

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Water

Aan: Rijkswaterstaat
 Van: ██████████ (HaskoningDHV), ██████████ (TU Delft)
 Datum: Thursday, 21 November 2019
 Kopie: ██████████ (RWS), ██████████ (TU Delft)
 Ons kenmerk: BG7311WATNT1911211101
 Classificatie: Vertrouwelijk

Onderwerp: Second opinion Nieuwe Spuimiddel Afsluitdijk

1 Vraagstelling review

Als gevolg van een stijgende zeespiegel wordt het steeds moeilijker om het water van het IJsselmeer af te voeren. Bij de Afsluitdijk wordt daarom de huidige spuicapaciteit uitgebreid en wordt pompcapaciteit geïnstalleerd. Om gebruik te kunnen maken van bestaande voorzieningen wordt de spuicapaciteit vergroot nabij het huidige meest westelijk gelegen spuicomplex van Den Oever. Acht nieuwe spuisluizen worden geplaatst tussen de huidige spuisluizen.

Door de aanwezigheid van het huidige spuicomplex en de snelweg (A7) is beperkt ruimte beschikbaar. Binnen deze beperkte ruimte is gezocht naar het maximaliseren van spuicapaciteit om inzet van gemalen en daaruitvolgend verbruik van energie te minimaliseren. De nieuwe spuisluizen spuien zijn daarom – overeenkomstig met de huidige spuisluizen – in normale situaties niet-verdronken. Bij een niet-verdronken spuiregime, kunnen windgolven de spukoker betreden. Door beknelling aan de bovenzijde van de koker ontstaan daarbij hoge golfkrachten, die de schuiven van de spuisluis belasten. Zowel door de hoogte als de frequentie van het optreden van windgolven, kunnen de schuiven bezwijken. Hoewel het bezwijken van een enkele schuif niet direct zal leiden tot grote problemen in het waterbeheer door dubbele uitvoering van de schuiven, wordt het bezwijken van schuiven onwenselijk geacht vanwege de bijbehorende kosten en de afname van beschikbaarheid van de spuicapaciteit.

Tijdens het ontwerpproces bleek rond mei 2019 dat het ontwerp voor de nieuwe spuisluizen onvoldoende sterk was om bezwijken door vermoeiing voor windgolven vanuit het IJsselmeer te voorkomen. De hydraulische vormgeving is daarvoor aangepast. Figuur 2-1 en Figuur 2-2 tonen het aangepaste schetsontwerp.

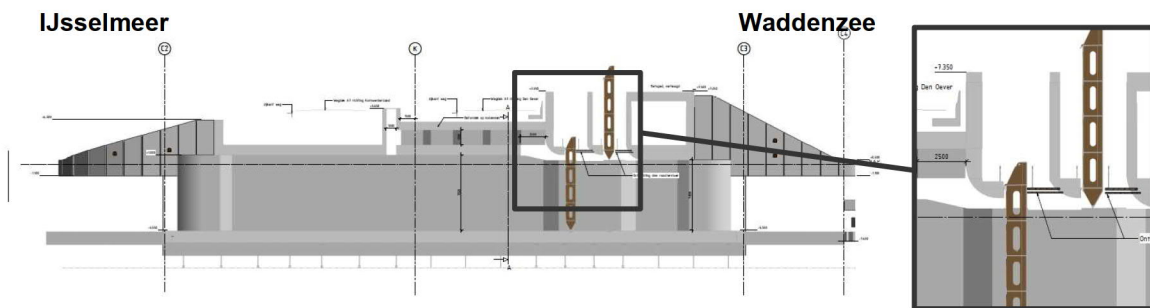
In deze notitie is beoordeeld of dit aangepaste schetsontwerp haalbaar lijkt. Daarbij richt de notitie zich op de hydraulische vormgeving en het effect hiervan op optredende golfklappen. Daarvoor is gekeken naar de berekeningsmethode, de robuustheid van die methode en de adaptiviteit van het schetsontwerp. Omdat vermoeiing de hoofdoorzaak is van het afkeuren van het originele ontwerp, is op dit fysische fenomeen de aandacht gevestigd bij de beschouwing van het gepresenteerde schetsontwerp.

Paragraaf 2 presenteert de verkregen informatie en de gehanteerde aanpak. Paragraaf 3 tot en met 5 behandelen de beschouwing van het schetsontwerp. De conclusies worden getoond in paragraaf 6.

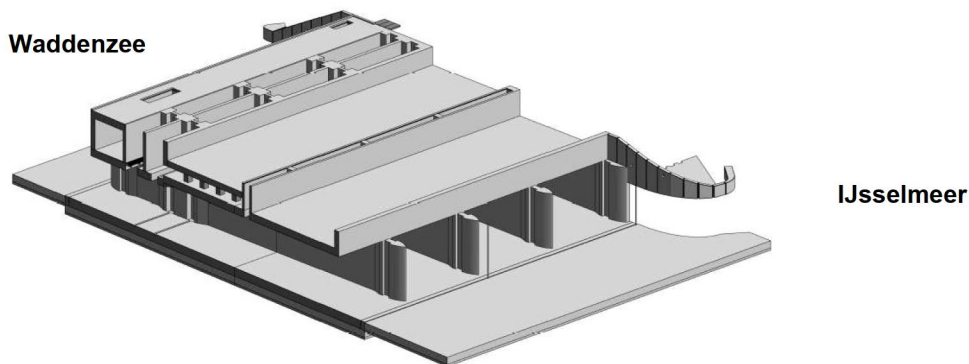
2 Verkregen informatie en aanpak

Voor deze beoordeling is de volgende informatie gebruikt:

- Berekeningsmethodiek, de volgende rapporten en memo's:
 - Implementatie methodiek in mei (Levvel/Arcadis)
 - Situatie mei (Levvel): ASD-RAP-0850-0.01 Impact analyse WOG 7.0 NSM.docx
 - Invloed klappen aan begin/eind van koker (Levvel): ASD -NOT-0877- golfklap belasting vanuit het IJsselmeer NSM variant 6A (003)
 - ASD-NOT-0443, Onderbouwing golfklappen spuumiddelen - Theoretische onderbouwing Levvel 2019.
 - Theorie TUD: TUD advies spleetinvloed klapbelastingen Afsluitdijk (concept v3)
 - Mondelinge toelichtingen Levvel
- Tekeningen:
 - Schuiven: CVP.00033-001-000000_cilinder_alternatief_15
 - Langsdoorsnede: RWS-#3756177-v1-CVP_00033-001-000000_cilinder_alternatief_16_(2)_(1)
 - Schets VA spuumiddelen
- Hydraulische Randvoorwaarden, de volgende documenten:
 - RWS-#3756174-v1-ASD-MEM-0080-C_Herziening_HR_Kunstwerken_IJsselmeerzijde_(faalmechanisme_Golfklap)
 - RWS-#3756175-v1-Stormverloop_t_b_v_vermoeiing_gebruik_analyse_NSM



Figuur 2-1: Dwarsdoorsnede schetsontwerp met detail hydraulische vormgeving nabij plafond schuif (Schets VA spuumiddelen)



Figuur 2-2: 3D beeld van nieuwe spuisluizen (Schets VA spuimiddelen)

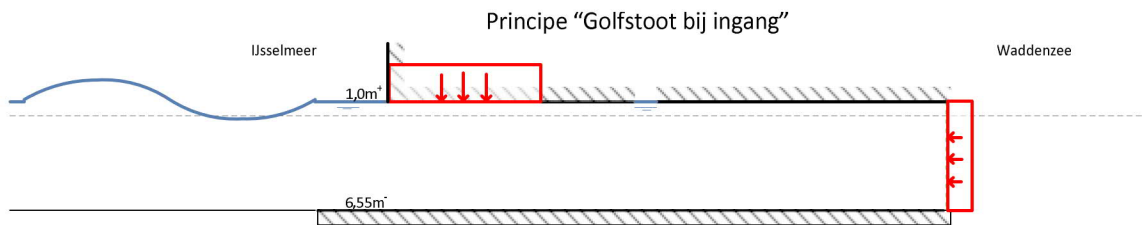
De volgende aanpak is aangehouden:

- 1) Herleidbaarheid: Allereerst is nagegaan of de uitgevoerde berekeningen voldoende herleidbaar zijn, zodat deze beoordeeld kan worden.
- 2) Beoordeling: Het schetsontwerp en de bijbehorende analyse zijn beoordeeld op twee aspecten:
 - o Robuustheid: Er is nagegaan of de bij het schetsontwerp behorende analyse voldoende robuust is om onzekerheden te kunnen opvangen.
 - o Adaptiviteit: Er is nagegaan of het schetsontwerp aanpasbaar is en daarmee ruimte biedt om eventuele tegenvallers in de nadere uitwerking op te vangen.

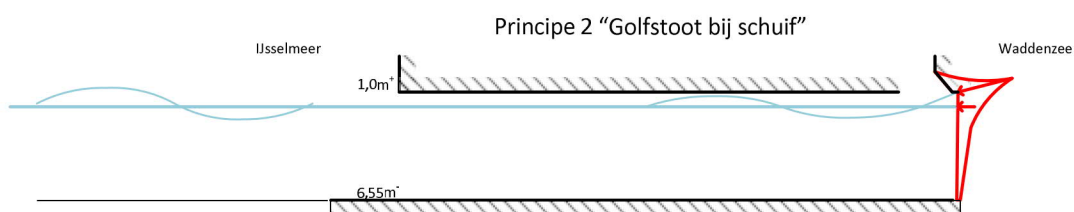
3 Herleidbaarheid berekening

Twee soorten golfklap die zware hydraulische belastingen op de schuif geven zijn beschouwd: 1) golfstoot bij de ingang en 2) golfstoot lokaal bij de schuif. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Aangezien het optreden van dit type golfklappen bij spuisluizen ongebruikelijk is, zijn geen ontwerpnormen of -richtlijnen beschikbaar. Levvel heeft daarom een analytische rekenmethode ontwikkeld om de grootte van deze golfstoten te bepalen. Deze rekenmethode heeft een solide theoretische (fysische) basis. De theorie is voor enkele configuraties gevalideerd met kleinschalige fysieke modellen en computersimulaties (CFD), zie Wood et al. 2000; Chen et al. 2019; Almeida et al. 2019; Hofland et al. 2019. Echter, de rekenmethode is niet gevalideerd voor een situatie met een lange koker (i.e. klaplengte gedomineerd door golflengte) inclusief ontluchting zoals voorgesteld in het schetsontwerp.

In het kader van deze second opinion, zijn de berekeningswijze en de uitgangspunten in de berekeningen voor beide type golfklappen nagegaan. Omdat de berekening in verschillende documenten is vastgelegd, die over verschillende versies van het ontwerp gaan, is niet elke waarde met zekerheid vast te stellen op basis van de aangeleverde informatie. De berekeningswijze en de daarbij gehanteerde uitgangspunten zijn daarom o.b.v. een mondelinge toelichting samengevat in bijlage 1. Op basis van deze mondelinge toelichting is de berekening herleidbaar.



Figuur 3-1: Golfklap type 1: Golfstoot bij ingang. Bij de ingang van de koker aan de IJsselmeerzijde klapt de golf tegen het plafond van de spuisluis. Deze klap levert én een lokale belasting op het plafond, maar zorgt ook voor een drukgolf bij de schuif. Een opening in het plafond van de koker vermindert deze drukstoot op de schuif.



Figuur 3-2: Golfklap type 2: Golfstoot bij schuif. Een deel van de golf weerkaatst en een gedeelte dringt door de koker. Het deel dat doordringt, levert lokaal bij de schuif een golfstoot.

4 Beschouwing robuustheid

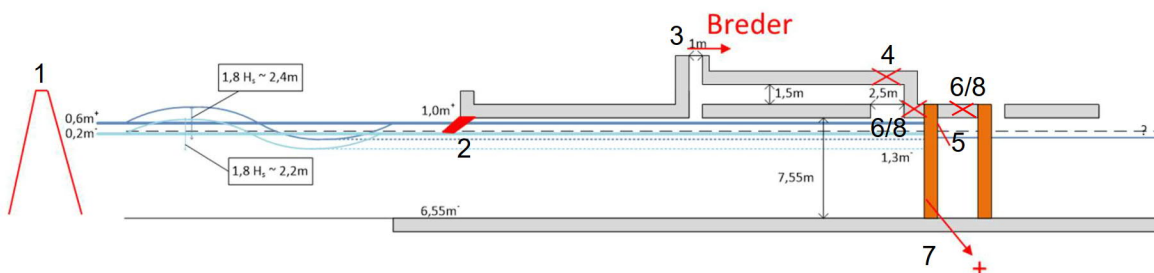
Als onderdeel van deze stap is nagegaan of de gebruikte inschattingen in de berekening de verwachtingswaarde, of juist conservatieve of onveilige waarden beschrijven (zie Bijlage 1). Ook is er gekeken hoe groot de onzekerheid in de diverse parameters is. De golfstoot nabij de schuif (golfklaptype 2) is daarbij het meest onzeker. De mate van golfdoordringing bepaalt in hoge mate de grootte van de golfklap. Dit golfvoortplantingsgedrag laat zich niet eenvoudig voorspellen via een analytische berekening. De afgeronde / afgehoekte hydraulische vormgeving nabij de schuif richting de ontluuchtingskamer is nog niet eerder gevalideerd. Daarbij wordt opgemerkt dat de vormgeving van dit onderdeel nog niet definitief is. Bij de golfstoot aan het begin van de koker (golfklaptype 1) is de mate van reductie van de golfstoot door de ontluuchtingsgaten onzeker, al lijkt het wel dat het verwaarlozen van de dempende werking van de lucht in de lange koker een conservatieve aanname is.

De gekozen waarden van de verschillende parameters zijn op dit ogenblik redelijk, maar ook scherp ingeschat. Aangezien de berekeningsmethode niet gevalideerd is voor de configuratie van het schetsontwerp lijkt er onvoldoende ruimte voor onzekerheden die nog aan de berekeningsmethode verbonden zijn. Aanbevolen wordt om de berekening te valideren en door middel van gevoeligheidsanalyses meer inzicht te krijgen in de onzekerheden binnen de berekening. De volgende mogelijkheden zijn er om onzekerheden in de berekening te verkleinen: 1) modelproef op volle schaal in de Deltagoot, 2) monitoring van krachten na realisatie 3) numerieke CFD modellering.

De mate van golfdoordringing en het effect hiervan op de golfklap nabij de schuif (type 2) kan goed met een numeriek CFD model gesimuleerd worden. In veel huidige state-of-the-art numerieke modellen wordt lucht nog als onsamendrukbaar aangenomen, waardoor dit mogelijk dempende effect niet wordt meegenomen. Een modelproef op volle schaal levert andere krachten door de invloed van compressibiliteit van lucht, maar de grootte hiervan is tot op heden onbekend (Wood et al. 2000; Mitsuyasu 1966). Testen op een realistische schaal zijn echter kostbaar. Gezien de wens om het schetsontwerp op korte termijn verder uit te werken, licht het valideren van de berekening door aanvullende computermodellsimulaties (CFD) voor de hand.

5 Beschouwing adaptiviteit

Aangezien het een schetsontwerp betreft, zijn aanpassingen in de uitwerking tot een definitief ontwerp nog mogelijk. Verder is de berekening nog beperkt gevalideerd en zou uit het validatieproces kunnen blijken dat onzekerheden onvoldoende meegenomen zijn. Daarom wordt in deze paragraaf gekeken waar in het ontwerp ruimte zit om de belasting minder groot en/of minder onzeker te maken. Voor de beschouwing van de adaptiviteit zijn meerdere maatregelen in overleg met Levvel besproken. Het resultaat hiervan is weergegeven in onderstaande figuur en tabel.



Figuur 5-1: Schetsmatige doorsnede van adaptieve maatregelen

Tabel 5-1: Overzicht van verkende aanpassingen

Verkende aanpassingen	Reactie Rijkwaterstaat/Levvel
1. Golfreducerende dammen	Kostbaar en weinig effectief (-30%)
2. Verlaging plafond bij ingang	Waarschijnlijk weinig effectief en negatieve invloed op spuicapaciteit.
3. Verbreding ontluchting	Toegepast tot 1,5 meter, verder is vermoedelijk niet effectief. Misschien is het luchtvolume onder de spleet zelfs groot genoeg om de golfklappen te dempen en kan de spleet het beste helemaal afgesloten worden. Maar dit is op dit moment onbekend.
4. Verwijdering plafond direct bij ontluchting naast schuif	Niet mogelijk vanwege aanwezigheid A7
5. Ontluchtingskleppen in schuif	Kostbaar en onderhoudsgevoelig
6. Verwijdering/versmalling dicht bij schuif	Uitgangspunt voor uitwerking schetsontwerp
7. Versterking schuif	Uitgangspunt voor uitwerking schetsontwerp
8. Verhoging van plafond lokaal bij schuif d.m.v. open stalen vakwerk met plaat aan bovenkant	Wordt als adaptieve maatregel meegenomen mocht uit het validatieproces blijken dat het schetsontwerp onvoldoende robuust is.

Naast de maatregelen beschreven in de tabel is het ook mogelijk om na realisatie optredende krachten te monitoren. Daarmee kan enerzijds het model gevalideerd worden en kan anderzijds de levensduur van de schuiven verlengd worden. Verder kan overwogen worden om de spleet nabij de A7 af te sluiten. Het afsluiten hiervan zou hierdoor de golfdemping van de golfklap bij de ingang (type 1) in tact kunnen laten, maar wel de lokale golfklap (type 2) kunnen verminderen, omdat de golven minder makkelijk de koker in zouden komen. Dit effect kan met CFD bepaald worden.

Omdat de huidige berekeningswijze scherp, maar realistisch is, zijn grote aanpassingen aan het ontwerp niet bij voorbaat noodzakelijk. De uitwerking van de overgang tussen ontluchting en schuif (maatregel 6) verdient daarbij aandacht, maar is binnen het schetsontwerp nader uit te werken op basis van numerieke modellering (CFD). Verder is het mogelijk om bij de constructieve uitwerking de schuif voldoende sterk te maken.

Mocht na de aanbevolen validatie van de analytische berekening volgen dat het ontwerp onvoldoende robuust is, dan wordt aanbevolen om het plafond lokaal te verhogen bij de schuif (maatregel 8). Met deze maatregel kan relatief veel zekerheid verkregen worden dat de lokale golfstoot (golflap type 2) sterk vermindert. Daarmee wordt de hydraulische belasting dus sterk gereduceerd. De verhoging van het plafond lokaal bij de schuif lijkt een maatregel die uitvoerbaar is door middel van toepassing van (dun) staal in plaats van beton. Gezien de beperkte tijd die beschikbaar is voor de uitwerking van het ontwerp, wordt aanbevolen om deze maatregel parallel uit te werken als variant voor het gepresenteerde schetsontwerp.

6 Conclusie

De informatie over de berekeningsmethode en de randvoorwaarden is gefragmenteerd en soms tegenstrijdig. Verder is in de aangeleverde stukken geen definitieve analyse van de golfkrachten getoond, slechts gevoeligheidsanalyses. Daardoor wordt bij deze second opinion sterk geleund op mondeling verstrekte informatie. Deze informatie is in de bijlage samengevat en de basis voor deze second opinion. Er wordt aanbevolen om een volledige en definitieve rapportage van de gebruikte berekeningsmethode en resultaten, inclusief een gevoeligheidsanalyse van de onzekere variabelen als effectieve spleetbreedte en drukverdeling over de breedte, op te stellen.

Voor de beoordeling van het effect van golflappen op de schuiven van het nieuwe spuumiddel is een aanpak ontwikkeld met een solide theoretische basis. Deze aanpak is beperkt gevalideerd met numerieke computermodellen (CFD) en fysieke modeltesten voor het bestaande spuumiddel (BSM) met defensiebalk. In de gepresenteerde berekeningen zijn realistische en scherpe aannames gedaan. De berekeningen laten daardoor nog weinig ruimte voor onzekerheden in deze aannames en zijn daarmee onvoldoende robuust.

Aanbevolen wordt om de berekeningswijze te valideren met CFD-berekeningen. Een voorzet voor invulling van het benodigde CFD-onderzoek is bijgevoegd (bijlage 2). Op basis van gevoeligheidsanalyses dient inzicht te worden verkregen in onzekerheden in de aanpak, waarmee een onderbouwde keuze voor parameters kan worden gemaakt.

Voor het schetsontwerp bevelen wij het volgende aan:

- Nadere uitwerking van de hydraulische vormgeving van het plafond nabij schuiven.
- Het constructief ontwerp van de schuiven zo te dimensioneren dat de schuiven de golflapbelastingen aankunnen.
- Parallel een variant uit te werken waarbij lokaal bij de schuiven het plafond van de koker met ongeveer 1 meter verhoogd wordt. Deze variant kan toegepast worden indien uit de CFD-berekening blijkt dat de belasting hoger is dan verwacht.
- Toevoegen van meetinstrumenten om gedurende de levensduur belasting te monitoren en evalueren.

7 Referenties

- Chen X., B. Hofland, W. Molenaar, A. Capel, M.R.A. Van Gent. (2019) Use of impulses to determine the reaction force of a hydraulic structure with an overhang due to wave impact. *Coastal Engineering* 147. pp. 75–88
- E. de Almeida, B. Hofland, S.J. Jonkman (2019) Wave impact pressure-impulse on vertical structures with overhangs. *Proc. Coastal Structures Conference*. Hannover, Germany.
- Hofland, B., M. Passos, and E. de Almeida Sousa. 2019. Effect of venting holes to relieve wave impact pressures on flood gates with overhangs. *Proc. Coastal Structures Conference*. Hannover, Germany.
- Mitsuyasu, H. (1966), Shock pressure of breaking wave, in 'Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engng., Tokyo', Vol. 1, ASCE, pp. 268–283.
- Wood, D.J., D.H. Peregrine, T. Bruce, (2000). Study of wave impact against a wall with pressure–impulse theory: part I, trapped air. *J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng.* 126, 182–190.

Bijlage 1: Beoordeling robuustheid

De grootte van de kracht is voorspeld met onderstaande analytische methode (Implementatie methodiek in mei):

$$F = 2/dt \beta C_i C_s \rho \lambda V W_i^2$$

Tabel 7-1: Second opinion per parameter, golfklap type 1: golfstoot bij ingang

Parameter	Symbol	Perceptie van gehanteerde aanpak o.b.v. diverse bronnen.	Second opinion
Golfrandvoorwaarden	[H _{m0} , T _p]	1/1 jaar conditie, golfcondities gerelateerd aan waterstand o.b.v. metingen incl. meerspiegelstijging, deze conform percentage van voorkomen uit meting. Aangevuld met 1/10 en 1/10,000 jaar conditie.	De gehanteerde conditie is realistisch. Aanbevolen wordt om de gevoeligheid van voor langere golflengtes te onderzoeken omdat de gehanteerde golven relatief steil zijn.
Golfverdeling	f (H)	Battjes Groenendijk 2000	Mogelijke onderschatting van 5 a 10% van de grootste golven.
Stootduur	[dt]	100 ms	Praktische conservatieve keus, in werkelijkheid een bredere range.
Hydraulische vormgevingsfactor	[C _i]	Wood&Peregrine 1996	Conform huidige wetenschappelijke inzichten
Spleetfactor	[C _s]	Openingsgrootte van 1,9 meter.	Gezien de onzekerheden wordt aanbevolen om hier als rekenwaarde een effectieve openingsgrootte van 1,4 a 1.75 meter (factor 2 a 2,5 t.o.v. spleetbreedte) aan te houden.
Klaplengte	[W _i]	0,15 x golflengte	Dit uitgangspunt is gekalibreerd op een configuratie zonder spleet. Dit zou kunnen veranderen met een spleet.
Impactsnelheid	[λ V]	Conform lineaire golftheorie	Realistisch
Reflectiecoefficient	[R]	1,7	Realistisch
Bounce-back factor	[beta]	Factor 1	Opslag van 10 a 20% wordt aanbevolen om rekening te houden met dit effect.
Veiligheidsfactor	[gamma]	1	Deze veiligheidsfactor doet geen recht aan onzekerheden die

			behoren bij toepassing van een analytisch model.
Spanningsverdeling schuif		Gelijkmatig	Realistisch
Aantal golven		Op basis van piekperiode T_p	Op basis van periode T_m . Dit levert ongeveer 20% meer golven op.
Zijdelingse vernauwing nabij schuif		Niet meegenomen	Niet conservatief, maar waarschijnlijk verwaarloosbaar.
Hoek van inval golven		loodrecht	Enigszins conservatief

Tabel 7-2: Second opinion per parameter, golfklap type 2: golfstoot bij schuif

Parameter	Symbool	Perceptie van gehanteerde aanpak o.b.v. diverse bronnen	Review
Golfrandvoorwaarden	$[H_{m0}, T_p]$	Zie eerdere tabel	Zie eerdere tabel
Golfverdeling	$f(H)$	Zie eerdere tabel	Zie eerdere tabel
Stootduur	$[dt]$	100 ms	Praktische keus, in werkelijkheid een bredere range. Naar verwachting korter dan bij golfstoot bij ingang.
Golfbelasting door koker / golfdoordringing	$[H]$	Maximale golfhoogte gemaximaliseerd tot 2 x afstand bovenkant koker en stilwaterlijn.	Voor korte verticale afstanden ($<0,5m$) tussen waterstand en plafond geeft deze aanpak een te optimistisch beeld.
Hydraulische vormgevingsfactor	$[C_i]$	Wood&Peregrine 1996	Conform huidige wetenschappelijke inzichten.
Klaplengte	$[W_i]$	1,5 m	In het schetsontwerp wordt een horizontale afstand van 0,7 meter aangehouden, waarna het plafond schuin wegloopt. Dit is realistische waarde.
Impactsnelheid	$[\lambda V]$	Zie eerdere tabel	Zie eerdere tabel
Reflectiecoefficient	$[R]$	1,7	Realistisch, vanwege de flenzen aan de achterkant van de schuif.
Bounce-back factor	$[\beta]$	Zie eerdere tabel	Zie eerdere tabel
Spanningsverdeling over schuif		Gelijkmatig verdeeld	Voor dit effect is de spanning bovenin de schuif groter dan onderin.
Veiligheidsfactor	$[\gamma]$	Zie eerdere tabel	Zie eerdere tabel
Optelling van golfstoot bij ingang en bij schuif	$[-]$	Maximum van de twee effecten	Het is goed mogelijk dat één golf twee klappen kan veroorzaken.

Zijdelingse vernauwing		Zie eerdere tabel	Zie eerdere tabel
Hoek van inval golven		loodrecht	Realistisch

Bijlage 2: Onderzoeksvoorstel CFD

De volgende testen en configuraties wordt geadviseerd in het CFD-onderzoek op te nemen:

- Testen met:
 - waterstanden van NAP + 0,5 / + 0,75 / + 1m
 - regelmatige golven, met golfhoogtes H_{m0} , H1% en H0,1% conform 1:1, 1:100 en 1:10.000 yr condities
 - verschillende golfperiodes, e.g. (0.9, 1, 1.1) T_m . Voor regelmatige golven ook de gevoeligheid voor langere golven (steilheid ~ 5%)
 - onregelmatige golf (ca. 100 golven)
- Configuraties:
 - Enkele varianten van details nabij de schuif
 - Gesloten spleet bij meest extreme conditie 1:10.000, H0,1%
 - Enkele configuraties die al eerder gevalideerd zijn (zonder spleet, korte overhang) om het model te toetsen