

## Memo

**Aan**  
TKI

**Datum**  
19 maart 2022  
**Contactpersoon**  
Mark Klein Breteler

**Ons kenmerk**  
11206622-000-HYE-0011  
**Doorkiesnummer**  
+31(0)88 335 8244

**Aantal pagina's**  
1 van 9  
**E-mail**  
Mark.KleinBreteler @deltares.nl

**Onderwerp**  
Voortgang TKI-project DEL125 "Ontwikkeling grootelement zetsteen als innovatieve dijkbekleding"

## Voortgang TKI-project DEL-125 Ontwikkeling grootelement zetsteen als innovatieve dijkbekleding

### 1 Inleiding

Dijkbekledingen zijn essentiële onderdelen van de Nederlandse waterkeringen. De primaire functie van deze bekleding is het voorkomen van erosie van de dijk waardoor het overstromingsrisico wordt gereduceerd. In het geval van een dijkbekleding welke gebukt gaat onder relatief zware golfaanval, zoals bij zee- en meerdijken, worden doorgaans betonnen zuilen (zetstenen) met een hoogte van 20 a 60 cm gebruikt. Dergelijke zuilen vergen echter een grote investering welke aanzienlijk kan worden gereduceerd indien de hoogte van de zuilen kan worden beperkt door een uitgekiend ontwerp.

Doordat de productiemethoden van betonnen zetstenen zijn doorontwikkeld is het tegenwoordig mogelijk om zetstenen met gecompliceerdere vormen te produceren. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om ook bredere of langere elementen te ontwikkelen waarbij holtes of uitsparingen in de zetsteen zijn aangebracht. Het is aannemelijk dat dergelijke elementen een hogere stabiliteit hebben dan soortgelijke zetstenen met beperktere afmetingen. Hierdoor kan de steenzetting dunner uitgevoerd worden wat zal leiden tot goedkopere oplossingsrichtingen, minder gebruik van grondstoffen en lagere CO2 belasting bij dijkversterkingsprojecten. Tevens geeft dit de mogelijkheid om de steen zodanig te ontwikkelen dat deze een verhoogde ecologische meerwaarde biedt ten opzichte van de bestaande steenzettingen.

De fysica met betrekking tot de stabiliteit van een dijkbekleding onder golfklapbelasting is zeer gecompliceerd. Hoewel er rekenmethodieken beschikbaar zijn om de stabiliteit van zetstenen te bepalen is het niet mogelijk om de stabiliteit van een nieuw type zetsteen met een specifieke vorm onomstotelijk aan te tonen met deze rekenmethoden. Om die reden zullen waterkering-beheerders dergelijke innovatieve dijkbekledingen dan ook niet toepassen (innovatieblokkade).

De werking van een innovatieve dijkbekleding kan echter aangetoond worden door deze op grote schaal te testen in een laboratorium; in een grootschalige golfgoet kunnen golven zeer natuurgetrouw onder gecontroleerde condities worden gegenereerd.

In het huidige project is ervoor gekozen om een nieuw type zetsteen te ontwikkelen en deze te testen in de Deltagoot van Deltares. Vervolgens worden detailproeven uitgevoerd om nadere informatie te verkrijgen over de werking van het inwasmateriaal, dat essentieel is voor de hoge stabiliteit.

Dit TKI-project is een samenwerking van:

- Altena Infra-materialen
- Waterschap Zuiderzeeland
- Haringman betonwaren
- Aannemersbedrijf van Heteren
- Deltares

## 2 Ontwikkeling van de nieuwe zetsteen

Bij de ontwikkeling van de nieuwe zetsteen is eerst bekeken of zo'n zetsteen heel groot, of juist heel klein zou moeten zijn. Daarbij is eerst de primaire belasting beschouwd, die tijdens golfaanval ervoor zorgt dat er op een bepaald moment instabiliteit ontstaat. Deze golfbelasting veroorzaakt een verschildruk die zetstenen uit het dijktaalud wil drukken. Deze verschildruk bij golfaanval leidt tot een smalle strook op het dijktaalud met een verschildruk. Gezien deze constatering is het beter voor de stabiliteit van zetstenen als deze groot zijn (in de richting van teen naar kruin). Immers, dan zal de strook met grote verschildruk slechts aangrijpen op een deel van de zetsteen.

Zo is er gekozen voor relatief grote zetstenen.

Er is echter ook een limiet tot waar de zetstenen groter gekozen kunnen worden. Hier spelen enerzijds de praktische aspecten van het plaatsen van de zetstenen op het dijktaalud, maar anderzijds ook het feit dat een dijktaalud nooit helemaal rechts is. Als de zetstenen te groot zijn, dan is het minder makkelijk om rondingen in het dijktaalud te volgen, en zouden er problemen kunnen ontstaan bij het aansluiten op andere taluddelen, zoals een berm.

In het project is in deze fase van de ontwikkeling gezocht naar het antwoord op de volgende vijf vragen:

1. Wat is de optimale vorm voor de stabiliteitsfactor?
2. Wat is de optimale vorm voor de productie?
3. Wat is de optimale vorm voor het zetten?
4. Wat is de optimale vorm voor ecologie?
5. Wat is de optimale vorm voor beheer?

In overleg met het waterschap Zuiderzeeland kwam ook een esthetische wens naar voren: het was wenselijk als de zetstenen enigszins lijken op de klassieke basalt bekledingen (Figuur 2.1), maar het mag wel gestoken zijn in een modern jasje.



Figuur 2.1, Basalt

Ten aanzien van de optimale vorm voor een zo hoog mogelijke stabiliteitsfactor is het volgende gekozen:

- Holle ruimte onderin zetsteen ligt tussen 10 en 11%.
- Ter voorkoming van uitspoeling van de filterlaag zijn de openingen in de zetsteen maximaal 25 mm breed.
- Splitkelken – gaten die van boven open zijn en van onder bijna gesloten – kwamen als positief uit de RONA®-ton test, dus bij nieuwe zetsteen ook toepassen.
- Zo mogelijk de maat van de zetsteen haaks op de dijk groter dan in de lengte van de dijk. De golfklap en de waterkracht komt maar in een heel smal gebied op de glooiing en zo wordt de kracht beter verdeeld.

Ten aanzien van de optimalisatie van de productie geldt:

- De optimale vorm voor juiste vulling van de steenpers is een rechthoekig pakket. Zo zijn er geen onbenutte ruimten op een productieplank.
- Maximale buitenmaat voor een stalen mal in de steenpers is ongeveer 140 x 120 cm.
- In de zandkasteel-gedachte is het niet handig om horizontale holten in de zetsteen op te nemen. Deze holten remmen de productie enorm.

Voor de optimale vorm ten aanzien van het zetten van de zetstenen op een dijktalud moet rekening gehouden worden met het volgende:

- De optimale vorm voor het zetten is vierkant, zo groot mogelijk, zonder gebruik van pallets en te leggen met een knijper/sorteergrijper. Uit een pakket mogen bij oppakken geen kleinere onderdelen vallen.
- Bij het pasmaken van grotere zetstenen in het werk is het niet toegestaan dat deze grote stenen doorgezaagd worden. Deze zaagstukken zijn namelijk niet getest. Kan een nieuw ontwerp eenvoudig aansluiten op een reeds geteste zetsteen om zo trappen en lichtbakens in de glooiing op te nemen.
- Ter voorkoming van schommelen/wippen is het verstandig een zetsteen niet groter te maken dan 70 x 70 cm, voor het moment dat de dijk in helling verandert of de filterlaag wat nazakt.
- Er moeten onder en boven rechte kanten aan een pakket zitten om een bocht in de dijk door te komen.

Ten aanzien van de ecologie geldt:

- Bij het ecologievraagstuk botste ecologie een beetje met beheer. Voor het inspecteren van een glooiing moeten de zetstenen zichtbaar zijn, maar in het kader van ecologie is een goede begroeiing gewenst.
- Tussen de zetstenen moeten kleine diertjes kunnen leven.
- In het oppervlak van de zetsteen zijn hele kleine holtes gewenst voor het iets langer vasthouden van water.

Voor onderhoud en beheer zijn de volgende aspecten van belang:

- Voor het constateren van gewelfvorming in het zand-/kleipakket onder de zetstenen moeten de zetstenen uit zichzelf kunnen zakken en niet gaan "hangen", en mag de afmeting van een individuele steen niet groter zijn dan circa 70 x 70 cm.
- Des te minder vaak de glooiing opnieuw afgestrooid moet worden met inwasmateriaal des te beter het is.
- De glooiing moet goed berijdbaar zijn.

Ten aanzien van de esthetica-eisen moet er rekening gehouden worden met het volgende:

- De rechte lijnen van een pakket moeten zo min mogelijk zichtbaar zijn.
- Geen kaal grijs repeterend oppervlak
- Het oppervlak moet een natuurlijke speelse uitstraling hebben die overeenkomt met oude natuurstenen basaltzuilen.

Sommige rechte lijnen in de steenzetting zijn moeilijk te voorkomen, gezien de eisen ten aanzien van het gemakkelijk kunnen plaatsen van de zetstenen en de toepassing op gebogen dijken. Het beeld dat daarbij ontstaat is te zien in Figuur 2.2. Maar het publiek dat een dijk bekijkt, ziet een dijk altijd zoals in Figuur 2.3. Hierin vallen de rechte lijnen al nauwelijks meer op.

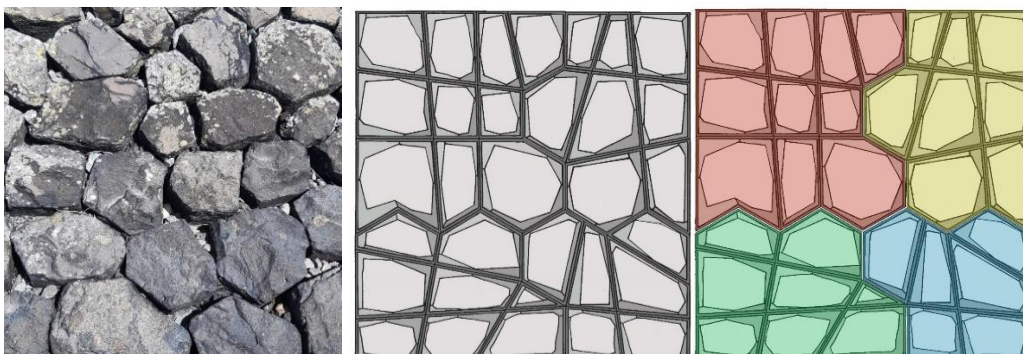


Figuur 2.2, Rechte lijnen in de dijkbekleding vanwege het werken met sets van gelijke grootte



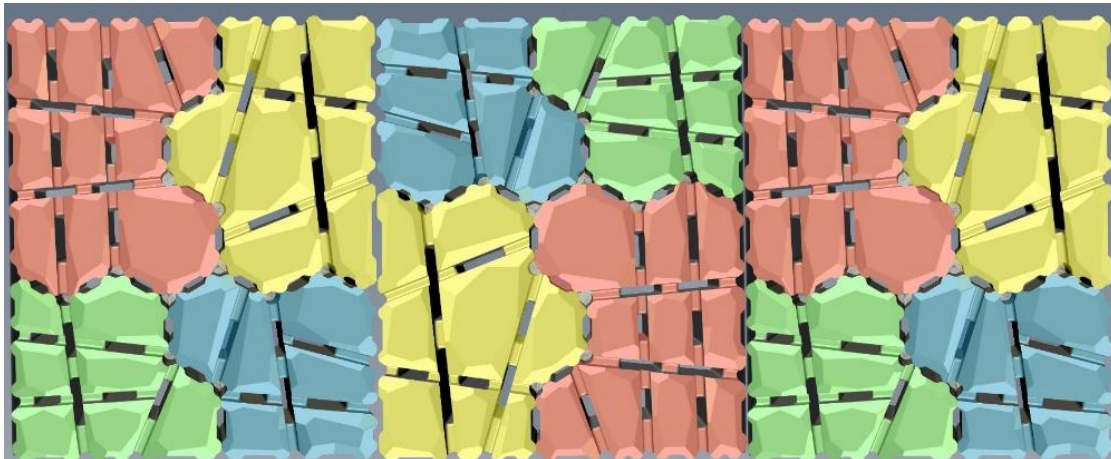
Figuur 2.3, Dezelfde dijk als in Figuur 2.2, maar dan zoals het publiek de dijkbekleding ziet.

De stap voor stap ontwikkeling van de vorm van de zetstenen, startend vanaf de klassieke basalt, is te zien in Figuur 2.4. Eerst is het grillige beeld van basalt omgezet naar een repeterend patroon van ongelijke betonnen zetstenen. Daarna zijn een aantal zetstenen samengevoegd (zetstenen met gelijke kleur in deze figuur), zodat er grote elementen ontstaan.



Figuur 2.4, Stap voor stap ontwikkeling vanaf basalt naar betonnen zetstenen met grote elementen



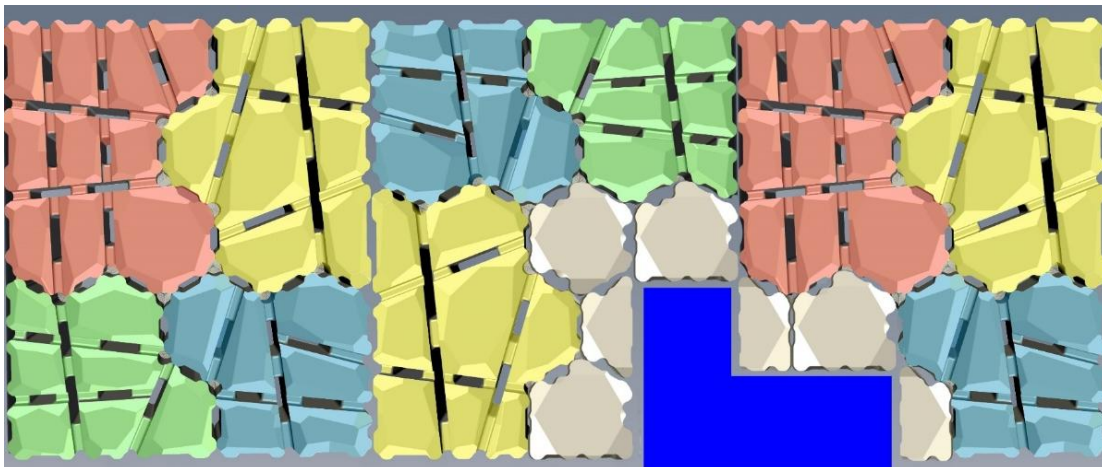


*Figuur 2.5, Uiteindelijke resultaat van het ontwerpproces.*

Het uiteindelijke resultaat is te zien in Figuur 2.5.

De zetstenen hebben een zodanige vorm dat ze te combineren zijn met de reeds op de markt aanwezige RONA<sup>®</sup>ton. Dat biedt de mogelijkheid om gemakkelijk aan te sluiten op objecten in de steenzetting, zoals de zien is in Figuur 2.6.

De naam van de nieuwe zetsteen is: RONA<sup>®</sup>ton XL.



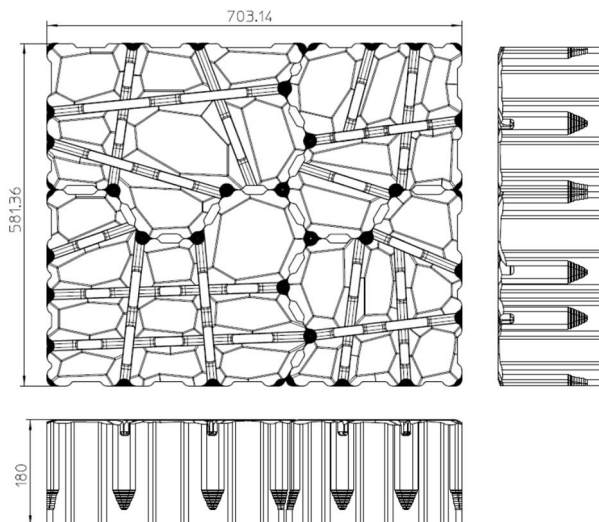
*Figuur 2.6, Aansluiting op objecten in de steenzetting met RONA<sup>®</sup>ton*

### 3 Deltagootproeven

Na het rationele proces van de ontwikkeling van het nieuwe type zetsteen is de stabiliteit van deze steenzetting bepaald. Om de stabiliteit van RONA<sup>®</sup>ton XL bij golfaanval te bepalen, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares volgens NEN-7024. De geometrische schaal van dit onderzoek was 1:1,67. De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van 18 cm, wat overeenkomt met een steenzetting van 30 cm in werkelijkheid. Onder de RONA<sup>®</sup>ton XL was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder een geotextiel.

Daarvoor was het nodig om de zetstenen op schaal 1:1,67 te produceren. Deze productie moet op dezelfde wijze als straks op grote schaal gaat worden uitgevoerd, zodat de betonkwaliteit hetzelfde is.

Om dit mogelijk te maken is eerst een stalen mal van de zetstenen gemaakt, zie Figuur 3.1.

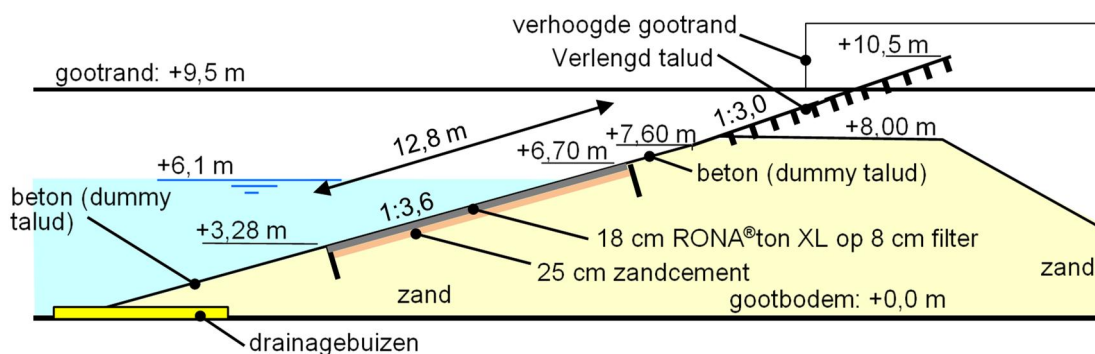


Figuur 3.1, Tekening van de stalen mal voor het produceren van de zetstenen

De steenzetting is beproefd met drie proevenseries:

- **Serie 1 en 2:** eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (ruim 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven) en de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef verhoogd totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- **Serie 3:** de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat schade optrad.

Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de stabiliteitsfactor van de steenzetting ( $f_{stab}$ ). Deze stabiliteitsfactor is een soortspecifieke factor die aangeeft hoe stabiel een steenzetting is in golfaanval, ten opzichte van een berekening met het rekenmodel Steentoets (met  $f_{stab} = 1$ ). Hoe beter de steenzetting presteert ten opzichte van de berekening met Steentoets, hoe hoger de stabiliteitsfactor.

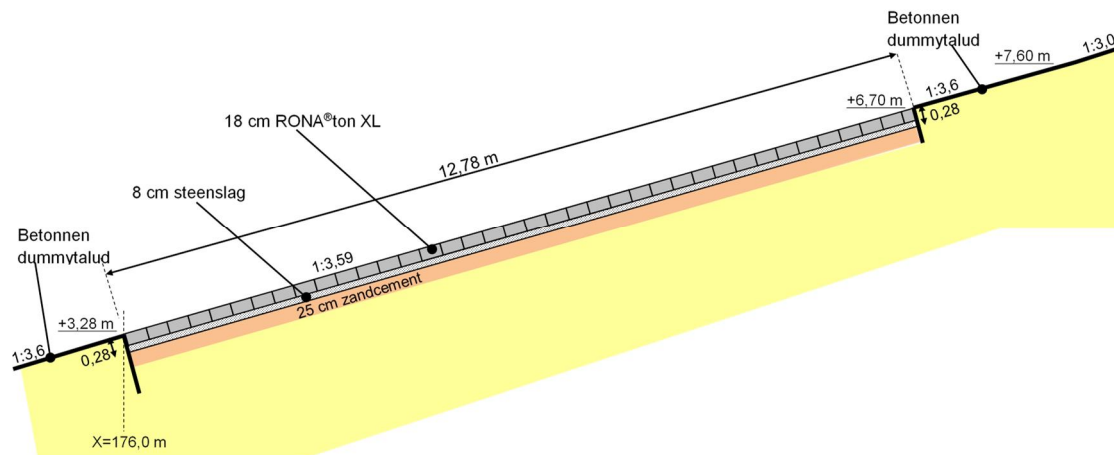


Figuur 3.2 Langsdoorsnede van de modelopstelling

De belangrijkste eigenschappen van de dijk en de bekleding waren (maten op schaal, zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3):

- taludhelling: 1:3,59
- gemiddelde toplaagdikte:  $D = 0,180$  m
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen:  $\rho_z = \text{ca } 2318 \text{ kg/m}^3$
- relatief open oppervlak: 10,5%
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,080 m

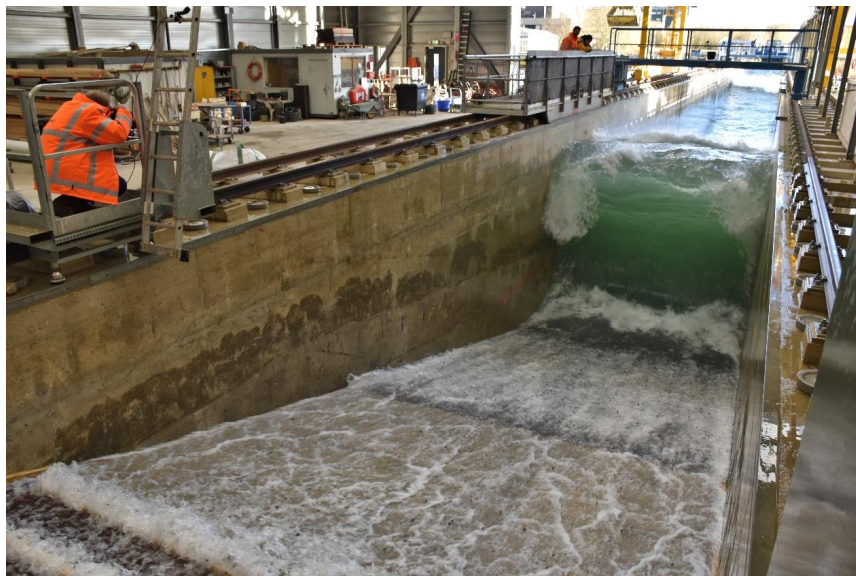
- korrelgrootte van het filter: 11-26 mm,  $D_{i15} = 11,2$  mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 12-21 mm,  $D_{i15} = 11,6$  mm



Figuur 3.3 Langsdoorsnede van modelsectie

Na afloop van de eerste twee proevenseries met korte duur was er nog geen schade ontstaan. Ook de vervorming was verwaarloosbaar en de mate van uitspoeling van het inwasmateriaal was zeer beperkt.

Tijdens de langeduurproef is tijdens proef RXL-12 na totaal ongeveer 11 uur de vervorming van de steenzetting zo groot geworden dat er schade van de categorie c is opgetreden. Er was sprake van een S-profiel met een amplitude gelijk aan 30% van de toplaagdikte. De onderlinge verplaatsing van naast elkaar gelegen zetstenen was toen nog hooguit orde 1 cm, waaruit blijkt dat de klemming van de steenzetting toen nog zeer goed werkte.



Figuur 3.4, Golfbelasting op de steenzetting in de Deltagoot

Vervolgens is er doorgegolfd en is na totaal 15,2 uur golven met significante golfhoogte van  $H_{m0} = 2,02$  m een zetsteen uit de bekleding gespoeld.

Op basis van deze proefresultaten en de daarvoor geldende procedure is de stabiliteitsfactor voor RONA<sup>®</sup>ton XL bepaald:  $f_{stab} = 1,44$ . Deze factor is beduidend hoger dan de thans op de markt beschikbare zetstenen en wordt zo opgenomen in Steentoets.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met RONA<sup>®</sup>ton XL van 30 cm hoog (op schaal 1:1,67, dus 18 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van



zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

Over deze proeven is een gedetailleerde rapportage gemaakt:  
Klein Breteler, M.  
Stabiliteit van RONA<sup>®</sup>ton XL in golfaanval, Modelonderzoek in Deltagoot  
Deltares, rapport 11206622-000-HYE-0006, 14 februari 2022

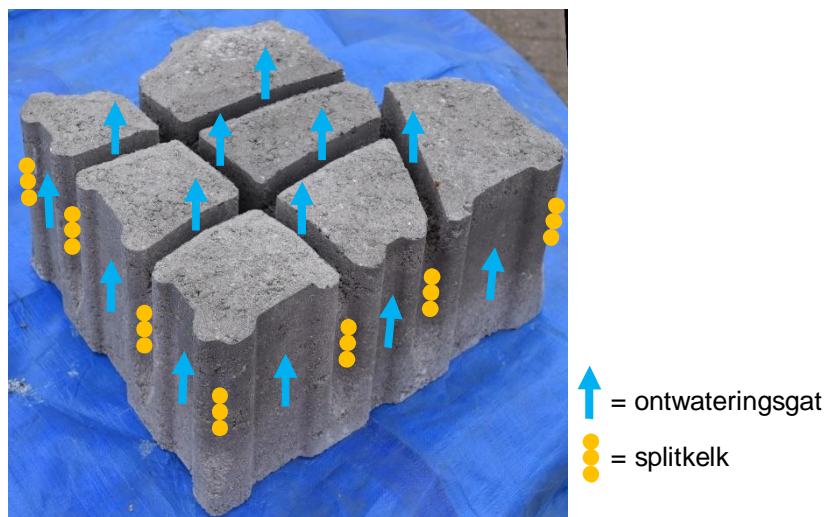
## 4 Workshop en webinar

Om de buitenwereld beter te kunnen betrekken bij de ontwikkeling van dit nieuwe type steenzetting, is op 16 december een workshop bij Deltares gehouden waarin vele mensen die betrokken zijn bij dijkbekledingen aanwezig waren. Vanwege de corona-regels zijn de bezoekers in verschillende groepen ingedeeld. Deze workshop is bezocht door 35 mensen van diverse waterschappen, ingenieursbureaus en aannemers.

Vervolgens is er op 17 december een webinar georganiseerd, die ook goed bezocht werd.

## 5 Inwasmateriaal

Het inwasmateriaal in de voegen van een steenzetting is zeer belangrijk voor de stabiliteit bij golfaanval. Dit inwasmateriaal zorgt voor een goede interactie tussen de afzonderlijke zetstenen, waardoor ze gaan samenwerken en de steenzetting als een vormvast geheel gaat functioneren. Bij het ontwerp van RONA<sup>®</sup>ton XL hebben sommige openingen in de steenzetting een speciale vorm gekregen. Dit is om enerzijds te zorgen voor een goede werking van het inwasmateriaal en anderzijds te zorgen dat het inwasmateriaal niet zo makkelijk uitspoelt tijdens golfaanval. Deze openingen zijn de splitkelken, terwijl de gewone openingen uitwateringsgaten zijn, zie Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Splitkelken en ontwateringsgaten

In 2022 is een plan om onderzoek naar de effectiviteit van de steenslag in de splitkelken en in de uitwateringsgaten nader te onderzoeken. Er is hierbij gekozen voor het maken van een klein oppervlak aan ingeklemde steenzetting. Vervolgens kunnen hier trekproeven op worden uitgevoerd, waaruit het volgende is af te leiden:

- de stijfheid van de steenzetting (relatie tussen trekkracht en vervorming)

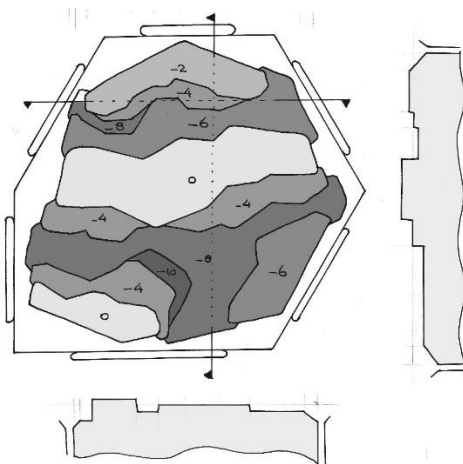


- de kracht die nodig is om de middelste steen uit de steenzetting te trekken

Vooraf het eerste lijkt een bepalend kenmerk te zijn voor de sterkte van een steenzetting. Tijdens zware golfaanval zien we namelijk dat de steenzetting geleidelijk een bolling begint te vertonen. Zodra deze bolling te groot wordt, schiet er een zetsteen uit de bekleding. Als er sprake is van een grote stijfheid, is het de verwachting dat deze bolling pas bij een grotere golfhoogte ontstaat.

## 6 Ecologie

Als laatste stap in de ontwikkeling van de zetstenen wordt nader aandacht geschonken aan de mogelijkheden om de natuur te helpen bij de begroeiing van zetstenen. Daarvoor zal binnenkort bekeken worden in hoeverre het betonoppervlak zodanig kan worden aangepast dat organismen zich zo goed mogelijk kunnen vestigen. Een ruw oppervlak is daarvoor gunstiger dan een glad betonoppervlak, zie als voorbeeld Figuur 6.1.



Figuur 6.1, Mogelijkheid van verruwing van het betonoppervlak