

Memo

Aan

Christiaan Tenthof van Noorden (Waterschap Zuiderzeeland)

Datum

21 mei 2025

Ons kenmerk

11209115-002-HYE-0014

Aantal pagina's

1 van 10

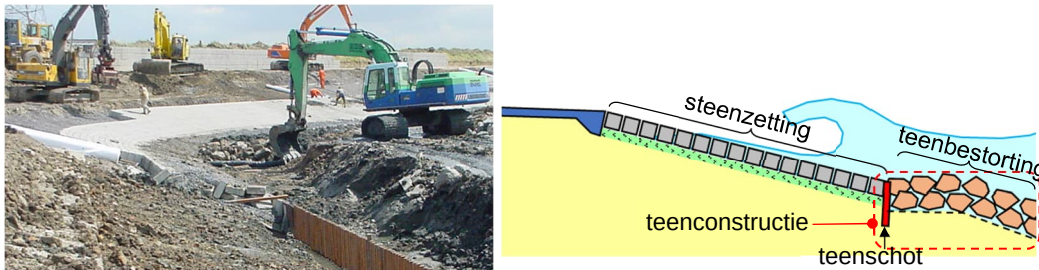
Onderwerp

Samenvatting onderzoek naar invloed teenconstructie op stabiliteit steenzetting op IJsselmeerdijk

Invloed teenconstructie op stabiliteit steenzetting Samenvatting van het onderzoek voor IJsselmeerdijk

1 Inleiding

Dijktafuds met een steenzetting worden aan de onderzijde afgewerkt met een teenconstructie. Deze teenconstructie bestaat in Nederland doorgaans uit houten palen met een schot met daarvoor wat breuksteen, zie Figuur 1.1. In sommige gevallen worden korte houten of betonnen damwandplanken toegepast. Het doel van de constructie is het steun geven aan de steenzetting, zodat deze niet afschuift, en om te zorgen dat er geen ondermijning plaatsvindt bij erosie voor de teen. In het huidige onderzoek gaat het om de ondersteunende functie van de teen, die daarmee invloed heeft op de stabiliteit van de steenzetting.

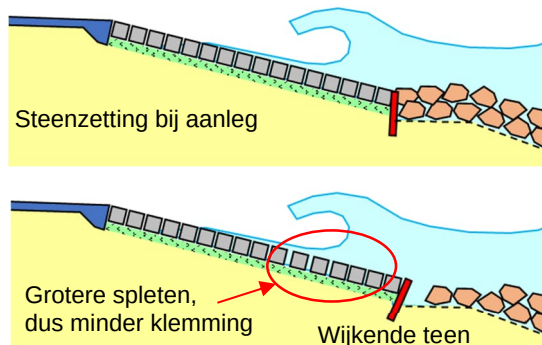


Figuur 1.1, Aanleg van houten teenconstructie in Zeeland (links) en definities (rechts)

Teenconstructies bij steenzettingen zijn in het verleden op basis van ervaring ontworpen en gebouwd. Hoewel ze in de praktijk meestal prima functioneren, is er uiteraard geen ervaring bij extreme omstandigheden (die minder dan eens per 1000 jaar treden). Er is behoefte aan meer inzicht in het effect van de stijfheid van de teen op de stabiliteit van de steenzetting. Het huidige onderzoek is erop gericht om ook dit deel van de dijk rationeel te kunnen ontwerpen.

De verwachting is dat wanneer de steenzetting wordt belast door golven, de normaalkracht in de steenzetting richting de teen snel oploopt, wat tot gevolg kan hebben dat de teen gaat vervormen. Dan zal de steun voor de steenzetting verminderen en kan er ruimte tussen de rijen zetstenen ontstaan, waardoor ook de stabiliteit van de steenzetting kan afnemen, zie Figuur 1.2.

Het doel van het onderzoek is om inzicht te krijgen in het effect van de stijfheid van de teenconstructie op de stabiliteit van de steenzetting. Als de teen grote invloed heeft op de stabiliteit van de steenzetting, dan zal deze zwaar moeten worden uitgevoerd, of gesteund moeten worden door zware breuksteen die ten alle tijden stabiel blijft. Het huidige project biedt het inzicht om dit aspect van het ontwerp van de IJsselmeerdijk goed af te wegen.



Figuur 1.2, Schematische weergave van de consequenties van een zwakke teenconstructie tijdens extreme condities

Redenerend vanuit het faalpad zijn er 4 vragen:

1. Hoeveel invloed heeft verplaatsing van het teenschot op de stabiliteit van de steenzetting? Voorziene mogelijke gevolgen zouden het verliezen van onderlinge klemming van de stenen en/of het kammen van zetstenen kunnen zijn, dat op zijn beurt de stabiliteit doet afnemen.
2. Welke eisen zouden moeten worden gesteld aan de verplaatsing van het teenschot?
3. Wat is de relatie tussen de geotechnische stabiliteit van de teenconstructie en het verplaatsen van het teenschot?
4. Met welke breuksteengrootte en teenbestortingsvorm kan de benodigde stabiliteit in de maatgevende omstandigheden worden gegarandeerd?

Vragen 1 en 2 betreffen (fundamentele) onderzoeksvragen. Om deze vragen te beantwoorden is een fysiek modelonderzoek bij Deltares uitgevoerd en zijn numerieke Abaqus proeven uitgevoerd door RHDHV. In dit onderzoek is gekeken naar de vraag hoeveel de stabiliteit van de steenzetting afneemt als functie van de verplaatsing van het teenschot, en naar de vraag hoeveel het teenschot dus mag verplaatsen. Vragen 3 en 4 betreffen ontwerp vragen. Om vraag 3 te beantwoorden zijn RHDHV Plaxis berekeningen uitgevoerd. In deze kan dan met numerieke berekeningen bepaald worden hoeveel het teenschot zal wijken bij een bepaalde normaalkracht op de teen. Dat is afhankelijk van de vormgeving van het teenschot, de invloed van de eventueel aanwezige breuksteen en de grond waarin de palen van het teenschot zijn aangebracht. Vraag 4 is behandeld in de reguliere ontwerpberekeningen door RHDHV.

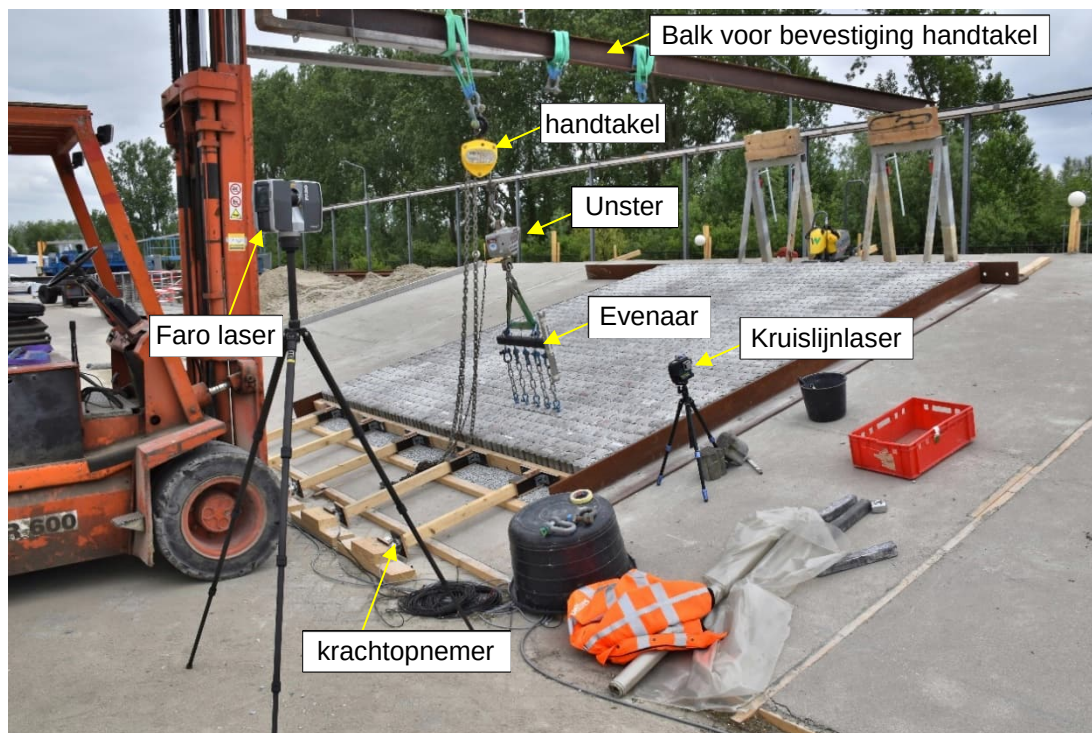
Het onderzoek is uitgevoerd door Deltares (experimenten op geschematiseerde opstelling) en Royal HaskoningDHV (numerieke berekeningen) in opdracht van het Waterschap Zuiderzeeland als onderdeel van de Planuitwerkingsfase van de versterking van de IJsselmeerdijk. Deze notitie beschrijft de conclusies uit de onderzoeken die voor de casus van de IJsselmeerdijk van toepassing zijn en is een samenvatting van de volgende rapporten:

- Klein Breteler, M. en S. Riedstra; invloed van teenconstructie op stabiliteit van steenzettingen; trekproeven voor de IJsselmeerdijk; Deltares rapport 11209115-002-HYE-0011, 29 juli 2024
- Peters, D.J.; Numeriek onderzoek naar invloed teenconstructie op stabiliteit van steenzetting; ten behoeve van ontwerpcriteria IJsselmeerdijk; Royal HaskoningDHV rapport BJ1884-RHD-01-BW-RP-Z-001 van 25 maart 2024
- Nota technische onderbouwing ontwerp traditionele dijk; hoofdstuk 4 (teenconstructie); Royal HaskoningDHV rapport BI8482-RHD-XX-ZZ-RP-Z-0004 van 15 maart 2024

2 Werkwijze in het onderzoek

2.1 Fysiek modelonderzoek

De invloed van de slappe teen is onderzocht door in een onderzoeksofstelling een steenzetting op schaal 1:2 te bouwen en vervolgens de teenbalk te verplaatsen. Het effect van golfaanval is om praktische redenen geschematiseerd met trilplaten (Deltagootonderzoek is onnodig omvangrijk in deze fase). Dit zorgt voor het verschuiven van de steenzetting naar de teen, net als golfklappen tijdens zware storm, resulterend in bredere spleten en verminderde klemming. In dit onderzoek is het relatieve effect van een wijkende teen bekeken door proevenseries onderling te vergelijken, waardoor een eventueel verschil met de werkelijkheid geen probleem hoeft te zijn.



Figuur 2.1, Modelopstelling tijdens trekproef in Groep A.1

Het effect op de stabiliteit is bepaald door de stijfheid van de steenzetting te meten met trekproeven op een steenzetting die gebouwd is tegen een muurtje op het terrein van de Deltagoot (naast de Deltagoot). De stijfheid is een belangrijke factor voor de stabiliteit van de steenzetting. Er zijn in totaal 180 trekproeven uitgevoerd op verschillende modelopstellingen, alle met Hydroblocks en een taludhelling van 1:4, zie Figuur 2.1.

Sommige trekproeven waren specifiek gericht op het controleren van de meetprocedure. Uit deze proeven is geconcludeerd dat de modelopstelling en procedure voor het uitvoeren van de trekproeven goed genoeg was om met de resultaten antwoord te geven op de gestelde vragen.

2.2 Numerieke berekeningen

Door RHDHV zijn numerieke berekeningen zijn uitgevoerd met het programma Abaqus. Het betreft een realistisch model wat in principe ook geschikt is om dynamische golfbelasting mee uit te rekenen. Voor dit onderzoek echter is gerekend met trekproeven. Er zijn twee modellen gemaakt en doorgerekend met diverse configuraties van de trekproeven.

1. Het eerste model betreft een talud met Hydroblocks, identiek aan de fysieke proeven.
2. Het tweede model is met Basalton.

De numerieke trekproeven zijn uitgevoerd met het doel het effect van de verplaatsing van de teenconstructie op de stabiliteit van de steenzetting vast te stellen. De volgende zaken zijn onderzocht:

1. Verschil in volgorde van belasten van de verschillende trekpunten
2. Verschil capaciteit tussen hoger en lagergelegen trekpunten
3. Verschil in normaalkracht voorafgaand aan start van de trekproef
4. Verschil in klemming in langsrichting
5. Verschil tussen Hydroblocks en Basalton
6. Effect van teen verplaatsing op de trekcapaciteit van Hydroblocks

Een verschil in volgorde van belasten is waargenomen. Het verschil in gemeten uittrekkraft in het tweede trekpunt wordt beïnvloed door de slip die ontstaat bij het verplaatsingsgestuurd trekken van het eerste trekpunt. Het optreden van slip is een random verschijnsel. Daardoor kan je geen conclusies trekken uit de verschillen in uittrekkraft voor de verschillende locaties van het tweede trekpunt. Dit probleem is opgelost door het eerste trekpunt telkens krachtsgestuurd te belasten waardoor kan er een betrouwbare vergelijking gemaakt kon worden tussen de gevonden trekkrachten op de hoger en lagergelegen locaties van het tweede trekpunten.

De conclusie is dat de gevonden trekkrachten goed corresponderen met de theorie die voorspelt dat er op lagergelegen punten een grotere normaalkracht heerst, er daar meer klemming is en een hogere uittrekkraften. Voor de gevallen met een hogere normaalkracht bij aanvang is er een grotere uittrekkraft gevonden.

De klemming in langsrichting blijkt voor de numerieke proeven een belangrijke factor voor een stabiel en realistisch berekeningsresultaat. Indien deze te gering wordt genomen liggen de zetstenen te los. Omdat ervoor gekozen is de voegvulling niet mee te modelleren, is het nodig dat de zetstenen niet los liggen, maar elkaar raken. Indien de klemming in langsrichting te hoog wordt gekozen beïnvloedt dit het resultaat, en ontstaat er een sterke rij-oriëntatie, zoals ook werd waargenomen bij de fysieke proeven. Het resultaat van de numerieke proeven is dus realistisch, maar voor sommige analyses ongewenst omdat de steenzetting dan in de proef niet vrij richting de teen kan zakken terwijl dit in werkelijkheid wel zou kunnen.

De kracht-vervormingskarakteristiek van de uittrekproeven op het talud met Basalton is minder stijf. Dat wordt verklaard door het geringere raakvlak van de zuilen. Tevens is er minder rij-oriëntatie en daarmee samenhangend een duidelijker respons van de teenreactiekracht.

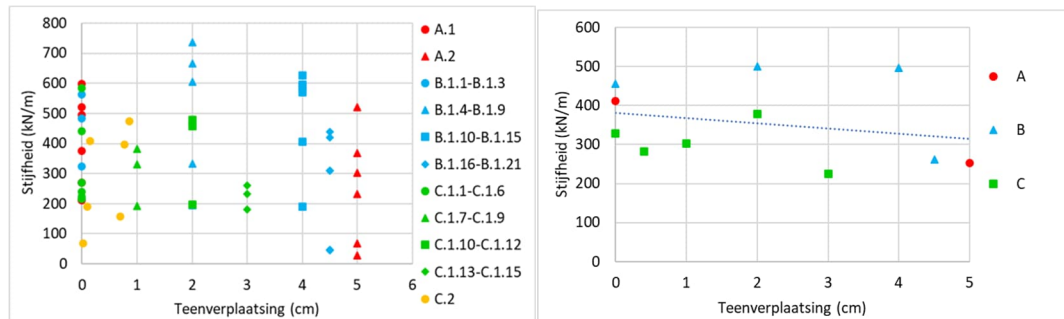
De teenverplaatsing heeft een duidelijke invloed op de trekcapaciteit. Het effect is in de uitgevoerde numerieke proeven sterker dan in de fysieke proeven. Omdat het lastig blijkt de numerieke proeven goed in te richten op de trekproeven, lijkt het aan te bevelen om modelberekeningen te maken waarbij golfbelasting wordt aangebracht op numerieke modellen van de steenzetting met en zonder teenvervorming.

3 Onderzoeksresultaten

De invloed van de wijkende teen op de stijfheid van de steenzetting is een belangrijke graadmeter voor de invloed van de teenconstructie op de stabiliteit van de steenzetting. De trekproevenseries geven de relatie tussen de benodigde trekkracht en de verplaatsing van de zetstenen (haaks op het talud) en daaruit volgt de stijfheid.

De resultaten van de experimenten laten helaas een vrij grote spreiding zien, zie Figuur 3.1 (linker figuur). Om toch enig zicht te krijgen op de trends zijn allereerst de gemiddelde waarden

per groep bepaald. Dit is te zien in Figuur 3.1 (rechter figuur). Als we alle meetpunten beschouwen, zien we een licht dalende trend met het toenemen van de verplaatsing van de teen (zie stippellijn).



Figuur 3.1, Gemeten gemiddelde stijfheid per trekproefseriegroep als functie van de verplaatsing van de teen (maten op schaal 1:2)

Er kan echter ook op een andere manier naar de meetpunten gekeken worden. In Figuur 3.1 (linker figuur) zien we bij 0 cm teenverplaatsing een groep meetpunten in de range van ongeveer 100 tot 600 kN/m. Een zeer vergelijkbare range van meetpunten is te zien voor de metingen met 4 à 5 cm teenverplaatsing, namelijk 50 tot 550 kN/m. Omdat deze puntenwolken voor het overgrote deel overlappen qua stijfheid, is er ook wat te zeggen voor de conclusie dat er een verwaarloosbare invloed is van de wijkende teen t/m ca. 4 à 5 cm teenverplaatsing (modelschaal).

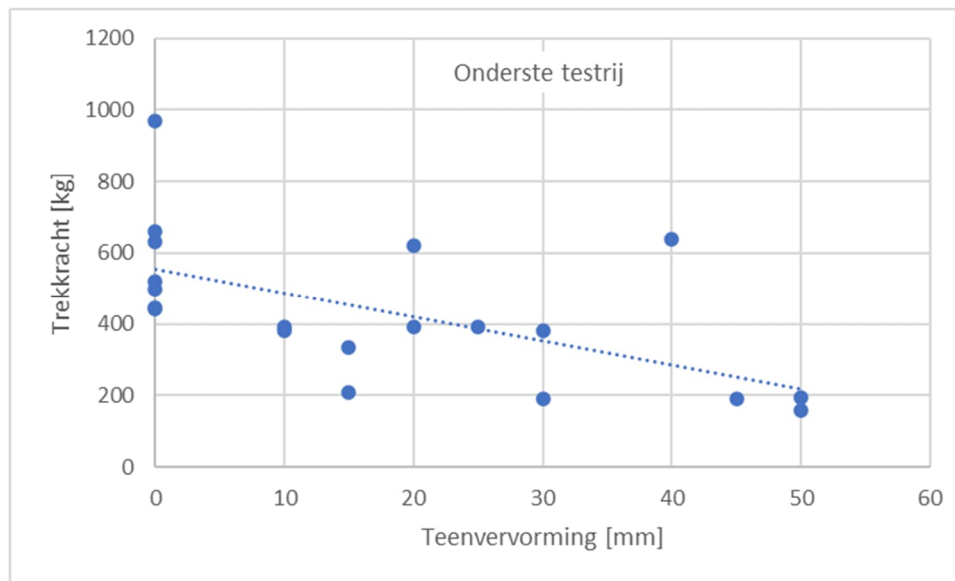
Beide zienswijzen zijn gecombineerd in een eindconclusie dat er enerzijds rekening gehouden moet worden met een lagere stijfheid naarmate de teenverplaatsing groter is (op basis van de trend in het hart van de puntenwolk), maar dat het niet nodig is om hier nog een veiligheidsmarge aan toe te voegen voor de toepassing hiervan in de praktijk (gezien de constatering dat de puntenwolken erg overlappen en de invloed van de wijkende teen mee zou kunnen vallen).

Geconcludeerd wordt dat er een gemiddeld licht dalende trend is van 17% verminderde stijfheid bij een teenverplaatsing van 5 cm op schaal 1:2. De spreiding is echter groot: het gemiddelde bij de meest realistische opstelling, namelijk programmadeel B, was -8% (zonder de laatste bijzondere trekproefserie; er was zelfs een lichte stijging) en die van A was 38%. Er kan dus in het ontwerp gewerkt worden met het 'worst case'-scenario van 38% vermindering van de stijfheid, maar er hoeft geen veiligheidsmarge op gezet te worden.

Voorafgaande aan dit onderzoek was het de vrees dat het effect van de stijfheid van de teenconstructie op de stabiliteit van de steenzetting groot is, maar uit de uitgevoerde proeven blijkt deze invloed vrij beperkt voor de IJsselmeerdijk. Dit levert een belangrijke winst voor het ontwerp van deze dijk.

Na afloop van het onderzoek is een heranalyse van de proefresultaat uitgevoerd door Royal HaskoningDHV. Hierbij is er niet gekeken naar de verplaatsing van de zetstenen waar aan getrokken is, maar naar de naastgelegen stenen. Daarmee is het effect van de eventuele verschuiving van de trekstenen ten opzichte van de omgeving weggenomen.

Bij analyse van subgroepen, en bij hantering van een definitie van de stijfheid met gebruikmaking van de verplaatsing van de zetsteen naast de getrokken zetstenen, blijkt dat er een geringere spreiding van de resultaten is en een sterkere dalende trend van de trekkracht bij toenemende teenvervorming.



Figuur 3.2, Meetresultaten van de trekproeven vlak boven de wijkende teen, waar het grootste effect van de wijkende teen zichtbaar was (schaal 1:2).

Aan het begin van het onderzoek zijn vragen geformuleerd waarop na uitvoering van het onderzoek het volgende antwoord kan worden geformuleerd.

1. Gaat een steenzetting een grote kracht op de teen uitoefenen als er plaatselijk een golfklap op het talud komt, of wordt dit (deels) afgedragen op de naastliggende taluddelen met een steenzetting?

Antwoord: Ja, de kracht op de teen neemt toe. De kracht op de teen wordt door golfbelasting geleidelijk groter. Dit gebeurt doordat de zetstenen verticale belasting ondervinden waardoor ze worden opgelicht en de wrijving wordt verbroken.

2. Als de teen gaat wijken en de steenzetting naar beneden gaat schuiven, wat is dan de relatie tussen de mate waarin de teen wijkt en de vermindering van de stijfheid (en dus de stabiliteit)?

Antwoord: De spreiding in de metingen was erg groot, maar desondanks is er vastgesteld dat bij een vervorming van de teen van 10 cm (prototypemaat; dit is afmeting in werkelijkheid) over tientallen meters er een gemiddelde vermindering van de stijfheid is van ongeveer 17% (zie Figuur 3.1). De grootste afname vond plaats in Programmadeel A, namelijk 38%. Dit geeft aan dat er een aanzienlijke spreiding is. In de numerieke proeven is vastgesteld dat er bij 4 cm vervorming van de teen er een afname van stijfheid is van 50%. Deze afwijking is dus veel groter dan bij de fysieke proeven. Bij de fysieke proeven is er veel aandacht besteed aan het aanbrengen van het inwasmateriaal in een staat zoals dat na enkele jaren op de dijk te verwachten is. Bij de numerieke proeven is dat minder.

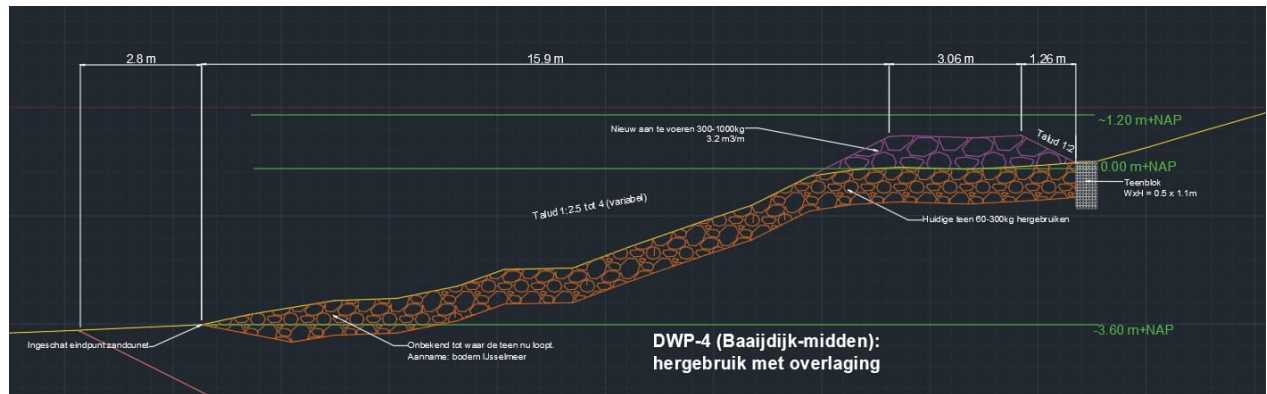
Voor de IJsselmeerdijk kan de verzwakking van de teen ontstaan door de directe golfaanval van de bestorting van de teen en niet door zakking van de zetstenen. Het wordt daarom realistisch geacht dat de steenzetting niet onmiddellijk na het wijken van de teen weer een optimale klemming heeft.

3. Welk criterium moet aangehouden worden voor het wijken van de teenconstructie?

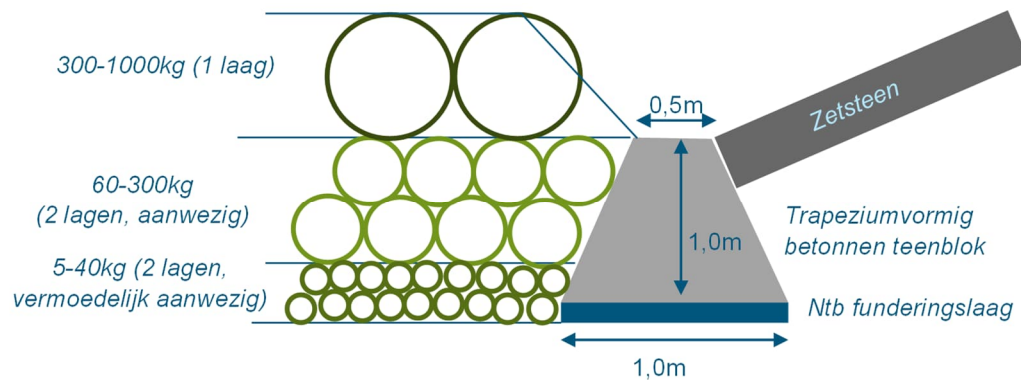
Antwoord: Er is een rekenvoorbeeld uitgewerkt waaruit blijkt dat (gegeven enkele plausibele, maar momenteel moeilijke aantoonbare aannames) als de stijfheid 38% kleiner is, de steenzetting bij een 13% lagere golfhoogte bezwijkt.

Deze afname van de stijfheid was de bovengrens van de fysieke experimenten bij 10 cm vervorming van de teen. Gezien de grote overlap van de puntenwolken kan dit

Figuur 4-1: Schets van Meerdijk-midden, overlagingvariant



Figuur 4-2: Schets van Baaijdijs-midden, overlappingsvariant



Figuur 4-3: Detail van het trapeziumvormig betonnen teenblok ingepast

4.2 Contracteisen vervorming Teenconstructie aan aannemer

De resultaten van dit onderzoek krijgen een plek in de laatste ontwerpfase van het project (OL3), waarbinnen ook de uitvraag richting een aannemer wordt geschreven. Er bestaat op het onderdeel teenconstructie nog ruimte voor ontwerpoptimalisatie of invulling door de aannemer. Het referentieontwerp en onderzoek is vertaald naar de onderstaande eisen aan de aannemer:

Eisen aan teenconstructie:

- De teenconstructie dient te verzorgen dat de steenbekleding onder normomstandigheden stabiel blijft (één stormgebeurtenis). Dat betekent dat als er een marge in de stabiliteit van de steenzetting van 13% aanwezig is ten opzichte van Steentoets, het teenschot onder extreme omstandigheden 10 cm mag vervormen (prototypemaat). Als slechts ten hoogste 2 cm vervorming optreedt, hoeft er geen verminderde stabiliteit van de steenzetting in rekening gebracht te worden en kan Steentoets dus normaal gebruikt worden voor het berekenen van de stabiliteit van de steenzetting. Tussen 2 en 10 cm vervorming mag er lineair geïnterpoleerd worden.
- De onderste opsluitrand van de steenzetting (teenschot) mag tijdens een normomstandigheden maximaal 0,10 m verplaatsen, horizontaal gemeten, dwars op de lengte-as van het teenschot. Een grotere vervorming van de teen zou leiden tot te grote onzekerheid in de integriteit van de steenzetting en is niet toegestaan
- De teenconstructie dient te verzorgen dat de onderste opsluitrand van de steenzetting gedurende de levensduur maximaal 0,20 meter verplaatst ten behoeve van de algehele geotechniek en esthetiek.

De volgende eisen worden gesteld aan de verificatiemethoden:

- Verificatie in Ontwerpfase: De vervorming van het teenschot dient te worden aangetoond in een eindige elementen model, zoals PLAXIS. Hierbij geldt het volgende:
 - o Omdat PLAXIS geen breuksteen kan modelleren, dient de breuksteen gemodelleerd te worden als een laag grond met een elasticiteitsmodulus van 5000 kPa, tenzij anders aangetoond.
 - o De horizontale belasting van de zetsteen op de ondergrond dient te worden berekend met de totale gewichtscomponent van de zetstenen evenwijdig aan het talud (zonder wrijving), rekenend vanaf de teen tot aan de normwaterstand, of zover de steenzetting reikt als dit lager is.
- Verificatie in Uitvoeringsfase: De breuksteen teen dient goed tegen de teenconstructie te worden aangelegd. Alleen dan kan de elasticiteitsmodulus in de praktijk worden gehaald. Er dienen de helft van de langs de teen liggende stenen per strekkende meter tegen de teenconstructie te liggen. Afhankelijk van de gradering en steengrootte is dan het aantal stenen per strekkende meter vast te stellen. Bij twee lagen met D_{n50} van 34 cm gaat het dan om drie stenen per strekkende meter. Met aanliggen wordt bedoeld dat de steen minder dan 2 cm van het teenschot verwijderd is.
- Verificatiemethode van stabiliteit van steenzettingen: Steentoets.

De resultaten van dit onderzoek geven een belangrijke ontwerpvrijheid aan de aannemer:

- Als gekozen wordt voor zware breuksteen op de teen, die niet wegspoelt tijdens de ontwerpcondities, dan mag ervan uitgegaan worden dat de teen slechts zo stabiel hoeft te zijn als nodig tijdens de aanleg van de steenzetting.
- Als gekozen wordt voor een lichtere breuksteen op de teen, die deels wegspoelt tijdens de ontwerpcondities, dan moeten er eisen aan de teenconstructie worden gesteld. Naarmate er meer oversterkte in de steenzetting zit, mag de teen onder extreme condities meer gaan wijken en kan dus een minder stijf schot zijn. Als er daarentegen weinig sterktemarge in de steenzetting zit, moet er een voldoende stijve teen worden gekozen. In dit laatste geval mag de teen, na het wegspoelen van de breuksteen, namelijk veel minder wijken dan in het eerste geval.

5 Conclusies en aanbevelingen

Gezien de verwachting dat een teenconstructie onderaan het talud van een dijk een belangrijk invloed zou kunnen hebben op de stabiliteit van de steenzetting tijdens zware golfaanval, is dit onderzocht door middel van fysieke experimenten en numerieke berekeningen.

Uit dit onderzoek is gebleken dat als de teen enkele centimeters wijkt (door welke oorzaak dan ook) de stabiliteit van de steenzetting lager is dan wanneer de teen volkomen star is. Dit is vastgesteld door de invloed op de stijfheid van de steenzetting te kwantificeren. De invloed op de stijfheid is vervolgens vertaald naar een invloed op de bezwijkgolffhoogte van de steenzetting op basis van redelijke aannames, die echter nog wel een verificatie verlangen.

Het onderzoek resulteert in de volgende conclusies:

- Als de teenconstructie 10 cm wijkt, moet er rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat de steenzetting bezwijkt bij een 13% kleinere golffhoogte. Dit is een veilige conclusie ten opzichte van de meetresultaten. Daarvoor is gekozen omdat er nog wat weinig informatie is om een goede schatting van de verwachtingswaarde en spreiding te kunnen geven. Een extra veiligheidsmarge is niet nodig, omdat er ook aanwijzingen zijn dat de invloed op de stabiliteit een stuk minder is.
- Als de teen minder wijkt, zal de invloed op de bezwijkgolffhoogte evenredig minder zijn, waarbij aangenomen wordt dat bij 2 cm vervorming de stabiliteit van de steenzetting

gelijk is aan die zonder vervorming en dus gewoon berekend kan worden met Steentoets.

- Een grotere vervorming van de teen dan 10 cm zou leiden tot te grote onzekerheid in de integriteit van de steenzetting en wordt daarom afgeraden.

Aanbevolen wordt om ook andere geometrieën en toplaagtypes te onderzoeken, voordat de resultaten landelijk toegepast kunnen worden. Ook wordt aanbevolen om de relatie tussen de stijfheid en de bezwijkgolffhoogte te verifiëren.