt gedefinieerd: “fasehoek tussen het variërende deel van de horizontale belasting loodrecht op de schuif en het variërende deel van de horizontale belasting evenwijdig aan de schuif”.

Bovenstaande is toegepast op de door WLDelft (1984b) gepresenteerde grafiek welke tevens is weergegeven in Figuur F.3.



Figuur F.3 krachten volgens WLDelft (1984b). In het groen is het faseverschil weergegeven. Dit is gelijk aan $1.2\text{ s} (=0.48\pi\text{ radialen} = 1.51\text{ radialen} = 87\text{ graden})$. In het rood is de door WLDelft gehanteerde waarde van 0.41π radialen weergegeven.

De door WLDelft (1984) gepresenteerde aanpak lijkt door WLDelft niet correct te zijn doorgevoerd; uit Figuur F.3 blijkt dat het faseverschil tussen de horizontale belasting loodrecht op de schuif en evenwijdig aan de schuif 0.48π is en niet 0.41π . In de door Deltares gehanteerde aanpak wordt als faseverschil de aanpak conform de groene lijn in Figuur F.3 gehanteerd.

F.5 Uitkomsten massa-demper-veersysteem

De door WLDelft (1984a,b) en in dit rapport afgeleide waarden welke de langs- en dwarskrachten beschrijven zijn beide toegepast in combinatie met het rekenmodel op basis van een massa-demper-veersysteem. Uitgangspunt voor de berekeningen is berekening L37 van WLDelft (1984a,b). De overige 24 parameters zijn daarbij gelijk gehouden. De belangrijkste uitkomsten van het van het massa-demper-veer systeem zijn de optredende botskrachten, de optredende versnellingen en de maximum verplaatsing van de schuif. De berekende waarden zijn weergegeven in Tabel F.3.

Tabel F.3. Maximum toegestane waarde, door WLDelft (1984a,b) bepaalde optredende waarden en door Deltares (dit rapport) bepaalde optredende waarden van de botskracht tussen pijler en zijaanslag, versnelling van de schuif in langsricting en maximum verplaatsing van de schuif in langsricting. Beide berekeningen zijn van toepassing op 'L37'.

	Maximum toegestane waarde	WLDelft (1984a,b) L37	Voorliggend rapport
Maximum botskracht F (kN)	1800	2060	3056
Maximum indrukking zijaanslag (m)	0.13	0.114	0.17
Maximum versnelling a (m/s ²)	3.0	1.63	2.06

Op basis van de resultaten in Tabel F.3 wordt het volgende geconcludeerd:

- de door WLDelft (1984a,b) berekende waarde van de maximum optredende botskracht is groter dan de toegestane waarde. Daarbij wordt opgemerkt dat in WLDelft (1984a,b) geen expliciete conclusie is gevonden ten aanzien van het (niet) voldoen van casus L37 aan de eisen. WLDelft (1984a, pag. 146) concludeert alleen het volgende: *'Het blijkt dat de nieuwe afschuiffender in combinatie met een kleinere speling tussen schuif en pijler het gewenste effect van een lagere botskracht oplevert'*.
- Inzet van de in dit rapport gehanteerde methode geeft aan dat volgens die beschrijving er aanzienlijk grotere waarden worden gevonden dan de methode welke door de Deltadienst is gebruikt: orde 50% voor de botskracht en indrukking van de zijaanslag en orde 25% voor de optredende versnellingen van de schuif.

G Rekenmodel met evanescent modes

Memo

To

Paul van Steeg

Date

September 2021

Our reference

Golfkrachten op een gedeeltelijkA6
geopende schuif

Number of pages**Contact person**

Mart Borsboom

Direct line

+31 (0)88 335 8435

E-mail

mart.borsboom@deltares.nl

Subject

Afleiding van lineaire golfkrachten die worden uitgeoefend op een gedeeltelijk geopende schuif

A Lineaire golfkracht op een schuif in een stormvloedkering

A.1 Introductie

Deltares is gevraagd om de golfkrachten op een schuif in de Oosterscheldekering te bepalen aan de hand van een ongedocumenteerde procedure uit de tijd dat de kering is ontworpen. Van wat kon worden gereconstrueerd is de kering destijds ontworpen op basis van de golfkrachten voortkomend uit een lineaire inkomende en gereflecteerde lopende golfcomponent per golfrequentie. De golfcomponenten worden geïntroduceerd in vergelijking (A.8).

Het gebruik van inkomende en gereflecteerde golfcomponenten is enkel representatief voor een situatie waarbij de schuif gesloten is. De maatgevende conditie voor het ontwerp van de zijaanslagen betreft echter een gedeeltelijk geopende schuif. In dit geval, wanneer de schuif gedeeltelijk geopend is, spelen ook doorgaande golfcomponenten (transmissie) een rol.

Wanneer de schuif (gedeeltelijk) open is, is het meenemen van alleen de inkomende, gereflecteerde en doorgaande golfcomponenten per frequentie niet om aan de randvoorwaarden bij de schuif te voldoen. Namelijk, de combinatie van de verticale snelheidsprofielen van de lopende golfcomponenten is in dit geval niet in overeenstemming met de randvoorwaarde dat de snelheid bij de schuif gelijk is aan nul. Om het systeem volledig te maken zijn "evanescente" componenten benodigd. Evanescente golfcomponenten zijn staande, niet-lopende, golfcomponenten met oscillerende snelheidsprofielen in verticale ruimte en tijd, en met een exponentiële afname in horizontale ruimte. De amplitudes van de evanescente componenten hangen af van de topologie van de schuif. De amplitudes zijn gelijk aan nul wanneer de schuif dicht is. Wanneer de schuif (gedeeltelijk) geopend is hebben de amplitudes een bepaalde grootte. Simpel gezegd, de combinatie van alle evanescente componenten per frequentie zorgen voor het opheffen van de discrepantie tussen het snelheidsprofiel van de lopende golven ter hoogte van de schuif, en het snelheidsprofiel dat aan de randvoorwaarden voldoet met snelheid nul ter plaatse van de schuif.

Van de combinatie van alle golfcomponenten, lopende en evanescente, kan een dynamische drukverdeling worden afgeleid. De drukken kunnen vervolgens worden geïntegreerd langs de contouren van de schuif om de resulterende golfkrachten te berekenen.

De afleiding van de lineaire golfkrachten op de schuif per frequentie en golfrichting, inclusief de evanescente componenten in het geval van een gedeeltelijk geopende schuif, wordt in deze appendix beschreven. Merk op dat in deze afleiding van lineaire golfkrachten geen effecten van hogere-orde (niet-lineaire) golven en bijbehorende krachten wordt meegenomen. Golfklappen worden ook niet meegenomen.

A.2 Relevante vergelijkingen

We gaan uit van een rotatieloze stroming met een gemiddelde van nul, wat betekent dat viscositeitseffecten kunnen worden verwaarloosd. Het vrij wateroppervlak bij, op en rond de gedeeltelijk geopende schuif kan nu worden beschreven met de snelheidspotential $\phi(\mathbf{x}, t)$ die voldoet aan de Laplace-vergelijking:

$$\nabla \cdot \nabla \phi = \nabla^2 \phi = 0, \quad (\text{A.1})$$

met locatie vector $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$, met y in langsrichting van de schuif, x loodrecht op schuif gezien vanaf de zee en z de omhooggerichte verticale richting waar $z = 0$ het stilstaand waterniveau is en $z = -h$ de positie van de bodem. Het coördinatenstelsel is weergegeven in Fig. 1.

De gradient operator is gedefinieerd als $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)^T$.

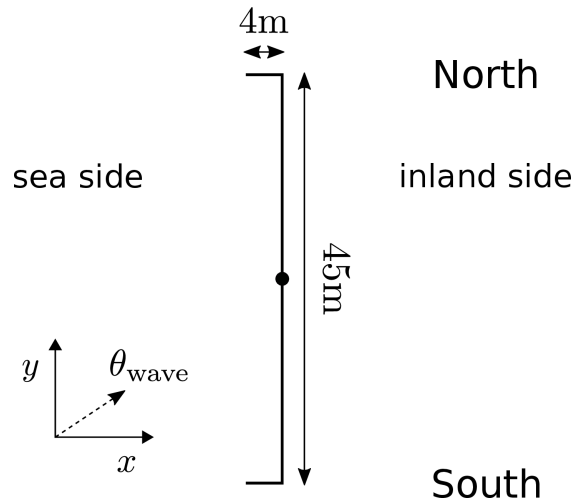


Figure 1: Coördinatenstelsel bij de schuif van de kering

Het snelheidsveld $\mathbf{u} = (u, v, w)^T$ volgt uit:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi, \quad (\text{A.2})$$

met de totale druk gegeven door de tijds- en plaatsafhankelijke Bernoulli-vergelijking:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + gz \right) + c(t), \quad (\text{A.3})$$

met ρ de dichtheid van water (aangenomen als constante) en met $c(t)$ een tijdsafhankelijke functie die wordt bepaald aan de hand van de drukrandvoorwaarde aan het vrije wateroppervlak. De kinematische randvoorwaarde op de ondoorlatende bodem wordt verkregen door het invullen van (A.2) in de ondoorlatende stromingsrandvoorwaarde ter plaatse van de bodem.

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = -h.$$

Het verwaarlozen van bodemgradienten leidt tot de volgende vergelijking:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = -h, \quad (\text{A.4})$$

ofwel, er is geen verticale snelheid op de bodem.

Voor de beschrijving van de positie van het vrije wateroppervlak (zonder omslaande en brekende golven bij de schuif) wordt een enkelewaardige hoogtefunctie $\zeta(x, y, t)$ geïntroduceerd. De kinematische randvoorwaarde aan het vrije oppervlak wordt nu als volgt beschreven:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = \zeta. \quad (\text{A.5})$$

De formulering van de dynamische randvoorwaarde $p|_{z=\zeta} = p_{\text{surf}}$ op het vrije wateroppervlak wordt in termen van snelheidspotentiaal afgeleid uit (A.3). Omdat kan worden aangenomen dat voor kleine gebieden en een korte tijdsduur de druk aan het vrije wateroppervlak p_{surf} constant is, kunnen we stellen dat $c(t) = p_{\text{surf}}$. Hieruit volgt:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + gz = 0, \quad z = \zeta. \quad (\text{A.6})$$

Als niet-lineaire effecten worden verwaarloosd en de analyse wordt beperkt tot enkel het golfprobleem (zonder stroming), kunnen de gelineariseerde randvoorwaarden (vgl. (A.5) en (A.6)) worden gecombineerd tot één randvoorwaarde aan het vrije wateroppervlak:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0. \quad (\text{A.7})$$

A.3 De lineaire potentiaalstroming oplossing

De klassieke oplossing van (A.1) met de bodem randvoorwaarde (A.4), die een golf beschrijft, is:

$$\phi(\mathbf{x}', z, t) = \varphi(t) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}') \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}, \quad (\text{A.8})$$

met $\mathbf{k} = (k_x, k_y)^T$ de golfvector (meestal een complex getal) in het horizontale vlak en met $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ (meestal een complex getal) het golfgetal. Om redenen van notatie wordt de 3D coördinaat geschreven als $\mathbf{x} = (\mathbf{x}', z)^T$, ofwel als een combinatie van horizontale coördinaten $\mathbf{x}' = (x, y)^T$ en de verticale coördinaat z .

Na het invullen van (A.8) in (A.7) en het niet meenemen van oplossingen in de vorm van een polynoom volgt dat:

$$\varphi(t) = \Phi \exp(i\omega t), \quad (\text{A.9})$$

met Φ de (complexe) amplitude aan het vrije wateroppervlak van deze specifieke golf oplossing en met ω die voldoet aan de lineaire dispersie relatie:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) = -gik \tan(ikh). \quad (\text{A.10})$$

Voor de oplossingen beperken we ons tot positieve reële getallen voor ω ¹ die overeenkomen met een frequentie. Elke reële ω gaat gepaard met een *enkele* lopende golfcomponent per golfrichting (bepaald aan de hand van een *enkele positieve en reële* oplossing voor k die volgt uit de lineaire dispersie relatie $\omega^2 = gk \tanh(kh)$), maar met *oneindig veel* evanescente componenten per golfrichting. Deze laatste worden bepaald door het *oneindige aantal imaginaire* oplossingen voor k volgens $\omega^2 = gk \tanh(kh)$. We beschrijven deze oplossingen als, $k = \kappa_n/i$, met κ_n de *positieve en reële* oplossingen van $\omega^2 = -g\kappa_n \tan(\kappa_n h)$, $(n - 1/2)\pi < \kappa_n < n\pi, n = 1, 2, \dots$

De situatie is echter veel gecompliceerder dan de vorige paragraaf doet lijken. Om dit te laten zien schrijven we (A.8) als:

$$\phi(\mathbf{x}', z, t) = \varphi(t) \exp(-i(k_x x + k_y y)) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}. \quad (\text{A.11})$$

Het is te zien dat k_x én k_y een complex getal kunnen zijn, hoewel het gedrag in de tijd periodiek is, met andere woorden, wanneer ω in (A.9) een reëel getal is. De voorwaarde waaraan moet worden voldaan is dat $k_x^2 + k_y^2$ óf positief, reëel en gelijk is aan k^2 óf negatief, reëel en gelijk aan een van de $-\kappa_n^2$. Dit zorgt voor een enkele lopende golf per richting (k_x en k_y reëel), oneindig veel evanescente golven per richting (k_x en k_y imaginair) en een oneindig aantal golven met een lopend karakter in de ene richting en, in de richting hier loodrecht op, een oneindig aantal golfcomponenten met een evanescent karakter (k_x en k_y complex).

De relatie tussen de amplitude Φ en de potentiaal vergelijking (A.8) met $\varphi(t)$ volgens (A.9) en de amplitude Z van de bijbehorende oppervlakte uitwijking, volgt uit de gelineairiseerde vergelijking (A.6):

$$Z = -\frac{i\omega}{g} \Phi. \quad (\text{A.12})$$

De lineaire oppervlakte uitwijking die overeenkomt met oplossing (A.8) is daarom:

$$\zeta(\mathbf{x}', t) = Z \exp(i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}')) = -\frac{i\omega}{g} \Phi \exp(i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}')). \quad (\text{A.13})$$

¹Merk op dat de randvoorwaarden (A.4) op de bodem en (A.7) op het vrije wateroppervlak complexe waarden voor ω toestaan. De horizontale randvoorwaarden zijn echter zo aangenomen dat deze imaginaire waarden voor ω uitsluiten.

A.4 Oplossing voor golven op/bij/rond de schuif

We gaan uit van een enkele lopende golf die zich van links (de zeezijde) in de richting de schuif verplaatst onder een hoek θ ($> -\pi/2$, $< \pi/2$) ten opzichte van de loodlijn van de schuif (x -richting):

$$\phi_{\text{prop}}^{L,+} = \Phi_{\text{prop}}^{L,+} \exp(i(\omega t - k_x x - k_y y)) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}, \quad (\text{A.14})$$

met $k_x = k \cos \theta$, $k_y = k \sin \theta$, en k een unieke en reële oplossing van (A.10). NB, het is aangenomen dat we deze inkomende, lopende golf beschouwen op een plek waar de grootte van de evanescente componenten die in de richting van de schuif lopen dusdanig zijn afgenomen dat deze kunnen worden verwaarloosd.

De reflectie van de inkomende golf bestaat uit één lopende golf:

$$\phi_{\text{prop}}^{L,-} = \Phi_{\text{prop}}^{L,-} \exp(i(\omega t + k_x x - k_y y)) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}, \quad (\text{A.15})$$

en oneindig veel evanescente golven:

$$\phi_{\text{evan},n}^{L,-} = \Phi_{\text{evan},n}^{L,-} \exp(i(\omega t - k_y y) + \kappa_{x,n} x) \frac{\cos(\kappa_n(z+h))}{\cos(\kappa_n h)}, \quad (\text{A.16})$$

met een reële $\kappa_{x,n} = \sqrt{\kappa_n^2 + k_y^2}$ waar κ_n/i de n -de imaginaire oplossing is van (A.10) (vergelijk met $k_x = \sqrt{k^2 - k_y^2}$).

De golven aan de rechterkant van de schuif (landzijde), doorgelaten via de opening tussen de schuif en de bodem, bestaan ook uit één lopende golf:

$$\phi_{\text{prop}}^{R,+} = \Phi_{\text{prop}}^{R,+} \exp(i(\omega t - k_x x - k_y y)) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}, \quad (\text{A.17})$$

en oneindig veel evanescente golven:

$$\phi_{\text{evan},n}^{R,+} = \Phi_{\text{evan},n}^{R,+} \exp(i(\omega t - k_y y) - \kappa_{x,n} x) \frac{\cos(\kappa_n(z+h))}{\cos(\kappa_n h)}. \quad (\text{A.18})$$

Om de golfcomponenten als gekoppeld systeem te laten bestaan, dient het gedrag van de gereflecteerde en doorlopende golven in tijd en y -richting overeen te komen met de inkomende golf. Om deze reden hebben (A.14), (A.15), (A.16), (A.17) en (A.18) dezelfde factor $\exp(i(\omega t - k_y y))$. Gegeven k en de κ_n , die volgt uit ω en (A.10), en ook sommige k_y ($> -k$, $< k$), volgen de waarden van k_x en de $\kappa_{x,n}$. De geschetste gecompliceerde situatie (zie tekst bij (A.11)) blijkt hier eenvoudiger te zijn.

Het golfsysteem aan de linker- en rechterkant van de schuif bestaat respectievelijk uit de som van (A.14), (A.15) en alle (A.16), en de som van (A.17) en alle (A.18):

$$\phi^L = \phi_{\text{prop}}^{L,+} + \phi_{\text{prop}}^{L,-} + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{\text{evan},n}^{L,-}, \quad \phi^R = \phi_{\text{prop}}^{R,+} + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{\text{evan},n}^{R,+}. \quad (\text{A.19})$$

Deze oplossingen zijn gekoppeld aan de randvoorwaarden ter plaatse van:

$$\begin{cases} u^L = 0, u^R = 0 & \text{if } z > z_{\text{gate}} \text{ (gedeelte waar de schuif is gesloten),} \\ u^L = u^R, p^L = p^R & \text{elders (gedeelte waar de schuif is geopend),} \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

met $z_{\text{gate}} \geq -h$ het onderste deel van de (gehesen) schuif. Merk op dat dit ook geldt voor een volledig gesloten schuif (in dat geval is de oplossing van (A.19) met koppeling van (A.20), $\Phi_{\text{prop}}^{L,+} = \Phi_{\text{prop}}^{L,+}$, $\Phi_{\text{prop}}^{R,+} = 0$, en $\Phi_{\text{evan},n}^{L,-} = \Phi_{\text{evan},n}^{R,+} = 0, \forall n$) en voor een volledig geopende schuif (in dat geval is de oplossing $\Phi_{\text{prop}}^{L,-} = 0$, $\Phi_{\text{prop}}^{R,+} = \Phi_{\text{prop}}^{L,+}$, en $\Phi_{\text{evan},n}^{L,-} = \Phi_{\text{evan},n}^{R,+} = 0, \forall n$).

Opmerkingen:

- Het is aangenomen dat de dikte van de schuif (de grootte in x -richting) klein is ten opzichte van de golflengte (om precies te zijn, erg klein in vergelijking met $1/k_x$ en de $1/\kappa_{x,n}$). Als gevolg is het effect hiervan niet meegenomen in (A.20).
- De gepresenteerde analyse kan relatief makkelijk worden uitgebreid met een drempel op de locatie van de schuif (gebruik hiervoor de eerste randvoorwaarde in (A.20) ook voor $z < z_{\text{sill}}$), en/of voor een andere diepte links en rechts van de schuif (gebruik hiervoor $h = h^L$ in (A.14), (A.15) en (A.16), en $h = h^R$ in (A.17) en (A.18)).

A.5 Oplossingsprocedure

In deze sectie zal de procedure worden beschreven hoe (A.19) kan worden opgelost met (A.20), gegeven een inkomende lopende golf met amplitude $\Phi_{\text{prop}}^{L,+} = igZ_{\text{prop}}^{L,+}/\omega$, cf. (A.12).

Met bekende inkomende lopende golfamplitude per frequentie, blijven er $2 + 2N$ onbekenden over. De onbekenden bestaan uit de amplitude van de gereflecteerde lopende golf, de amplitude van de doorgaande lopende golf, N evanescente golfcomponenten aan de zeezijde en N evanescente golfcomponenten aan de landzijde van de kering.

In navolging van TAKANO, K. (1960), wordt een set van $2 + 2N$ onafhankelijke vergelijkingen per frequentie verkregen door de twee matchende randvoorwaarden in (A.20) te nemen die continuïteit van snelheid en druk vereisen, door ze vervolgens te wegen met de complexe exponentiële verticale snelheidsprofielen van de componenten zelf en door te integreren over de diepte.

$$\begin{cases} \int_{-h}^0 u^L \psi_n dz = \int_{-h}^0 u^R \psi_n dz, & \text{en} \\ \int_{-h}^0 p^L \psi_n dz = \int_{-h}^0 p^R \psi_n dz, & \text{voor } n = 0, N \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

waar ψ_n het complexe exponentiële verticale profiel over de diepte representeert, $n = 0$ het verticale profiel van een lopende golfcomponent weergeeft en de andere waarden van n de verticale profielen van evanescente componenten representeren. Merk op dat u en p worden verkregen door de juiste afgeleiden van de potentiaalfuncties te nemen.

Het stelsel vergelijkingen, waarin de amplitudes van de lopende en evanescente golfcomponenten onbekend zijn, wordt opgezet door een (numerieke) Gauss-kwadratuur van (A.21) uit te voeren waaruit een volledig gevulde coëfficiëntmatrix volgt. Het aantal verticale posities waarop de verticale profielen worden geëvalueerd moet veel groter zijn dan N . Nadat alle coëfficiënten zijn bepaald kan het stelsel worden opgelost met een directe oplossingsmethode voor stelsels vergelijkingen.

Met de gevonden golfamplitudes kunnen de potentiaalfuncties worden gebruikt om de verticale profielen van de snelheid en dynamische druk te reconstruëren. Het aantal beschouwde evanescente componenten was dusdanig groot gekozen dat een verdere toename een verwaarloosbaar klein effect had op de verticale drukprofielen aan beide kanten van de schuif. Een aanvullende controle is gedaan op basis van energiebehoud. Energiebehoud vereist dat de amplitudes van de lopende golfcomponenten voldoen aan:

$$\left(Z_{\text{prop}}^{L,+}\right)^2 = \left(Z_{\text{prop}}^{L,-}\right)^2 + \left(Z_{\text{prop}}^{R,+}\right)^2 \quad (\text{A.22})$$

In woorden, volgens (A.22) is het vermogenstransport van de inkomende golfcomponent, lopend in de richting van de schuif, hetzelfde als de som van het vermogenstransport van de gereflecteerde en doorgaande golfcomponenten die van de schuif weglopen. Het is geverifieerd dat alle resultaten voldoen aan (A.22) binnen een marge van 0.5%. Merk op dat evanescente golfcomponenten geen energie transporteren

A.6 Referenties

TAKANO, K., 1960. "EFFETS D'UN OBSTACLE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE SUR LA PROPAGATION DE LA HOULE." *La Houille Blanche* (3): 247-267. DOI: [10.1051/lhb/1960037](https://doi.org/10.1051/lhb/1960037), URL <https://doi.org/10.1051/lhb/1960037>.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl