

Kennisdocument steenzettingen



Kennisdocument steenzettingen

Auteur(s)

Nova Huppés

Vera van Bergeijk

Mark Klein Breteker

Kennisdocument steenzettingen

Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Contactpersoon	-
Referenties	SITO-IS Placed block revetments
Trefwoorden	Steenzettingen, Steentoets, hydraulische belasting, stijghoogteverloop, klemming

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	07-01-2025
Projectnummer	11210269-001
Document ID	11210269-001-GEO-0002
Pagina's	51
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Vera van Bergeijk Mark Klein Breteler Nova Huppes

Samenvatting

Vele honderden kilometers dijk in Nederland zijn bekleed met steenzettingen. Voor de beoordeling en het ontwerp van al deze steenzettingen wordt momenteel Steentoets gebruikt, dat gebaseerd is op vele jaren onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen. Steentoets past echter niet meer goed bij de nieuwe manier van rekenen aan de faalkans van dijken, gebaseerd op een faalpadenanalyse. Dat is de aanleiding om de hele opzet van het rekenmodel nader te evalueren. Gezien het naderende pensioen van Mark Klein Breteler, expert op het gebied van steenzettingen, is deze evaluatie urgent. Daarnaast kan deze evaluatie gebruikt worden om de kennis van Mark over te dragen op zijn opvolgers.

Het is de wens om voor BOI uiteindelijk de beoordeling van steenzettingen te implementeren in DiKerNel met een modulaire opbouw. Dat wordt een traject van een aantal jaren. In voorliggende rapportage zijn een aantal belangrijke componenten van de kennis over steenzettingen geanalyseerd en is uitgezocht hoe deze in Steentoets zijn opgenomen, zodat er een goed plan gemaakt kan worden voor de herziening van de software. Hiertoe is gekeken naar de hydraulische belastingen, de belasting op de steenzetting en klemming.

Voor de hydraulische belastingen wordt in Steentoets gebruik gemaakt van het waterstandsverloop uit VTV-2004. Op plekken waar waterstand en golfcondities weinig correlatie hebben leidt dit tot onlogische combinaties van waterstand en golfcondities. Er zijn veelbelovende ontwikkelingen op het gebied van hydraulische belastingen, zoals de toepassing van GRADE en RACMO. Er wordt aanbevolen om bij de ontwikkeling van een nieuw rekenmodel voor steenzettingen de mogelijkheden te scheppen om te rekenen met extreme condities waarin verschillende stochasten tijdens een storm veranderen. Verder dient in een nieuw rekenmodel kritisch gekeken te worden naar aannames die nu in Steentoets zitten, zoals een minimum aantal golven per niveau van de steenzetting en een verkleining van de hoek van golfval.

Momenteel wordt de belasting op de steenzetting gekwantificeerd met een maatgevend stijghoogteverschil over de toplaag. Hiervoor worden 4 geschematiseerde stijghoogteverlopen op de toplaag gebruikt die worden berekend met empirische formules. Deze verlopen zijn sinds 2006 bijna niet meer aangepast. Daarnaast heeft een grote afstand tussen de drukopnemers tijdens het modelonderzoek er mogelijk toe geleid dat er belangrijke gradiënten niet gemeten zijn. Bij ontwikkeling van een nieuw rekenmodel wordt aangeraden om de stijghoogteverlopen te herevalueren. Hierbij kan rekening gehouden worden met de volgende bekende beperkingen van de huidige verlopen:

- Meenemen van gradiënten in het stijghoogteverloop evenwijdig aan de waterlijn.
- De huidige verlopen onderschatten de grootte van de golfklap voor grote golven met $H_{m0} \approx 2$ m.
- Onderzoeken of de verlopen ook geldig zijn voor moderne steenzettingen met kleine leklengtes.
- Invloed van de brekerparameter op de stabiliteit correct meenemen, nadat de klemming op minder complexe wijze is gedefinieerd (zie hierna).

De beschrijving van de klemming van een steenzetting is een gecompliceerd proces. Er zijn heel veel aspecten die de bijdrage van klemming aan de stabiliteit van steenzettingen beïnvloeden. Veel van deze aspecten zijn beschouwd in het proefschrift van Peters (2007), en slechts een deel hiervan is opgenomen in Steentoets en bovendien zijn die aspecten nog aanzienlijk versimpeld en geschematiseerd. Desondanks zijn de formules bijzonder gecompliceerd en is de code in Steentoets onnavolgbaar geworden. Verder hebben de huidige formules een aantal tekortkomingen. Er is aanbevolen om de formules voor de klemming aanzienlijk te versimpelen en te baseren op een goed te volgen afleiding. In voorliggende rapportage wordt hier een eerste aanzet toe gegeven.

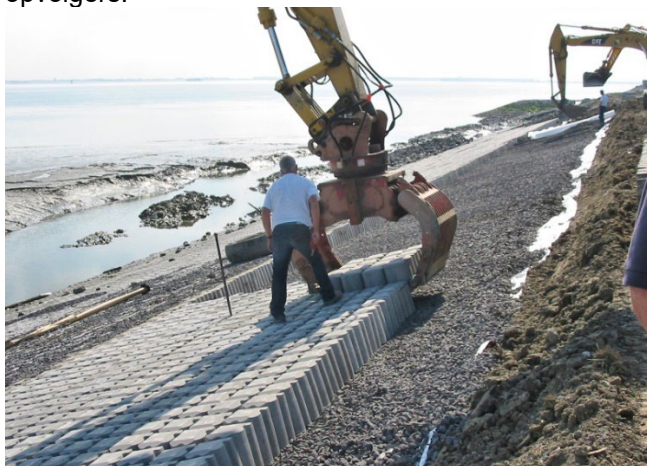
Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	6
1	Inleiding	8
2	Hydraulische belasting	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Waterstand	9
2.2.1	Maatgevende waterstand	10
2.3	Golfcondities	11
2.4	Belastingduur	12
2.5	Kennisleemtes en ontwikkelingen hydraulische belasting	13
3	Belasting op de steenzetting	15
3.1	Schematisatie stijghoogteverloop op de toplaag	15
3.1.1	Schematisatie golfklap	15
3.1.2	Schematisatie golffront	19
3.2	Invloed van de brekerparameter op de stabiliteit	21
3.3	Kennisleemtes en kennisvragen	23
4	Klemming als onderdeel van de sterkte	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Schematisatie volgens Peters (2007) voor Steentoets	26
4.2.1	Inleiding	26
4.2.2	Belasting	27
4.2.3	Als $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 > 0$	30
4.2.4	Als $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 < 0$	31
4.2.5	Correctie voor invloed van de filterlaag: verend ondersteunde ligger	31
4.2.6	Normaalkracht	33
4.2.7	Beoordeling van de stabiliteit	34
4.3	Steentoets	35
4.4	Aanbevelingen voor het opnemen van klemming in DIKErnel	36
5	Conclusies en aanbevelingen	39
5.1	Hydraulische belasting	39
5.2	Belasting op de steenzetting	39
5.3	Klemming als onderdeel van de sterkte	40
	Literatuur	42
A	Formules voor a1 t/m a6 in klemmingformules	44

B	Afnemende golfhoogte bij hogere waterstanden	46
B.1	Inleiding	46
B.2	Typen hydraulische belastingen	46
B.3	Werking Steentoets inzake hydraulische belasting	47
B.4	Voorbeeldberekeningen	48
B.5	Aanbevelingen	49

1 Inleiding

Vele honderden kilometers dijk in Nederland zijn bekleed met steenzettingen. Voor de beoordeling en het ontwerp van al deze steenzettingen wordt momenteel Steentoets gebruikt, dat gebaseerd is op vele jaren onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen. Steentoets past echter niet meer goed bij de nieuwe manier van rekenen aan de faalkans van dijken, gebaseerd op een faalpadenanalyse. Dat is de aanleiding om de hele opzet van het rekenmodel nader te evalueren. Gezien het naderende pensioen van Mark Klein Breteler, expert op het gebied van steenzettingen, is deze evaluatie urgent. Daarnaast kan deze evaluatie eveneens gebruikt worden om de kennis van Mark over te dragen op zijn opvolgers.



Figuur 1-1, Aanleg Steenzettingen van Hydroblocks

Het is de wens om voor BOI uiteindelijk de beoordeling van steenzettingen te implementeren in Dikernel met een modulaire opbouw. Dat wordt een traject van een aantal jaren. Het doel van het huidige SITO-IS project is het analyseren van een aantal belangrijke componenten van de kennis over steenzettingen en hoe dit thans in Steentoets is opgenomen, zodat er een goed plan gemaakt kan worden voor de herziening van de software.

2 Hydraulische belasting

2.1 Inleiding

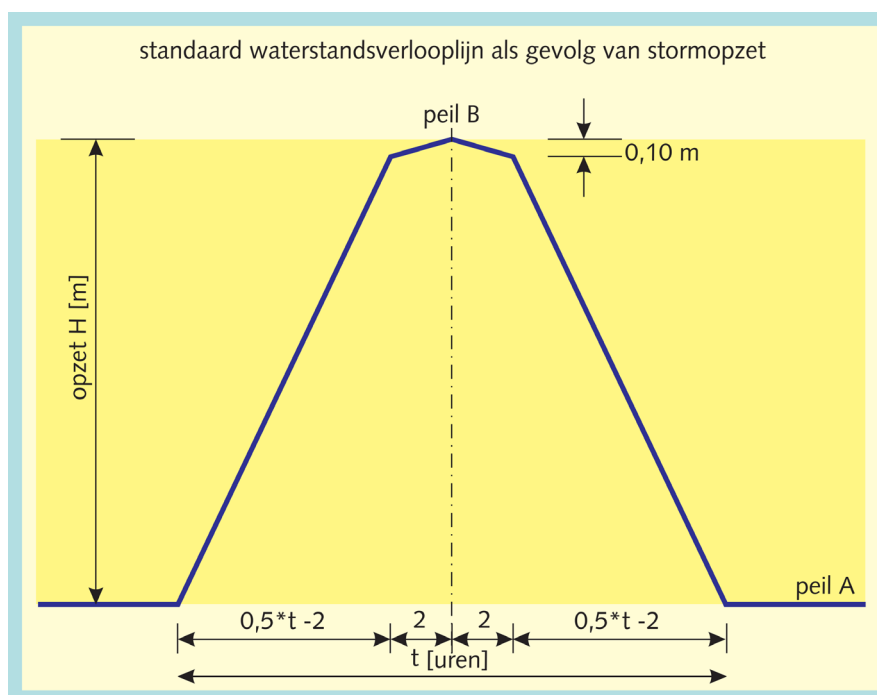
Voor het afleiden van hydraulische belastingen wordt verwezen naar de achtergrondrapporten en handleidingen die vanuit het BOI beschikbaar zijn. Dit is geen onderdeel van voorliggende rapportage. Deze rapportage licht uitsluitend de relevante informatie en kennisleemtes voor steenzettingen toe.

Voor steenzettingen wordt gewerkt met de trajectnorm als basis voor het berekenen van de hydraulische belastingen. Hierop is het rekenmodel Steentoets gekalibreerd (Jongejan en Klein Breteler, 2015).

Bij een bepaalde overschrijdingsfrequentie kunnen met Hydra-NL of Riskeer voor elke relevante waterstand (maximale waarde in de storm) de bijbehorende golfcondities bepaald worden. Een tabel met golfcondities (significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting) per waterstand vormt de basis voor de berekeningen in Steentoets.

2.2 Waterstand

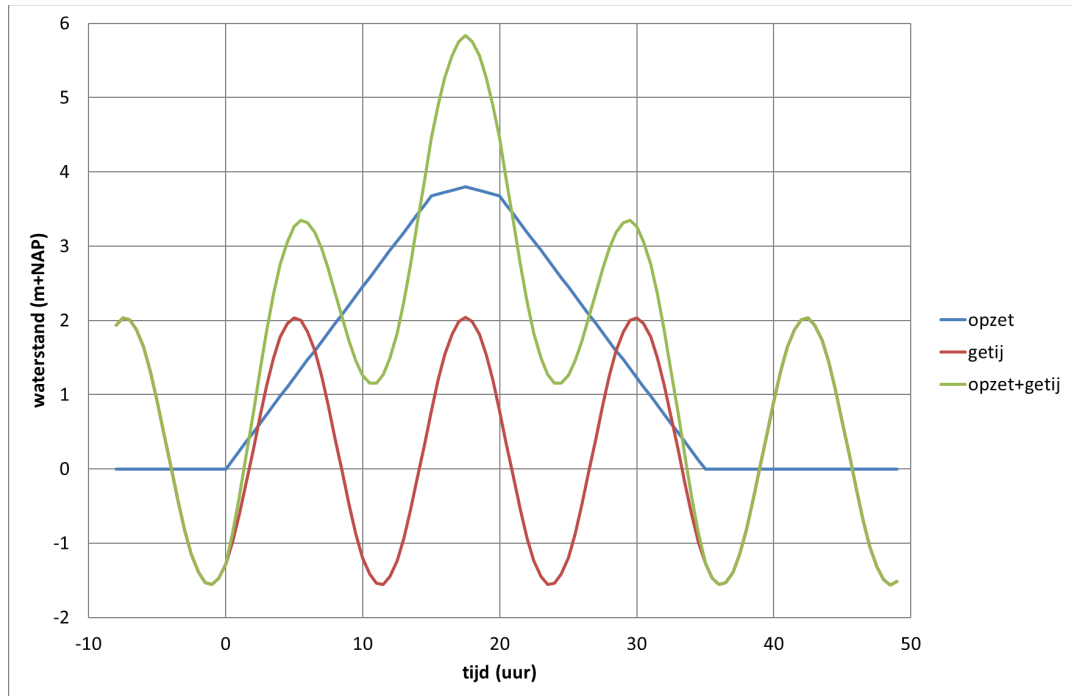
Voor het verloop van de waterstand wordt in Steentoets een trapeziumvormige stormopzet gebruikt met daarop gesuperponeerd het getij. Deze methode is sinds de VTV-2004, en bijbehorende hydraulische belastingen uit HR2006, niet meer veranderd. Het verloop van de stormopzet is weergegeven in Figuur 2-1, waar te zien is dat op de 4 uur durende top van de stormopzet nog een kleine verhoging van 10 cm wordt toegepast.



Figuur 2-1, Trapeziumvormige stormopzet volgens HR2006 (figuur 2-10)

Dit verloop van de opzet wordt in Steentoets opgeteld bij de gemiddelde getijcurve, waarbij hoogwater samenvalt met de maximale stormopzet. Voor de getijcurve wordt een sinus aangehouden met top en dal op het niveau van de ingevoerde waardes van gemiddeld

hoogwater en laagwater. Een voorbeeld van het resulterende waterstandsverloop voor een kustlocatie is te zien in Figuur 2-2.



Figuur 2-2, Geschematiseerd verloop van de waterstand tijdens een storm met duur van 35 uur

Voor de Waddenzee wordt een stormduur van 45 uur gehanteerd en voor de andere kustlocaties en meren wordt 35 uur aangehouden. Op de rivieren is er een constante waterstand met een stormduur van 12 uur.

Op basis van zo'n waterstandsverloop wordt de belastingduur per zetsteen in het dwarsprofiel berekend, zie Paragraaf 2.4.

2.2.1 Maatgevende waterstand

Op elke steenzetting is er een zone met de ongunstigste verhouding tussen de sterkte en de belasting. Deze zone is bepalend voor het resultaat van de stabiliteitsberekeningen. De waterstand in de storm waarbij deze zone maximaal wordt belast is de maatgevende waterstand. Dit is vaak niet de waterstand op de top van de storm, ondanks dat dan de golven vaak het grootst zijn. Dat komt omdat de belastingduur, die op de top maar kort is, ook belangrijk is voor de stabiliteit van steenzettingen.

Er worden in het huidige beoordelingsinstrumentarium (Steentoets) resultaten bij verschillende waterstanden berekend, beginnend met de waterstand op de top van de storm. Bij elke waterstand wordt de belastingduur berekend (zie Paragraaf 2.4) en worden door middel van lineaire interpolatie de golfcondities (golfhoogte, golfperiode en golfrichting) berekend (zie Paragraaf 2.3).

Vervolgens wordt stap voor stap de storm doorlopen om het niveau op de steenzetting te vinden waarvoor de stabiliteit het laagst is (kleinste verhouding tussen sterkte en belasting). De waterstand wordt in stappen van 30 cm verlaagd, zodat steeds weer een ander deel van de steenzetting door de golven belast wordt. In de buurt van de zone met de kleinste stabiliteit wordt deze procedure verfijnd naar stappen van 5 cm.

Deze procedure levert de maatgevende waterstand voor de steenzetting, waar de stabiliteit het laagste is. Dit levert het eindoordeel over de top laagstabiliteit. Deze waterstand wordt vervolgens ook gebruikt voor het beoordelen van de andere mechanismen:

- Stabiliteit in stroming.
- Materiaaltransport door de top laag.
- Materiaaltransport van de onderlaag.
- Lokale afschuiving door golfbelasting.
- Erosie van de onderlagen.

2.3 Golfcondities

Onder de golfcondities worden de golfhoogte, -periode en -richting verstaan. Deze worden in het huidige instrumentarium berekend met behulp van Hydra-Ring of Hydra-NL, en vervolgens per waterstand opgegeven in Steentoets. Dit levert een tabel op met per waterstand de golfhoogte, golfperiode en golfrichting (golventabel). De berekeningen in Hydra-Ring vallen buiten de scope van dit document.

De golfperiode kan binnen Steentoets door de gebruiker opgegeven worden als een T_p of een $T_{m-1,0}$. Op deze manier wordt optimaal aangesloten op de beschikbare gegevens. De golfperiode werkt in de berekeningen door omdat het bijvoorbeeld invloed heeft op de golfsteilheid, en daarmee het type belasting op de steenzetting (zie ook Paragraaf 3.2). Verder bepaalt de golfperiode het aantal golven, en dus belastingherhalingen, op de steenzetting per tijdstep. Om het aantal golven te bepalen wordt de gemiddelde golfperiode gebruikt. Het omrekenen van piekperiodes en spectrale golfperiodes wordt gebaseerd op een smal spectrum. Dit is een belangrijke aanname voor de bepaling van het aantal golven (N). Een breed spectrum of anders vormig spectrum leidt tot andere resultaten. Er is gekozen voor een smal spectrum omdat dit aansluit op het spectrum dat is toegepast tijdens de Deltagootproeven die gebruikt zijn voor diverse empirische relaties in Steentoets.

De hoek van golfinval ten opzichte van de dijknormaal wordt in Steentoets met 15 graden verkleind. Dit heeft zijn herkomst in de golfcondities zoals deze in Hydra-Ring berekend worden. In Hydra-Ring werden in het verleden golfcondities uitgerekend per segment van 30 graden. Het was dus mogelijk dat de opgegeven golfcondities 15 graden schuiner of rechter invallen. In Steentoets is hier rekening mee gehouden door aan de veilige kant te gaan zitten en ervanuit te gaan dat de golven 15 graden rechter op het talud invallen. Op dit moment wordt in Hydra-Ring met 16 windrichtingen gewerkt, dus segmenten van 22,5 graden (BOI, 2024). De aanbeveling is daarom om deze parameter te heroverwegen in een nieuw rekenmodel. In Steentoets is tot nu toe gekozen om met de meest ongunstige hoek binnen het segment te rekenen, om zo een veilige waarde te krijgen, terwijl er ook argumenten zijn om iets minder ongunstig (veilig) te rekenen. Verder is de parameter niet geschikt voor probabilistisch rekenen, want daarvoor zou de hoek van golfinval een stochast moeten worden.

In Steentoets wordt er gerekend met een variërende golfhoogte, golfperiode en golfrichting tijdens de storm. Deze waarden worden bepaald aan de hand van de waterstand op elk moment in de storm, zie Paragraaf 2.2. Op de relevante momenten in de storm wordt eerst de waterstand uit het waterstandsverloop bepaald en vervolgens worden door middel van lineaire interpolatie de golfhoogte, golfperiode en golfrichting bepaald uit de golventabel.

Deze werkwijze heeft als consequentie dat de golfcondities in de verschillende fases van de storm eigenlijk niet bij elkaar passen, maar horen bij verschillende stormgebeurtenissen. Desondanks geeft dit goed bruikbare resultaten, zolang het locaties betreft langs de kust en de oostzijde van het IJsselmeer/Markermeer, waar de windsnelheid en de waterstand sterk gecorreleerd zijn. Aan de westzijde van het IJsselmeer en op de rivieren levert dit echter een

foutief verloop van de golfcondities. Dat komt omdat bij een hoge waterstand een groot deel van de kansruimte gebruikt is voor het meerpeil (of rivierafvoer) en daardoor is de windsnelheid beperkt. De grootste windsnelheden worden berekend bij de laagste waterstanden. Zonder aanpassingen rekent Steentoets daardoor met hoge golven bij lage waterstanden en lage golven op de top van de storm bij de hoogste waterstand. Omdat dit onlogisch is, moet op dit soort locaties het verloop van de golfcondities anders berekend worden. Deze problematiek is nader toegelicht in Bijlage B. Hierin worden tevens voorbeeldberekeningen gegeven, waaruit blijkt dat steenzettingen onterecht kunnen worden goedgekeurd of afgekeurd door de wijze waarop de golfcondities nu worden bepaald. Er wordt aanbevolen om, in gevallen waar de golfcondities geen logisch verloop hebben ten opzichte van de waterstand de werkwijze aan te passen, beginnend met een plan uit te werken hoe het rekenmodel voor de hydraulische belastingen het beste kan worden aangepast.

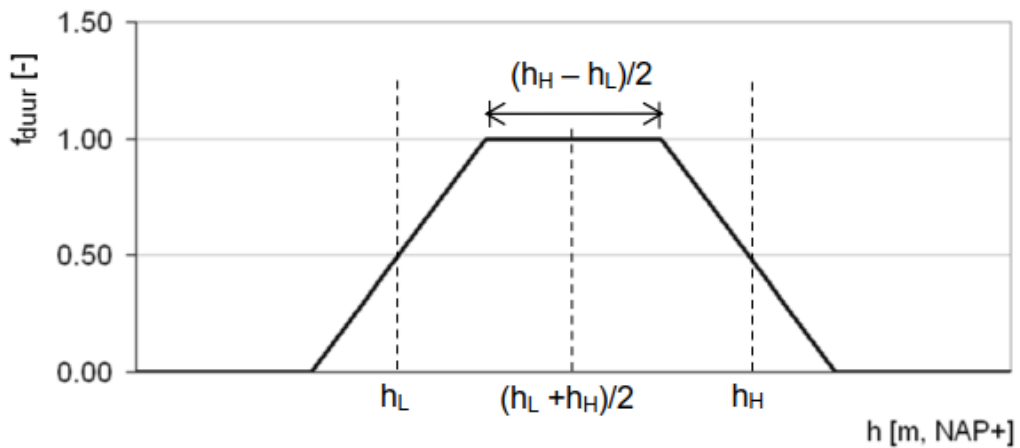
2.4 Belastingduur

Golfklappen komen niet gedurende een hele storm op de zelfde locatie op de steenzetting neer. Naast de grootte van de belasting wordt de stabiliteit van de steenzetting bepaald door de belastingduur op een bepaald niveau van de steenzetting. Het is daarom van belang om een goede inschatting te hebben van de locatie waar golfklappen op de bekleding neerkomen bij een bepaalde waterstand.

In Steentoets worden eerst steenzettingen die heel hoog of laag liggen goedgekeurd omdat er geen golfklappen (of belasting door golfoploop) op terecht komen. Vervolgens worden achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen om de belastingduur te bepalen:

- Berekenen van de maatgevende waterdiepte op een halve diepwatergolf lengte afstand van de teen.
- Berekenen van de locatie met de maximale belasting. Deze locatie is afhankelijk van welke van de vier verschillende belastinggevallen geldig is (zie Paragraaf 3.1). In Steentoets worden deze belastinggevallen versimpeld tot twee situaties; één met een korte, en één met een lange leklengte. Hiervoor is gekozen omdat er veel andere onzekerheden zijn rondom waterstandsverlopen gedurende een storm, en in de belastinggevallen zelf (zie ook Hoofdstuk 3). Het werd daarom niet zinvol geacht om steeds de vier verschillende belastinggevallen te beschouwen voor het bepalen van de locatie waar de maximale belasting plaatsvindt.
- Bepalen van de onder- en bovengrens van de belaste zone (h_L en h_H), op basis van de locatie met de maximale belasting.
- Per niveau (h) berekenen in hoeverre een tijdstap bijdraagt aan de belastingduur op dat niveau (f_{duur}), zie Figuur 2-3. Er wordt gerekend met tijdstappen van 0,2 uur.
- Bepalen van de belastingduur, als tweemaal (voor twee zijden van de stormopzet trapezium) de som van alle effectieve tijdsduren, met een minimum van 1000 golven.

In het algemeen wordt de methode gezien als een logische manier om de belastingduur per niveau te berekenen. In de laatste stap wordt een belastingduur in uren uitgerekend. Op basis van de laatste ontwikkelingen (Huppés en Klein Breteler, 2024) is het logischer om het aantal golven te gebruiken, wat een kleine wijziging in het totale protocol betekent. Tenslotte zal het na de overgang naar een rekenwijze op basis van een Minersom niet meer nodig zijn om eerst de delen die hoog of laag op het talud liggen goed te keuren, dit gebeurt automatisch bij het uitrekenen van de Minersom.



Figuur 2-3, Factor f_{duur} per niveau h als functie van h_L en h_H

2.5 Kennisleemtes en ontwikkelingen hydraulische belasting

Uit dit hoofdstuk volgen een aantal kennisleemtes en ontwikkelingen die relevant zijn voor de hydraulische belastingen van steenzettingen. In deze paragraaf worden deze verder toegelicht.

Tot nu toe wordt er gerekend in Steentoets met de trapeziumvormige stormopzet van Figuur 2-1 met erbij gezochte golfcondities met weliswaar de juiste herhalingstijd, maar die niet noodzakelijkerwijs bij elkaar horen in één storm. Voor veel locaties komt het erop neer dat er gerekend wordt met een constante windsnelheid gedurende de gehele storm, hetgeen ook niet realistisch is. In de loop der tijd zijn er diverse variaties ontwikkeld:

- Constante stormopzet op de top van de storm gedurende 4 uur, dus zonder de 10 cm verhoging uit de VTV-2004.
- Faseverschuiving tussen de top van de stormopzet en het hoogwater van het getij (2,5 uur voor Zeeland en 5,5 uur voor de Waddenzee).
- Trapeziumvormig verloop van de golfhoogte, zoals de waterstand, met een constante golfsteilheid die gelijk is aan de golfsteilheid op de top van de storm.
- Trapeziumvormig verloop van de golfhoogte, maar beginnend bij een bepaalde startgolfhoogte en eindigend bij dezelfde waarde.

Het is nooit goed onderzocht of deze aanpassingen ook voor Steenzettingen een goede verbetering zijn. Daarom is er steeds terughoudendheid betracht om deze veranderingen ook in Steentoets door te voeren.

De werkwijze in Steentoets gaat met name fout als de waterstand en de golfcondities weinig correlatie hebben, zoals op de rivieren en de westkant van het IJsselmeer/Markermeer. Op die locaties worden door Steentoets hoge waterstanden gecombineerd met lage golven en lage waterstanden met hoge golven, om die vervolgens in één stormgebeurtenis te combineren. Omdat dit onjuist is, is dit met een work-around opgelost in Steentoets.

Een veelbelovende ontwikkeling is de nieuwe manier om hydraulische belastingen af te leiden op basis van simulaties van extreme weersomstandigheden. Deze ontwikkeling begint nu zijn eerste vruchten af te werpen, zoals met het rapport van Hegnauer e.a. (2023). Door de weersomstandigheden te simuleren in het stroomgebied van de rivieren kan de rivierwaterstand tijdens extreme omstandigheden berekend worden. Hiervoor wordt momenteel GRADE (Generation of Rainfall and Discharge Extremes) gebruikt. GRADE is een combinatie van een stochastische weergenerator, een hydrologisch model en een

hydrodynamisch model. Het wordt gebruikt voor het simuleren van tienduizenden jaren aan afvoeren in de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen. Op basis van deze reeksen wordt afvoerstatistiek bepaald. De ontwikkelingen van GRADE zijn gestart in 1998 en sinds 2014 (versie GRADE 2.0) wordt GRADE officieel toegepast binnen het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI2017) voor het genereren van de afvoerstatistiek en golfvorm. Thans wordt GRADE 3.0 ingezet.

Een modelmatige aanpak kan ook ingezet worden voor wind. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van de regionale RACMO reeksen van KNMI, die nu 240 jaar beslaan. Er zijn ook simulaties met andere modellen, zoals de seizoensverwachtingen SEAS5 van het ECMWF. Hiermee heeft het KNMI reeksen van druk- en windvelden boven de Noordzee gecreëerd met een lengte van 8.000 jaar. Deze zijn input geweest voor het DSCM model waarmee tijdreeksen van dezelfde lengte voor de waterstand op de Noordzee zijn gegenereerd. Deze reeksen vormen weer de basis voor nieuwe statistiek voor wind en zeewaterstand op kustlocaties. In principe is iets dergelijks ook voor binnenwateren mogelijk, maar dan is aanvullende downscaling nodig. Vooralsnog is dat niet in gang gezet.

Naast het afleiden van nieuwe statistiek, bieden de reeksen inzicht op een veel gedetailleerder niveau in extreme stormen, inclusief het samenhangende verloop van de stormduur, waterstand, windsnelheid, windrichting en golfcondities. De langjarige reeksen vormen ook de basis van de ontwikkeling van een nieuw belastingmodel (in het kader van Kennis voor Keringen, KvK), waarin de tijdverlopen van de gelijktijdig voorkomende waterstanden en golfcondities optreden. Een belangrijke vraag die daar nog altijd voorligt, is hoe nauwkeurig de tijdverlopen moeten zijn. Moeten alle stormen uit de reeks worden meegenomen, of kan worden volstaan met een middeling, of in extremum 1 schematische weergave. Dit is een belangrijke vraag in het lopende onderzoek naar tijdsafhankelijkheid (ook in KvK), waarbij het belastingmodel wordt ingezet. Het is zeer waarschijnlijk dat deze vraag per faalmechanisme een ander antwoord geeft. Om deze reden is het noodzakelijk om ontwikkelingen op het gebied van tijdsafhankelijkheid in gezamenlijkheid op te pakken, dus belasting en sterkte samen. Dat geldt ook voor steenzettingen. Alleen met de juiste afstemming tussen belastingen en sterkte, is het mogelijk om het rekenmodel voor steenzettingen zodanig te maken dat er gerekend kan worden aan extreme condities waarin de nodige en voldoende geachte tijdsafhankelijke aspecten zitten.

Per niveau van de steenzetting wordt een minimum van 1000 golven aangehouden. Dit is in lijn met stabiliteitsproeven voor steenzettingen in de Deltagoot, die doorgaans getest worden voor een belastingduur van 1000 golven. Numeriek is er echter geen bezwaar om van het minimum van 1000 golven af te wijken. Bij een nieuw instrumentarium kan hier dus een andere keuze in gemaakt worden.

Voor de hoek van golfval wordt nu aan de veilige kant gerekend door de golven altijd 15 graden rechter in te laten vallen dan uit Hydra-Ring volgt. Dit heeft zijn herkomst in de golfcondities zoals deze in Hydra-Ring berekend worden. In Hydra-Ring werden in het verleden golfcondities uitgerekend per segment van 30 graden. Het was dus mogelijk dat de opgegeven golfcondities 15 graden schuiner of rechter invallen. In Steentoets is hier rekening mee gehouden door aan de veilige kant te gaan zitten en ervanuit te gaan dat de golven 15 graden rechter op het talud invallen. In het algemeen zullen hydraulische belastingen stochastisch worden wanneer probabilistisch gerekend gaat worden, dus wordt aanbevolen om deze aanname te heroverwegen in een nieuw rekenmodel.

3 Belasting op de steenzetting

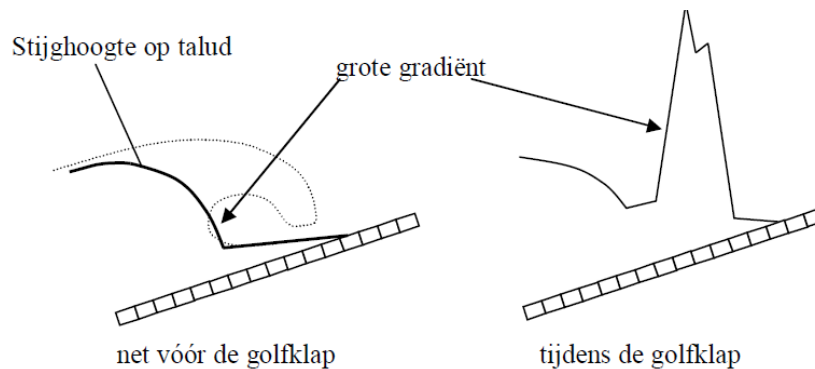
3.1 Schematisatie stijghoogteverloop op de toplaag

De belasting op de steenzetting wordt gekwantificeerd door het stijghoogteverschil over de toplaag, dus het verschil tussen de stijghoogte op de toplaag en de stijghoogte in het filter. Grote stijghoogteverschillen kunnen leiden tot het eruit lichten van stenen (niet-ingegoten steenzettingen) of tot scheuren in ingegoten steenzettingen. Een grote belasting op de steenzetting ontstaat op twee momenten (Figuur 3-1):

- Op het moment vlak vóór de golfklap, waarbij er een muur van water op het talud staat met een steil stijghoogtefront.
- Tijdens de golfklap, als er lokaal een (zeer) hoge stijghoogte op het talud aanwezig is.

Voor relatief open bekledingen zal vooral de golfklap van belang zijn, maar voor relatief dichte steenzettingen is ook het steile golffront van belang.

Het is voor moderne steenzettingen vooral de grote gradiënt in het stijghoogteverloop op de toplaag (zie Figuur 3-1) die leidt tot grote stijghoogteverschillen.



Figuur 3-1 Stijghoogteverloop op de toplaag (Klein Breteler e.a., 2012)

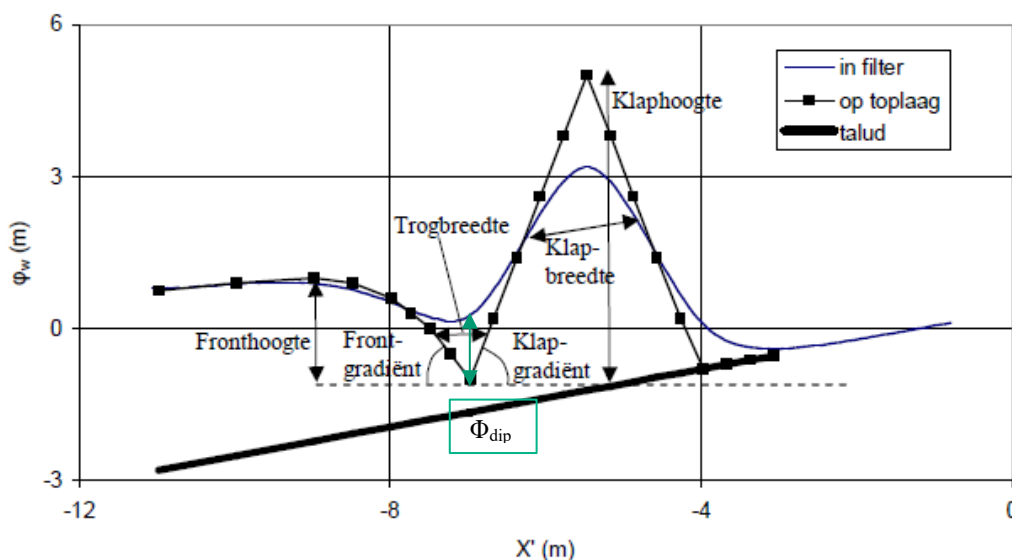
In het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen is het karakteristieke verloop van de stijghoogte op de toplaag tijdens deze twee momenten gekwantificeerd (Klein Breteler e.a., 2006; Klein Breteler e.a., 2012). De belangrijkste eigenschappen van golfklappen en golffronten zijn gekwantificeerd op basis van een analyse van gemeten drukken op het talud in kleinschalig en grootschalig modelonderzoek (Tabel 3.1). In Klein Breteler e.a. (2012) zijn twee stijghoogteverlopen voor de golfklap en twee verlopen voor het golffront bepaald, die momenteel nog steeds in Steentoets worden gebruikt (Mourik, 2023).

3.1.1 Schematisatie golfklap

Het stijghoogteverloop tijdens de golfklap wordt gekarakteriseerd door een aantal basiseigenschappen (Figuur 3-2):

- De fronthoogte tijdens de golfklap ϕ_{bklap} .
- De frontgradiënt tijdens de golfklap (steilheid van het front) θ_{fklap} .
- De trogbreedte B_{trog} .
- De klapgradiënt (steilheid van de golfklap bij de trog) θ_k .
- De klapbreedte, evenwijdig aan het talud gemeten B_{klap} .
- De klaphoogte (t.o.v. de trogdiepte: de maximale stijghoogte in de golfklap t.o.v. de minimale stijghoogte in de trog) ϕ_k .

Daarnaast is de gediptheid ϕ_{dip} geïntroduceerd in de analyses (Klein Breteler e.a., 2012) als inschatting van het maximale opwaartse stijghoogteverschil over de toplaag. De gediptheid is het maximale verschil tussen de stijghoogte op het talud en het gedempte stijghoogteverloop in het filter (Figuur 3-2). Ter plaatse van de trog treedt meestal het grootste stijghoogteverschil over de toplaag op en is de grootste zetsteenbeweging te verwachten. Deze gediptheid is uitsluitend bedoeld voor onderzoeksdoeleinden en is niet geïmplementeerd in het rekenmodel Steentoets. In het onderzoek geeft het de mogelijkheid om aan de hand van het verloop van de stijghoogte op de toplaag een schatting te maken van de locatie en grootte van het stijghoogteverschil. Dit helpt bij het kwantificeren van de maatgevende golfklappen.



Figuur 3-2 Schematisatie stijghoogteverloop tijdens een golfklap (Klein Breteler e.a., 2012)

Het maatgevend stijghoogteverloop op de toplaag is bepaald in Klein Breteler e.a. (2006) waarbij het verloop van de stijghoogte wordt weergegeven met 8 punten. De drukken in het filter waren niet gemeten tijdens de proeven, maar wel noodzakelijk om de stabiliteit van steenzettingen te bepalen. In de analyse wordt het stijghoogteverloop in het filter benaderd door het vloeiend maken van het gemeten stijghoogteverloop op de toplaag met een voortschrijdend gemiddelde. De analyse van een groot aantal specifieke golfklappen toont dat er twee type golfklappen zijn die leiden tot grote stijghoogtegradiënten (Figuur 3-3 t/m Figuur 3-6). Er wordt geconcludeerd dat het voldoende is om deze twee als karakteristieke golfklappen te hanteren. De andere golfklappen lijken hier op en hoeven dus niet apart doorgerekend te worden.

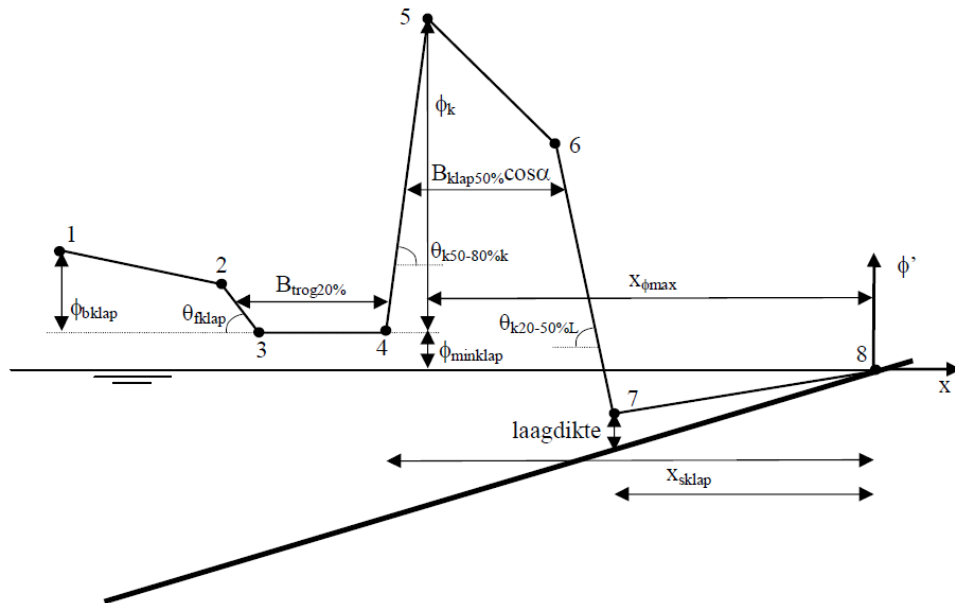
Het eerste type golfklap is vergelijkbaar met verloop weergegeven in Figuur 3-2, waarbij de locatie van de maximale gediptheid x_{sklap} soms zeewaarts (punt 4) en soms landwaarts (punt 7) van de golfklappen plaatsvindt afhankelijk van de eigenschappen van de golfklap (Figuur 3-3). In het tweede type golfklap ontbreekt de trog wat leidt tot de schematisatie in Figuur 3-4.

De relevante variabelen voor het maatgevend stijghoogteverloop van de golfklap zijn bepaald met een gevoeligheidsanalyse en de resultaten van proeven (Klein Breteler e.a., 2006). De variabelen die invloed hebben op het maximale stijghoogteverschil zijn gebruikt in de schematisatie. In de schematisaties geven de percentages in de namen van de variabelen aan in welk deel van de golfklap of het front het gemiddelde bepaald is. Dus $B_{trog20\%}$ is

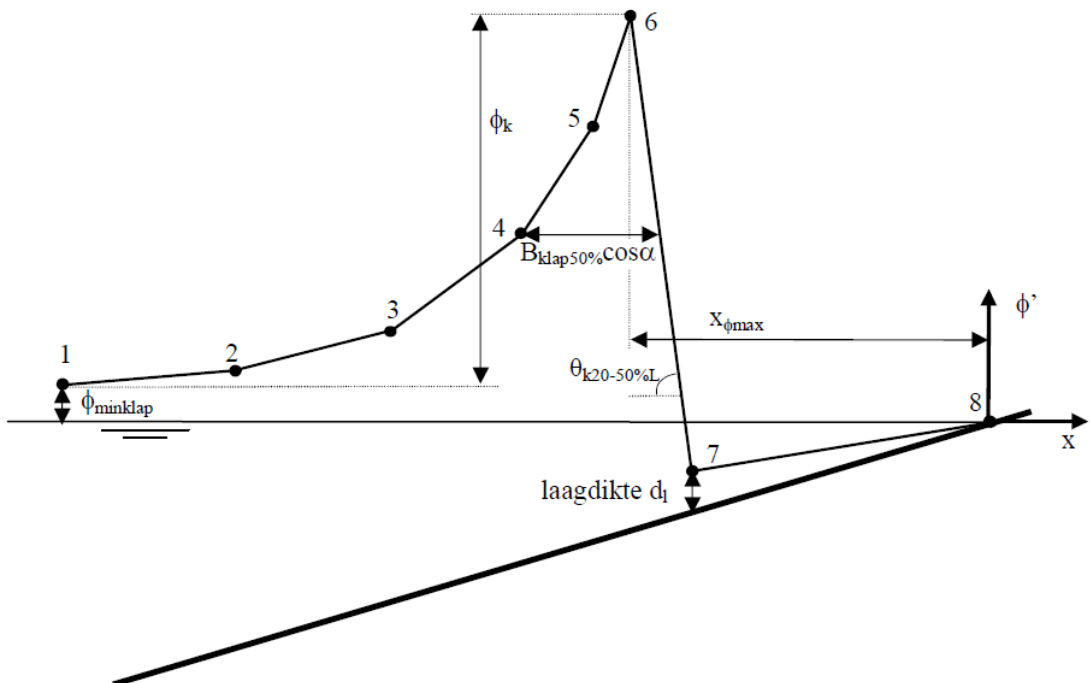
bijvoorbeeld de breedte van de trog tussen de golfklap en de restanten van het golffront, gemeten op 20% van de fronthoogte. Daarnaast zijn de volgende variabele geïntroduceerd:

- De stijghoogte op het talud t.o.v. de stilwaterlijn ϕ .
- De stijghoogte in de trog tussen de golfklap en de restanten van het golffront ten opzichte van de stilwaterlijn ϕ_{minklap} .
- De horizontale afstand van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud tot de locatie met grootste stijghoogte in de golfklap $x_{\phi_{\text{max}}}$.

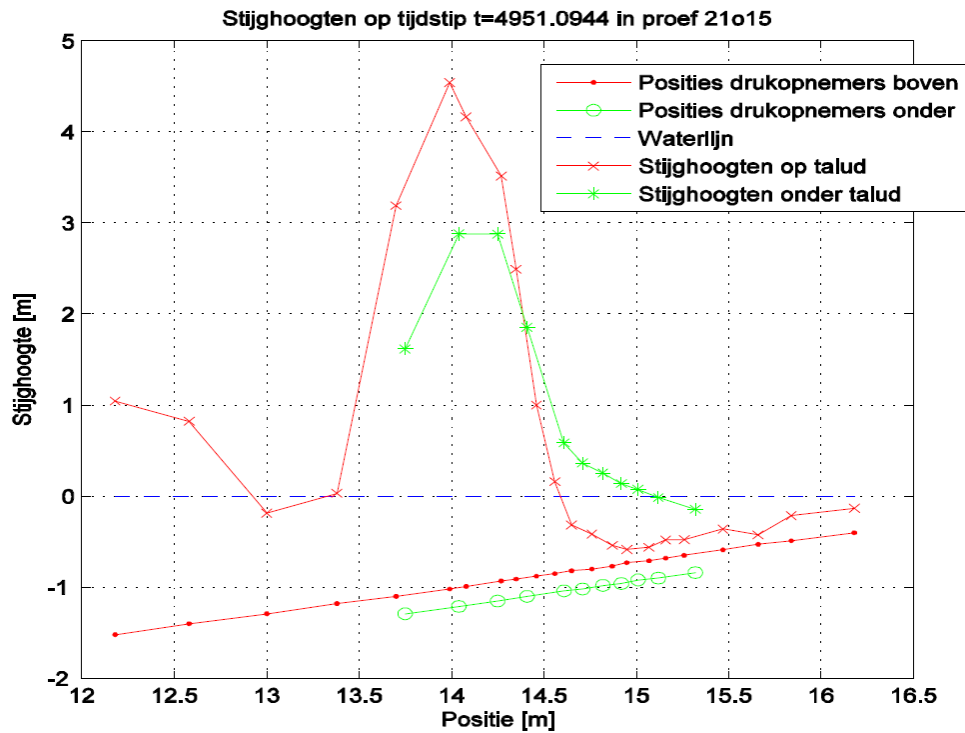
Een voorbeeld van een gemeten stijghoogteverloop van het golfklap type 1 en type 2 zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 3-5 en Figuur 3-6.



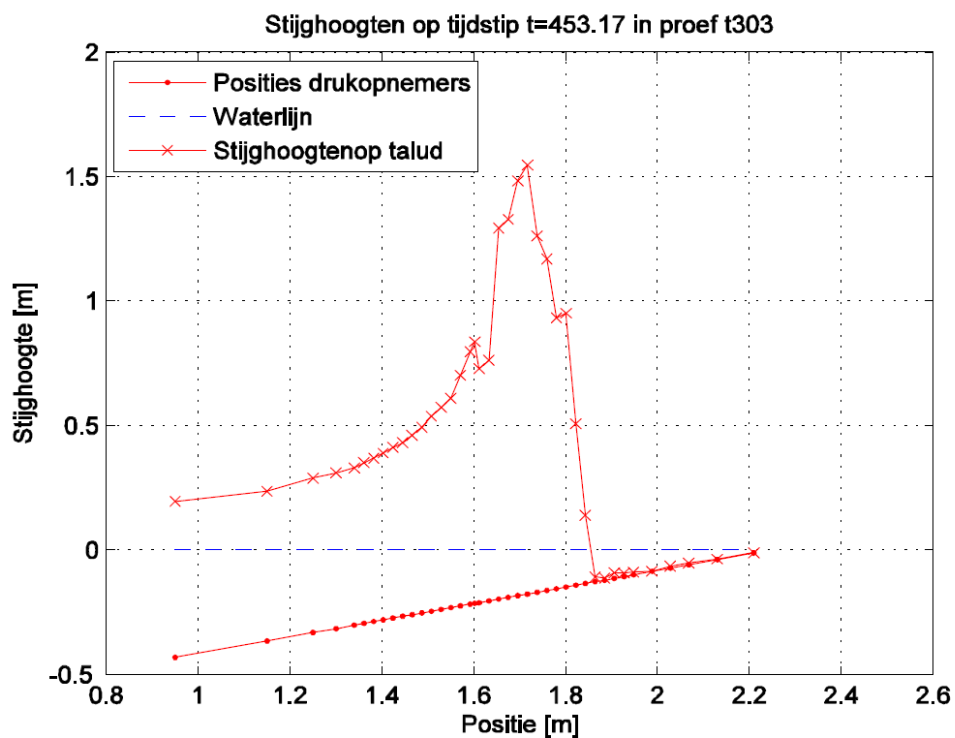
Figuur 3-3 Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens de golfklap van type 1 (Klein Breteler e.a., 2006)



Figuur 3-4 Schematische weergave van golfklap van type 2 (Klein Breteler e.a., 2006)



Figuur 3-5 Voorbeeld van een gemeten stijghoogteverloop van golfklap type 1 waarbij de drukopnemers op de toplaag en in het filter zijn geplaatst (Klein Breteler e.a., 2006)



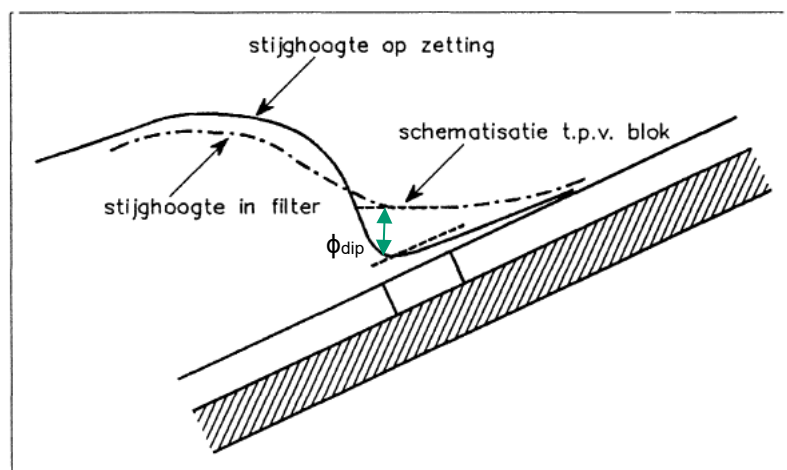
Figuur 3-6 Voorbeeld van een gemeten stijghoogteverloop van golfklap type 2 (Klein Breteler e.a., 2006)

De formules die gegeven worden in Klein Breteler e.a. (2006) om de coördinaten van de 8 punten van het stijghoogteverloop te bepalen komen grotendeels overeen met de formules in de huidige versie van Steentoets (Mourik, 2023). Voor golfklap type 1 is er een begrenzing toegevoegd voor de x-coördinaat van punt 6 en punt 7 en voor golfklaptype 2 is er een begrenzing toegevoegd voor de x-coördinaat van punt 4.

Bij moderne steenzettingen, die doorgaans een relatief kleine lek lengte hebben, treedt voornamelijk een groot stijghoogteverschil op waar de gradiënt in het stijghoogteverloop op de toplaag het grootste is. Dit introduceert tevens een belangrijke zwakte in het onderzoek, omdat deze gradiënt sterk bepaald wordt door de meetbaarheid hiervan. Het stijghoogteverloop wordt gemeten door middel van drukopnemers op het talud met een bepaalde onderlinge afstand. Naarmate drukopnemers dicht bij elkaar worden gezet, kan een grotere gradiënt worden gemeten. De waardes waarmee momenteel gerekend wordt in Steentoets, zitten heel dicht bij de maximale waarde die meetbaar is bij de modelproeven waarop ze zijn gebaseerd.

3.1.2 Schematisatie golffront

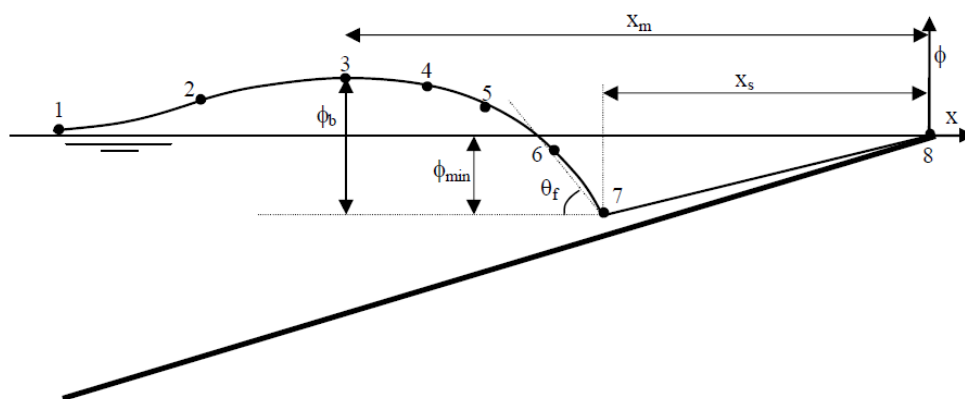
De proefresultaten van De Waal e.a. (1995) zijn de basis voor het stijghoogteverloop op de toplaag tijdens het optreden van een steil en/of hoog front, vlak voor de golfklap. Het maatgevende moment voor de stabiliteit van moderne steenzettingen met relatief kleine lek lengte is ten tijde van de maximale steilheid van het front. Daar is de locatie waar het stijghoogteverschil maximaal is (Figuur 3-7). Het stijghoogteverschil is maximaal bij de voet van het front.



Figuur 3-7 Schematisatie stijghoogteverloop tijdens het golffront (De Waal e.a., 1995)

Het stijghoogteverloop van het golffront wordt gekarakteriseerd door vijf basiseigenschappen (Figuur 3-8):

- De minimale stijghoogte aan de voet van het stijghoogtefront ϕ_{\min} ten opzichte van de stilwaterlijn (altijd een negatieve waarde).
- De hoogte van het stijghoogtefront t.o.v. de minimale stijghoogte ϕ_b .
- De helling van het stijghoogtefront θ_f .
- De horizontale afstand van de voet van het stijghoogtefront tot de snijlijn van de waterlijn en het talud x_s (altijd een positieve waarde).
- De horizontale afstand van de top van het front tot de snijlijn van de waterlijn en het talud x_m .



Figuur 3-8 Schematische weergave van het stijghoogteverloop van het golffront (Klein Breteler e.a., 2006)

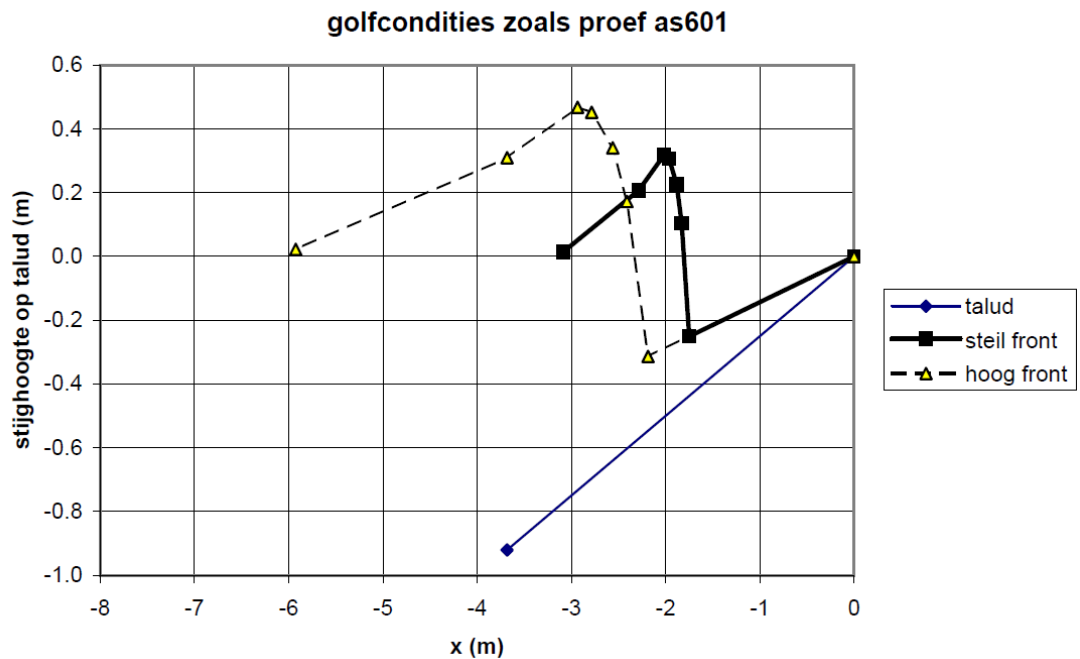
Voor het bepalen van het maatgevend stijghoogteverloop zijn de fronthoogte en de fronthelling belangrijk. Fronten ontstaan tijdens maximale golferugtrekking, en een naderende opvolgende golf. Er bevindt zich dan een muur van water op het talud, wat een golffront wordt genoemd. Het is gebleken dat een zeer hoog front en een zeer steil front niet plaatsvinden in dezelfde golf. Op basis van metingen is in Klein Breteler e.a. (2012) een formule afgeleid voor de fronthoogte met 2% overschrijdingswaarde en de fronthelling met 2% overschrijdingswaarde. In een verdere analyse van Klein Breteler e.a. (2006) blijkt dat de fronthelling van de hoge fronten doorgaans kleiner is dan deze 2% waarde. Er wordt geconcludeerd dat hoge fronten niet bijzonder steil zijn, en dat een zeer steil front niet bijzonder hoog is (Figuur 3-9).

Afhankelijk van de leklengte zal het steile front met een matige hoogte, of het minder steile front met grote hoogte, het grootste stijghoogteverschil geven. Verder kan de steenzetting zover onder water zitten dat alleen de hoge fronten een relevant stijghoogte verschil geven. Daarom zijn er twee stijghoogteverlopen bepaald voor het golffront: een steil front en een hoog front. De formules voor de coördinaten van de 8 punten van het stijghoogteverloop in Figuur 3-8. De waardes van de punten zijn voor beide verlopen hetzelfde en afhankelijk van de vijf basiseigenschappen. Klein Breteler e.a. (2006) geven empirische formules voor ϕ_{\min} , ϕ_b , θ_f en x_s die verschillen voor een steil front en een hoog front. In Steentoets worden deze formules nog grotendeels gebruikt, maar er zijn twee aanpassingen. Ten eerste is de formule voor de fronthelling veranderd. Daarnaast is er aan de formule voor x_s een invloedsfactor $f_{od,front}$ toegevoegd voor de invloed van ondiepe voorlanden op de locatie van de maximale belasting op het talud.

De locaties van de punten van het stijghoogteverloop en de lokale stijghoogte worden berekend in zowel Steentoets als Klein Breteler e.a. (2006) met de analytische formule voor het Ronde Front van De Waal e.a. (1995):

$$x_m = \frac{3\phi_b + 1,4\phi_{\min}}{\tan \theta_f} + x_s \quad (3.1)$$

Bij de berekening van tussen- en eindresultaten in Steentoets wordt gesproken over het doorrekenen van 5 verschillende typen belastingen (3 golfklappen en 2 stijghoogtefronten). In Paragraaf 5.9 van de Steentoets documentatie (Mourik, 2023) worden 4 stijghoogtefiguren beschreven (golfklap type 1, golfklap type 2, hoog front en steil front), waarbij er op twee locaties in golfklap type 1 een groot stijghoogteverschil optreedt (landwaarts en zeewaarts van de golfklap). Zo komen we aan vijf verschillende belastingssituaties.



Figuur 3-9 Voorbeeld van een gemeten stijghoogteverloop van een steil golffront en een hoog golffront (Klein Breteler e.a., 2006)

3.2 Invloed van de brekerparameter op de stabiliteit

Het brekingsproces is afhankelijk van de taludhelling en verschilt tussen lange en korte golven, waardoor de belasting op de steenzetting verschilt tussen lange en korte golven. De meeste proeven zijn uitgevoerd met korte golven (Tabel 3.1), waarna in Klein Breteler e.a. (2012) de invloed van lange golven op de golfbelasting is onderzocht.

De relatieve lengte van de golven wordt gekarakteriseerd door de golfsteilheid s_{op} en het type brekingsproces wordt gekarakteriseerd door de brekerparameter ξ_{op} :

$$s_{op} = \frac{H_s}{L_{op}} = \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \quad (3.2)$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}} \quad (3.3)$$

Relatief lange golven hebben een kleine golfsteilheid en een grote brekerparameter. De belasting verandert naarmate de brekerparameter verandert. Voor de veelvoorkomende waarden van de brekerparameter ($1,3 < \xi_{op} < 2,3$) is er sprake van overstortende brekers waarbij de golven bij de dijk overkrullen en een golfklap geven op het talud (zie Figuur 3-10). Voor grotere waarden van de brekerparameter, bijvoorbeeld $\xi_{op} > 5$, dan zullen nog maar een paar procent van de golven een golfklap veroorzaken, en gaan de meeste golven enigszins bruisend het talud op (zie Figuur 3-11). Als de brekerparameter nog veel groter wordt, breken de golven niet meer en is er sprake van reflecterende golven.

In Klein Breteler e.a. (2012) zijn er voor het kwantificeren van de invloed van de brekerparameter op de stabiliteit proeven geanalyseerd (Tabel 3.1) waarin de druk op het talud (stijghoogte) is gemeten tijdens een golfbelasting met relatief lange golven ($2,5 < \xi_{op} < 7$) en normale golven ($1,5 < \xi_{op} < 2,5$). De resulterende trends zijn vervolgens geverifieerd met grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot met relatief lange golven op een talud van 1:3 opgebouwd met Hydroblocks.



Figuur 3-10 Drie momenten in een overstortende golf (Klein Breteler e.a., 2012)



Figuur 3-11 Een lange golf gaat bruisend het talud op (Klein Breteler e.a., 2012)

Tabel 3.1 Overzicht van de fysieke modelonderzoeken die gebruikt zijn voor het kwantificeren van de belangrijkste eigenschappen van golfklappen en golffronten en voor het kwantificeren van de invloed van de brekerparameter op de stabiliteit (Klein Breteler e.a., 2012)

Onderzoek	Range	Referentie
Scheldegootonderzoek van 1993	Taludhelling 1:3 – 1:4 Golfsteilheid 0.01 – 0.04 Brekerparameter 1.1 – 2.0	Van der Meer en de Waal (1993).
Deltagoot uit 1991 met een gezette steenbekleding	Taludhelling 1:3 Brekerparameter 1.6 – 2.0	Wouters (1991)
Deltagoot uit 1992 met een asfalttalud	Taludhelling 1:4 Brekerparameter 1.1 – 2.2	Derks en Klein Breteler (1992)
Deltagoot uit 1997/1998 met een gezette steenbekleding	Talud 1:3,5 Berm 5 m breed Brekerparameter 1.4 – 2.2	Klein Breteler (2000)
Scheldegootonderzoek van 2003	Talud 1:3 – 1:4 Brekerparameter 2.5 - 7	Kuiper en Van Vossen (2003)
Deltagootonderzoek van 2004 met een gezette steenbekleding van Hydroblokken	Talud 1:3,5 Brekerparameter 3.3 – 5.0	Klein Breteler (2012)

Op basis van de analyse van de proefresultaten en berekeningen is de invloed van de brekerparameter toegevoegd aan de formules voor de stabiliteit van relatief open steenzettingen ($\Lambda < 1,5$ m; Klein Breteler e.a., 2012):

- $\xi_{op} < 2$: de stabiliteit neemt af met toenemende brekerparameter, bij benadering: $H_s/(\Delta D) = F \xi_{op}^{-2/3}$.
- $2 < \xi_{op} < 5$: de stabiliteit neemt toe met toenemende brekerparameter met ongeveer de volgende trend: $H_s/(\Delta D) = 2^{-2/3} F + 0,5(\xi_{op} - 2)$.
- $\xi_{op} > 5$: gebaseerd op engineering judgement is er een schatting gemaakt dat de stabiliteit constant blijft met een toenemende brekerparameter: $H_s/(\Delta D) = 2^{-2/3} F + 1,5$.

Dit is in Steentoets meegenomen in een subroutine waarbij het stijghoogteverschil van de golfklappen kunstmatig verkleind wordt als de brekerparameter groot is en de leklengte klein is (Mourik, 2023):

$$f_{lang} = 1 + 0,2(\max[(\min(\xi_{op}; 4); 2)] - 2) \cdot \min(\max[1, 75 - 2,5\Lambda; 0]; 0) \quad (3.4)$$

$$\phi_{wmax} = \phi_{wmax} / f_{lang} \quad (3.5)$$

Dit is toegevoegd omdat de toenemende stabiliteit van open steenzettingen met de brekerparameter voor een relatief grote waarde van ξ_{op} nog onvoldoende in de formules tot uiting kwam. Door de complexiteit van o.a. de klemming formules was het niet gelukt om de fysisch realistische grenzen van de formules zo te wijzigen dat de trend overeenkomt met de verwachtingen. Daarom is er gekozen om deze terugvaloptie te programmeren in Steentoets.

3.3 Kennisleemtes en kennisvragen

Momenteel wordt de belasting op de steenzetting gekwantificeerd met een maatgevend stijghoogteverschil over de toplaag. Hiervoor worden 4 geschematiseerde stijghoogteverlopen op de toplaag gebruikt die bestaan uit 8 punten. De coördinaten van deze 8 punten worden berekend met empirische formules.

Deze empirische formules zijn gebaseerd op kleinschalig en grootschalig fysiek model onderzoek en zijn sinds 2006 bijna niet meer aangepast. In Klein Breteler e.a. (2012) worden al een aantal beperkingen benoemd van gebruikte data, zoals schaaffecten gerelateerd aan de samendrukbaarheid van het water en een te grote afstand tussen de drukopnemers waardoor er belangrijke gradiënten gemist kunnen worden.

De constatering dat lokale stijghoogtegradiënten op de toplaag heel belangrijk zijn voor de stabiliteit van de steenzetting, maakt het ook relevant om niet alleen in de dwarsdoorsnede van de dijk te kijken, maar ook naar gradiënten in de richting evenwijdig aan de waterlijn. Zelfs bij perfect loodrechte invallende golven, zal de golfklap niet overal exact op hetzelfde moment op het talud neerkomen. Dat maakt dat er ook tijdelijke stijghoogtegradiënten zijn in de richting evenwijdig aan de waterlijn. Aanbevolen wordt om dit nader te onderzoeken.

In recent Deltagootonderzoek naar de bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkerings-systeem is gebleken dat Steentoets de grootte van de golfklap onderschat voor grote golven met $H_{m0} \approx 2$ m (Klein Breteler e.a. 2024). Dit is een aanwijzing dat de huidige formules uit 2006 wellicht niet kloppen voor het gehele bereik van de golfklappen. Het zou daarom nuttig zijn om de drukken op een hard buitentalud te meten bij grote golven ($H_{m0} = 1.5 - 2$ m) en op basis van deze metingen te onderzoeken of er aanpassingen aan het stijghoogteverloop nodig zijn. Het is hierbij belangrijk dat de onderlinge afstand van de drukopnemers klein is, aangezien alleen dan grote gradiënten meetbaar zijn die belangrijk zijn voor steenzettingen met kleine leklengtes. Er kan ook overwogen worden met nieuwe meettechnieken de druk op het talud ook in de dwarsrichting van de goot te meten om de drukgradiënten in deze richting ook te onderzoeken.

Er worden momenteel 4 geschematiseerde verlopen doorgerekend in Steentoets. Deze verlopen zijn gebaseerd op de leklengtetheorie toen er nog steenzettingen waren met langere leklengtes dan nu gebruikelijk zijn ($\Delta/D > 1$ à 2). De nieuwe steenzettingen hebben veelal een relatief kleine leklengte ($\Delta/D < 1$ à $1,5$). Voor deze moderne steenzettingen is het belangrijk om te onderzoeken of deze verlopen nog wel leiden tot een maatgevende belasting. Het is denkbaar dat andere gradiënten over een kleine afstand – zowel in de dwarsdoorsnede richting als parallel langs de dijk – tot falen van de steenzetting kunnen leiden. Daarnaast is het goed om kritisch te kijken naar het rekenen met een schematisatie van het stijghoogteverloop gebaseerd op een 2% overschrijdingswaarde voor de belasting op de steenzetting. Er kan met de huidige rekentechnieken wellicht ook overwogen worden om de druk voor elke golf in een storm te berekenen op basis van random trekkingen van de basiseigenschappen, of de belasting op de steenzettingen tijdens een storm op een andere manier te kwantificeren.

De invloed van de brekerparameter op de stabiliteit komt onvoldoende tot uiting in de huidige empirische formules. Door de complexiteit van o.a. de klemming formules was het niet gelukt om de fysisch realistische grenzen van de formules zo te wijzigen dat de trend overeenkomt met de verwachtingen. Daarom is er gekozen om een terugvaloptie te programmeren in Steentoets. Wanneer wordt gekozen voor een andere werkwijze voor de klemming, wordt geadviseerd om opnieuw te kijken of de invloed van de brekerparameter verbeterd kan worden in de formules.

4 Klemming als onderdeel van de sterkte

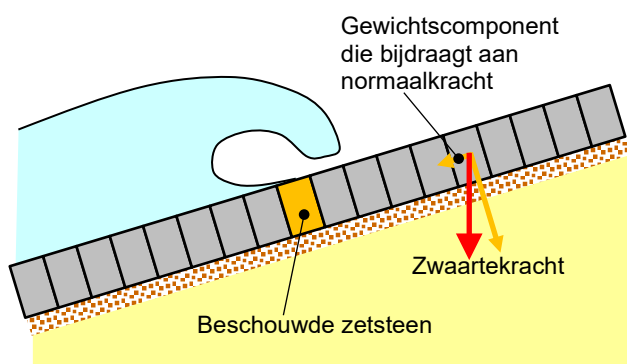
4.1 Inleiding

De hydraulische belasting op Steenzettingen levert een stijghoogte verschil over de toplaag. De sterktecomponenten van de steenzetting moeten tenminste evenwicht maken met dit stijghoogteverschil, want anders treedt instabiliteit van de steenzetting op. Er zijn twee sterktecomponenten, namelijk:

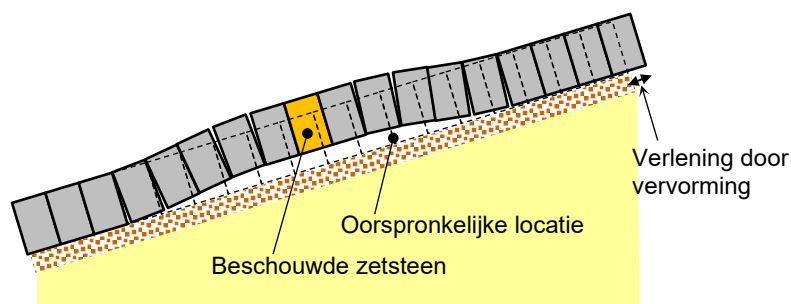
- Het eigen gewicht van de zetstenen.
- De interactie van de zetstenen die zich uit in wrijving en klemming.

Bij wrijving gaat het om langs elkaar schuivende zetstenen, die door deze wrijvingskracht gehinderd worden in hun beweging. Dit draagt bij aan de stabiliteit van de steenzetting. Met klemming wordt bedoeld dat de zetstenen in de toplaag een normaalkracht ondervinden, waardoor de zetstenen gaan functioneren als een buigligger. De bijdrage van klemming aan de stabiliteit kan veel hoger zijn dan de som van het eigen gewicht en de wrijving. Wrijving is echter wel een voorwaarde om klemming mogelijk te maken.

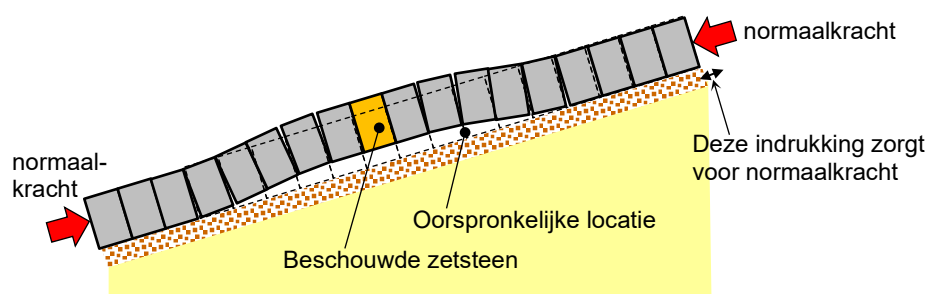
De normaalkracht in de steenzetting wordt enerzijds veroorzaakt door de rijen zetstenen boven de beschouwde zetstenen, die een deel van hun zwaartekracht afdragen in het vlak van het talud, zie Figuur 4-1. Aanvankelijk zal er ook wrijving zijn tussen de zetstenen en het eronder gelegen granulaire filter, waardoor niet de hele zwaartekrachtcomponent tot uiting komt in een normaalkracht, maar tijdens zware golfaanval is het de hypothese dat de trillingen ervoor zorgen dat de wrijving met de filterlaag grotendeels wegvalt. Anderzijds neemt deze normaalkracht flink toe zodra de steenzetting gaat vervormen, zie Figuur 4-2. Doordat een deel van de steenzetting van het talud wordt gelicht, moeten er zetstenen gaan roteren en daardoor worden zetstenen langs het talud omhoog gedrukt. Het kantelen van de stenen zorgt ervoor dat ze meer ruimte nodig hebben, en de steenzetting als geheel zou moeten verlengen. Omdat hier geen ruimte voor is ontstaat een additionele normaalkracht, zie Figuur 4-3. De grootte van de normaalkracht heeft een flinke invloed op de grootte van de klemming.



Figuur 4-1, Normaalkracht als gevolg van de zwaartekracht



Figuur 4-2, Verlenging als gevolg van de vervorming



Figuur 4-3, Normaalkracht omdat verlenging niet mogelijk is

De opbouw van de normaalkracht door de vervorming, zoals getekend in Figuur 4-2 en Figuur 4-3, gebeurt ook evenwijdig aan de waterlijn.

In het promotiewerk van Peters (2007) is uitvoerig aandacht besteed aan de opbouw van de normaalkracht en de bijdrage van de klemming aan de stabiliteit van steenzettingen. In zijn proefschrift zijn de meeste relevante fysische processen diepgaand beschouwd en zijn er formules voor afgeleid. Helaas is er geen praktisch bruikbare set formules voor het bepalen van de invloed van de klemming op de stabiliteit van steenzettingen in te vinden. Daarom wordt in Steentoets gebruik gemaakt van de diverse memo's die Peters tijdens zijn promotie heeft gemaakt.

4.2 Schematisatie volgens Peters (2007) voor Steentoets

4.2.1 Inleiding

In zijn proefschrift heeft Peters (2007) de complexe fysica van de vervormende steenzetting zo goed mogelijk proberen te kwantificeren. Daarbij heeft hij gewerkt aan de volgende processen:

- De toplaag van de steenzetting is gemodelleerd als buigende ligger.
- De ligger is verend ondersteunend verondersteld op het filter.
- Er is sprake van een normaalkracht in de steenzetting als gevolg van de zwaartekrachtscomponent van de steenzetting (Figuur 4-2).
- De normaalkracht heeft invloed op de buigende momenten in de ligger.
- De normaalkracht in de steenzetting wordt beïnvloed door de interactie met het filter. Hiervoor zijn verschillende rekenmethodes gehanteerd, zoals elastische en plastische wrijving, waarbij ook rekening is gehouden met de beweging van de zetstenen haaks op het talud en in het vlak van het talud.
- Er is aandacht geweest voor eendimensionale berekeningen van een rij zetstenen in de doorsnede (van teen tot kruin) en tweedimensionale berekeningen van een veld zetstenen.

- Bij een bepaalde verplaatsing van de zetstenen haaks op het talud knikt de rij zetstenen uit en is er instabiliteit.

Door rekening te houden met al deze aspecten werden de formules zo gecompliceerd dat ze niet meer praktisch hanteerbaar waren. Daarom heeft Peters tijdens zijn promotieonderzoek de formules in vereenvoudigde vorm uitgewerkt (Peters 2007). Die vereenvoudigde formules zijn opgenomen in Steentoets.

4.2.2 Belasting

Peters (2007) gaat uit van de situatie tijdens een golfklap door een overstortende golf (lijkend op golfklaptype 1 in Steentoets), zie Figuur 4-4. Onder de golfklap wordt de steenzetting hard omlaag gedrukt, maar iets lager op het talud is er een opwaarts stijghoogteverschil. Dit is in de grafiek van Figuur 4-5 weergegeven. Hierin staat op de verticale as het stijghoogteverschil over de toplaag (neerwaarts gericht is positief) en op de horizontale as de locatie op het talud.

In deze figuur zijn de volgende symbolen gebruikt:

ϕ = stijghoogteverschil over de toplaag (m)

x = horizontale afstand in de dijkdoorsnede (haaks op de waterlijn/dijkas) (m)

L = lengte waarover het netto stijghoogteverschil negatief is, dus resulterend in een opwaarts gerichte kracht (m)

L_1 = afstand tussen locatie waar ϕ_{\min} optreedt en waar ϕ_{\max} optreedt (m)

L_2 = afstand waarover de golfdrukken de bezetting tegen het talud drukt, boven het maximaal belaste deel van de steenzetting (m)

$\Delta = (\rho_z - \rho)/\rho$ = relatieve dichtheid van de zetstenen (-)

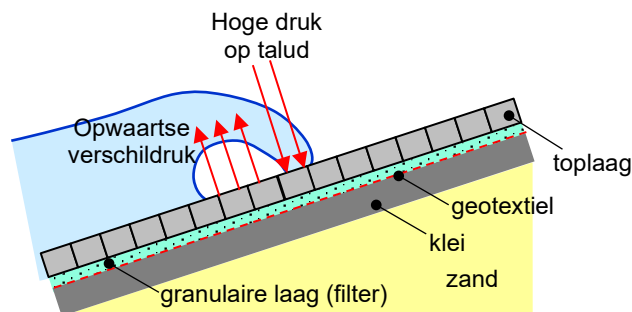
ρ_z = dichtheid van de zetstenen (kg/m^3)

ρ = dichtheid van water (kg/m^3)

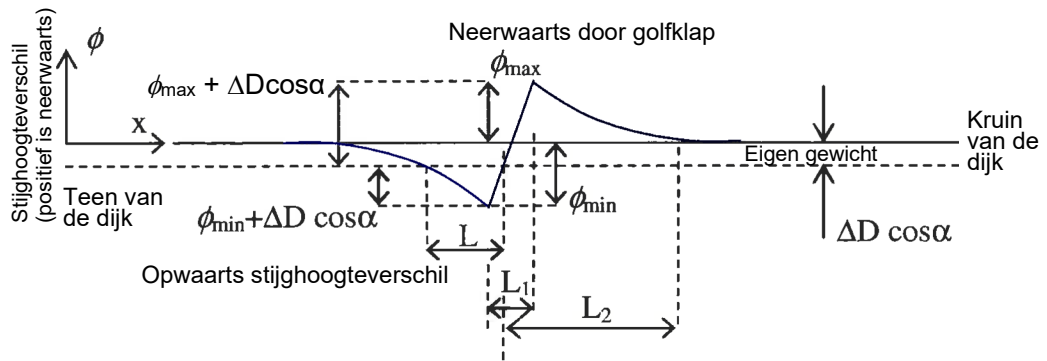
D = toplaagdikte (m)

α = taludhelling ($^\circ$)

g = versnelling van de zwaartekracht ($9,8 \text{ m/s}^2$)



Figuur 4-4, Druk op steenzetting tijdens golfklap



Figuur 4-5. Verloop van stijghoogteverschil op de steenzettingen in een dwarsdoorsnede (links is de teen en rechts de kruin van de dijk)

Met een stippellijn is het eigen gewicht van de toplaag ($\Delta D \cos \alpha$) aangegeven als negatieve waarde. Als het stijghoogteverschil negatiever is dan dit, dan wordt de toplaag opgelicht. Die omhoog gerichte netto belasting ($\phi > \Delta D \cos \alpha$) is aanwezig over een lengte L , zie Figuur 4-5. Het grootste opwaartse stijghoogteverschil is ϕ_{\min} en het grootste neerwaartse stijghoogteverschil (onder de golfklap) is ϕ_{\max} . De afstand tussen de locaties met ϕ_{\min} en ϕ_{\max} is L_1 . De lengte vanaf het punt waar $\phi = \Delta D \cos \alpha$ tot waar er geen stijghoogteverschil meer is, wordt L_2 genoemd.

Het verloop van de netto kracht op de toplaag is geschematiseerd met een aantal rechte lijnstukken, zoals weergegeven in Figuur 4-6. Links in de figuur is te zien dat het eigen gewicht nu positief is (q_0 , naar beneden gericht). De totale lengte in deze figuur ($a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$) is het deel van de steenzetting dat een vervorming ondergaat als gevolg van de golfbelasting. Geheel links en geheel rechts is het uiteinde als een scharnierende oplegging geschematiseerd ter plaatse van het dwarskrachtennulpunt. De lengte van a_1 en a_6 volgen uit de berekeningen. De andere lengtes worden bepaald door de belasting.

Het volgende geldt voor de kracht q op de toplaag (in N/m) per meter dijk lengte:

$$q_0 = \rho g \Delta D \cos \alpha \quad (\text{eigen gewicht}) \quad (4.1)$$

$$q_1 = \rho g \phi_{\min} + \rho g \Delta D \cos \alpha \quad (\phi_{\min} \text{ en } q_1 \text{ zijn negatief}) \quad (4.2)$$

$$q_2 = \rho g \phi_{\max} + \rho g \Delta D \cos \alpha \quad (\text{maximale kracht recht onder de golfklap}) \quad (4.3)$$

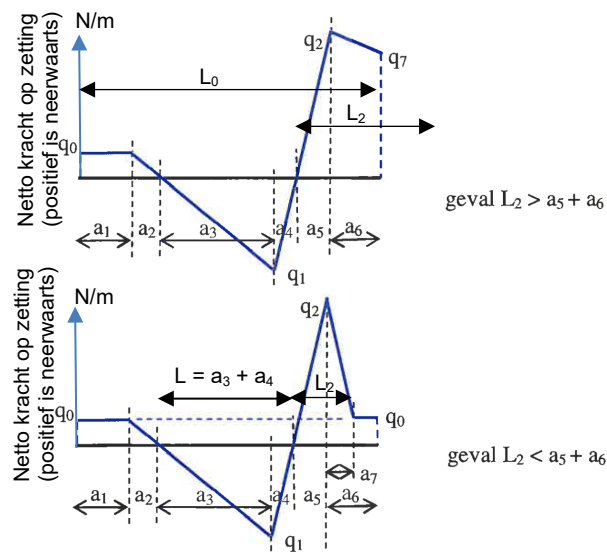
$$L_0 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 \quad (\text{lengte van de ligger tussen de opleggingen}) \quad (4.4)$$

$$a_2 = \frac{q_0}{q_1} \left(L - \frac{q_1}{q_1 - q_2} L_1 \right) \quad (4.5)$$

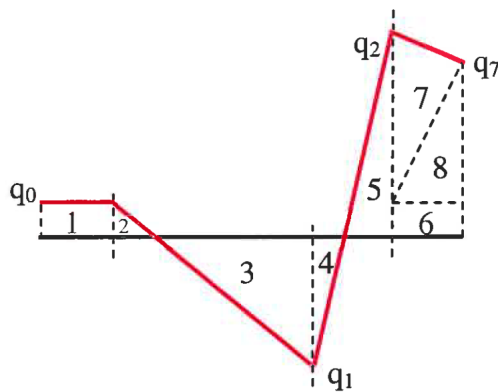
$$a_3 = L - \frac{q_1}{q_1 - q_2} L_1 \quad (4.6)$$

$$a_4 = \frac{q_1}{q_1 - q_2} L_1 \quad (4.7)$$

$$a_5 = \frac{q_2}{q_1 - q_2} L_1 \quad (4.8)$$



Figuur 4-6, Schematisatie van de netto belasting van de steenzetting



Figuur 4-7, De nummering van de oppervlakken onder de belastingfiguur

Verder geldt voor de oppervlakken onder de belastingfiguur, zoals aangegeven in Figuur 4-7, het volgende:

$$R_1 = q_0 a_1 \quad (4.9)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} q_0 a_2 \quad (4.10)$$

$$R_3 = \frac{1}{2} q_1 a_3 \quad (4.11)$$

$$R_4 = \frac{1}{2} q_1 a_4 \quad (4.12)$$

$$R_5 = \frac{1}{2} q_2 a_5 \quad (4.13)$$

Peters (2007) heeft een groot aantal complexe formules afgeleid op basis van bovenstaande schematisatie, maar heeft dat in zijn rapportage in grote stappen weergegeven. Daardoor is het niet altijd goed te volgen. In Paragraaf 4.4 wordt hier nader op ingegaan met een alternatieve aanpak met ongeveer vergelijkbare nauwkeurigheid maar die eenvoudiger te volgen is.

Om de momenten en de dwarskrachten in de ligger (toplaag van de steenzetting) te kunnen berekenen, is het eerst nodig om de locatie van de opleggingen (scharnieren zonder dwarskracht) te bepalen. Daartoe worden twee gevallen onderscheiden:

- Situatie met $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 > 0$: dan bevinden de randen van het opgerichte gedeelte zich binnen de velden van a_2 en a_5 .
- Situatie met $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 < 0$: dan bevinden de randen van het opgerichte gedeelte zich binnen de velden van a_1 en a_6 .

Beide situaties worden onderstaand nader uitgewerkt.

4.2.3 Als $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 > 0$

Helaas is er geen hanteerbare analytische oplossing voor de lengte van a_2 en a_5 in dit geval, waarbij voldaan wordt aan de evenwichtsvoorwaarden. Daarom is voor Steentoets een benadering afgeleid:

$$a_2 = a_5 = \sqrt{\frac{2R_3 a_4}{q_1}} \quad (4.14)$$

Met deze waardes wordt voldaan aan de voorwaarden van verticaal evenwicht (haaks op het talud) en wordt met een acceptabele nauwkeurigheid voldaan aan het rotatie-evenwicht. De lengte van het opgelichte deel bedraagt dan:

$$L_{\text{opgelicht}} = a_3 + a_4 + 2\sqrt{\frac{2R_3 a_4}{q_1}} \quad (4.15)$$

Met:

$L_{\text{opgelicht}}$ = lengte van het opgelichte deel van de steenzetting (m)

Voor de locatie van het maximale buigend moment in de steenzetting geldt:

$$a_M = \sqrt{\frac{2R_3 a_4}{q_1}} + a_3 - \frac{R_3 - R_4}{q_1} \quad (4.16)$$

Het is helaas niet helemaal duidelijk ten opzichte van welk nulpunt a_M is bepaald. Vermoedelijk ten opzichte van de linkerkant van het opgelichte deel van de steenzetting (waar L_{op} begint). Voor x_M (afstand vanaf linker uiteinde van de ligger met lengte L_0) geldt dan $x_M = a_1 + a_2 + a_M$.

De grootte van de maximale dwarskracht en het maximale buigend moment is:

$$V^* = \min(R_3; R_4) \quad (4.17)$$

$$M^* = R_4 \left(\frac{2}{3} a_4 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2R_3 a_4}{q_1}} \right) + (R_3 - R_4) \cdot \left(\frac{R_3 - R_4}{2q_1} + a_4 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2R_3 a_4}{q_1}} \right) \quad (4.18)$$

4.2.4 Als $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 < 0$

In dit geval is de grootte van de maximale dwarskracht en het maximale buigend moment als volgt:

$$V^* = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (4.19)$$

$$M^* = -R_1 \cdot \left(\frac{1}{2} a_1 + a_2 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a_3(R_1 + R_2)}{-q_1}} \right) - \frac{2}{3} R_2 \left(a_2 + \sqrt{\frac{2a_3(R_1 + R_2)}{-q_1}} \right) \quad (4.20)$$

De formules voor a_1 t/m a_6 , die nodig zijn om dit te berekenen, zijn helaas aanzienlijk gecompliceerder dan voor het vorige geval. Deze zijn gegeven in Bijlage A.

De locatie van het maximale moment is:

$$a_M = \sqrt{\frac{2a_3(R_1 + R_2)}{-q_1}} \quad (4.21)$$

$$x_M = a_1 + a_2 + \sqrt{\frac{2a_3(R_1 + R_2)}{-q_1}} \quad (4.22)$$

In deze formule lijkt het alsof x_M gedefinieerd is ten opzichte van het linker begin van de ligger.

4.2.5 Correctie voor invloed van de filterlaag: verend ondersteunde ligger

In het bovenstaande is nog geen rekening gehouden met het feit dat de steenzetting op een verend ondersteunde ondergrond ligt, namelijk het granulaire filter. Om dit in rekening te brengen wordt onderstaande correctie op de dwarskrachten en momenten toegepast.

De hoekverdraaiing bij de uiteinden van de ligger met lengte L_0 is :

$$\varphi_1 = -\frac{L_0 - a_{zwM}}{L_0} \frac{1}{2} \frac{M^* L_0}{EI} \quad (4.23)$$

$$\varphi_2 = \frac{a_{zwM}}{L_0} \frac{1}{2} \frac{M^* L_0}{EI} \quad (4.24)$$

Met:

a_{zwM} = locatie van het zwaartepunt van het momenten vlak (m)

E = elasticiteitsmodulus van de steenzetting (Pa)

I = traagheidsmoment van de steenzetting per meter dijk (m^4/m)

φ_1 = hoekverdraaiing van de ligger aan de linker kant (-)

φ_2 = hoekverdraaiing van de ligger aan de rechter kant (-)

M^* = het bovenstaand berekende maximale moment (Nm per meter dijk)

L_0 = lengte van de ligger ($a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$) (m)

In Steentoets wordt gerekend met de volgende waarden voor E en I:

$$E = 300 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$I = D^3/12 \text{ m}^4 \text{ per meter}$$

Voor a_{zWM} wordt in dit verband de volgende benaderende schatting gebruikt, namelijk het gemiddelde van halverwege L_0 en de berekende locatie $a_1 + a_2 + a_M$:

$$a_{zWM} = \frac{L_0 / 2 + (a_1 + a_2 + a_M)}{2} \quad (4.25)$$

Voor de buigende momenten aan de twee uiteinden van de ligger geldt:

$$T_1 = c_L \frac{2\phi_1 + \phi_2 + \frac{c_L}{c_k} \phi_1}{3 + 4 \frac{c_L}{c_k} + \left(\frac{c_L}{c_k}\right)^2} \quad (4.26)$$

$$T_2 = -c_L \frac{2\phi_2 + \phi_1 + \frac{c_L}{c_k} \phi_2}{3 + 4 \frac{c_L}{c_k} + \left(\frac{c_L}{c_k}\right)^2} \quad (4.27)$$

$$\beta_{bed} = \left(\frac{k_z}{4EI} \right)^{0,25} \quad (4.28)$$

$$c_k = \frac{k_z}{4\beta^3} \quad (4.29)$$

$$c_L = \frac{6EI}{L_0} \quad (4.30)$$

Met:

T_1 = buigend moment aan het linker uiteinde van de ligger (zeezijde) (Nm per meter dijk)

T_2 = buigend moment aan het rechter uiteinde van de ligger (kruinzijde) (Nm per meter dijk)

c_L = stijfheidsgetal van de ligger (Nm)

c_k = stijfheidsgetal van de rotatieveer (Nm)

β = beddingsparameter van de granulaire laag onder de zetstenen (-)

k_z = indrukingsstijfheid van het filter (beddingsconstante) (N/m³)

De door Peters (2007) aanbevolen waarde voor de indrukingsstijfheid van het filter, die ook gebruikt wordt in Steentoets, is $k_z = 10 \cdot 10^6 \text{ N/m}^3$.

Bovenstaande momenten T_1 en T_2 worden gebruikt om de dwarskrachten en momenten mee te corrigeren:

$$V_{\min} = V^* - \frac{T_2 - T_1}{L_0} \quad (4.31)$$

$$M_{\min} = M^* + T_1 + \frac{x_{M^*}}{L_0} (T_2 - T_1) \quad (4.32)$$

$$M_{\max} = T_2 \quad (4.33)$$

$$x_{M^*} = a_1 + a_2 + a_M \quad (4.34)$$

4.2.6 Normaalkracht

De normaalkracht in de steenzetting is bepalend voor de sterkte. Het maximaal toelaatbare moment en de dwarskracht in de steenzetting zijn hier afhankelijk van. De afgeleide formule voor de normaalkracht is:

$$N = f_4 \left(\rho g (1 + \Delta) D \sin \alpha \frac{x_{\text{berm}} - x_N}{\cos \alpha} \right) - \rho g D \sin \alpha \frac{x_{\text{SWL}} - x_N}{\cos \alpha} + f_{11} \rho g D \left(\phi_{\text{trog}} - \frac{1}{2} \phi_{\text{min}} \right) \quad (4.35)$$

$$f_4 = \left(f_9 - f_{10} \frac{x_{\text{berm}} - x_N}{x_{\text{berm}} - x_{\text{teen}}} \right) \cdot \min \left(\frac{x_N - x_{\text{teen}}}{10D}; 1, 0 \right) \quad (4.36)$$

$$f_9 = 0,6$$

$$f_{10} = 0,2$$

Met:

x_{berm} = horizontale coördinaat van de buitenrand van de berm (bovenrand van de steenzetting) (m)

x_N = horizontale coördinaat van de locatie met grootste belasting (m)

x_{SWL} = horizontale coördinaat van de stilwaterlijn (m)

x_{teen} = horizontale coördinaat van de teen van de dijk (onderrand van de steenzetting) (m)

ϕ_{trog} = minimale stijghoogte op de toplaag ter plaatse van de maximale belasting (m)

f_i = diverse parameters waarmee de invloed van bijzondere aspecten wordt verdisconteerd

De eerste termen van formule (4.35), namelijk $\rho g (1 + \Delta) D \sin \alpha (x_{\text{berm}} - x_N) / \cos \alpha$, betreft de zwaartekrachtcomponent van de steenzetting langs het talud. De tweede term, namelijk $\rho g D \sin \alpha (x_{\text{SWL}} - x_N) / \cos \alpha$, is een correctie omdat een deel van de steenzetting onder water zit. Hier wordt arbitrair voor aangenomen dat dit het geval is tussen het punt met de maximale belasting en de stilwaterlijn.

Bij de berekeningen van de normaalkracht houdt Peters (2007) ook rekening met de stijghoogte in de spleten tussen de zetstenen. De hoge druk onder de golfklap geeft ook een hoge druk in de spleten en die heeft de neiging de zetstenen uiteen te drukken. Dit aspect is opgenomen in de derde term, namelijk $\rho g D (\phi_{\text{trog}} - \phi_{\text{min}} / 2)$. De parameter f_{11} is een nader te

bepalen factor (kleiner dan 1) die tot uitdrukking brengt dat er een deel van de spleetdrukkrachten opgenomen wordt in de bedding en niet direct in mindering wordt gebracht op de normaalkracht.

Voor x_N moeten de volgende waarden worden aangehouden:

- voor het beoordelen van M_{\min} : het diepste punt van het stijghoogteverloop op de toplaag (iets lager op het talud dan waar de golfklap inslaat). Deze locatie is x_t .
- voor het beoordelen van M_{\max} : $x_t + L_0/2$
- voor het beoordelen van V_{\min} : $x_t + L_0/4$

De formule (4.36) voor f_4 heeft betrekking op de hypothese dat de klemming vlak bij de teen, die zwak verondersteld wordt, afneemt naar nul. De gedachte was dat de teen kan wijken en dat daardoor de zetstenen los komen te staan in de steenzetting. Peters veronderstelt hier een lineaire afname over de onderste 10 rijen van de steenzetting.

De praktijk leert echter dat ook langs de teen de zetstenen geklemd liggen, mede door klemming in de horizontale richting, die door Peters niet beschouwd is.

4.2.7 Beoordeling van de stabiliteit

Voor de uiteindelijke beoordeling van de stabiliteit adviseert Peters (2007) om ook veiligheidsfactoren en modelfactoren in rekening te brengen. Deze factoren worden als volgt gebruikt in de belastingen:

$$M_{d\min} = \gamma_S \frac{1}{\gamma_m} f_8 M_{\min} \quad (4.37)$$

$$M_{d\max} = \gamma_S \frac{1}{\gamma_m} f_8 M_{\max} \quad (4.38)$$

$$V_{d\max} = \gamma_S \frac{1}{\gamma_m} f_8 V_{\max} \quad (4.39)$$

De sterkte van de steenzetting met normaalkracht N is:

$$M_{u,\min} = \gamma_R f_1 f_2 f_{12} \frac{1}{2} D \cdot N_{M,\min} \quad (4.40)$$

$$M_{u,\max} = \gamma_R f_1 f_2 f_{12} \frac{1}{2} D \cdot N_{M,\max} \quad (4.41)$$

$$V_u = \gamma_R \gamma_m f_3 f_{13} \cdot N_{V,\max} \quad (4.42)$$

Met:

M_u = momentcapaciteit (Nm per m)

V_u = maximaal toelaatbare dwarskracht (N per m)

$N_{M,\max}$ = normaalkracht ter plaatse van M_{\max} (N per m)

$N_{M,\min}$ = normaalkracht ter plaatse van M_{\min} (N per m)

$N_{V,\max}$ = normaalkracht ter plaatse van V_{\max} (N per m)

Voor de diverse invloedsfactoren wordt door Peters (2007) geadviseerd om het volgende te hanteren:

- $f_1 = 0,9$ = factor voor h/D
- $f_2 = 0,9$ = factor voor voegvullingsgraad
- $f_3 = 0,55$ = wrijvingsfactor tussen toplaagelementen
- $f_8 = 1,8$ = dynamische vergrotingsfactor
- $f_{12} = 0,9$ = reductiefactor op capaciteit M_u in verband met geometrische imperfecties
- $f_{13} = 0,9$ = reductiefactor op capaciteit V_u in verband met geometrische imperfecties
- $\gamma_S = 1,0$ = partiële veiligheidsfactor belasting
- $\gamma_m = 1,0$ = modelfactor voor de krachten en momenten
- $\gamma_R = 1,0$ = partiële veiligheidsfactor sterkte toplaag

Als criterium geldt dat de belasting kleiner moet blijven dan de sterkte:

- Maximaal moment: $|M_{d,max}| < M_{u,max}$ (aan het rechter uiteinde van de ligger: kruinzijde)
- Minimaal moment: $|M_{d,min}| < M_{u,min}$ (ter plaatse van het grootste stijghoogteverschil)
- Minimale dwarskracht: $|V_{d,max}| < V_u$

Als hieraan voldaan wordt, is de steenzetting stabiel.

4.3 Steentoets

In Steentoets is de invloed van klemming op de stabiliteit van Steenzettingen met bovenstaande formules opgenomen. Opgemerkt moet worden dat Peters de variabelen wat afwijkend had gedefinieerd. Hij heeft bijvoorbeeld de maximale opwaartse belasting ϕ_{min} genoemd en de maximale neerwaartse belasting ϕ_{max} , terwijl dat in Steentoets net andersom is:

$$[\phi_{min}]_{Peters} = -\phi_{w,max} \text{ (negatief getal bij Peters)}$$

$$[\phi_{max}]_{Peters} = -\phi_{w,min} \text{ (positief getal bij Peters)}$$

Verder zijn de L , L_1 en L_2 horizontaal gedefinieerd in plaats van langs het talud:

$$[L/\cos\alpha]_{Peters} = L$$

Verder wordt het stijghoogteverschil verkleind om de invloed van traagheid en toestroming te verdisconteren (zie Huppes e.a. 2024). Hierbij wordt aangenomen dat de beweging van de toplaag 3% van de toplaagdikte is, en alleen het maximaal belaste blok beweegt. Deze aannames zijn conservatief. Verder wordt het niet meegeteld bij het bepalen van de lengtes L , L_1 en L_2 , en dat is ook conservatief.

Voor de uiteindelijke beoordeling van de stabiliteit van de bekleding inclusief klemming wordt gebruikgemaakt van de volgende waarden van de verschillende invloedsfactoren:

- $f_1 = 0,7$ = factor voor h/D
- $f_2 = 0,9$ = factor voor voegvullingsgraad
- $f_3 = 0,55$ = wrijvingsfactor tussen toplaagelementen
- $f_8 = 1,0$ = dynamische vergrotingsfactor
- $f_{12} = 1,0$ = reductiefactor op capaciteit M_u in verband met geometrische imperfecties
- $f_{13} = 1,0$ = reductiefactor op capaciteit V_u in verband met geometrische imperfecties
- $\gamma_S = 1,0$ = partiële veiligheidsfactor belasting
- $\gamma_m = 1,0$ = modelfactor voor de krachten en momenten
- $\gamma_R = 1,0$ = partiële veiligheidsfactor sterkte toplaag

Voor f_{12} en f_{13} wordt de waarde 1,0 gehanteerd, omdat het effect van de geometrische imperfecties al is verdisconteerd in de waarde van f_1 . De partiële veiligheidsfactor en de modelfactor zijn op 1 gezet, omdat de veiligheidsfactoren op een andere plek in de software zijn opgenomen. Die zijn afgeregeld op basis van Deltagootproeven in de kalibratie ten behoeve van het opnemen van Steentoets in WBI2017 (Jongejan en Klein Breteler, 2015).

In Steentoets wordt gerekend met wat aangepaste formules voor de normaalkracht om onlogische rekenresultaten te voorkomen. Dat de stabiliteit blijft toenemen naarmate de steenzetting verder doorloopt tot boven SWL, is bijvoorbeeld onlogisch. De invloed van een extra rij zetstenen aan de bovenzijde van het talud moet steeds minder extra stabiliteit geven, en vanaf een bepaald niveau geen extra stabiliteit meer opleveren. Daarom is de stilwaterlijn als bovengrens aangehouden voor de rijen zetstenen die bijdragen aan de normaalkracht. Dus er wordt aangenomen dat de rijen boven de stilwaterlijn de normaalkracht afdragen aan de filterlaag door wrijving. Verder wordt een minimale normaalkracht in de steenzetting aangehouden met de grootte van de zwaartekrachtscomponent van een enkele zetsteen langs het talud: $\rho g \Delta D^2 \tan \alpha$.

Voor x_N wordt gerekend met de locatie waar de steenzetting beoordeeld wordt, in plaats van de locaties met maximaal moment of dwarskracht. Bij de ontwikkeling van Steentoets is op basis van enkele oriënterende berekeningen vastgesteld dat dit een verwaarloosbare invloed heeft, terwijl het de formules aanzienlijk vereenvoudigt.

In Steentoets wordt de stabiliteit van de steenzetting weergegeven met de parameter f_{gt} , die de afstand weergeeft ten opzichte van het omslagpunt van stabiel naar instabiel. Als $f_{gt} < 1$, dan is de steenzetting instabiel. Deze parameter wordt als volgt berekend:

$$f_{gt} = \max \left(\min \left(\frac{M_{u \min}}{|M_{d \min}|}, \frac{M_{u \max}}{|M_{d \max}|}, \frac{V_{u \min}}{|V_{d \min}|} \right); f_{gtlos} \right) \quad (4.43)$$

Met:

f_{gt} = verhouding tussen de sterkte en de belasting

f_{gtlos} = verhouding tussen de sterkte en de belasting als er geen klemming wordt beschouwd (losse zetstenen)

Om fouten bij het implementeren van de formules in Steentoets zoveel mogelijk te voorkomen, is de door Peters opgestelde spreadsheet met de volledige rekenmethode één op één in de code opgenomen. Helaas is daardoor dit deel van de code ondoorgrondelijk geworden.

4.4 Aanbevelingen voor het opnemen van klemming in DiKErnel

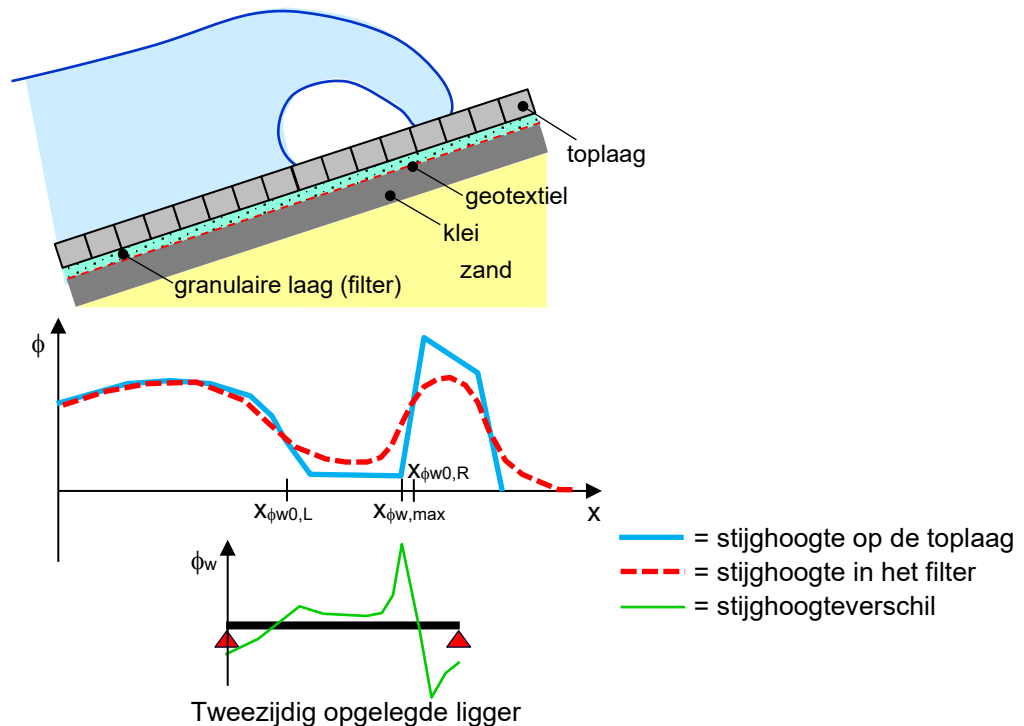
Er zijn heel veel aspecten die de bijdrage van klemming aan de stabiliteit van steenzettingen beïnvloeden. Veel van deze aspecten zijn beschouwd in het proefschrift van Peters (2017), maar niet alles. Zo is bijvoorbeeld de klemming in de steenzetting evenwijdig aan de waterlijn niet beschouwd, terwijl die duidelijk wel aanwezig is (Van Steeg e.a., 2009, en Klein Breteler e.a., 2024).

Slechts een deel van de aspecten is opgenomen in Steentoets en bovendien zijn die aspecten nog aanzienlijk versimpeld en geschematiseerd. Desondanks zijn de formules bijzonder gecompliceerd en is het moeilijk te controleren of alle afleidingen correct door Peters zijn uitgevoerd. Verder geldt dat de schematisatie van het stijghoogteverloop op de toplaag van Peters niet precies klopt met datgene wat in Steentoets wordt aangehouden. De resulterende formules zijn zo gecompliceerd dat ook de code in Steentoets onnavolgbaar is geworden.

Op basis van deze analyse wordt aanbevolen om de formules aanzienlijk te versimpelen en te baseren op een goed te volgen afleiding.

Het primaire proces is een stijghoogteverschil over de toplaag, die een deel van de toplaag oplicht en daarbij ook momenten en dwarskrachten in de toplaag veroorzaakt. Het feit dat er sprake is van een verend ondersteunde ligger, is naar verwachting van secundair belang. Voor de sterkte moet rekening gehouden worden met een bepaalde normaalkracht in de steenzetting. Deze normaalkracht is initieel aanwezig vanwege enige belasting door de zwaartekrachtcomponent evenwijdig aan het talud, maar ontstaat voornamelijk tijdens het omhoog bewegen van de steenzetting. Voorgesteld wordt om dit sterk vereenvoudigd te modelleren met enkele formules. Onderstaand zijn hier enkele suggesties voor gegeven.

Als eerste moet een geschikte lengte van de buigende ligger worden geïdentificeerd. Voorgesteld wordt om uit te gaan van het punt met het grootste stijghoogteverschil (opwaarts). Voor Golfklaptype 1 is dat bijvoorbeeld punt 4 in het stijghoogteverloop. Dit punt noemen we: $x_{\phi_w, \max}$. Vervolgens wordt het stijghoogteverschil beschouwd aan beide zijden van $x_{\phi_w, \max}$. Gezocht wordt naar de locatie waar het stijghoogteverschil nul is. Dit noemen we $x_{\phi_w0, L}$ en $x_{\phi_w0, R}$. De oplegging van de ligger moet nog iets verder weg gelegd worden. We kiezen hiervoor het punt waar de momenten nul zijn. Daar plaatsen we een roloplegging. Als alternatief kan ook het punt gekozen worden waar de dwarskrachten nul zijn.



Figuur 4-8, Tot tweezijdig opgelegde ligger geschematiseerde steenzetting

Voor het berekenen van de normaalkracht wordt voorgesteld een bepaalde vervorming te kiezen en aan de hand van de stijfheid van de steenzetting te berekenen hoeveel normaalkracht er ontstaat. Naar mate de steenzetting in het midden wordt opgelicht, zal er meer verlenging van de steenzetting optreden en dus een grotere normaalkracht ontstaan, zie Figuur 4-2. Voorgesteld wordt om met een vervorming van 10% van de toplaagdikte te rekenen, namelijk de helft van wat nog niet als bezwijken wordt geïdentificeerd (Huppes e.a. 2024).

Ook de omvang van de vervorming (oppervlak) is van invloed op de grootte van de normaalkracht. Voorgesteld wordt om een oppervlak aan te houden van 5 m in de richting van de dijkas en 10 m in de richting van teen naar kruin. Dit sluit aan op de gemiddelde vervormingsgrootte zoals te zien is in Deltagootproeven.

5 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van het voorliggende document is het analyseren van een aantal belangrijke componenten van de steenzettingenkennis en hoe dit thans in Steentoets zit, zodat er een goed plan gemaakt kan worden voor de herziening van de software. Hiertoe is de achtergrond uitgewerkt van hoe de hydraulische belastingen, de belasting op de steenzetting en de klemming op dit moment in Steentoets verwerkt zijn, en welke aanbevelingen en kennisleemtes hieruit volgen. Deze aanbevelingen en kennisleemtes worden in de betreffende hoofdstukken uitgebreid beschreven. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies en aanbevelingen per onderwerp puntsgewijs samengevat.

5.1 Hydraulische belasting

De belangrijkste kennisleemtes en ontwikkelingen rondom hydraulische belastingen voor steenzettingen worden beschreven in Paragraaf 2.5. Puntsgewijs kan dit als volgt worden samengevat:

- Voor het waterstandsverloop wordt in Steentoets gebruik gemaakt van het trapeziumvormige waterstandsverloop uit VTV-2004, in combinatie met golfcondities die niet noodzakelijkerwijs bij elkaar horen in één storm. De werkwijze in Steentoets gaat met name fout als de waterstand en de golfcondities weinig correlatie hebben, zoals op de rivieren en de westkant van het IJsselmeer/Markermeer. Er wordt aanbevolen om de werkwijze aan te passen, zodat er met stormcondities uit één storm wordt gerekend die passen bij het aangehouden waterstandsverloop.
- Een veelbelovende ontwikkeling is de nieuwe manier om hydraulische belastingen af te leiden op basis van simulaties van extreme weersomstandigheden. Hiervoor wordt momenteel Grade gebruikt voor de waterstand op de rivieren. GRADE (Generation of Rainfall and Discharge Extremes) is een combinatie van een stochastische weergenerator, een hydrologisch model en een hydrodynamisch model. Met vergelijkbare simulaties kan de wind op zee berekend worden, zoals met de regionale RACMO reeksen van KNMI, die nu 240 jaar beslaan. Er wordt aanbevolen om bij de ontwikkeling van een nieuw rekenmodel voor steenzettingen de mogelijkheden te scheppen om te rekenen met extreme condities waarin verschillende parameters tijdens een storm variëren.
- In Steentoets zitten aannames verwerkt voor het minimum aantal golven per niveau van de steenzetting, en voor de hoek van golfval. Bij uitwerking van een nieuw rekenmodel dient nagegaan te worden of deze aannames nog passend zijn.

5.2 Belasting op de steenzetting

Momenteel wordt de belasting op de steenzetting gekwantificeerd met een maatgevend stijghoogteverschil over de toplaag. Hiervoor worden 4 geschematiseerde stijghoogteverlopen op de toplaag gebruikt die worden berekend met empirische formules. De herkomst van deze formules is toegelicht in Hoofdstuk 3, en de daaruit volgende kennisleemtes en -vragen staan in Paragraaf 3.3. Samengevat leidt dit tot de volgende conclusies en aanbevelingen:

- De empirische formules voor het bepalen van de stijghoogteverlopen zijn sinds 2006 bijna niet meer aangepast en hebben beperkingen zoals schaaleffecten gerelateerd aan de samendrukbaarheid van het water. Daarnaast heeft een te grote afstand tussen de drukopnemers tijdens de schaalmodelonderzoek er mogelijk toe geleid dat er belangrijke gradiënten niet gemeten zijn.

- Lokale stijghoogtegradiënten op de topklaag zijn heel belangrijk voor de stabiliteit van de steenzetting. Hierdoor is het relevant om niet alleen in de dwarsdoorsnede van de dijk te kijken, maar ook naar gradiënten in de richting evenwijdig aan de waterlijn. Aanbevolen wordt om dit nader te onderzoeken.
- Uit recent onderzoek is gebleken dat Steentoets de grootte van de golfklap onderschat voor grote golven met $H_{m0} \approx 2$ m. Dit is een aanwijzing dat de huidige formules uit 2006 wellicht niet kloppen voor het gehele bereik van de golfklappen. Aanbevolen wordt om additionele metingen uit te voeren om golfklappen te kwantificeren voor grote golven.
- De huidige stijghoogteverlopen zijn gebaseerd op de lek lengtetheorie toen er nog steenzettingen waren met langere lek lengtes dan nu gebruikelijk zijn. De nieuwe steenzettingen hebben veelal een relatief kleine lek lengte. Voor deze moderne steenzettingen is het belangrijk om te onderzoeken of deze verlopen nog wel representatief zijn voor een maatgevende belasting.
- De invloed van de brekerparameter op de stabiliteit komt onvoldoende tot uiting in de huidige empirische formules. Door de complexiteit van o.a. de klemming formules was het niet gelukt om de fysisch realistische grenzen van de formules zo te wijzigen dat de trend overeenkomt met de verwachtingen. Daarom is er gekozen om een terugvaloptie te programmeren in Steentoets. Wanneer wordt gekozen voor een andere werkwijze voor de klemming, wordt geadviseerd om opnieuw te kijken of de invloed van de brekerparameter verbeterd kan worden in de formules.

5.3 Klemming als onderdeel van de sterkte

De beschrijving van de klemming van een steenzetting is een gecompliceerd proces. Er zijn heel veel aspecten die de bijdrage van klemming aan de stabiliteit van steenzettingen beïnvloeden. Veel van deze aspecten zijn beschouwd in het proefschrift van Peters (2007), en slechts een deel hiervan is opgenomen in Steentoets en bovendien zijn die aspecten nog aanzienlijk versimpeld en geschematiseerd. Desondanks zijn de formules bijzonder gecompliceerd en is de code in Steentoets onnavolgbaar geworden. Verder hebben de huidige formules een aantal tekortkomingen:

- De klemming in de steenzetting evenwijdig aan de waterlijn wordt in het proefschrift van Peters (2007) niet beschouwd, terwijl die duidelijk wel aanwezig is (Van Steeg e.a., 2009, en Klein Breteler e.a., 2024). Aanbevolen wordt om nieuwe formules zo op te stellen dat dit op den duur toegevoegd kan worden.
- De schematisatie van het stijghoogteverloop op de topklaag van Peters (2007) klopt niet precies met datgene wat in Steentoets wordt aangehouden.

Er wordt aanbevolen om de formules voor de klemming aanzienlijk te versimpelen en te baseren op een goed te volgen afleiding. Paragraaf 4.4 geeft hier een eerste aanzet toe, en is hieronder puntsgewijs samengevat:

- Het primaire proces is een stijghoogteverschil over de topklaag, die een deel van de topklaag oplicht en daarbij ook momenten en dwarskrachten in de topklaag veroorzaakt.
- Voor de sterkte moet rekening gehouden worden met een bepaalde normaalkracht in de steenzetting. Deze wordt deels veroorzaakt door de zwaartekracht, maar ontstaat voornamelijk tijdens het omhoog bewegen van de steenzetting ten gevolge van klemming.
- In Peters (2007) wordt een verend ondersteunde ligger als uitgangspunt gehanteerd. Voorgesteld wordt om deze aanname te vervangen voor een opgelegde ligger. De verwachting is dat de eventueel verende ondersteuning van de ligger als van ondergeschikt belang beschouwd kan worden.
- Als lengte van de ligger wordt voorgesteld om uit te gaan van het punt met het grootste stijghoogteverschil (opwaarts). Voor Golfklaptype 1 is dat bijvoorbeeld

punt 4 in het stijghoogteverloop. De lengte van de ligger kan vervolgens gevonden worden door te bepalen waar de momenten, danwel dwarskrachten nul zijn (zie Paragraaf 4.4).

- Voor het berekenen van de normaalkracht wordt voorgesteld een bepaalde vervorming te kiezen en aan de hand van de stijfheid van de steenzetting te berekenen hoeveel normaalkracht er ontstaat. Aanbevolen wordt om aan te sluiten op de gemiddelde vervormingsgrootte zoals te zien is in Deltagootproeven (zie Paragraaf 4.4).

Literatuur

- BOI (2024). Riskeer – Gebruikershandleiding | Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI), juli 2024.
- Derks, H. en M. Klein Breteler (1992) Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval Verslag modelonderzoek in Deltagoot WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H1480.
- Hegnauer, M., J Beersma, H van den Brink en R Leander (2023), Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine, Final report of GRADE-Rhine version 3.0; Deltares/KNMI rapport 11205237-003-ZWS-0016, 26 May 2023.
- HR2006 (2007). Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen – voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006), augustus 2007.
- Huppes, N., en Klein Breteler, M. (2024) Tijdsafhankelijk rekenmodel voor steenzettingen. Van Steentoets naar DiKErnel. Deltares 11210371-017-GEO-0001.
- Jongejan R.B., en M. Klein Breteler (2015); A semi-probabilistic assessment rule for the stability of block revetments under wave attack; Deltares report 1220080-004-ZWS-0002, 5 August 2015.
- Klein Breteler, M. (2000) Grootschalig model onderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen. Analyse van resultaten van Deltagootproeven WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3272, mei 2000.
- Klein Breteler, M. (2012) Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven; Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen. Deltares 1204727-009-HYE-0007.
- Klein Breteler, M., Mourik, G., van Dam, M., Teng, D. en Willemsen, P. (2024) Bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkeringssysteem. Analyse van de resultaten van de proeven in de Deltagoot. Deltares 11205132-005-HYE-0009.
- Klein Breteler, M., en S. Riedstra (2024); Invloed van teenconstructie op stabiliteit van steenzettingen, Trekproeven voor de IJsselmeerdijk, Deltares rapport 11209115-002-HYE-0011, 29 juli 2024.
- Kuiper, C., en B. Van Vossen (2003) Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven. Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen. WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4329, december 2003.
- Peters, D.J. (2007), Kennisontwikkeling t.b.v. Steentoets, verzamelde memo's betreffende het implementatie gereed maken van het klemmingsonderzoek, Royal Haskoning, maart 2007.
- Peters, D.J. (2017), Design of pattern-placed revetments, dissertation at TU-Delft, ISBN 978-946-295-665-0, June 2027.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003. Technisch rapport steenzettingen – deel achtergronden. Auteur: Jaap-Jeroen Flikweert.
- Mourik, 2023. Documentatie Steentoets – Excel-programma voor het beoordelen en ontwerpen van steenzettingen. Deltares rapport 11209270-002-GEO-0003.

Meer, J.W. van der, en H. de Waal (1993) Waterbeweging op taluds, invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang- en kortkammige golfaanval WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H1256, april 1993.

Steeg, P. van, en M. Klein Breteler (2009); Stabiliteit van steenzettingen onder golfaanval; boven de waterlijn en onder een horizontale overgangsconstructie; Deltares rapport 1200193; 18 november 2009.

Waal, J.P. de, M. Klein Breteler en H. den Adel (1995) Talubekledingen van gezette steen, golfdruk op het talud. Deel B: verbetering van het analytisch model en Steenzet. WL | Delft Hydraulics, verslag H195, december 1995.

Wouters, J. (1991) Talubekledingen van gezette steen Eindverificatie onderzoek Deltagoot WL | Delft Hydraulics, rapport nr. M1795/H195 deel XXII.

A Formules voor a1 t/m a6 in klemmingformules

Voor het geval dat $R_2 + R_3 + R_4 + R_5 < 0$ bevinden de randen van het opgerichte gedeelte zich binnen de velden van a_1 en a_6 . De door Peters (2007) afgeleide formules zijn dan bijzonder gecompliceerd.

In al onderstaande gevallen geldt:

Als $L_2 < a_5 + a_6$:

$$a_6 = (-12q_0^3 q_1^3 L^2 q_2^2 - 12q_2^5 L^2 L q_1^2 q_0 - 12q_0^3 L^2 q_1^4 L q_2 - 12q_0^3 L^2 q_2^3 L_1 q_1^2 + 12q_0^3 q_1^4 L_1 L q_2 - q_0^4 L^2 q_2^4 + 3q_1^6 q_2^2 L^2 - 6q_1^5 q_2^3 L^2 + 3q_1^4 q_2^4 L^2 + 3q_2^6 L^2 q_1^2 + 6q_2^5 L^2 q_1^3 + 3q_2^4 L^2 q_1^4 - 6q_2^5 L^2 q_1^3 + 3q_1^2 q_2^6 L^2 + 3q_2^4 q_1^4 L^2 + 7q_0^4 L^2 q_1^4 + 7q_0^4 q_1^4 L^2 - 36q_0^3 L q_2^3 q_1^3 L_2 + 12q_0^3 L q_2^4 q_1^2 L_2 + 18q_0^3 L q_2^3 q_1^3 L_1 + 12q_0^3 L q_2^2 q_1^3 L_2 + 12q_0^3 L q_2^3 q_1^2 L_2 + 6q_0^4 L q_2 q_1^3 L_2 - 12q_0^4 L q_2^2 q_1^2 L_2 - 6q_0^4 L q_2 q_1^3 L_1 + 6q_0^3 L q_2^5 L_1 q_1 + 6q_0^3 L q_2^5 q_1 L_2 - 12q_0^3 L q_2^4 q_1 L_2 - 12q_0^3 L q_2^3 q_1^2 L_1 + 6q_0^4 L q_2^3 q_1 L_2 + 6q_0^4 L q_2^2 q_1^2 L_1 + 6q_1^5 q_2^3 L L_2 - 12q_1^4 q_2^4 L L_2 - 6q_1^5 q_2^3 L L_1 + 6q_1^3 q_2^5 L L_1 + 6q_1^3 q_2^5 L L_2 + 6q_2^6 L_1 q_1^2 L_2 - 24q_2^4 L^2 q_1^3 q_0 + 30q_2^3 L^2 q_1^3 q_0^2 - 6q_2^4 L^2 q_1^4 L_1 - 16q_2^3 L^2 q_1^4 q_0 + 32q_2^4 L^2 q_1^3 q_0 + 30q_2^2 L^2 q_1^4 q_0^2 - 60q_2^3 L^2 q_1^3 q_0^2 - 16q_1^2 q_2^5 L^2 q_0 + 30q_1^2 q_2^4 L^2 q_0^2 - 16q_2^3 q_1^4 L^2 q_0 + 30q_2^2 q_1^4 L^2 q_0^2 - 24q_2 q_0^3 L^2 q_1^4 + 48q_2^2 q_0^3 L^2 q_1^3 - 24q_1^2 q_2^3 q_0^3 L^2 - 24q_2 q_0^3 q_1^4 L^2 - 14q_0^4 L^2 q_1^4 q_2 - 14q_0^4 L^2 q_1^4 L_1 + 7q_1^2 q_0^4 L^2 q_2^2 - 12q_1^5 q_2^2 L q_0 L_2 + 12q_1^4 q_2^3 L q_0 L_2 + 16q_1^5 q_2^2 L q_0 L_1 + 6q_1^5 q_2^2 L q_0 L_2 + 12q_1^4 q_2^3 L q_0^2 L_2 - 6q_1^5 q_2^2 L q_0^2 L_1 + 12q_1^3 q_2^4 L q_0 L_2 - 4q_1^4 q_2^3 L q_0 L_1 - 18q_1^4 q_2^2 L q_0 L_1 - 8q_2^4 L_1 q_1^3 q_0 L_2 - 24q_2^5 L_1 q_1^2 q_0 L_2 + 30q_2^4 L_1 q_1^3 q_0^2 L_2 + 30q_2^4 L_1 q_1^2 q_0^2 L_2 + 32q_2^3 L_2 q_1^4 q_0 L_1 - 60q_2^2 L^2 q_1^4 q_0^2 L_1 + 48q_2 q_0^3 L^2 q_1^4 L_1 - 36q_1^3 q_2^2 q_0^3 L^2 L_1 + 14q_1^3 q_0^4 L^2 q_2 L_1 - 8q_1^5 q_2^2 L^2 q_0 + 16q_1^4 q_2^3 L^2 q_0 - 8q_1^3 q_2^4 L^2 q_0 - 8q_2^5 L^2 q_1^2 q_0 - 12q_2^5 L_1 q_1^2 L q_0 - q_0^4 L^2 q_2^3 q_1^2 + 2q_0^4 L^2 q_2^3 q_1 + 6q_0^3 L^2 q_2^4 q_1^4 - 12q_0^3 L^2 q_2^3 q_1^3 + 6q_0^2 L^2 q_2^4 q_1^2) / (12q_0 q_1 q_2 (-2L q_1^3 q_2 q_0 + 4L q_1^3 q_2^2 q_0 - 2L q_1 q_2^3 q_0 - 2q_2^3 L_1 q_1 q_0 + q_0^2 L q_2 q_1^2 - 2q_0^2 L q_2^2 q_1 + q_0^2 L q_2^3 + q_1^4 q_2 L - 2q_1^3 q_2^2 L + q_1^2 q_2^3 L + q_2^2 L_2 q_1^3 - 2q_2^3 L_2 q_1^2 - q_2^2 q_1^3 L_1 - 2q_2 q_0 L_2 q_1^3 + 4q_2^2 q_0 L_2 q_1^2 + 2q_2 q_0 q_1^3 L_1 + q_0^2 L_2 q_1^3 - 2q_0^2 L_2 q_1^2 q_2 - q_0^2 q_1^3 L_1 + q_1 q_2^4 L_2 - 2q_1 q_2^3 q_0 L_2 + q_1 q_0^2 L_2 q_2^2 + q_0^2 q_1^2 L_1 q_2))$$

$$a_1 = \frac{-\frac{q_0^2 L}{2q_1} + \frac{1}{2}q_1 \left(L - \frac{q_1 L_1}{q_1 - q_2} \right) + \frac{q_1^2 L_1}{2(q_1 - q_2)} + \frac{q_2^2 L_1}{2(q_2 - q_1)} + q_0 a_6 + \frac{(q_2 - q_0)^2 \left(L_2 - \frac{q_1 L_1}{q_1 - q_2} \right)}{2q_2}}{q_0}$$

Als $L_2 > a_5 + a_6$:

Hiervoor wordt een benadering gehanteerd, afhankelijk van $L_2 q_2 / (-L q_1)$:

als $\frac{L_2}{L} \left(\frac{q_2}{-q_1} \right) < 0,7$ dan $q_7 = q_0 + \frac{1}{3}(q_2 - q_0)$ en geldt:

$$a_6 = \frac{1}{2(-16q_2^2 + 12q_0^2 + 4q_0 q_2) q_1 (q_1 - q_2)} (12q_1^3 q_0 L + 24L q_1^3 q_2 - 60q_1^2 q_2 q_0 L - 24q_1^2 L q_0^2 - 24L q_1^2 q_2^2 + 48q_1 q_2 L q_0^2 + 24q_1 q_0^2 q_2 L_1 + 48q_1 q_0 q_2^2 L + 36q_1 q_2^2 L_1 q_0 - 24q_2^3 L_1 q_1 + 12q_1 L q_0^3 - 24q_2^2 L q_0^2 - 12q_2 L q_0^3 + 4 \sqrt{\dots})$$

$$a_1 = \frac{-\frac{q_0^2 L}{2q_1} + \frac{1}{2}q_1 \left(L - \frac{q_1 L_1}{q_1 - q_2} \right) + \frac{q_1^2 L_1}{2(q_1 - q_2)} + \frac{q_2^2 L_1}{2(q_2 - q_1)} + q_0 a_6 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} q_2 - \frac{1}{3} q_0 \right) a_6}{q_0}$$

als $0,7 < \frac{L_2}{L} \left(\frac{q_2}{-q_1} \right) < 1,3$ dan $q_7 = q_0 + \frac{1}{2}(q_2 - q_0)$ en geldt:

$$a_6 = \frac{1}{2(-27q_2^2 + 13q_0^2 + 14q_2q_0)q_1(q_1 - q_2)} (36q_1^3Lq_2 + 12q_1^3q_0L - 24q_1^2Lq_0^2 - 84q_1^2q_0q_2L - 36q_1^2Lq_2^2 + 60q_1q_2^2Lq_0 - 36q_1q_2^3L + 60q_1q_2Lq_0^2 + 24q_1q_0^2q_2L + 12q_1Lq_0^3 + 72q_1q_0Lq_2^2 - 36q_2^2Lq_0^2 - 12q_2Lq_0^3 + 8 \operatorname{sqrt}(-27q_2^2q_1^5Lq_1q_0 + 93q_1^2q_2^3Lq_0^3L + 48q_1^2q_2^2Lq_0^4L + 66q_1^2q_2^4Lq_0^2L - 33q_1q_2^4Lq_0^3L - 30q_1q_2^3Lq_0^4L - 108q_1q_2^2L^2q_0^4 - 29q_1q_2^2L^2q_0^5 + 9q_1^2q_0^4q_2^2L^2 + 2q_1L^2q_0^6q_2 + 24q_1^6L^2q_2q_0 - 106q_1^5L^2q_2q_0^2 - 75q_1^5L^2q_2^2q_0 + 257q_1^4L^2q_2^2q_0^2 + 172q_1^4L^2q_2q_0^3 + 78q_1^4L^2q_2^3q_0 - 244q_1^3L^2q_2^3q_0^2 - 320q_1^3L^2q_2^2q_0^3 - 120q_1^3q_0^4L^2q_2 + 168q_1^2L^2q_0^4q_2^2 + 28q_1^2L^2q_0^5q_2 + 264q_1^2q_0^3q_2^3L^2 - 27q_1^2L^2q_2^4q_0 + 81q_1^2L^2q_2^4q_0^2 + 11q_1^2q_2^4L^2q_0^2 - 3q_1^2q_2^5L^2q_0 + 19q_1^2q_2^3L^2q_0^3 + 9q_1^2q_0^5q_2Lq_1L - 9q_1q_0^5q_2^2Lq_1L - 81q_1q_0^3q_2^2L^2 + 13q_0^3q_1^5Lq_1L + 60q_1^4Lq_2^3Lq_0 + 12q_1^6q_0^3L^2 + 16q_1^4Lq_2^2q_0^2Lq_1 - 4q_1^4q_0^3Lq_2Lq_1 - 69q_1^3Lq_0^3q_2^2Lq_1 - 96q_1^3Lq_0^2q_2^3Lq_1 - 18q_1^3Lq_0^4q_2Lq_1 - 33q_1^3q_0q_2^4Lq_1L - 35q_1^3q_0^3L^2 + 33q_1^4q_0^4L^2 - 9q_1^3L^2q_0^5 - q_1^2L^2q_0^6 + 27q_2^4L^2q_0^4 + 10q_2^3L^2q_0^5 - q_2^2L^2q_0^6 + 14q_2q_0^2q_1^5Lq_1L))$$

$$a_1 = -\frac{\frac{q_0^2L}{2q_1} + \frac{1}{2}q_1 \left(L - \frac{q_1Lq_1}{q_1 - q_2} \right) + \frac{q_1^2Lq_1}{2(q_1 - q_2)} + \frac{q_2^2Lq_1}{2(q_2 - q_1)} + q_0a_6 + \frac{1}{2}(q_2 - q_0)a_6 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}q_2 - \frac{1}{2}q_0 \right) a_6}{q_0}$$

als $1,3 < \frac{L_2}{L} \left(\frac{q_2}{-q_1} \right) < 2,0$ dan $q_7 = q_0 + \frac{2}{3}(q_2 - q_0)$ en geldt:

$$a_6 = \frac{1}{2(7q_0^2 - 25q_2^2 + 18q_0q_2)(q_1 - q_2)q_1} (6Lq_1^3q_0 + 30q_1^3Lq_2 - 66Lq_1^2q_0q_2 - 12q_0^2Lq_1^2 - 30q_1^2Lq_2^2 + 60Lq_1q_0q_2^2 + 54q_2^2Lq_1q_0 + 42q_0^2Lq_1q_2 - 30q_2^3Lq_1 + 12q_2Lq_1q_0^2 + 6q_0^3Lq_1 - 30q_0^2Lq_2^2 - 6q_0^3Lq_2 + 4 \operatorname{sqrt}(63L^2q_1^6q_0q_2 + 18L^2q_1^5q_0^2q_2 - 234L^2q_1^5q_0^2q_2^2 - 201L^2q_1^5q_0q_2^2 + 639L^2q_1^4q_0^2q_2^2 + 318L^2q_1^4q_0^3q_2 + 45L^2q_1^4q_0^4 + 174Lq_1^4q_0q_2^3Lq_1 - 12Lq_1^4q_0^3q_2Lq_1 - 75q_2^2q_1^5Lq_1q_0 - 708L^2q_1^3q_0^3q_2^2 - 180L^2q_1^3q_0^4q_2 + 213q_1^4L^2q_2^3q_0 - 648q_1^3L^2q_2^3q_0^2 + 666L^2q_1^2q_0^3q_2^3 + 300L^2q_1^2q_0^4q_2^2 + 27q_0^5L^2q_1^2q_2 - 75q_1^3L^2q_2^4q_0 + 225q_1^2L^2q_2^4q_0^2 - 225L^2q_1q_0^3q_2^4 - 240L^2q_1q_0^4q_2^3 + 45q_2^4L^2q_1^2q_0^2 - 12q_2^5L^2q_1^2q_0 + 39q_2^3L^2q_1^2q_0^3 - 27q_0^5L^2q_1q_2^2 + 9q_2^2L^2q_1^2q_0^4 + 6q_0^6L^2q_1q_2 - 252Lq_1^3q_0^2q_2^3Lq_1 - 99Lq_1^3q_0q_2^4Lq_1 - 117Lq_1^3q_0^3q_2^2Lq_1 - 18q_0^4Lq_1^3q_2Lq_1 + 198Lq_1^2q_0^2q_2^4Lq_1 + 207Lq_1^2q_0^3q_2^3Lq_1 + 72q_2^2Lq_1q_2^4q_0 - 99q_2^4Lq_1q_2^3Lq_1 - 54q_2^3Lq_1q_2^4Lq_1 + 9q_2Lq_1q_2^3q_0^5L - 9q_2^2Lq_1q_2^4Lq_1 + 21q_0^3q_1^5Lq_1L + 54q_0^2q_2q_1^5Lq_1L - 9q_0^5L^2q_1^3 + 9q_0^5L^2q_2^3 - 3q_0^6L^2q_2^2 - 51L^2q_1^5q_0^3 + 75q_0^4L^2q_2^4 - 3q_0^6L^2q_1^2))$$

$$a_1 = -\frac{\frac{q_0^2L}{2q_1} + \frac{1}{2}q_1 \left(L - \frac{q_1Lq_1}{q_1 - q_2} \right) + \frac{q_1^2Lq_1}{2(q_1 - q_2)} + \frac{q_2^2Lq_1}{2(q_2 - q_1)} + q_0a_6 + \frac{1}{2}(q_2 - q_0)a_6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3}q_2 - \frac{2}{3}q_0 \right) a_6}{q_0}$$

als $\frac{L_2}{L} \left(\frac{q_2}{-q_1} \right) > 2,0$ dan $q_7 = q_2$ en geldt:

$$a_6 = \frac{1}{2(-12q_2^2 + 12q_0q_2)q_1(q_1 - q_2)} (12Lq_1^3q_2 - 12Lq_1^2q_2^2 - 24q_0q_1^2Lq_2 + 12q_0^2Lq_1q_2 + 24q_0q_1q_2^2Lq_1 - 12q_2^3Lq_1q_1 + 24q_1Lq_0q_2^2 - 12q_2^2Lq_0^2 - 30L^2q_1^5q_2^2q_0 + 84L^2q_1^4q_2^2q_0^2 + 33L^2q_1^4q_2^3q_0 - 96L^2q_1^3q_2^3q_0^2 - 12L^2q_1^3q_2^4q_0 + 36L^2q_1^2q_2^4q_0^2 - 72q_0^3q_1^3L^2q_2^2 + 90q_0^3q_1^2L^2q_2^3 + 12q_0^4L^2q_1^2q_2^2 - 24q_0^4L^2q_1q_2^3 + 12q_0^2q_1^2q_2^4Lq_1^2 + 12q_2^4L^2q_0^4 - 3q_0^5q_2^3L^2 - 3q_0q_1^2q_2^3Lq_1^2 + 30Lq_1^4q_2^3q_0Lq_1 - 12q_2^2q_1^5Lq_1q_0 - 18Lq_1^3q_2^4q_0Lq_1 - 36q_0^3q_1^3Lq_2^3Lq_1 + 18q_0^3Lq_1^2q_2^3Lq_1 + 36q_0^2Lq_1^2q_2^4Lq_1 - 18q_0^3q_1q_2^4Lq_1L - 36q_1L^2q_0^3q_2^4 + 9q_0q_2q_1^6L^2 + 6q_0^3q_2^2L^2q_1 - 3q_0^5q_2L^2q_1^2 + 18q_0^3q_2L^2q_1^4 - 24q_0^3q_2q_1^5L^2 + 12q_0^2q_2q_1^3Lq_1L - 12q_0^2q_2^2q_1^4Lq_1L))$$

$$a_1 = -\frac{\frac{q_0^2L}{2q_1} + \frac{1}{2}q_1 \left(L - \frac{q_1Lq_1}{q_1 - q_2} \right) + \frac{q_1^2Lq_1}{2(q_1 - q_2)} + \frac{q_2^2Lq_1}{2(q_2 - q_1)} + q_0a_6 + (q_2 - q_0)a_6}{q_0}$$

B Afnemende golfhoogte bij hogere waterstanden

B.1 Inleiding

Steenstoets werkt uitstekend voor de meeste locaties langs de Nederlandse primaire waterkeringen. Er zijn echter twijfels over de geschiktheid van de standaard toepassing van de hydraulische belasting in specifieke gevallen waarbij de golfhoogte bij hoge waterstanden lager is dan bij lage waterstanden. In deze bijlage is de problematiek geschetst (diagnose) en is een aanbeveling gegeven voor een oplossing.

B.2 Typen hydraulische belastingen

Steenstoets is oorspronkelijk ontwikkeld met een specifiek type hydraulische belasting in gedachten. Bij deze hydraulische belasting worden zowel de verhoogde waterstand als de golfhoogte veroorzaakt door een zware storm. In een dergelijke situatie zal bij een grotere windsnelheid zowel de waterstandsopzet als de golven hoger zijn. Er is dan alleen sprake van een snelle stochast, namelijk de windsnelheid in de storm, die bepalend is voor zowel de golven als de waterstanden. Voorbeelden van primaire waterkeringen waar dit type belasting optreedt zijn de Westerschelde en de Groningse en Friese kust van de Waddenzee.

Er zijn echter ook watersystemen waarbij de waterstand niet alleen door de storm wordt bepaald, maar ook door andere oorzaken. Voor het IJsselmeer en Markermeer geldt dat de waterstand gedurende lange tijd verhoogd kan zijn als de rivieren een hoge afvoer hebben en de spuimogelijkheden richting de Waddenzee beperkt zijn. Op de bovenrivieren en een deel van de benedenrivieren treedt met name een hoge waterstand op als er een hoge rivierafvoer is. In beide gevallen is de oorzaak van de verhoogde waterstand niet de storm die op een bepaald moment hoge golven veroorzaakt.

Deze verhoogde waterstand houdt enige weken aan en daarom wordt deze de trage stochast genoemd.

Er zijn ook locaties waarbij de verhoogde waterstand een combinatie van oorzaken heeft, zoals op het IJsselmeer en het Markermeer. Er kan hier sprake zijn van een verhoogde waterstand door hoge rivierafvoer en beperkte spuimogelijkheden, die verder verhoogd wordt door een storm. De storm zorgt voor een scheefstand van het meer waardoor de benedenwindse zijde een hogere waterstand krijgt. Er is dan sprake van een combinatie van een trage en snelle stochast. Aan de westzijde van het IJsselmeer en Markermeer zijn er vele locaties waar de trage stochast dominant is, terwijl aan de oostzijde er vele locaties zijn waar de snelle stochast dominant is.

Verder zijn er waterkeringen langs de Westerschelde en Waddenzee die tijdens noord-westerstorm, die de hoogste waterstanden veroorzaakt, in de luwte liggen en dus vrijwel geen golven te verwerken krijgen. Bij deze waterkeringen, zoals de Waddenzeezijde van Texel, worden de steenzettingen niet maximaal belast bij de hoogste waterstand, maar bij lagere waterstanden en een wind die zorgt voor golven op de steenzetting.

Voor het beoordelen of dimensioneren van steenzettingen wordt gebruik gemaakt van de door Hydra-NL of Hydra-Ring berekende golfcondities (Q-variant). De rekenresultaten bestaan uit een tabel met een aantal waterstanden en voor elk van deze waterstanden de significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Daarnaast worden nog extra resultaten in de uitvoer gepresenteerd, zoals de windrichting en windsnelheid met de grootste kansdichtheid bij de betreffende omstandigheden.

Een voorbeeld van de relatie tussen de waterstand en golfcondities is gegeven in Fig. B-1. In deze figuur valt op dat de golfhoogte steeds kleiner wordt naarmate de waterstand hoger wordt. Dit komt omdat er bij de hoge waterstanden meer kansruimte is gebruikt voor de trage stochast, zodat er minder kansruimte overblijft voor de snelle stochast. Daardoor is de windsnelheid kleiner en zijn de golven kleiner bij hoge waterstanden.

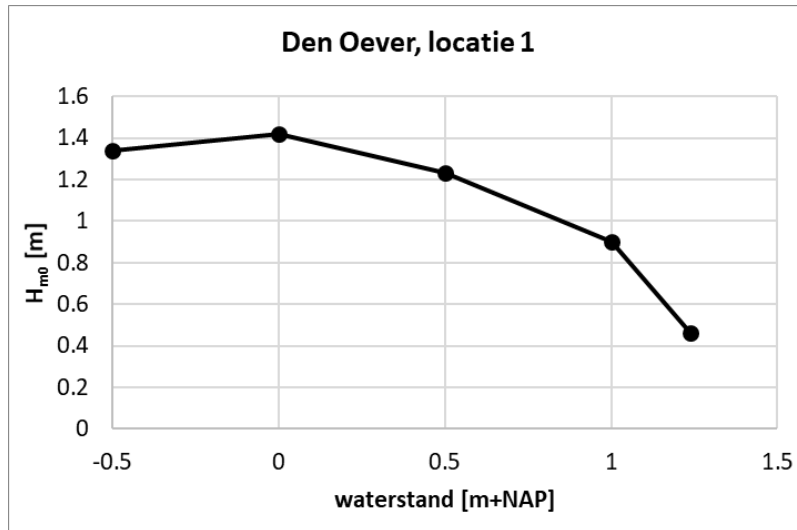


Fig. B-1, Voorbeeld van relatie tussen waterstand en golfhoogte (Den Oever)

In Fig. B-2 is het geschematiseerde verloop van de waterstand gegeven voor twee zeer verschillende locaties langs het IJsselmeer. Op de ene locatie is de trage stochast dominant en op de andere locatie de snelle stochast. Als de trage stochast dominant is, is er weinig variatie in de waterstand tijdens een extreme gebeurtenis.

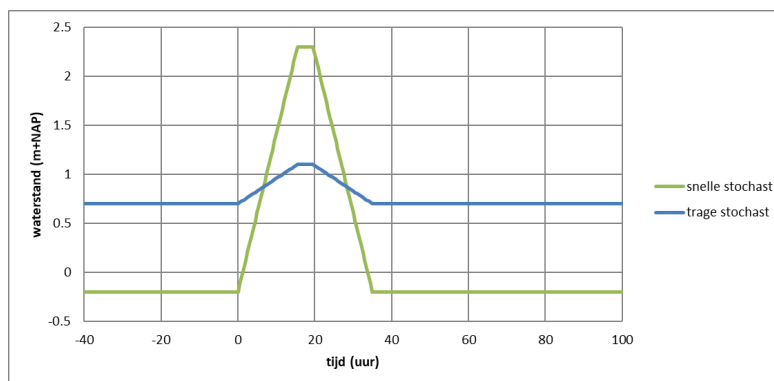


Fig. B-2, Voorbeelden van het geschematiseerde verloop van de waterstand

B.3 Werking Steentoets inzake hydraulische belasting

Op basis van de gegevens die zijn ingevoerd in het werkblad “toetsgolven” of “ontwerpgolven” maakt Steentoets een bepaald stormverloop aan en gaat de stabiliteit berekenen. Voor het IJsselmeer en Markermeer wordt gerekend met het waterstandsverloop van Fig. B-3, waarbij de hoogste waterstand overeenkomt met het ingevoerde toetspeil of ontwerppeil en de startwaterstand gelijk is aan het ingevoerde meerpeil. Als totale duur van de belasting wordt 35 uur gehanteerd.

Omdat bij lage waterstanden de golfcondities in de Hydra-NL uitvoertabel (Q-variant) berekend worden met windsnelheden die niet zoveel lager zijn als op de top van de storm, is de windsnelheid in de zo geschematiseerde storm bijna constant. Op de top van de storm is de windsnelheid maar 20 à 30% groter dan aan het begin van de storm.

De golfcondities tijdens de storm worden berekend aan de hand van de ingevoerde waarden bij de verschillende waterstanden. Voor de locaties waarbij de snelle stochast dominant is, levert dit een acceptabel verloop van de storm, maar voor die waar de trage stochast dominant is, leidt dit tot een minder realistisch verloop. In zo'n geval zullen bij het begin van de storm, als de waterstand nog relatief laag is, de golven veel hoger zijn dan tijdens de top van de storm, als de waterstand relatief hoog is. Dit is geschetst in Fig. B-3.

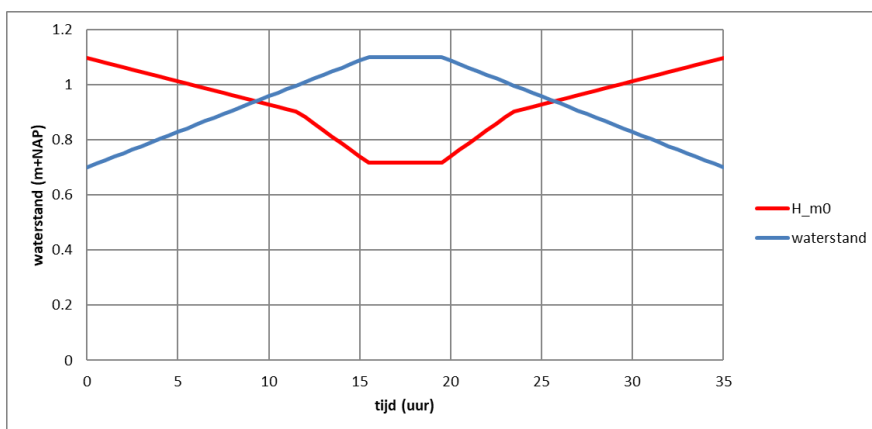


Fig. B-3, Verloop van de waterstand en golfhoogte volgens Steentoets

Een ander verloop van de golfcondities tijdens zo'n storm met dominante trage stochast is realistischer. Er is dan weinig verloop in de waterstand tijdens een storm. Het is dan te verwachten dat de golfhoogte vrij groot is als de startwaterstand in de storm laag is (er is dan veel kansruimte beschikbaar voor de wind) en een vrij lage golfhoogte als de startwaterstand hoog is. Verder zal de golfhoogte tijdens de storm geleidelijk toenemen naar een hoogtepunt en vervolgens weer afnemen.

B.4 Voorbeeldberekeningen

Er zijn een aantal voorbeeldberekeningen uitgevoerd voor situaties waarbij de trage stochast dominant is en er een afnemende golfhoogte is bij toenemende waterstand in het werkblad van Steentoets met toetsgolven/ontwerpgolven. De resultaten zijn samengevat in Tabel B-1.

In de tabel zijn de resultaten van de berekeningen met Steentoets gegeven, waarbij op twee manieren gerekend is;

1. met Steentoets (versie 20.1.1), normale werkwijze
2. met Steentoets (versie 20.1.1), maar met een work-around.

Deze work-around is nog niet de oplossing van de problematiek, maar is slechts toegepast om de problematiek te kwantificeren. De work-around is als volgt:

- Als waarde voor de waterstand bij de norm in Steentoets (h_{norm}) is een van de waterstanden gebruikt uit de tabel met toetsgolven/ontwerpgolven van Hydra-NL: h_i .
- Als startwaterstand is gerekend met een meerpeil dat ongeveer 30 cm onder de waterstand h_i ligt (bij Den Oever en Beatrixpolder was dit 30 cm, bij de andere locaties de werkelijke waarde, namelijk 20 à 40 cm).
- Vooralsnog worden gedurende de gehele storm dezelfde golfcondities aangehouden. In werkelijkheid zal de windsnelheid gedurende de storm toenemen tot een maximum en daarna weer afnemen, waarbij ook de golfhoogte een dergelijk verloop volgt. Zonder de code van Steentoets te wijzigen is een dergelijk verloop nog niet mogelijk, en daarom is hier nog voorlopig vanaf gezien. Het zo geschematiseerde verloop van de windsnelheid is weinig anders dan die in de golfcondities voor Steentoets normaal gebruikt wordt voor locaties waar de snelle stochast dominant is.

- Voor elke waterstand worden dezelfde golfcondities ingevoerd, namelijk de waarden uit de tabel bij de waterstand h_i . Zo wordt bereikt dat gedurende de hele storm de golfcondities constant zijn.
- Bovenstaande is herhaald voor alle waterstanden uit de tabel met toetsgolven/ontwerpgolven van Hydra-NL. De waterstand (h_i) met de laagste stabiliteit is maatgevend.

case	h_{norm} (m+NAP)	Waterstand bij min. Stab.		Dikte overschot (m)	
		Steentoets (m+NAP)	Work-around (m+NAP)	Steentoets (m)	Work-around (m)
Den Oever 1	1.25	0.14	0.00	0.04	0.04
Den Oever 2	1.25	0.15	0.00	0.04	0.04
Den Oever 3	1.25	0.50	0.50	0.01	0.01
Den Oever 4	1.25	0.50	0.50	0.04	0.04
Den Oever 5	1.25	0.14	0.00	0.05	0.05
Den Oever 6	1.25	0.50	0.50	0.02	0.05
Enkhuizen 1	1.55	1.00	1.00	0.06	0.06
Enkhuizen 2	1.55	0.25	1.00	0.09	0.06
Edam 1	1.16	-0.11	0.25	0.01	-0.02
Edam 2	1.16	0.37	0.25	-0.04	-0.08
Beatrixpolder 1	0.82	-0.08	0.00	0.04	0.04
Beatrixpolder 2	0.82	0.26	0.25	0.03	0.05
Beatrixpolder 3	1.31	0.46	0.50	-0.01	-0.01
Beatrixpolder 4	1.31	0.71	0.75	-0.01	-0.01

Tabel B-1, Resultaten van enkele Steentoets berekeningen

In de tabel is het volgende weergegeven:

- Waterstand bij de norm.
- Waterstand waarbij volgens Steentoets de kleinste stabiliteit geldt, verdeeld over een kolom met resultaten van de huidige Steentoets en een kolom met waarden zoals gehanteerd in de work-around (waarde van h_i met kleinste stabiliteit).
- Het dikte-overschot volgens Steentoets. Dit is een maat voor het rekenresultaat. Het is het aantal m dat de steenzetting dunner zou kunnen met nog steeds 'stabiel' als rekenresultaat. Als deze waarde negatief is, had de steenzetting iets dikker moeten zijn om voldoende stabiel te zijn.

In de tabel is te zien dat in veel gevallen het dikte-overschot voor een reguliere Steentoets berekening en die met de work-around hetzelfde zijn. Kennelijk levert het vreemde verloop van de golfhoogte tijdens de storm dan geen wezenlijk ander resultaat. Maar in 30% van de gevallen is er wel een verschil. Dit verschil kan er toe leiden dat een bepaalde bekleding onterecht wordt goedgekeurd of afgekeurd.

B.5 Aanbevelingen

Bovenstaande problematiek vraagt wijzigingen in de wijze waarop de hydraulische belastingen worden bepaald. Er wordt aanbevolen om dit generiek, voor alle bekledingen en eventuele andere faalmechanismen waar dit speelt, op te pakken. Mocht dit niet mogelijk zijn wordt aanbevolen om het rekenmodel voor steenzettingen zo op te zetten dat het programma herkent dat het een situatie is met een dominante trage stochast. In dat geval kan de berekening uitgevoerd worden met een aangepast waterstandsverloop en constante golfcondities.

Daarnaast wordt aanbevolen om de gebruiker ook handmatig de gelegenheid te geven te switchen tussen de twee rekenmethodes. Dat geeft de gebruiker de mogelijkheid om het handmatig aan te passen, als het programma de situatie niet goed inschat.

Voorgesteld wordt om eerst een plan uit te werken hoe dit het beste in het rekenmodel kan worden gerealiseerd. Daarbij kan ook gelijk gekeken worden naar andere bekledingen (asfalt en gras) om te zien of daar dezelfde problemen spelen of dat Steentoets gelijkgetrokken kan worden met die typen als daar dergelijke problemen niet spelen. Ook het rivierengebied kan daarbij beschouwd worden, met name omdat daar nu al wordt afgeweken van de standaard toepassing van de hydraulische belasting, en wel om een sterk vergelijkbare reden als hier aan de orde is: de hoge waterstanden worden door de trage stochast bepaald.

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