

**Invloed oneffen
taludoppervlak op stabiliteit
van steenzettingen**



Invloed oneffen taludoppervlak op stabiliteit van steenzettingen

A. Capel
M. Klein Breteler

1206424-016

Titel

Invloed oneffen taludoppervlak op stabiliteit van steenzettingen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1206424-016	1206424-016-HYE-0010	27

Trefwoorden

Steenzettingen, Steentoets, Stuwdruk, Stijghoogteverschil, dijkbekleding

Samenvatting

In dit rapport is een verkenning uitgevoerd naar de stabiliteit van oneffen steenzettingen. Dit zijn steenzettingen waarbij een of meerdere stenen iets uitsteken boven de andere stenen. Het onderzoek concentreert zich op het stijghoogteverschil bij golfaanval op oneffen steenzettingen, ten opzichte van het stijghoogteverschil over normale steenzettingen. Hieronder wordt verstaan steenzettingen met betonzuilen (Basalton, Hydroblocks, Ronaton, Hillblocks, C-Star, etc.), omdat dit thans het meest toegepaste type is. Het gaat daarbij om oneffenheden welke beperkt blijven tot enkele centimeters (minder dan orde 10 % van de toplaagdikte).

Doordat een steen iets boven de andere stenen uitsteekt, zal er tijdens golfploop of golfneerloop een hoge stroomsnelheid tegen de uitstekende zijkant van de zetsteen op botsen. Dit levert een hoge stuwdruk, die wordt doorgegeven aan het filter.

Uit het onderzoek is gebleken dat het grote stijghoogteverschil tijdens een golfklap of golffront, zoals verdisconteerd in Steentoets, meestal niet tegelijk optreedt met het hoge stijghoogteverschil als gevolg van de stuwdruk. Dit kan alleen bij een uitzonderlijke situatie met een lage overgangsconstructie ten opzichte van de stilwaterlijn, maar niet te laag.




Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

Referenties

Waterdienst zaaknummer 31068749 / 4500196054, van 7 mei 2012

+Contactpersoon Waterdienst: dhr. K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: dhr. Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	Feb. 2013	A. Capel		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
2.0	Feb. 2013	A. Capel		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Hydraulische belastingen	3
2.1 Maatgevend stijghoogteverloop op vlakke toplaag	3
2.2 Hydraulische belasting op uitstekende steen	5
2.2.1 Watersnelheid tijdens golfneerloop	6
2.2.2 Watersnelheid tijdens golfoploop	9
3 Vergelijking belasting op oneffen en vlakke steenzetting tijdens golfneerloop	11
3.1 Vergelijking stijghoogteverschillen	11
3.2 ComFLOW	17
3.3 Stijghoogte en Stuwdruk	18
3.4 Faseverschil stijghoogte en stuwdruk	19
4 Vergelijking belasting op oneffen en vlakke steenzetting tijdens golfoploop	23
5 Conclusie	25
6 Referenties	27
A Snapshots van brekende golven	A-1

1 Inleiding

De Nederlandse dijken worden vaak beschermd tegen golfbelasting met een steenzetting. Deze steenzetting kan reeds bij aanleg of gedurende de levensduur van de dijk door zettingen of verzakking van de teenconstructie een min of meer oneffen oppervlak krijgen. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 1.1. Op basis van deze figuur kan verondersteld worden dat de golfneerloop tijdens een golfbelasting gehinderd wordt door de uitstekende stenen van de steenzetting. Het naar beneden stromende water tijdens de golfneerloop botst tegen de opstaande zijken van de stenen. Iets vergelijkbaars kan optreden bij uit de zetting stekende stenen in geval van golfoploop, zie Figuur 1.2.

Deze bureaustudie is gericht op steenzettingen met betonzuilen (Basalton, Hydroblocks, Ronaton, Hillblocks, C-Star, etc.), omdat dit thans het meest toegepaste type is. Het gaat hierbij om oneffenheden die beperkt blijven tot enkele centimeters (minder dan orde 10 % van de toplaagdikte).

Het doel van het onderzoek is het kwantificeren van de stabiliteit van de uitstekende stenen bij een belasting door golven, ten opzichte van een steenzetting met dezelfde eigenschappen waarbij geen stenen uitsteken.

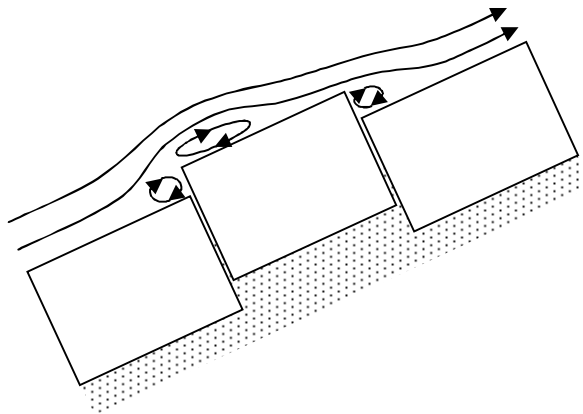


Figuur 1.1 Oneffen steenzetting bij de Poortvlietpolder ('kammende' zuilen)

De invloed van een uitstekende steen in een steenzetting is eerder beschouwd door Kuiper e.a. (2006) en Mourik en Klein Breteler (2012). In het eerstgenoemde rapport is een analytische methode afgeleid voor de belasting op een uitstekende steen op een havendam tijdens golfoverslag. Deze resultaten zijn in het tweede rapport gebruikt voor het kwantificeren van de belasting op een oneffen steenzetting in de golfoploopzone, waarbij onder andere Deltagootproeven zijn besproken. Hierin is het proces van stuwdruk tegen een obstakel beschouwd en is de invloed hiervan op de metingen aannemelijk gemaakt.

In dit rapport zal de theorie van Kuiper e.a. (2006) gebruikt worden voor het kwantificeren van de belasting op een oneffen steenzetting in de golfaanvalzone. Het onderzoek concentreert zich op het stijghoogteverschil bij golfaanval op oneffen steenzettingen, ten opzichte van het stijghoogteverschil over normale steenzettingen. Omdat slechts oneffenheden van enkele centimeters worden beschouwd, wordt er van uitgegaan dat er alleen een invloed is op het stijghoogteverschil over de steenzetting en dat er geen invloed is op de klemming. Voor de invloed van de kwaliteit van het zetwerk op de klemming wordt verwezen naar Klein Breteler en Mourik (2013).

Doordat een steen iets boven de andere stenen uitsteekt, zal er tijdens golfoploop of golfneerloop een hoge stroomsnelheid tegen de uitstekende zijkant van de zetsteen op botsen. Dit levert een hoge stuwdruk, die wordt doorgegeven aan het filter. Dit leidt vervolgens tot een stijghoogteverschil dat mogelijk in staat is de steen verder uit de steenzetting te lichten.



Figuur 1.2 Gekromde stroomlijnen over een uitstekende steen tijdens golfoploop

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Adviesing steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

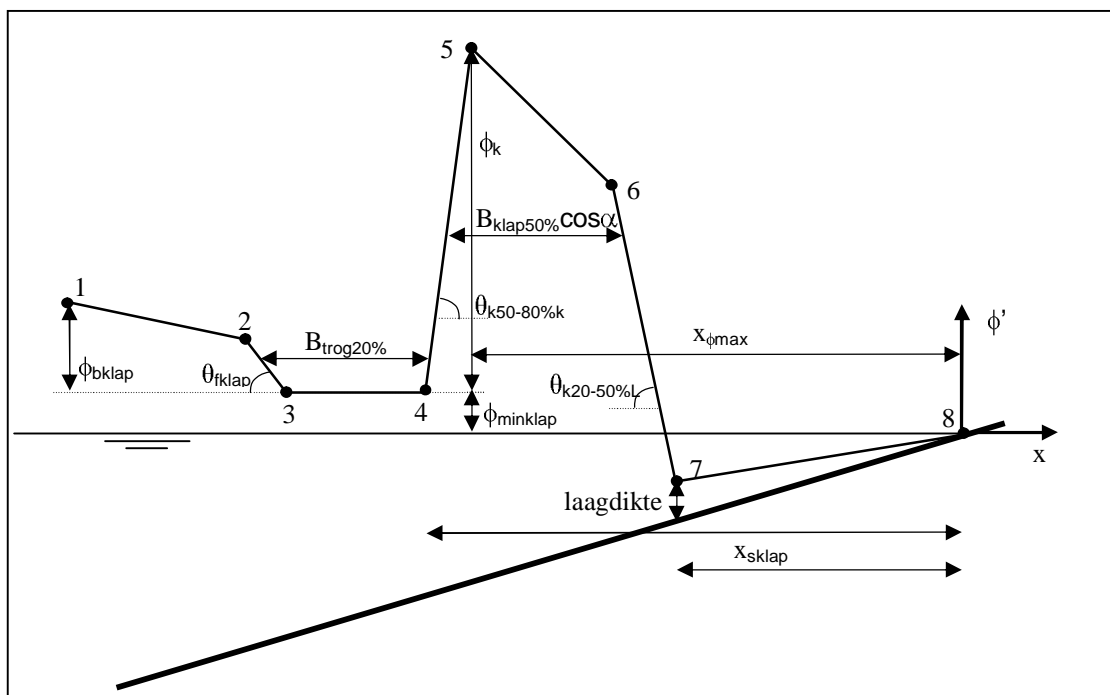
2 Hydraulische belastingen

2.1 Maatgevend stijghoogteverloop op vlakke toplaag

Steenstoets is het rekenmodel waarmee thans de stabiliteit van steenzettingen bepaald wordt. Impliciet wordt er van uitgegaan dat de steenzettingen mooi vlak is.

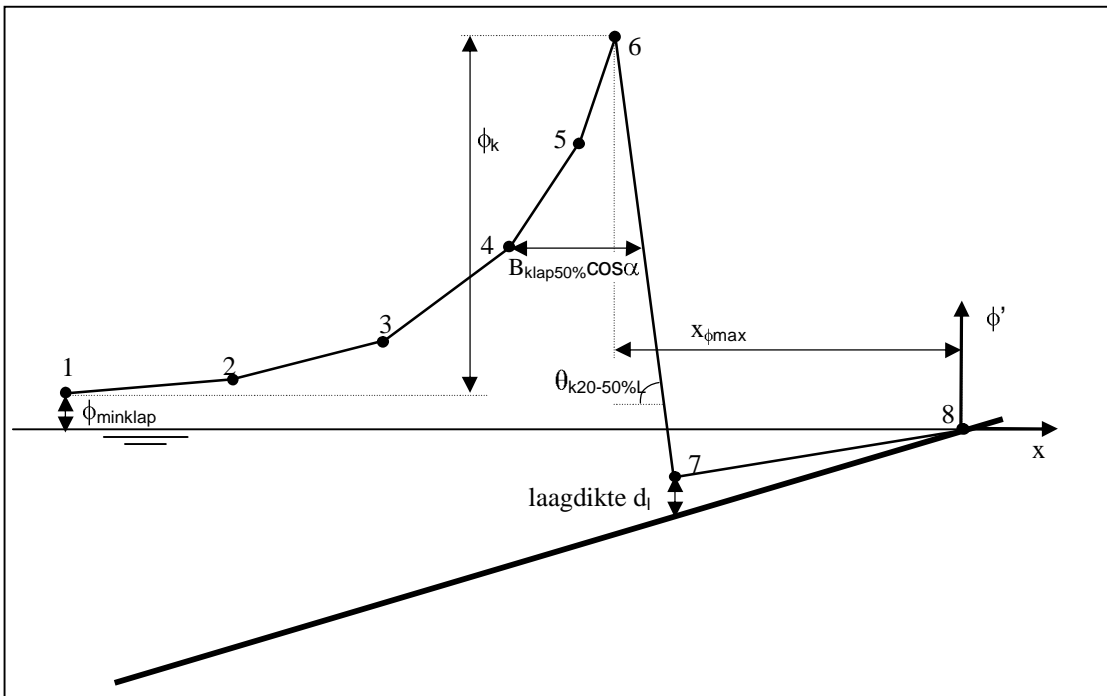
In Steentoets wordt het maatgevende stijghoogteverloop op de toplaag berekend voor twee typen golfklappen en twee typen golffronten. Het verloop van de stijghoogte wordt weergegeven door middel van 8 punten. Voor de huidige studie is alleen dit geschematiseerde verloop en de locatie van de punten belangrijk. Voor de verdere definitie en berekeningsmethodiek van de verschillende grootheden wordt verwezen naar de documentatie van Steentoets (Klein Breteler 2012).

In golfklap type 1 worden over twee trajecten extreme gradiënten beschreven. Deze twee gradiënten zijn gedefinieerd als golftype 1 zeewaarts (punt 5 - 4) en golftype 1 landwaarts (punt 6 - 7). Het grootste stijghoogteverschil treedt dan respectievelijk op in punt 4 en punt 7 afhankelijk van de eigenschappen van de golfklap en de steenzetting, zie Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens golfklap type 1

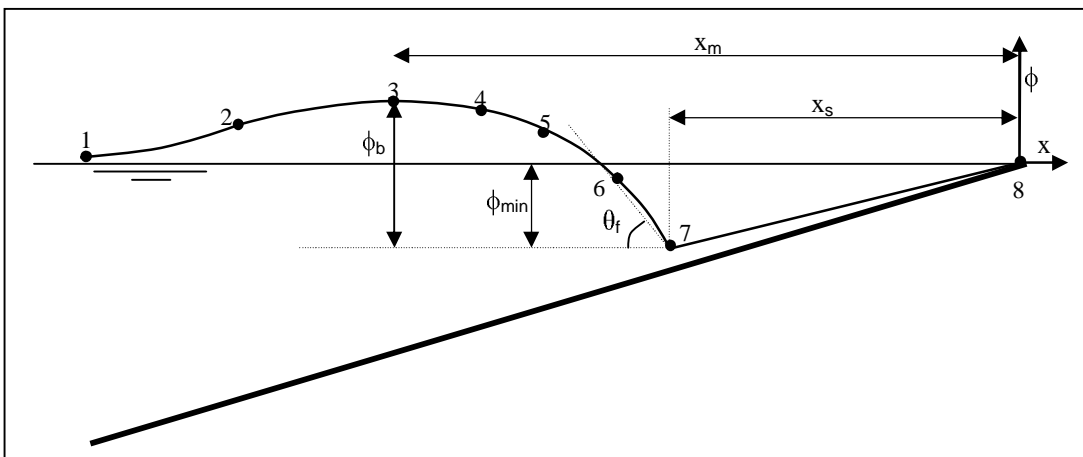
Naast golfklap type 1 is er ook een drukverdeling volgens golfklap type 2. Hierbij is er maar één punt met een maximale golfstijghoogte (punt 6). Het grootste stijghoogteverschil treedt dan op in punt 7, zie Figuur 2.2.



Figuur 2.2: Schematische weergave van golfklap van type 2

Naast de twee golfklaptypen wordt er in Steentoets ook gekeken naar twee typen stijghoogtefronten, namelijk het hoge en het steile stijghoogtefront.

Het grootste stijghoogteverschil treedt hier ook op in punt 7, zie Figuur 2.3. Van golf tot golf varieert de hoek van het golffront. Dit is verdisconteerd door te werken met een hoog stijghoogtefront en een steil stijghoogtefront.



Figuur 2.3: Stijghoogteverloop tijdens het hoge/steile stijghoogtefront

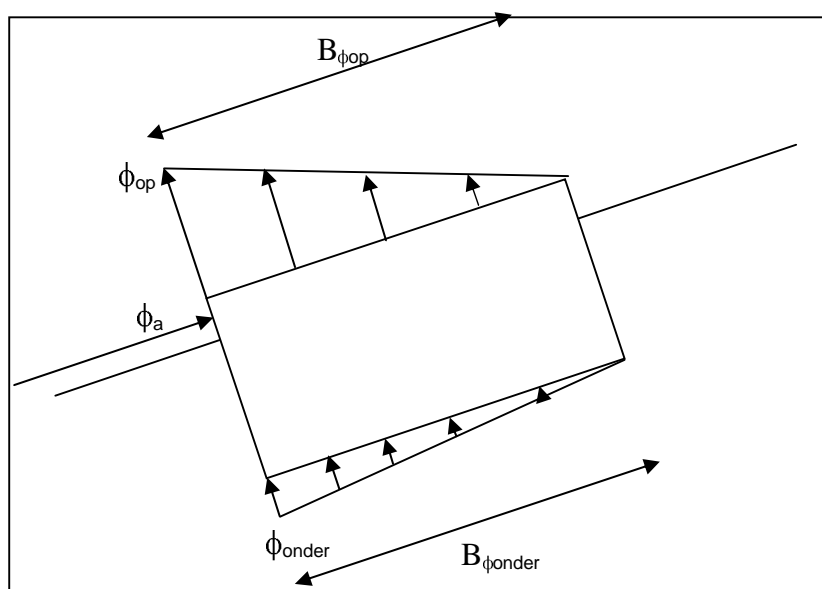
2.2 Hydraulische belasting op uitstekende steen

De hydraulische belasting op een uitstekende steen in een steenzettingen is vooral groot als de stroomsnelheid op het talud groot is. Die grote stroomsnelheid treedt op tijdens golfloop en tijdens golfneerloop.

In het rapport van Mourik en Klein Breteler (2012) wordt een analyse gegeven van de drukbalans rondom een uitstekend element. Figuur 2.4 is hieruit overgenomen en laat een schematische weergave zien van de stijghoogteverlaging op de toplaag en de stijghoogteverhoging in het filter. In stabiliteitsberekeningen dienen beide effecten meegenomen te worden, die beiden afhankelijk zijn van de stroomsnelheid op het taludoppervlak.

Een bovengrens van deze stroomsnelheid volgt uit het gelijkstellen van de potentiële energie van het water tijdens de maximale golfloop en de kinetische energie die dat water krijgt als het wrijvingsloos naar beneden stroomt. Dit levert formule (2.1) op, die in paragraaf 2.2.1 en 2.2.2 zal worden verfijnd. Deze stroomsnelheid leidt tot een stuwdruk die gekwantificeerd kan worden met formule (2.2). De coëfficiënt c is in deze formule geïntroduceerd omdat niet de volledige snelheidshoogte wordt omgezet in stuwdruk.

Met een formule met een empirische liftcoëfficiënt wordt de stijghoogte op de steen gevonden. De maximale stijghoogteverlaging boven de steen (ϕ_{op}) is in deze formule gerelateerd aan de maximale stijghoogteverhoging aan de bovenstroomse zijde (ϕ_a), zoals weergegeven in formule (2.3). Een vergelijkbare uitdrukking bestaat er voor de stijghoogteverhoging onder de steen (ϕ_{onder}).



Figuur 2.4 Schematische weergave van stijghoogteverlaging op toplaag en stijghoogteverhoging in het filter

De maximale stijghoogteverlaging boven de uitstaande steen kan als volgt berekend worden:

$$u_{2\%} = \sqrt{2g \cdot (z_{2\%} - z)} \quad (2.1)$$

$$\phi_{2\%a} = c \cdot \frac{u_{2\%}^2}{2g} \quad (2.2)$$

$$\phi_{op} = C_L \cdot \phi_a \quad (2.3)$$

Substitutie daarvan geeft:

$$\phi_{2\%op} = C_L \cdot c \cdot \frac{2g \cdot (z_{2\%} - z)}{2g} = C_L \cdot c \cdot (z_{2\%} - z) \quad (2.4)$$

Met:

$\phi_{2\%a}$ = maximale stijghoogteverhoging aan bovenstreamse zijde van de uitstekende steen (m)

$\phi_{2\%op}$ = maximale stijghoogteverlaging boven de uitstekende steen (m).

c = coëfficiënt $\approx 0,7$ à $0,9$ (-); In de berekeningen wordt gerekend met $0,8$ (-).

C_L = liftcoëfficiënt (-); Bij het berekenen van stabiliteit wordt gerekend met $0,9$.

$u_{2\%}$ = snelheid van het water over het talud met overschrijdingsfrequentie van 2% (m/s)

$z_{2\%}$ = golfoploophoogte met een overschrijdingsfrequentie van 2% (m).

z = verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (m), punt 7 binnen Steentoets.

Op basis van de beschikbare literatuur is door Kuiper e.a. (2006) een schatting gegeven van de coëfficiënten. De liftcoëfficiënt C_L is voor de stijghoogteverlaging boven de steen gelijk aan $0,7$ en voor de stijghoogteverhoging in het filter gelijk aan $0,2$. Beide drukverdelingen zijn opwaarts gericht, zie Figuur 2.4. Voor de stabiliteitsberekeningen mogen deze twee daarom bij elkaar op worden geteld zodat er een C_L van $0,9$ gehanteerd wordt, ervan uitgaande dat $B_{\phi_{onder}}$ gelijk is aan $B_{\phi_{op}}$.

De stroomsnelheid op het talud volgens formule (2.1) is slechts een eerste ruwe schatting. In onderstaande paragrafen is dit nader uitgewerkt voor de situatie in golfneerloop en golfoploop.

2.2.1 Watersnelheid tijdens golfneerloop

De snelheid van de golfneerloop wordt volgens formule (2.1) echter overschat, aangezien er geen wrijving van het talud is meegenomen. In Van der Meer en Klein Breteler (1990) wordt een formule gepresenteerd voor de golfneerloop welke bepaald is op basis van metingen op een glad talud. De ruwheid van dit gladde talud is dus impliciet verwerkt in de formule. Deze metingen hebben geleid tot de volgende formule:

$$u_{2\%} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{z}{z_{2\%}}\right)} \cdot \sqrt{g \cdot z_{2\%}} \quad (2.5)$$

Deze formule levert al een reductie op van bijna 30% ten opzichte van de theoretische maximale waarde. De metingen zijn echter uitgevoerd op een glad talud. De neerloop over een steenbekleding zal echter ruwer zijn waardoor de snelheid als gevolg van wrijving lager wordt.

Met behulp van formule (2.6), waarin de ruwheid via de Chezy parameter wordt verdisconteerd, is een factor bepaald waarmee de snelheden gereduceerd worden.

$$u = C \cdot \sqrt{h \cdot i_b} \quad (2.6)$$

Met:

$$C = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h}{k}\right) \quad (\text{m}^{1/2}/\text{s}) \quad (2.7)$$

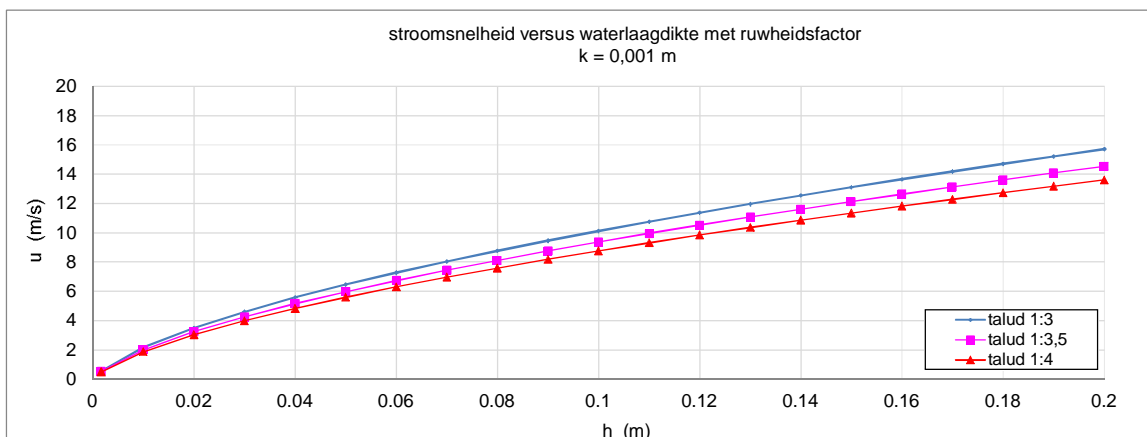
i_b : helling van het talud (-)

k : de ruwheid volgens Nikuradse (m)

h : de dikte van de neerloop (m)

u : de snelheid behorende bij de dikte (m/s).

De ruwheid behorende bij metingen welke in Van der Meer en Klein Breteler (1990) zijn gedaan wordt geschat op $k = 1$ à 2 mm. De ruwheid van een steenbekleding wordt geschat op 2 cm. Daarnaast is volgens deze formule de snelheid afhankelijk van de waterlaagdikte (h) en het verhang (i_b), dat gelijk is aan de taludhelling ($\tan\alpha$).

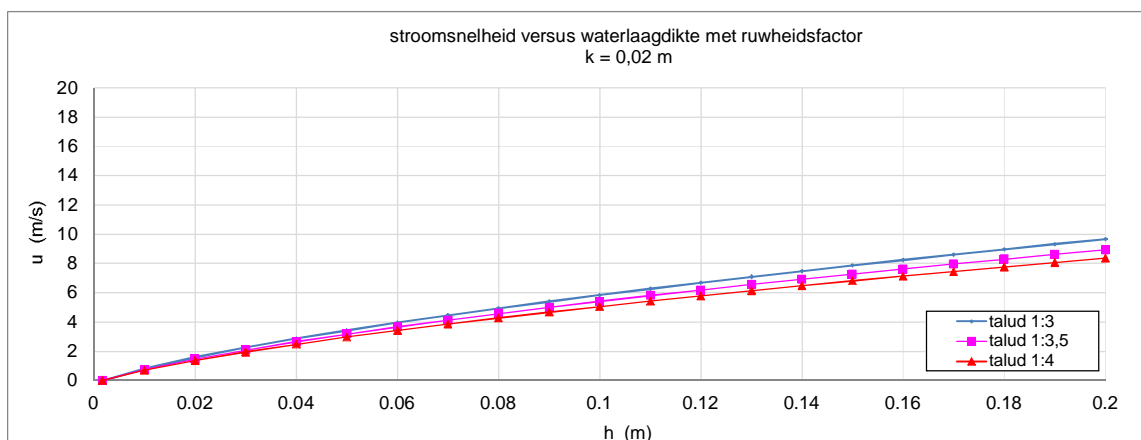


Figuur 2.5 Snelheid neerloop en bijbehorende waterlaagdikte voor ruwheidsfactor $k=0.001\text{m}$

Wanneer we voor verschillende waarden van de waterlaagdikte in de neerloop de bijbehorende snelheid berekenen voor beide ruwheden, dan blijkt dat het snelheidsverschil als gevolg van het verschil in ruwheid respectievelijk een factor 1,7 en 1,6 is voor waterlaagdiktes van 7 en 13 cm. Voor een extreem grote laagdikte van 32 cm wordt de factor 1,5, hetgeen gezien kan worden als een praktische ondergrens.

Figuur 2.5 en Figuur 2.6 geven de combinaties van neerloopsnelheid en bijbehorende laagdikte weer bij de geschatte ruwheidsfactor. De verschilfactoren blijken onafhankelijk van de taludhelling te zijn. Voor het berekenen van de $u_{2\%}$ zal formule (2.5) daarom gedeeld worden door 1,6.

$$u_{2\%} = \frac{1,1}{1,6} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{z}{z_{2\%}}\right)} \cdot \sqrt{g \cdot z_{2\%}} \quad (2.8)$$



Figuur 2.6 Snelheid neerloop en bijbehorende waterlaagdikte voor ruwheidsfactor $k=0.02m$

Deze nieuwe formule levert een halvering op ten opzichte van de theoretische maximum snelheid van formule (2.1). De verandering in stijghoogte zoals berekend met formule (2.2) en (2.3) als gevolg van de stuwdruk wordt in dit rapport verder met formule (2.8) in plaats van met (2.1) bepaald.

Het stijghoogteverschil als gevolg van golfklaptypen 1, 2 of één van de stijghoogtefronten werkt bij benadering over de gehele breedte van een bekledingselement (conservatief). Het stijghoogteverschil als gevolg van de stuwdruk echter niet.

Het maximum is gelegen aan de aanstroomrand en verloopt naar 0 op enige afstand daarvan (afhankelijk van hoe hoog de steen uitsteekt boven de omliggende stenen). Voor de drukverhoging in het filter geldt ook een afnemende waarde over de breedte van de steen, waarbij wel wordt aangenomen dat deze pas 0 is aan de andere zijde van het bekledingselement. Voor de stijghoogteverlaging aan de bovenzijde geldt echter dat deze werkt over een breedte van bij benadering 5 maal de mate waarin de steen boven het talud uitsteekt ($5d_r$), zie Mourik en Klein Breteler (2012). Het kan daardoor voorkomen dat $B_{\phi_{onder}}$ niet gelijk is aan $B_{\phi_{op}}$, in tegenstelling tot hetgeen is weergegeven in Figuur 2.4.

Om de hydraulische belasting als gevolg van de stuwdruk gemakkelijk te kunnen vergelijken met die van golven op een vlakke steenzetting, wordt dit omgerekend naar een gemiddeld stijghoogteverschil over de uitstekende steen. Aangezien $\phi_{2\%op}$ bepaald is met de som van liftcoëfficiënten in formule (2.3) zal, wanneer $B_{\phi_{op}}$ kleiner is dan $B_{\phi_{onder}}$, het gemiddelde berekend worden met formule (2.9).

$$\bar{\phi}_{2\%op} = \frac{2}{9} \cdot \frac{\phi_{2\%op}}{2} + \frac{7}{9} \cdot \frac{B_{\phi_{op}} / 2}{B_{\phi_{onder}}} \cdot \phi_{2\%op} \quad (2.9)$$

Deze formule wordt in hoofdstuk 3 gebruikt voor het berekenen van de belasting op een uitstekende steen tijdens golfneerloop en zoals in de volgende paragraaf verder wordt besproken in hoofdstuk 4 voor het berekenen van de belasting tijdens de golfoploop.

2.2.2 Watersnelheid tijdens golfoploop

Ook de snelheid van de golfoploop wordt met de theoretische formule (2.1) niet precies weergegeven. In Van der Meer en Klein Breteler (1990) is ook een formule gepresenteerd voor de snelheid tijdens de golfoploop op basis van metingen op een glad talud. In de zone onder de waterlijn treden de hoogste snelheden op, die nauwelijks plaatsafhankelijk blijken te zijn. De volgende formule is geldig voor de zone tussen ongeveer $SWL - H_s$ en SWL voor regelmatige golven:

$$u_{op} = 0,2 \sqrt{\frac{gH}{s_o}} \quad (2.10)$$

Met:

- u_{op} = maximale watersnelheid onder de waterlijn tijdens golfoploop (m/s)
- H = golfhoogte van de regelmatige golven (m)
- s_o = golfsteilheid (-)

Aannemende dat de grootste golven ook de grootste snelheden geven, en gegeven een Rayleigh-verdeling van golfhoogten in onregelmatige golven, kan deze formule omgezet worden naar een formule voor de snelheid met 2% overschrijdingsfrequentie in onregelmatige golven:

$$u_{op,2\%} = 0,3 \sqrt{\frac{gH_s}{s_{op}}} \quad (2.11)$$

Deze snelheid wordt bereikt vlak na het optreden van de golfklap. Het hoeft verder niet gecorrigeerd te worden voor de ruwheid van het talud, omdat het water bij het bereiken van deze snelheid nog nauwelijks over het talud gestroomd heeft.

Er dient echter wel een maximum snelheid gedefinieerd te worden. Deze wordt op basis van de proefresultaten hier vastgesteld op:

$$u_{op,max} = 1,7 \sqrt{gH_s} \quad (2.12)$$

In hoofdstuk 4 wordt met formule (2.11) en als bovengrens formule (2.12), in combinatie met formule (2.2) en (2.3), het stijghoogteverschil als gevolg van de stuwdruk tijdens golfoploop bepaald. Daarnaast zal ook gebruikgemaakt worden van formule (2.9).

3 Vergelijking belasting op oneffen en vlakke steenzetting tijdens golfneerloop

3.1 Vergelijking stijghoogteverschillen

Met behulp van Steentoets zijn een aantal fictieve dijkbekledingen doorgerekend met variërende golfcondities voor een vlakke steenzetting zonder oneffenheden. Het betreft rechte taluds met een helling van 1:3, 1:3,5 en 1:4. De golfsteilheid s_{op} is gevarieerd tussen 2%, 4% en 6% op basis van de T_p . De golfhoogte varieerde hierbij van 1 m to 2,5 m in stappen van 0,5 m. Waterstanden zijn gevarieerd van NAP +2 tot NAP +5 m. In eerste instantie is de golfconditie constant gehouden over het gehele waterstandsbereik. In tweede instantie is deze afhankelijk gemaakt van de waterstand.

Voor de steenbekleding is Basalton gekozen. Deze steenbekleding was in eerste instantie aangebracht over een hoogte van NAP+0 m tot NAP+6 m, dus tot boven het totale waterstandsbereik.

De minimale dikte is hiervoor uitgerekend waarbij het dikteoverschot maximaal 2 cm was.

Met behulp van deze inputrandvoorwaarden zijn de maximale stijghoogteverschillen voor beide golfklaptypen en stijghoogtefronten berekend. Hieruit volgt dat het maximale stijghoogteverschil zich altijd voordoet in het zeewaarts gelegen punt van golfklaptype 1. Bovendien is het stijghoogteverschil berekend voor een oneffen steenzetting in de buurt van de waterlijn met een 4 cm uitstekende steen. Daarvoor is formule (2.9) gebruikt uit het vorige hoofdstuk.

In Figuur 3.1 zijn de resultaten van de berekeningen gepresenteerd. Op de horizontale as staat het stijghoogteverschil volgens Steentoets (twee typen golfklappen en twee typen golffronten met vlakke steenzetting) en op de verticale as het stijghoogteverschil over de steen die 4 cm uitsteekt boven de omliggende stenen ($d_r = 4$ cm). Het valt op dat het stijghoogteverschil aan de zeewaarts kant in golfklap type 1 steeds het grootste is.

Opgemerkt dient te worden dat het niet eenvoudig is om het verschil in stijghoogte tussen de vijf berekende waarden direct te vergelijken met het stijghoogteverschil als gevolg van een steen die uitsteekt. Dit komt doordat de duur van de belasting verschilt per belastinggeval. Het stijghoogteverschil ter plaatse van de uitstekende steen duurt waarschijnlijk wat langer dan die bij het golffront en op zijn beurt duurt die weer een stuk langer dan die bij de golfklap. Hoe langer het stijghoogteverschil aanhoudt, hoe groter de kans is dat de betreffende stenen ook daadwerkelijk substantieel omhoog gedrukt kan worden.

Het effect van de duur van het stijghoogteverschil is in Steentoets verdisconteerd door de verhinderde toestroming en traagheid als volgt te berekenen (Klein Breteler 2012):

duur van stijghoogteverschil:

- In geval van een hoog front en steil front (HF en SF):
 - als $\xi_{op} < 2$: $t_o = 0,25 + T_p/20$ (3.1)

$$\text{als } \xi_{op} \geq 2: t_o = 0,25 + (2/\tan\alpha \cdot \sqrt{(H_s/1,56)})/20 \quad (3.2)$$

- In geval van een golfklap (K1Z, K1L, K2):
 - als $\xi_{op} < 2$: $t_o = 0,0018T_p \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,2}$ (3.3)

$$\text{als } \xi_{op} \geq 2: t_o = 0,0018 \cdot \frac{2}{\tan\alpha} \sqrt{\frac{H_s}{1,56}} \cdot \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,2} \quad (3.4)$$

$$\phi_{toe} = \max \left(0; \frac{0,03}{1,5t_o} \cdot \frac{D^2 \sqrt{BL}}{\pi k' \Lambda} \left(0,56 + 0,18 \ln \left(\frac{\sqrt{BL}}{\Lambda} \right) \right) \right) \quad (3.5)$$

$$\phi_{tr} = \frac{1,78 \cdot 0,03 \cdot D^2 (\Delta + 2)}{gt_o^2} \quad (3.6)$$

In deze formules zijn de volgende symbolen gebruikt:

- ϕ_{toe} = verlaging van het stijghoogteverschil als gevolg van toestroming (m)
- ϕ_{tr} = verlaging van het stijghoogteverschil als gevolg van traagheid (m)
- k' = gelineariseerde toplaagdoorlatendheid (m/s)
- t_o = duur van de opwaartse belasting (s)
- σ_w = 0,073 N/m = oppervlaktetenspanning van het water (N/m)
- $f_{S,klap}$ = invloedsfactor t.a.v. de sterkte bij een belasting door golfklappen (-)
- D = rekendikte m.b.t. een belasting met golfklappen (m)
- Λ = leklengte (m)
- Δ = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)
- ρ = soortelijke massa van het water (kg/m³)
- B, L = breedte en lengte van de stenen (m)

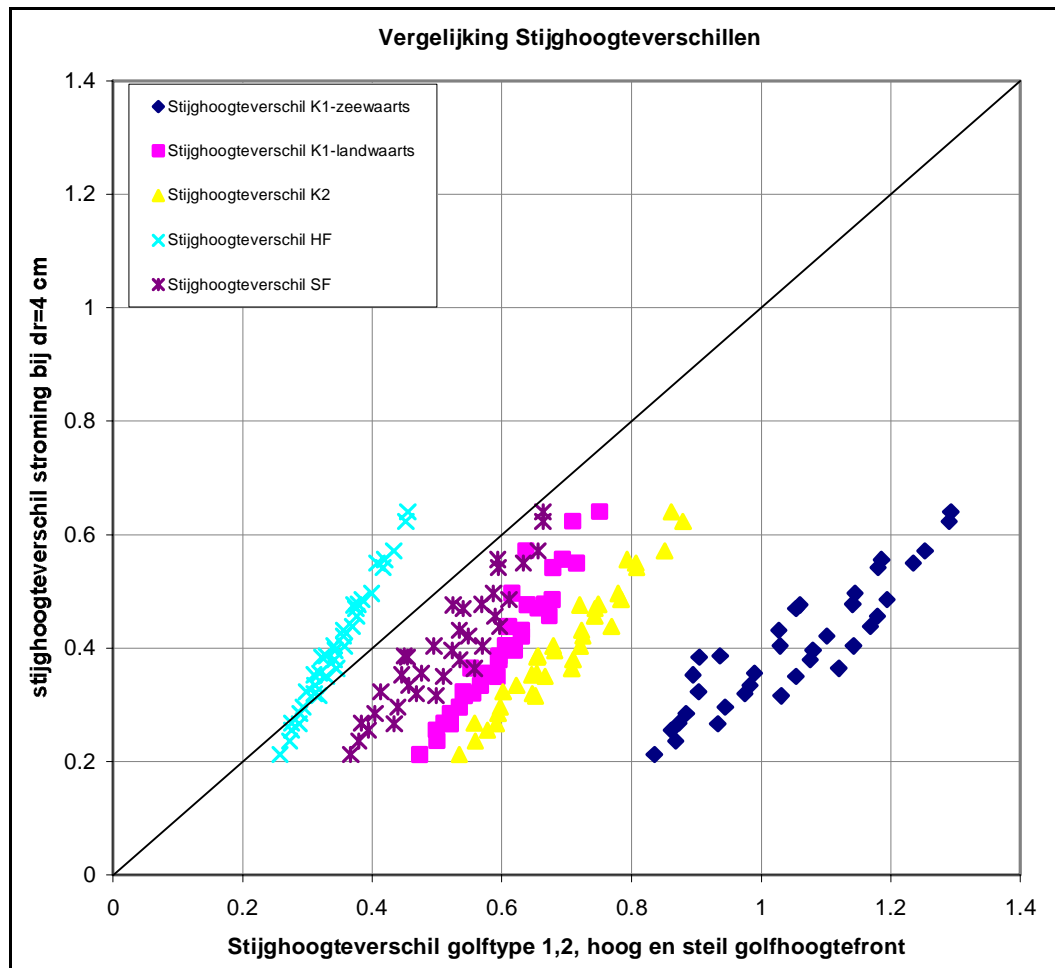
In Steentoets wordt het maximale stijghoogteverschil verminderd met ϕ_{tr} en ϕ_{toe} om rekening te houden met de duur van het stijghoogteverschil. Hier kan dat handmatig berekend worden om de stijghoogteverschillen in Figuur 3.1 onderling te kunnen vergelijken.

Op basis van het doorrekenen van vele concrete steenzettingen met zuilen en diverse belastingssituaties is gebleken dat $\phi_{tr} + \phi_{toe}$ voor golfklappen doorgaans 5 à 10 cm groter is dan voor golffronten, met uitschieters naar 4 cm en 15 cm. Aannemende dat de duur van het stijghoogteverschil over een uitstekende steen nog tweemaal groter is dan bij het golffront, blijkt de $\phi_{tr} + \phi_{toe}$ voor fronten 1 à 2 cm groter te zijn dan voor de uitstekende steen. Dat laatste is derhalve verwaarloosbaar.

Dat betekent dat de stijghoogteverschillen van de golfklappen in Figuur 3.1 5 à 10 cm verkleind moeten worden om ze direct te kunnen vergelijken met de stijghoogteverschillen bij de fronten. Stijghoogteverschillen bij de fronten zijn direct vergelijkbaar met die bij de uitstekende steen.

Het maximale stijghoogteverschil van het zeewaarts gelegen punt van golfklaptype 1 is zoveel groter dan het stijghoogteverschil bij een uitstekende steen dat ook na het meewegen van de duur van de stijghoogteverschillen deze nog steeds het grootste is.

Figuur 3.1 laat ook zien dat het stijghoogteverschil van het hoge stijghoogtefront als enige voor een groot deel van de beschouwde situaties kleiner is dan het stijghoogteverschil over de uitstekende steen als gevolg van de stuwdruk.

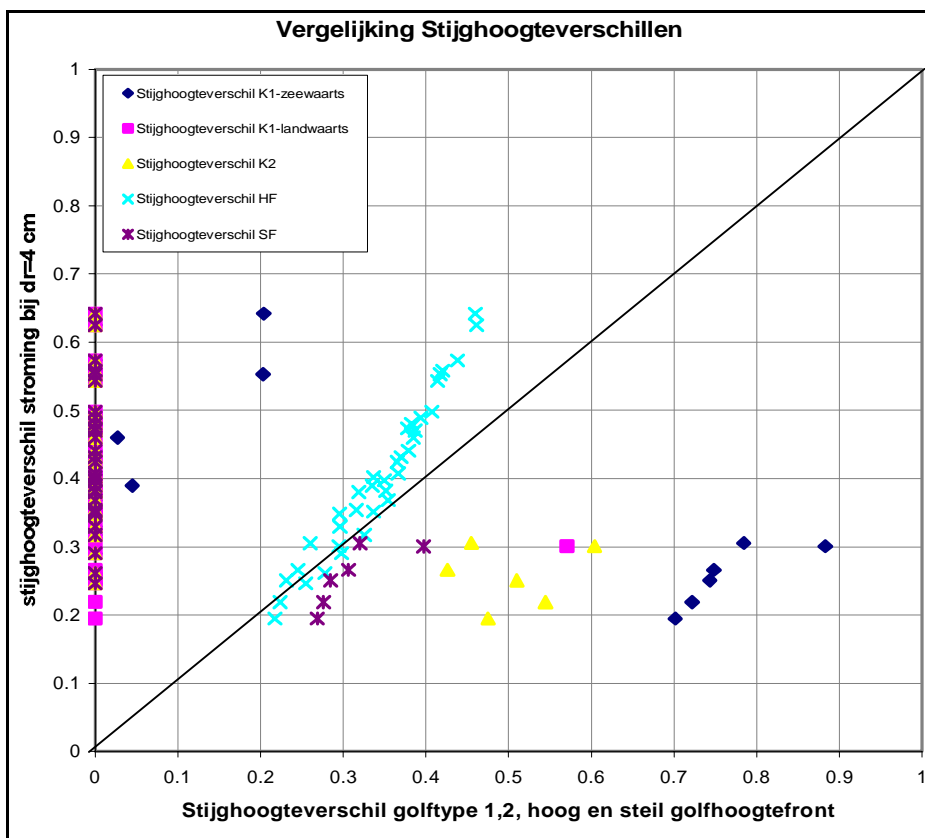


Figuur 3.1: Vergelijking stijghoogteverschillen bij steenzetting over gehele talud (neerloop)

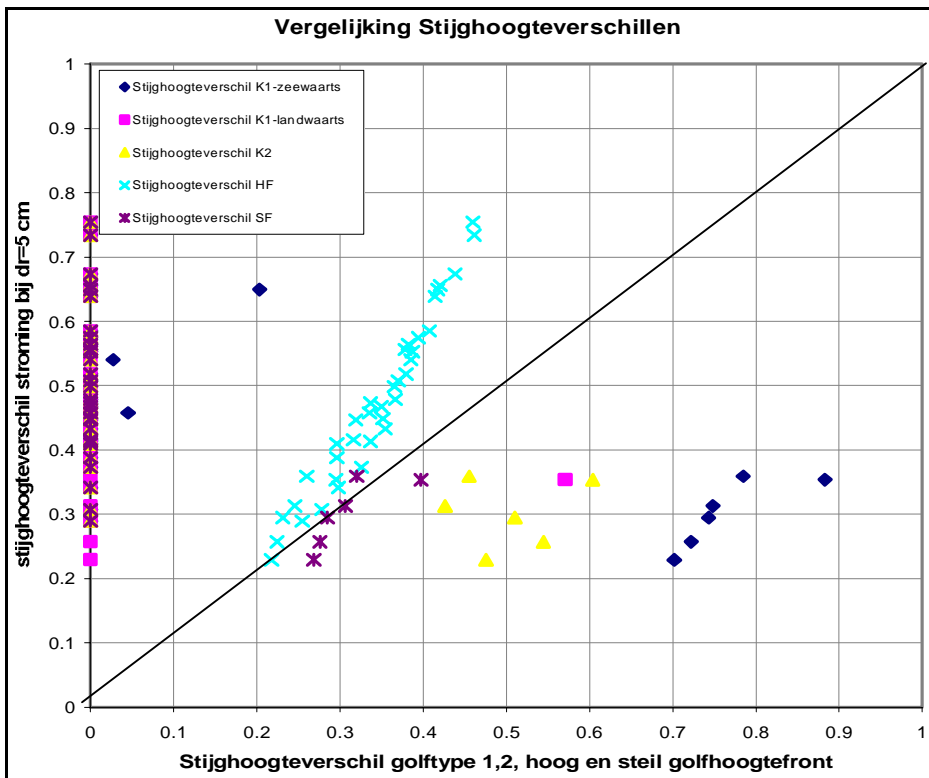
Het feit dat het zeewaarts gelegen punt in golfklaptype 1 maatgevend is, heeft onder meer te maken met het feit dat gekozen is voor een steenbekleding met overgangsconstructie boven het toetspeil. Het maximale stijghoogteverschil zal dan altijd aan de zeewaartse kant van golfklaptype 1 zijn.

Om één van beide stijghoogtefronten maatgevend te laten worden in de berekening wordt in de berekeningen de zone aangepast waarover de steenbekleding aanwezig is, zodat golfklaptype 1 niet meer maatgevend wordt. Dit kan gerealiseerd worden door het niveau van de overgangsconstructie te verlagen. Er is in de berekening gekozen voor een niveau van deze overgang op NAP +3 m.

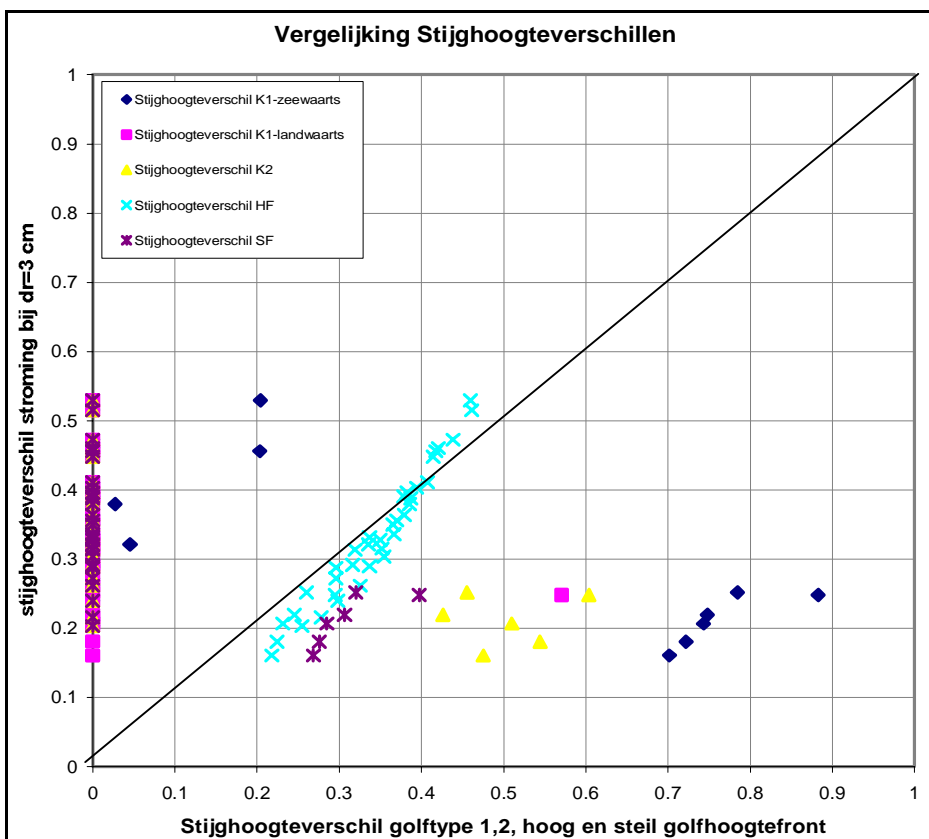
In Figuur 3.1 tot en met Figuur 3.3 zijn de uitkomsten weergegeven van alle vijf berekende stijghoogteverschillen over de toplaag ten opzichte van het door de stuwdruk veroorzaakte gemiddelde stijghoogteverschil over een uitstekende steen. De steen heeft hier een breedte van 0,3 m (normale waarde voor zuilen). Het verschil tussen de drie figuren is de grootte van de gemiddelde stijghoogteverschil bij verschillende maten van uitsteeking (d_r). Ter referentie is wederom $d_r = 4$ cm gekozen waarin de steen uitsteekt. Ter vergelijking zijn daarnaast zowel de grafieken van 3 cm als 5 cm gegeven. De invloed van de mate waarin een steen uitsteekt is goed zichtbaar. Hoe groter deze maat hoe groter de stuwdruk en dus het stijghoogteverschil zal zijn.



Figuur 3.2: Vergelijking stijghoogteverschillen met neerloop stuwdruk bij een d_r van 4 cm

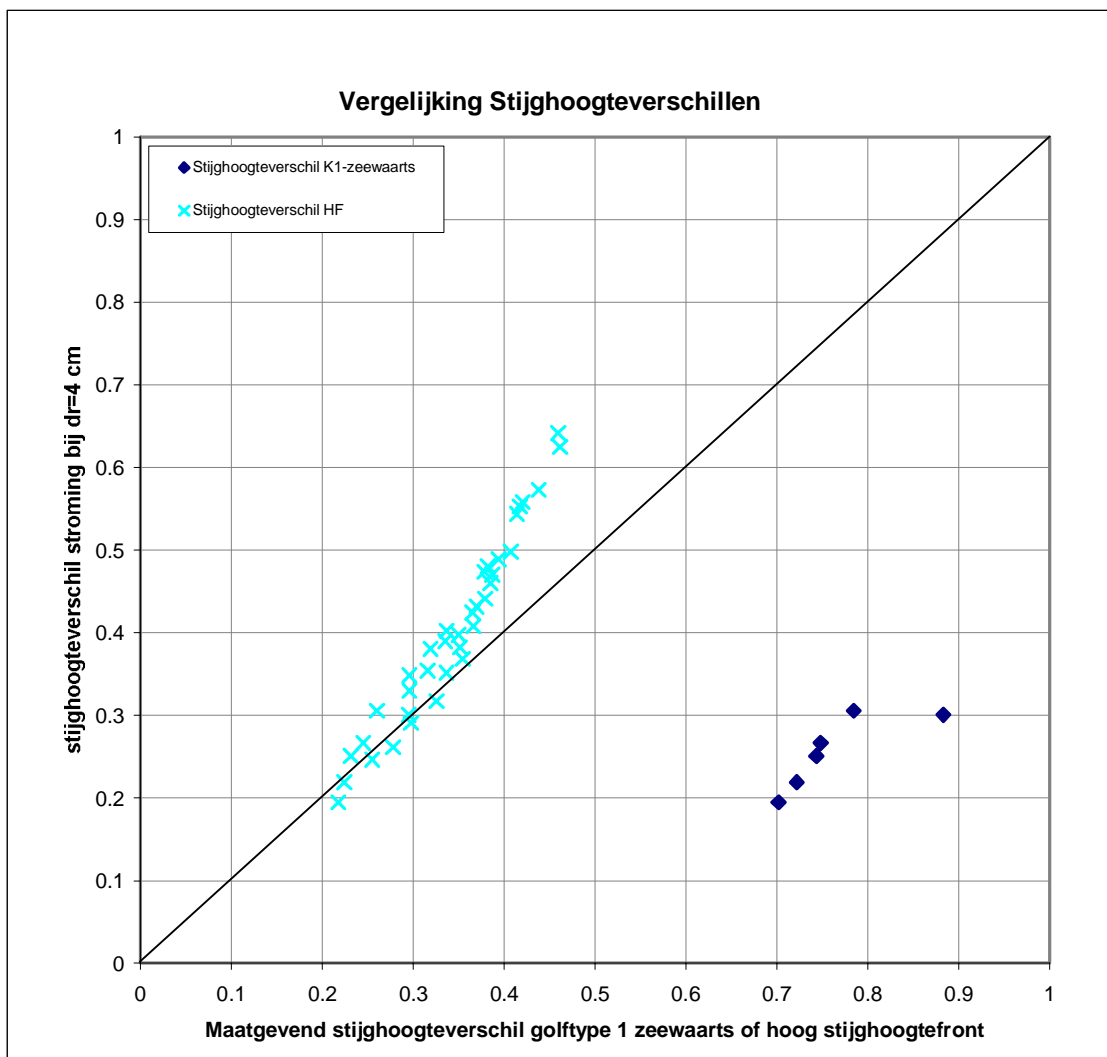


Figuur 3.3 Vergelijking stijghoogteverschillen met neerloop stuwdruk bij een dr van 5 cm



Figuur 3.4 Vergelijking stijghoogteverschillen met neerloop stuwdruk bij een dr van 3 cm

In Figuur 3.5 is per berekende conditie het maatgevend stijghoogteverschil over de toplaag weergegeven. Dit is dus een selectie van de uitkomsten van Figuur 3.1. Hoewel het dezelfde data is, valt hierin des te meer op dat het stijghoogteverschil over de uitstekende steen in veel gevallen groter is dan het stijghoogteverschil welke direct toegeschreven kan worden aan het hoge stijghoogtefront. Wetende dat deze belasting afkomstig van de stuwdruk een langere duur heeft, is deze maatgevend voor de stabiliteit. Deze conclusie geldt voor golfsteilheden van 2% tot 6%.

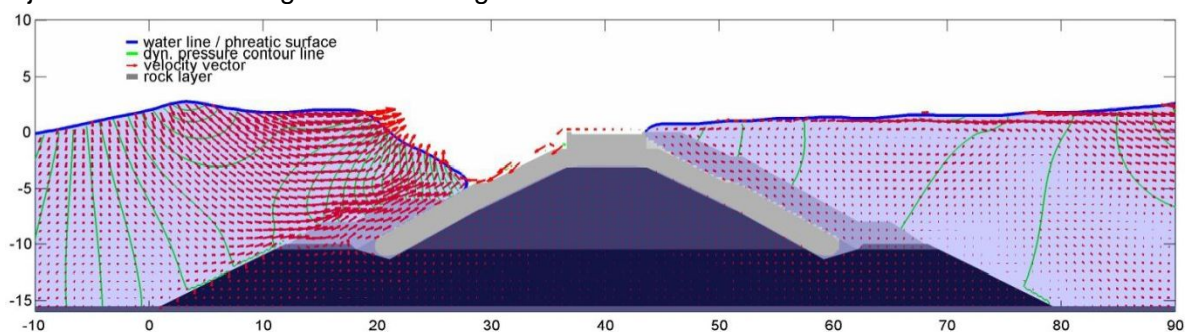


Figuur 3.5 Vergelijking maatgevende stijghoogteverschillen met neerloop stuwdruk bij een dr van 4 cm

3.2 ComFLOW

In paragraaf 3.3 zal gekeken worden of de stuwdruk samen kan vallen met één van de vijf belastingsgevallen. Voor deze analyse is onder andere gebruik gemaakt van het numerieke model ComFLOW, waarmee snelheden en eventueel ook drukken op een talud voor verschillende waterstanden en golfcondities kunnen worden berekend.

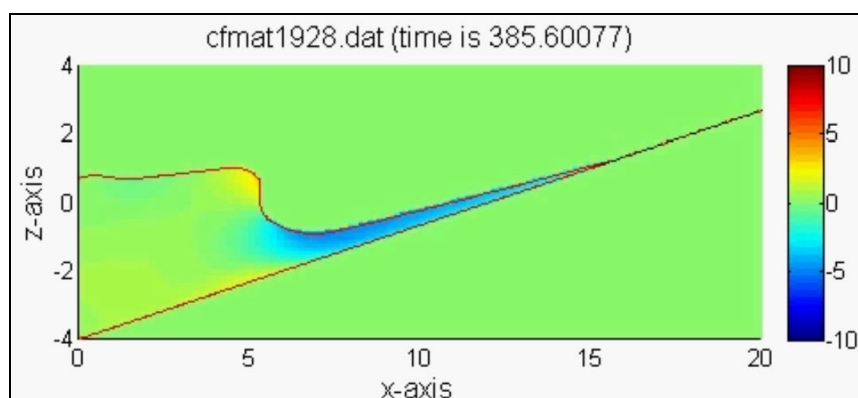
ComFLOW is een 3D numeriek model waarmee de 2D of 3D waterbeweging bij en in constructies wordt uitgerekend. Het vrije wateroppervlak wordt met de Volume of Fluid (VOF) methodiek afgehandeld, waarmee ook steile en overslaande golven en golfklappen berekend kunnen worden. Het is ook mogelijk de eventuele stroming door poreuze media, zoals een filterlaag of kern van een dijk, uit te rekenen. Een voorbeeld van een momentopname in een bijvoorbeeldberekening is te zien in Figuur 3.6.



Figuur 3.6: ComFLOW resultaat voor een geavanceerde berekening

De ComFLOW-berekeningen zijn behoorlijk complex, waardoor de rekentijd doorgaans vele dagen tot enkele weken per geval is (één geometrie en enkele tientallen tot honderden golven) op een cluster van snelle computers.

In ComFLOW is voor dit onderzoek een eenvoudige schematisering toegepast waarbij de nadruk lag op de opbouw van een nieuw golffront in combinatie met de neerloop van een vorige golf. Er is gekozen voor een ondoorlatend 1:3 talud. De horizontale snelheden zijn voor ieder tijdstip in iedere grid cel gebruikt om een contourplot te maken. Een voorbeeld van zo'n contourplot is te zien in Figuur 3.7.



Figuur 3.7: ComFLOW resultaat van snelheden waterbeweging over talud

In de analyse is vervolgens gezocht naar combinaties van golffronten met hoge neerloop-snelheden.

3.3 Stijghoogte en Stuwdruk

In paragraaf 3.1 is gekeken naar de stijghoogteverschillen van de vijf beschouwde belastinggevallen en de belasting door de stuwdruk. In deze paragraaf zal gekeken worden of de stuwdruk samen kan vallen met één van de vijf belastinggevallen.

Golfklaptype 1-zeewaarts

In het geval van golfklaptype 1 zal de golf breken als een “plunging breaker”, waarbij er twee locaties zijn met groot stijghoogteverschil, namelijk aan de zeewaartse kant en de landwaartse kant van de zone waar de grootste druk op het talud ontstaat.

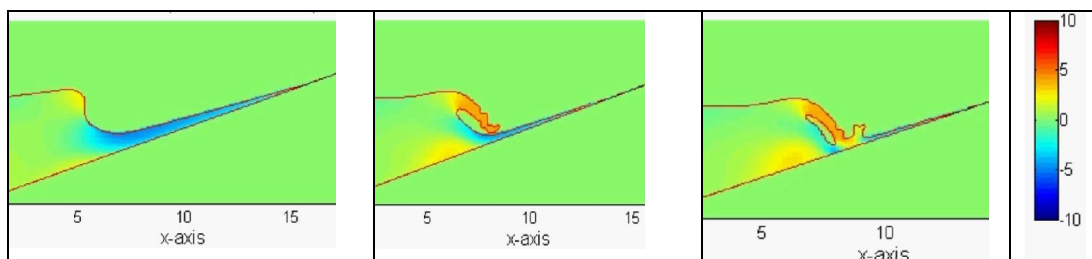
Aan de zeewaartse zijde ontstaat meestal het grootste stijghoogteverschil bij steenzettingen van zuilen (locatie 4 in Figuur 2.1). Op deze locatie is het grote stijghoogteverschil echter pas aanwezig als er al een vrij grote waterlaagdikte is ontstaan. Dit is te zien aan de grote stijghoogte ter plaatse van locatie 4 (vaak boven de waterlijn). Vanwege deze grote waterlaagdikte is het onwaarschijnlijk dat er een grote stroomsnelheid bij het taludoppervlak optreedt. Daardoor wordt geconcludeerd dat het samenvallen van het grote stijghoogteverschil in golfklaptype 1 (zeewaarts) en een groot stijghoogteverschil over een uitstekende steen als gevolg van de stuwdruk niet mogelijk is.

Golftype 1-landwaarts

In de vorige paragraaf hebben we reeds gezien dat de zeewaartse kant van golftype 1 maatgevend zal zijn in de grootte van het stijghoogteverschil. Om de belasting aan de landwaartse kant maatgevend te laten worden dient er dus een significant stuwdruk opbouw plaats te vinden. Dit is echter niet waarschijnlijk.

Tijdens het neerkomen van de golfklap ontstaat er een hoge stroomsnelheid het talud op, terwijl er daarvoor een hoge stroomsnelheid omlaag was door de golfneerloop. Deze twee stromingen ontmoeten elkaar waardoor er weliswaar veel turbulentie ontstaat, maar de stroomsnelheden niet bijzonder groot zijn.

In onderstaande momentopnames van een ComFLOW berekening is dit ook te zien. De snelheid van de neerloop is maximaal net voordat de bovenzijde van de golf gaat “struikelen”. Doordat de golf het talud oploopt, remt deze de neerloop. Op het moment dat de jet in de neerloop valt is de snelheid gereduceerd tot een relatief kleine waarde.



Figuur 3.8 Waterbeweging tijdens golfklap volgens ComFlow

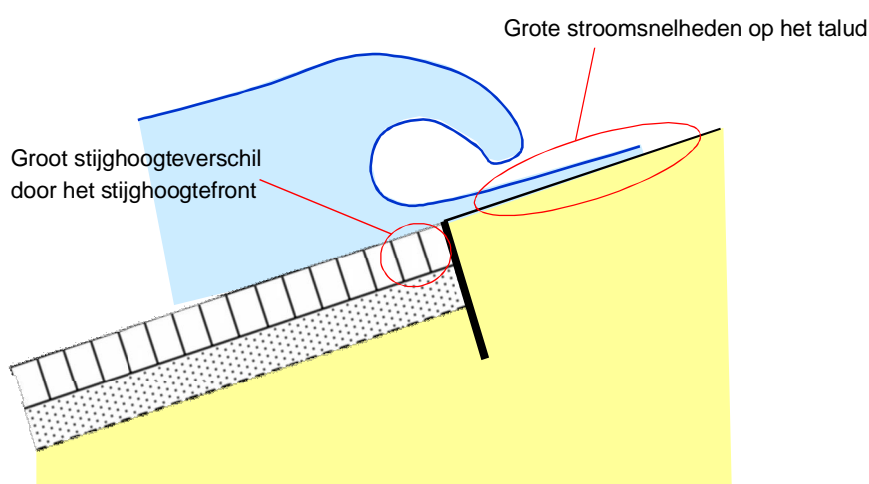
Op grond van bovenstaande analyse wordt dan ook geconcludeerd dat een combinatie van golftype 1 met een significante stuwdruk niet kan voorkomen.

Golfklaptype 2

De situatie tijdens golfklaptype 2 is niet wezenlijk anders dan aan de landzijde van golfklaptype 1. Ook hiervoor geldt dus dat het grote stijghoogteverschil door de golfklap niet samenvalt met het grote stijghoogteverschil als gevolg van de stuwdruk tegen een uitstekende steen.

Hoog en Steil Stijghoogtefront

De situatie waarbij een hoog dan wel steil stijghoogtefront maatgevend kan worden is alleen mogelijk wanneer de bovenste overgangsconstructie erg laag ligt. Deze situatie is geschetst in Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Situatie bij relatief lage overgangsconstructie, waarbij het stijghoogteverschil bij het hoger stijghoogtefront maatgevend is

Voor deze situatie geldt dat het aannemelijk is dat een stijghoogtefront samen kan vallen met een stuwdruk. Het maximale stijghoogteverschil zal altijd optreden bij de hoogst gelegen steen. De neerloop zal zich dan boven de steenzetting bevinden, zoals geschetst in Figuur 3.9, waardoor de stuwdruk op de uitstekende steen geen bijdrage kan geven aan het grootste stijghoogteverschil als gevolg van het front.

Een combinatie van deze twee kan dus alleen voorkomen in een situatie waarbij de waterstand iets lager is en het maximale stijghoogteverschil als gevolg van het front iets lager dan de overgangsconstructie optreedt. Of deze situatie werkelijk tot significante belastingverhoging kan leiden zal in de volgende paragraaf worden uitgezocht. Hier zal gekeken worden of er een faseverschil tussen beide belastingmechanismen aanwezig is.

3.4 Faseverschil stijghoogte en stuwdruk

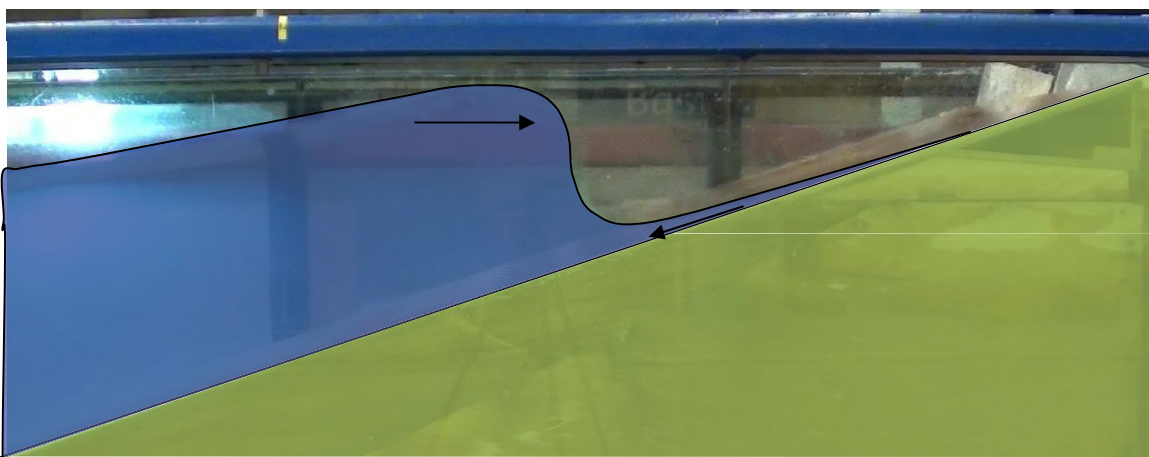
In de vorige paragraaf is besproken dat het onwaarschijnlijk is dat een eventuele stuwdruk als gevolg van neerloop gelijktijdig zal optreden met een groot stijghoogteverschil voor golfklaptypen 1 en 2. Deze combinatie is eventueel alleen mogelijk bij een stijghoogtefront. In deze paragraaf zal gekeken worden of er een faseverschil aanwezig is tussen de twee belastingmechanismen. Hiervoor is zowel gebruik gemaakt van een analyse van een tweetal golven, waarvan snapshots uit een video opname zijn weergegeven in Bijlage A, en het numerieke model ComFLOW.

De opbouw en dissipatie van de twee golven welke een groot golffront laten zien is weergegeven in Bijlage A. Beide golven behoren tot een test die gekenmerkt is met een kleine golfsteilheid van ongeveer 2%. We gaan er even vanuit dat deze golffronten dan leiden tot de maatgevende stijghoogteverschillen bij een steil/hoog stijghoogtefront.

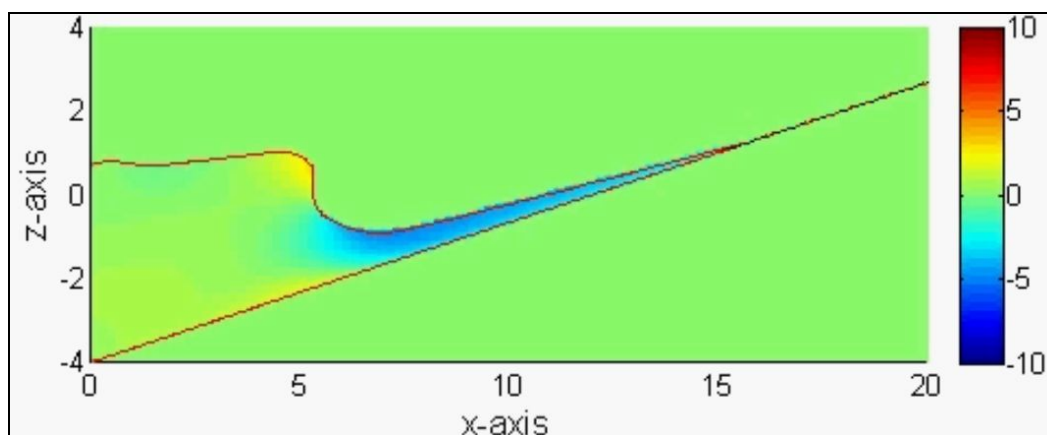
Het verschil tussen de twee golven wordt gekenmerkt door enerzijds het ontbreken van een neerloop en anderzijds door de aanwezigheid van een significante neerloop. In het eerste geval is de neerloop marginaal en de laagdikte dus nihil, waardoor de golf niet als een plunging breaker breekt zoals in het tweede geval. Het drukverloop in het filter is dan overeenkomstig met een diep of steil stijghoogtefront.

Bij de tweede golf is er juist een signifiante neerloop die het golffront aan de bodem vertraagt waardoor de bovenzijde van de golf, welke juist een voorwaartse snelheid heeft als een plunging breaker breekt met een jet in de neerloop valt. In deze situatie is het mogelijk dat net voordat de golf breekt een eventuele stuwdruk samenvalt met een hoog stijghoogtefront.

Met behulp van de resultaten van het numerieke model ComFLOW is gekeken naar de combinatie van golffronten en neerloop. ComFlow reproduceert vergelijkbare golfbewegingen als te zien was in de video opname van het fysieke model. Ter vergelijking zijn in onderstaande twee figuren vrijwel gelijke momentopnames weergegeven. De neerloop is in de output van ComFLOW maximaal voor deze golf en is bij $x = 7$ m rond de 5 m/s in horizontale richting tegen de golfvoortplantingsrichting in. Parallel aan het talud zal de snelheid iets groter zijn, maar de exacte grootte maakt niet uit voor deze kwalitatieve analyse.



Figuur 3.10 Fysiek model opname: Hoog golffront in combinatie met een significante neerloop.



Figuur 3.11 Numerieke model opname: Hoog golffront in combinatie met een significante neerloop.

Hoewel het in deze twee figuren lastig te benoemen is waar het maximale stijghoogteverschil exact zal optreden als gevolg van het hoge stijghoogtefront wordt echter verondersteld dat dit ongeveer op de locatie in ComFLOW ter hoogte van $x = 6$ m zal zijn. Daar is bij het taludoppervlak te zien dat de stroomsnelheid veel kleiner is dan in de golfneerloop hoger op het talud ($x > 8$ m).

De maxima van beide belastingmechanismen vallen in ieder geval dus niet samen op dezelfde locatie. Het verschil in locatie zal dus ook zorgen voor een faseverschil in de stijghoogtemaxima, mocht het stijghoogtefront nog iets verder naar rechts bewegen.

Het is belangrijk om te beseffen dat een eventuele optelling van belastingen alleen plaats kan vinden bij de uitstekende steen. De stuwdruk is namelijk niet meer aanwezig links of rechts van deze steen op het talud. De invloedzone van het stijghoogtefront is groter, maar toch ook gelimiteerd en waarschijnlijk minder dan 1 m breedte.

Vermoedelijk zal er ergens tussen de $x = 6$ m en $x = 7$ m een maatgevende situatie kunnen optreden wanneer er juist op die plek een steen uitsteekt. Op deze locatie zou dus een optelling van de twee componenten kunnen voorkomen waarbij elk van deze componenten niet de individuele maximale belasting is, maar de optelling van beide wel leidt tot de maximale belasting. Daarbovenop geldt nog de voorwaarde dat de bovenste overgangsconstructie ook in deze buurt zit, want anders is het front niet maatgevend.

Doordat de maxima van de stijghoogteverschillen plaats vinden op verschillende locaties, maar dicht bij elkaar in de buurt, wordt aangenomen dat dit leidt tot een faseverschil tussen het moment van maximale stuwdruk en stijghoogteverschil bij het hoge stijghoogtefront onder de uitstekende steen. In paragraaf 3.1 hebben we gezien dat het stijghoogteverschil als gevolg van een hoog stijghoogtefront van vergelijkbare grootte is als het gemiddelde stijghoogteverschil op basis van de stuwdruk. De vraag is wat op deze locatie nog merkbaar is van een groot lokaal stijghoogteverschil op de andere locatie.

Zelfs wanneer er voor bepaalde golven geldt dat deze een toename leveren tot het stijghoogteverschil bij de uitstekende steen, dan is er nog de vraag of deze combinatie groter kan worden dan zowel het in Steentoets berekende maximale stijghoogteverschil als het maximum van de gemiddelde stijghoogte op basis van de 2% neerloopsnelheid.

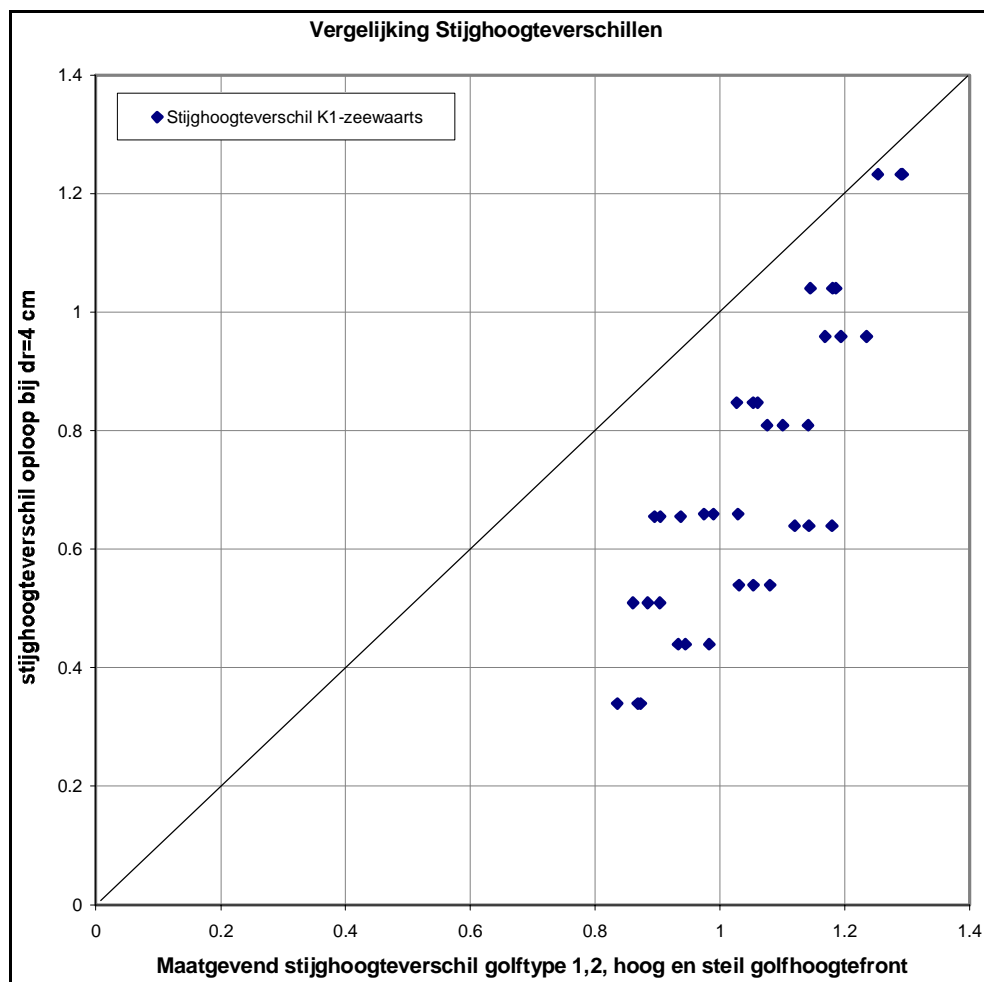
Samenvattend kan gesteld worden dat het in principe mogelijk lijkt te zijn dat het stijghoogteverschil over de toplaag ter plaatse van een uitstekende steen bij een diep gelegen overgangsconstructie groter wordt dan volgens Steentoets. Het betreft echter een vrij bijzondere situatie, waardoor het aantal malen dat deze grote stijghoogteverschillen optreden tijdens een storm niet zo groot zullen zijn. Gezien het feit dat een steenzetting pas bezwijkt nadat er vele malen een groot stijghoogteverschil is opgetreden, lijkt het voorsnog niet waarschijnlijk dat de uitstekende steen belangrijk is voor de stabiliteit. Helaas is dit echter nog niet volledig uit te sluiten.

4 Vergelijking belasting op oneffen en vlakke steenzetting tijdens golfoploop

Op vergelijkbare wijze als in het vorige hoofdstuk kan het effect van de stuwdruk op uitstekende stenen tijdens golfoploop berekend worden. In dit geval is gebruikgemaakt van formule (2.11) voor de maximale stroomsnelheid op het talud met overschrijdingsfrequentie van 2% met als bovengrens formule (2.12).

Het berekende stijghoogteverschil over de toplaag als gevolg van de uitstekende steen in de golfoploop is voor een aantal cases te zien in Figuur 3.1. In deze figuur is op de horizontale as het stijghoogteverschil over een vlakke steenzetting gegeven (zelfde cases als in het vorige hoofdstuk), terwijl op de verticale as het berekende stijghoogteverschil over de uitstekende steen is te zien.

Uit de figuur blijkt dat in alle gevallen het stijghoogteverschil over de vlakke steenzetting als gevolg van de golfklappen groter zijn dan bij de uitstekende steen als gevolg van de stuwdruk.



Figuur 4.1: Vergelijking stijghoogteverschillen bij vlakke en oneffen steenzettingen tijdens golfoploop

De punten welke dicht bij de lijn liggen behoren tot de 2% golfcondities. Hiervoor worden grote oploopsnelheden berekend van meer dan 8 m/s. Dit is waarschijnlijk conservatief.

Doordat de golfklap niet op hetzelfde moment optreedt als de hoge opwaartse stroomsnelheden, mag het optredende stijghoogteverschil over de uitstekende steen niet opgeteld worden bij het stijghoogteverschil als gevolg van de golfklap. De hoge stroomsnelheden treden duidelijk na de golfklap op.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat een uitstekende steen tijdens golfoploop niet maatgevend is voor het al dan niet instabiel worden van de steenzetting. Het stijghoogteverschil over een vlakke steenzetting tijdens de golfklap is groter dan die tijdens golfoploop kan optreden door de stuwdruk tegen een uitstekende steen.

5 Conclusie

In dit rapport is een verkenning uitgevoerd naar de invloed van uitstekende stenen op de stabiliteit van steenzettingen. De studie heeft zich gericht op steenzettingen met betonzuilen (Basalton, Hydroblocks, Ronaton, Hillblocks, C-Star, etc.), omdat dit thans het meest toegepaste type is. De beschouwde oneffenheden zijn beperkt tot enkele centimeters (minder dan orde 10 % van de toplaagdikte).

Tijdens golfoploop of golfneerloop zal water met hoge snelheid tegen de opstaande rand van de uitstekende steen botsen, waardoor er een hoge stuwdruk ontstaat. Er is onderzocht of deze stuwdruk de stabiliteit van de steenzetting kan bedreigen. Hiervoor is de stabiliteit van de uitstekende stenen bij een belasting door golven gekwantificeerd, ten opzichte van een steenzetting met dezelfde eigenschappen waarbij geen stenen uitsteken. Het stijghoogteverschil over een vlakke steenzetting is voor een groot aantal gevallen met Steentoets berekend. Tevens is het stijghoogteverschil over uitstekende stenen berekend als daar een grote stroomsnelheid langs komt voor zowel oploop als neerloop.

In de berekeningen is naar voren gekomen dat in veel gevallen het maximale stijghoogteverschil aan de zeezijde van golfklaptype 1 maatgevend zal zijn voor de stabiliteit. In dat geval zijn er tegelijkertijd geen grote snelheden langs het talud en zal een oneffenheid in het taludoppervlak geen vergroting geven van het stijghoogteverschil. Dit is nader onderzocht op basis van numerieke berekeningen met het rekenmodel ComFlow. Deze conclusie geldt ook voor golfklaptype 2. Het individuele stijghoogteverschil van golfoploop blijkt ook kleiner te zijn dan het maximale stijghoogteverschil aan de zeezijde van golfklaptype 1.

Bij een golffront is het echter niet uit te sluiten dat een oneffen steenzetting zwaarder belast wordt dan een vlakke steenzetting. Het golffront is echter alleen maatgevend als de overgangsconstructie laag op het talud ligt (ver onder water).

De berekeningen hebben aangetoond dat het stijghoogteverschil als gevolg van 3-4 cm uitsteeking van de steen voor neerloop van dezelfde orde van grootte kan zijn als het maximale verschil in stijghoogte over de toplaag van een steil of hoog stijghoogtefront op een vlakke steenzetting.

Een combinatie van een maximum stijghoogtefront en een maximum neerloop stuwdruk is niet mogelijk door het faseverschil dat gevonden is tussen deze twee belastingcomponenten. De neerloop stuwdruk en daarmee de gemiddelde stijghoogteverlaging over de steen en stijghoogteverhoging in het filter heeft een beperkt invloedsbereik, namelijk ter grootte van de steen. De grootste snelheden van de neerloop treden naar alle waarschijnlijkheid alleen op op een hoger gelegen punt dan het maximale stijghoogteverschil. Hierdoor hoeven de afzonderlijke componenten niet volledig bij elkaar opgeteld te worden.

Concluderend kan gesteld worden dat het in principe mogelijk lijkt te zijn dat het stijghoogteverschil over de toplaag ter plaatse van een uitstekende steen bij een diep gelegen overgangsconstructie groter wordt dan volgens Steentoets. Het betreft echter een vrij bijzondere situatie, waardoor het aantal malen dat deze grote stijghoogteverschillen optreden tijdens een storm niet zo groot zullen zijn. Gezien het feit dat een steenzetting pas bezwijkt nadat er vele malen een groot stijghoogteverschil is opgetreden, lijkt het voorsnog niet waarschijnlijk dat de uitstekende steen belangrijk is voor de stabiliteit. Helaas is dit echter nog niet volledig uit te sluiten.

6 Referenties

Klein Breteler, M.; *Documentatie Steentoets 2008 en Steentoets 2010, Excel programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*. Deltares, rapport 1204727-009, februari 2012.

Klein Breteler, M. en Mourik, G.C.; *Invloed kwaliteit zetwerk op stabiliteit steenzetting; Trekproeven op slecht zetwerk*. Deltares, rapport 1206424-016, februari 2013.

Kuiper, C., Klein Breteler, M., Booster, L.N. en, Eysink, W. *Stabiliteit van gezette steenbekledingen op Havendammen. Afleiding van een verbeterde toetsmethode van de toplaag*. WL | Delft Hydraulics, rapport H4432, februari 2006.

Mourik, G.C. en Klein Breteler, M. *Stabiliteit van steenzettingen boven de stilwaterlijn en invloed van een berm*. Deltares, rapport 1202551-009 v.2.0, januari 2012.

A Snapshots van brekende golven

