

Aan

[REDACTED]

Van

[REDACTED]

Kopie

Status

Ter informatie

Concept

Definitief (gereviewd door [REDACTED])

10.2.e

Datum 1 september 2021

Kenmerk

DT0014327-[REDACTED]-0-BBSP-M-002-1

Pagina

1 | 13

MARKER WADDEN

Opgetreden schade aan steenbestoring “Harde Rand” – onderzoek naar oorzaken

1 INTRODUCTIE

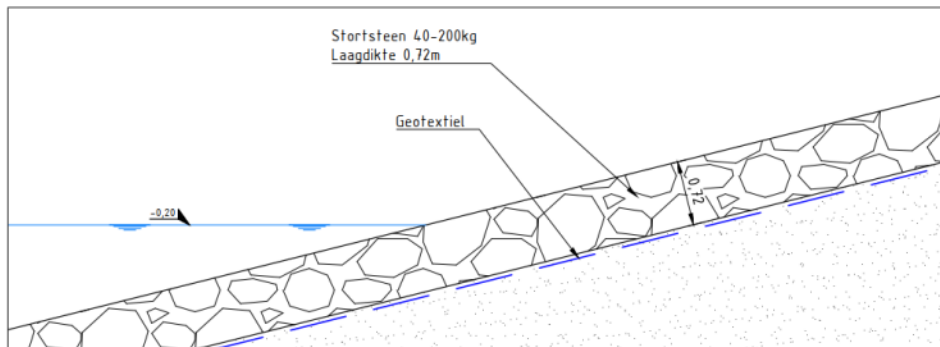
Boskalis is betrokken bij het ontwerp, aanleg, beheer en onderhoud van de Marker Wadden. Deze eilanden worden deels beschermd door een “Harde Rand” van breuksteen op de noordwestelijke oever. Sinds de aanleg van deze Harde Rand is schade geconstateerd aan de stortsteenbekleding en het onderliggende geotextiel.

Hydronamic, het in-house ingenieursbureau van Boskalis, is gevraagd de mogelijke oorzaak (of oorzaken) van de opgetreden schade te onderzoeken. Dit onderzoek is uitgevoerd door Boskalis, met inbreng van Witteveen + Bos, Geopex en Opdrachtgever (Rijkswaterstaat). In deze memo zijn de bevindingen van Hydronamic opgenomen.

Het plan van aanpak voor deze analyse is beschreven in een eerdere memo (DT0014327-JVDB-0-BBSP-M-001). Hierin worden enkele hypothesen ten aanzien van de oorzaken gegeven en worden verdere (laboratorium) onderzoeken en data analyses voorgesteld. Deze onderzoeken en analyses zijn inmiddels afgerond. De resultaten hiervan worden in deze memo gebruikt om de gegeven hypothesen één voor één na te lopen. Tot slot wordt de meest waarschijnlijke oorzaak (of oorzaken) benoemd en verder uitgewerkt.

De kwantitatieve onderzoeksresultaten en overige details van de gedane onderzoeken dienen als achtergrondinformatie en worden omwille van de leesbaarheid niet allemaal benoemd in deze memo. Hiervoor wordt verwezen naar een separate PowerPoint presentatie d.d. 1 september.

2 ONTWERP



Figuur 1: Ontwerp steenbestorting (uit: MW-UO-WP-OW02-1)

Het ontwerp is gebaseerd op de in het contract (ref [1]) opgelegde eisen en de op dat moment vigerende normen en richtlijnen en als zodanig geverifieerd.

Het ontwerp van de Harde Rand ter plaatse van de opgetreden schade kan worden samengevat als:

- Een zandlichaam op een taludhelling van 1:4, beschermd door:
 - Een geotextiel (composit: primair weefsel PP40 met opgestikt vlies (170 g/m²) als bescherming tijdens de uitvoering), met daarop:
 - Een steenbestorting 40-200 kg, dik 0.72 m, rechtstreeks aangebracht op het geotextiel zonder wiepenrooster of tussenliggende "vlijlaag".

De ontwerp kruinhoogte is +2.0 m NAP¹. Het zuidelijke deel langs het Compartiment Dun Slib is in de eerste paar jaar na aanleg sterk gezet en in 2018 opnieuw opgehoogd naar +2.5 m NAP (inclusief zettingscompensatie). Het referentiepeil van het Markermeer varieert tussen -0.2 m NAP (zomerpeil) en -0.4 m NAP (winterpeil). Het ontwerp peil van de teen van de bestorting is -2.0 m NAP.

3 OMSCHRIJVING VAN DE SCHADE

Er zijn drie aparte gebieden met schade waargenomen, zie figuur aan het eind van deze memo:

- "Locatie A", dicht tegen de zuidelijke beëindiging van de Harde Rand (rond KP 1600). Hier is de schade waarneembaar hoog op het talud, buiten de golfzone, rond de +1.0 / +1.5 m NAP. De steenbestorting is voor een deel afgeschoven en het onderliggende zandlichaam staat erg steil, voor een deel als 'verticale klif' over een beperkte hoogte. Op sommige plaatsen is het doek zichtbaar en gescheurd, inclusief het onderliggende weefsel. Het gat is orde 10-15 m breed, en op het diepste punt ongeveer 0.5 m diep. De schade op locatie A bevindt zich ter hoogte van de overgang tussen de originele constructie en de ophoging van de kruin die in 2018 heeft plaatsgevonden. Bij de ophoging is een ander geotextiel geplaatst dan ten tijde van de originele constructie. Dit is ook duidelijk waarneembaar in het veld (kleurverschil). Opvallend is dat alleen het originele geotextiel gescheurd is; het doek dat is gebruikt voor de ophoging is nog intact (dat wil

¹ Ten tijde van het originele ontwerp in 2016 was de kruinhoogte langs het zuidelijke deel (Compartiment Dun Slib) +2.60 m NAP, dit is later per VTW gewijzigd naar +2.0 m NAP.

zeggen, het vertoont wel schade aan het opgestikte 'opofferingsdoek' (vlies), zoals verwacht mag worden, maar het onderliggende 'primaire' doek (weefsel) is nog intact en functioneel. Dit is conform de ontwerp filosofie van een composiet doek)

- "Locatie B", verder naar het noorden in de buurt van de compartimenteringsdam langs het Compartiment Dun Slib (rond KP 1300). Hier is de schade lager in het profiel, net boven de waterlijn, rond de +0.5 / +1.0 m NAP. Er is een duidelijke verzakking in het profiel waarneembaar die in eerste instantie iets wegheeft van een "S-profiel" zoals verwacht kan worden bij stormschade, alleen veel dieper. Op sommige plaatsen is het doek zichtbaar en gescheurd, inclusief het onderliggende weefsel. Gezien de locatie op het talud gaat het hier ook om het 'originele' geotextiel. Het gat is orde 30 m breed en 0.8 m diep op het diepste punt.
- "Locatie D", nog verder ten noorden, op de Harde Rand langs compartiment A1 (rond KP 579). Deze locatie is niet opgehoogd in 2018. Deze schade toegevoegd tijdens de meest recente site visit (juni 2021) en was nog niet benoemd in het Plan van Aanpak. Deze lijkt later ontstaan te zijn dan die op locaties A en B (zie tijdlijn hieronder), is kleiner van omvang en er is hier niet direct gescheurd geotextiel waargenomen. De mate van vervorming van het breuksteen profiel is echter wel groter dan op basis van stormschade alleen zou worden verwacht (zie ook paragraaf 5.8). Het gat is orde 5 m breed en 0.4 m diep.

Het is mogelijk dat er hier -- niet waarneembare -- beschadigingen aan het geotextiel zijn en dat er onderliggend zand is uitgespoeld. Dit is echter niet met zekerheid vast te stellen en deze locatie wordt in deze memo daarom niet volledig meegenomen in de analyse. We stellen voor deze locatie scherp te monitoren. .

NB: initieel was ook sprake van een "locatie C" (rond KP 850) maar deze blijkt een andere oorzaak te hebben. Nadat op locaties A en B schade was geconstateerd, is in maart 2021 op enkele locaties een proefsleuf gegraven om de laagdikte te controleren. Voor locatie C is dit toevalligerwijze gedaan op de dag dat ook de (drone) survey "Q4-2020" is ingemeten (zie sectie 4.2), waardoor deze proefsleuf als "schade" lijkt op te vallen op de survey tekeningen. De proefsleuf is naderhand weer opgevuld; in het veld is momenteel nog een lichte profielvervorming waarneembaar als gevolg van deze werkzaamheden. Locatie C wordt derhalve hier niet verder besproken. Omwille van consistentie in de naamgeving blijven de locatienamen "A – B – D" wel gehandhaafd.



Figuur 2: Impressie van de schade op locatie A (links), B (midden) en D (rechts).

4 TIJDLIJN VAN GEBEURTENISSEN

4.1 **Ontwerp en uitvoering**

Het ontwerp van de Harde Rand dateert van begin 2016 (ref [2]). Het Uitvoeringsontwerp is gemaakt door Witteveen+Bos in opdracht van Boskalis.

De constructie van de Harde Rand is uitgevoerd in zomer 2016 (gekeurd door middel van “as built survey” 30-11-2016) . In de periode daarna zijn sterke zettingen geconstateerd in de ondergrond van in het zuidelijke deel van de Harde Rand langs het Compartiment Dun Slib, en in de zomer van 2018 is de kruin in dat deel opgehoogd met breuksteen om het opgetreden tekort aan kruinhoogte te compenseren (keuring d.m.v. “as built survey” 25-10-2018).

Tot slot is in juli / augustus 2019 het Compartiment Dun Slib hydraulisch gevuld; tijdens deze werkzaamheden is de waterstand aan de binnenzijde van de dam opgezet geweest tot +0.90 m NAP.

4.2 **Ontstaan van de schade**

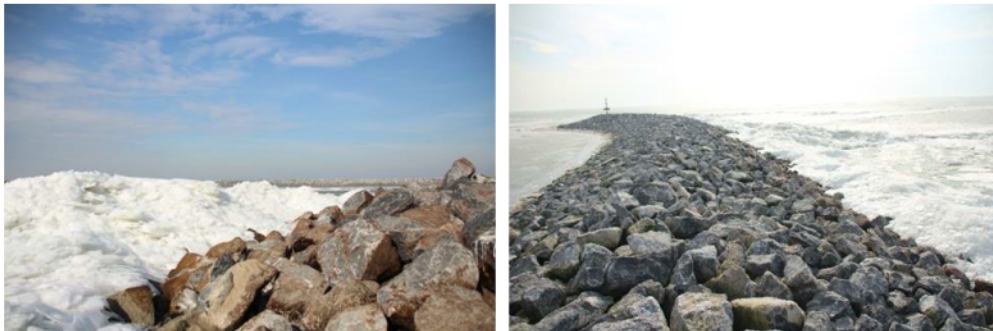
Sinds medio 2018 is de Harde Rand elk kwartaal ingemeten door middel van een topografische survey. Op locaties A en B is op de resultaten van survey “Q4 2018” (uitgevoerd januari 2019) nog geen schade te zien, op de survey “Q1-2019” (mei 2019) wel. De nu geconstateerde schade is dus naar alle waarschijnlijkheid ontstaan in de periode tussen deze twee peildata. Het profiel is daarna nog geleidelijk dieper geworden maar lijkt zich sinds medio 2020 te hebben gestabiliseerd.

Op locatie D is voor het eerst schade te zien op de meest recente survey “B&O 2021 (mei 2021) en nog niet op de surveys daarvoor, tot en met “Q4 2020” (februari 2021). Deze schade is dus van veel later datum.

4.3 **Belasting**

In de periode sinds de uitvoering is de constructie enkele keren belast door optredende golfcondities. Dit blijkt uit een analyse van meetgegevens van de stappenbaken op het Noord- en Zuidstrand. Deze data is beschikbaar vanaf voorjaar 2019 tot februari 2021 (toen de meetinstrumenten zijn verwijderd in verband met dreigende ijsgang).

Noemenswaardig is ook de belasting door kruierend ijs die eind februari / begin maart 2018 is opgetreden. Ook in de jaren daarna is enkele malen sprake geweest van ijsvorming op het Markermeer

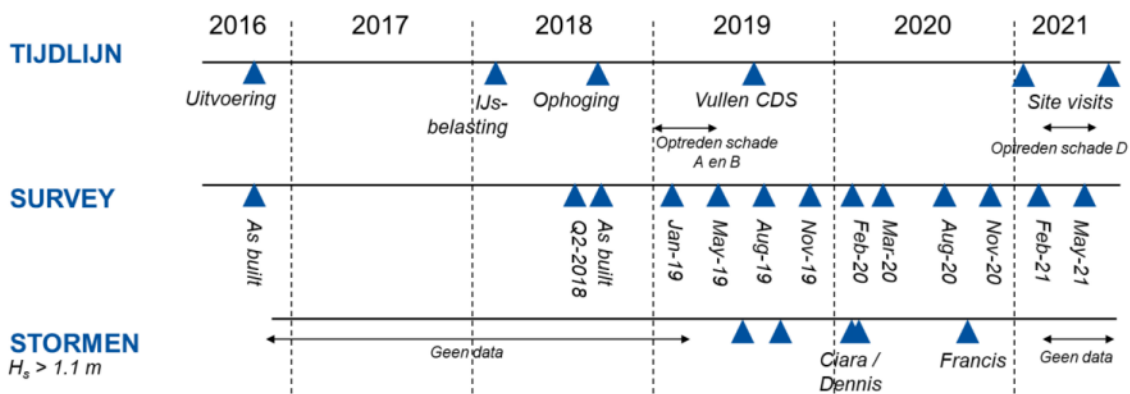


Figuur 3: Impressie van ijsbelasting winter 2018

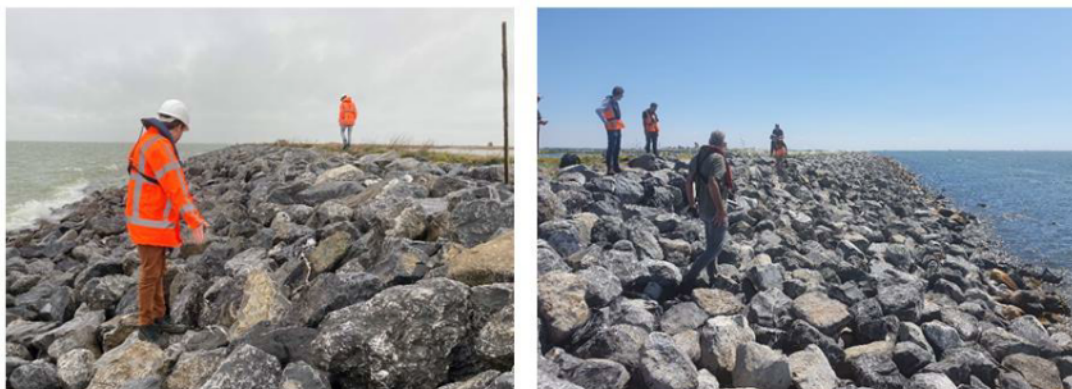
4.4 Site visits Januari en Juni 2021

Op 19 januari 2021 heeft een site visit plaatsgevonden op uitnodiging van Boskalis, in aanwezigheid van een ontwerper van Witteveen+Bos en Hydronamic. Er heeft een schouw plaatsgevonden van het deel van de Harde Rand langs het Compartiment Dun Slib, grofweg tussen KP 850 en KP 1650.

Een tweede site visit heeft plaatsgevonden op 7 juni 2021 met dezelfde deelnemers, aangevuld door experts van Rijkswaterstaat en de leverancier van het geotextiel (Geopex).



Figuur 4: Tijdlijn van gebeurtenissen



Figuur 5: Impressie van de site visit 19 januari 2021 (links) en 7 juni 2021 (rechts)

5 HYPOTHESEN TEN AANZIEN VAN DE OORZAAK

In het Plan van Aanpak is een lijst met hypothesen ten aanzien van de oorzaak van deze schade genoemd. Deze is gaandeweg nog aangevuld als gevolg van discussies tussen de aanwezige experts. De hypothesen worden hieronder één voor één nader bediscussieerd.

5.1 Zettingen van de ondergrond

Het deel van de Harde Rand waar de schade in eerste instantie is opgetreden kent aanzienlijk sterkere zettingen van de ondergrond dan op andere plaatsen. De sterkere zettingen in dit gebied kunnen worden verklaard door de dikkere laag holocene afzettingen.

Het gebied tussen grofweg KP 900 – 1300 kent de sterkste zettingen. Dit komt overeen met locatie B. Daar staat tegenover dat op locaties A en D is de zetting kleiner is, en andersom is het gebied met sterke zettingen ongeveer 400 m lang terwijl alleen lokaal rond locatie B schade optreedt. De correlatie met de zetting is dus niet volledig en eenduidig.

Het ligt daarmee niet voor de hand dat hier een hoofdoorzaak in gevonden kan worden. De zettingen kunnen wel een aanvullende oorzaak zijn op locatie B.

5.2 Ijsbelasting

De opgetreden situatie met kruierend ijs vormt een extra belasting die niet in het ontwerp is meegenomen. Dit is conform de VSE (*Nvl 3, 2de dialooffase, MUT 2: De constructies van de randen en dammen behoeven niet bestendig te zijn tegen kruierend ijs.*)

Het kruierende ijs kan de stenen in / over het geotextiel hebben gedrukt, wat kan hebben geleid tot mechanische schade aan het doek. Tijdens de site visits zijn stenen aangetroffen die door het doek heen gedrukt waren en er half uitstaken. Ook wijst de manier van scheuren van het geotextiel eerder op langzame, mechanische belasting (“op trek bezweken”) in plaats van snelle, dynamische belasting (“ponsen”) zoals bijvoorbeeld kan ontstaan tijdens het laten vallen van stenen.

Breuk van stenen

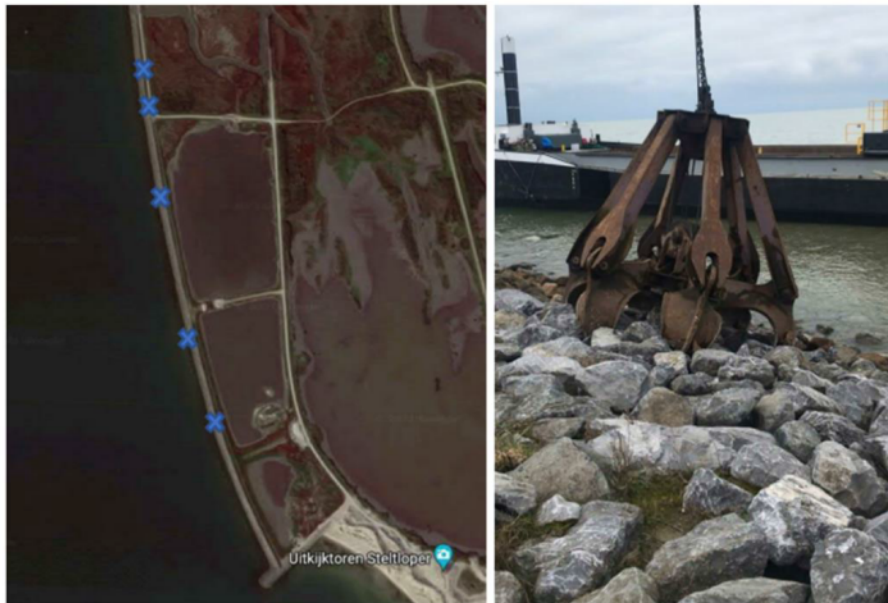
Daarnaast kan het kruierende ijs schade aan de stenen zelf hebben veroorzaakt met scherfvorming als gevolg. Tijdens de site visits zijn enkele steenfragmenten aangetroffen, die mogelijk van de breuksteen uit de bestorting afkomstig zijn als gevolg van breuk of slijtage. De stenen zijn op locatie B afkomstig van de groeve te Jemelle, en op locatie A uit de Carrière des Limites (op locatie D is de oorsprong niet meer te achterhalen). In beide gevallen voldoet de steen blijkens het productcertificaat aan de gebruikelijke eisen aan druksterkte (>80 MPa, CS₈₀), slijtvastheid (<20%, MDE₂₀) en waterabsorptie (<0.5%, WA_{0.5}). Deze eisen zijn overigens in het Uitvoeringsontwerp niet expliciet benoemd, maar zijn in de context van dit onderzoek overgenomen uit de Rock Manual (ref [5]).

In het kader van dit onderzoek zijn steenmonsters genomen uit het werk, waarop aanvullende laboratorium proeven zijn gedaan conform NEN-EN 13383 (ref [8]). De monsters zijn genomen op 4 maart 2021 uit de Harde Rand door het kraanschip Nova Venture. Per locatie zijn er 2 tot 3 grepen genomen met de poliepgrijper. De gaten die ontstonden zijn aangevuld met stenen uit IJmuiden die in depot liggen voor de haven van Module E.

De locaties van de monsternamen zijn gegeven in Figuur 6. Deze omvatten onder meer de directe omgeving van locatie B.

De proeven bevestigen de bovengenoemde waarden: druksterkte 114 MPa, slijtvastheid 11% en waterabsorptie 0.3%. Wel valt op dat de gemiddelde waarde van de druksterkte weliswaar voldoet, maar dat er een sterke spreiding in de resultaten zit. De zwakste samples hadden een druksterkte van nog geen 40 MPa. Dit wordt veroorzaakt doordat de stenen een mengsel zijn van minstens twee verschillende steensoorten.

Het is hierdoor mogelijk dat er, door de ijsgang, scherven van de stenen zijn gedrukt die schade aan het geotextiel veroorzaakt of verergerd hebben. Kruisend ijs lijkt hiermee de meest aannemelijke hoofdoorzaak van de uiteindelijk ontstane schade.



Figuur 6: Locaties monsternamen steenkwaliteit

5.3 Onvoldoende sterkte van het geotextiel

Toegepaste doek

Het toegepaste doek is geleverd in twee fases: één ten tijde van de initiële uitvoering in 2016 en één ten tijde van de ophoging in 2018. In beide gevallen gaat het om een composiet van een weefsel met opgestikt vlies. Het weefsel is in beide leveringen hetzelfde (PP40, zie onderstaande tabel). Dit weefsel heeft een treksterkte van 40 kN/m¹. De rek is 12 / 15% (anisotroop in twee richtingen). Het vlies is wel verschillend en is in de tweede levering aanzienlijk sterker: 15 kN/m¹ tegen circa 1 kN/m¹ in de eerste levering. De rek is iets lager (50%), maar de combinatie van rek en treksterkte maakt dit tot een veel robuuster doek.

Het feit dat het doek in de tweede levering sterker is, en dat in dit doek geen schade is geconstateerd, doet vermoeden dat hierin mede een oorzaak gezocht kan worden. Dit wordt hieronder nader uitgewerkt.

Parameter		Eis ontwerp	Gebruikt in originele constructie 2016		Gebruikt bij ophoging 2018	
			Weefsel PP40	Vlies PECT 170	Weefsel PP40	Vlies NW170
Openingsgrootte O_{90}	μm	≤ 270	200	nvt	200	nvt
Permittiviteit Ψ	s^{-1}	≥ 0.1	0.24	nvt	0.24	nvt
Treksterkte	$[\text{kN}/\text{m}^1]$	≥ 35	40 / 40	0.9 / 1.3	40 / 40	15 / 15
Rek bij breuk	$[\%]$	-	15 / 12	70 / 70	15 / 12	50 / 50
Gewicht	$[\text{g}/\text{m}^2]$	≥ 170 (vlies)	200	170	200	170

Ontwerpspecificaties

Ten tijde van het ontwerp was het CUR rapport 174 "Geokunststoffen in de waterbouw" (ref [3]) een in de ontwerppraktijk gebruikelijke aanbeveling. Deze was echter niet bindend voorgeschreven in het ontwerp.

Voor wat betreft de civieltechnische eigenschappen van het geotextiel (openingsgrootte en waterdoorlatendheid) is de CUR 174 volledig gevolgd. Ten aanzien van materiaalkundige eigenschappen (rek en sterkte) van het geotextiel is de CUR 174 echter minder eenduidig. Er wordt een methode genoemd ("formule van Lawson") die de benodigde *massa* van het geotextiel (in gr/m^2) relateert aan de valhoogte en steengrootte tijdens de uitvoering. Er wordt daarbij echter de nuance geplaatst dat "*een discussie gaande is om niet de massa van het geotextiel maatgevend te laten zijn*" en als praktische regel meegegeven dat "*gebruik van composietmaterialen van vliezen en weefsels een oplossing [kan] zijn*" (citaten uit CUR 174).

Ten tijde van het Uitvoeringsontwerp had die discussie inmiddels geleid tot het schrijven van een nieuwe CUR richtlijn 205 ("Ontwerprichtlijn geotextielen onder steenbekleding"), die in concept beschikbaar was (ref [4a]). De definitieve versie hiervan (ref [4b]) is pas in maart 2017 beschikbaar gekomen, dus na afronding van het ontwerp en aanleg van de Harde Rand. Deze richtlijn presenteert een "eenvoudige methode" met, in de conceptversie, een geldigheid voor steenbestortingen tot en met 40-200 kg, dus ook voor de onderhavige toepassing. Deze methode stelt inderdaad niet de massa van het geotextiel, maar de *treksterkte* en *rek* centraal. Om recht te doen aan de nuance uit CUR 174 en deze 'modernere' en theoretisch beter onderbouwde manier van specificeren te volgen, is deze concept CUR 205 toegepast in het ontwerp. Hierbij is inderdaad gekozen voor een composiet materiaal.

De concept CUR 205 stelt de volgende eigenschappen voor:

- **Treksterkte:** Deze moet minimaal gelijk zijn aan $35 \text{ kN}/\text{m}^1$ voor weefsels, en $15 \text{ kN}/\text{m}^1$ voor vliezen. Bij composieten moet één van de materialen aan deze treksterkte eis voldoen (de sterktes mogen veiligheidshalve niet bij elkaar worden opgeteld), en geldt als aanvullende eis dat het vlies minstens $200 \text{ gr}/\text{m}^2$ moet wegen.
- **Rek:** Deze moet minimaal 60% zijn. In tegenstelling tot de aanbeveling bij sterkte wordt hier geen éénduidige interpretatie richtlijn ten aanzien van vliezen, weefsels of composieten gegeven.

Weefsels kunnen in de praktijk om materiaalkundige redenen geen rek halen van 60%. Hierdoor blijven dus nog twee mogelijkheden over voor toepassing in de praktijk:

- Een (enkelvoudig) vlies met een rek van 60% en een treksterkte van 15 kN/m¹. Deze combinatie van eigenschappen was in 2016 nog niet op de markt beschikbaar. Daarnaast had dit niet de voorkeur vanuit uitvoeringstechnische redenen omdat de voorkeur werd gegeven aan een hogere treksterkte.
- Een samengesteld (composiet) geotextiel bestaande uit een weefsel met opgestikt vlies. De sterkte eis is dan duidelijk (óf het weefsel moet 35 kN/m¹ sterkte hebben, óf het vlies 15 kN/m¹, én het vlies moet 200 gr/m² wegen). De rek eis is echter onduidelijk. Vanuit engineering perspectief kan worden geredeneerd dat “de zwakste schakel maatgevend is”, dat wil zeggen dat de lagere rek van het weefsel de rek van het composiet bepaalt. Hierdoor kan een composiet dus indirect nooit aan de eis van 60% voldoen, tenzij het vlies op zichzelf al aan alle eisen zou voldoen en het weefsel alleen wordt toegevoegd om bijvoorbeeld (ten tijde van de uitvoering) een hogere treksterkte te leveren. Daarmee gelden dan weer dezelfde afwegingen als hierboven: een vlies met deze eigenschappen was in 2016 nog niet op de markt.

In het uitvoeringsontwerp is hierdoor de conclusie getrokken dat de concept CUR 205 geen eis aan de rek van een composiet stelt, dan wel dat er geen materiaal beschikbaar is dat aan deze eis kan voldoen. Er is uiteindelijk gekozen alleen de sterkte eis in het ontwerp op te nemen. Het uitgangspunt van 200 gr/m² voor het vlies is hierbij versoepeld naar 170 g/m² op basis van ervaringen (valproeven) op het Maasvlakte II project. Daar is bij valhoogtes tot 2 m en bestorting met 40-200 kg geen schade aan een composiet geotextiel met 170 g/m² vlies geconstateerd. Dit gaf ook vertrouwen in de gekozen oplossing met een composiet geotextiel zonder expliciete rek eis. Op basis van deze testen heeft het Ontwerpteam wel aanbevolen om de valhoogte in de uitvoering te limiteren naar 1 m.

Het geleverde en toegepaste geotextiel (weefsel met treksterkte 40 kN/m¹ en vlies 170 gr/m²) voldoet aan bovengenoemde ontwerpuitgangspunten. Noemenswaardig hierbij is dat het vlies van het in de ophoging toegepaste geotextiel (geleverd in 2018) een hogere treksterkte van 15 kN/m¹ heeft en daarmee bijna óók zelfstandig voldoet aan de eisen die aan een enkelvoudig vlies gesteld zouden worden (behoudens een nuance tussen een rek van 50% en 60%).

Huidige inzichten

Als dit ontwerp vandaag de dag (medio 2021) opnieuw zou moeten worden gemaakt dan zou de inmiddels officieel uitgebrachte CUR 205 worden gevolgd in plaats van de CUR 174. In de huidige versie van de CUR 205 zijn de aanbevolen getallen voor rek en treksterkte niet gewijzigd ten opzichte van het concept dat in 2016 beschikbaar was. Echter:

- Vliezen met een combinatie van de aanbevolen rek én sterkte zijn inmiddels wel op de markt beschikbaar
- De “Eenvoudige Methode” is middels een later erratum (januari 2021) niet meer van toepassing verklaard voor bestorting met 40-200 kg omdat “*ervaringen uit de praktijk en beproevingen in het laboratorium hebben uitgewezen dat [indien deze methode wordt gebruikt] het mogelijk blijkt te zijn dat een ontwerp in de praktijk beschadigd kan raken tijdens het aanbrengen van de steenbekleding op de geotextielen*”. (citaat uit erratum).

Als alternatief geldt dan de “geavanceerde methode”, hetgeen neerkomt op het doen van praktijkproeven (valproeven) om tot een voldoende robuust ontwerp te komen.

Conclusie op basis van de ontwerprichtlijnen

Kort gezegd is ten tijde van het ontwerp gebruik gemaakt van een concept richtlijn, die niet éénduidig was ten opzichte van de vereiste materiaaleigenschappen van composieten, zeker met het oog op de toenmalige beschikbaarheid van materialen op de markt. Dit heeft een ontwerp opgeleverd dat minder robuust is dan wat vandaag de dag gespecificeerd zou worden op basis van de nu geldende richtlijn en inzichten. Het oorspronkelijke ontwerp voldeed wel aan de laatste stand der techniek. Overigens is van huidige richtlijn onderkend dat deze waarschijnlijk resultaten zou hebben gegeven die niet steeds voldoende robuust zijn; deze richtlijn wordt momenteel herzien.

Dit ondersteunt de conclusie dat het ontwerp voldoet aan de vigerende ontwerprichtlijn, maar op grond van voortschrijdend inzicht inmiddels duidelijk is dat daarmee desondanks schade kan ontstaan

De tweede fase leverantie van geotextiel, die is toegepast in de ophoging, voldoet ook (net) niet aan de huidige gestelde eisen (meer specifiek ten aanzien van rek) maar komt daar wel veel dichterbij. In dit geotextiel is geen scheurvorming waargenomen in het primaire doek.

5.4 UV belasting

Het geotextiel is op enkele plekken niet meer volledig bedekt door stortsteen en staat daarmee bloot aan rechtstreekse UV belasting. Het expert oordeel van de leverancier is dat dit geen oorzaak kan zijn. Het opgestikte vlies kan weliswaar sterkte verloren hebben, maar deze sterkte was met orde 1 kN/m¹ toch al zeer laag. En het onderliggende primaire doek wordt, ondanks dat het bovenliggende vlies beschadigd is, nog steeds voldoende beschermd tegen UV belasting.

5.5 Uitvoering

Plaatsingsmethode breuksteen

De breuksteen is zowel ten tijde van de originele uitvoering (2016) als ten tijde van de ophoging (2018) geplaatst vanuit een kraanschip. Hierbij is voldaan aan de maximale valhoogte van 1 m conform de ontwerp aanbeveling.

Overlap geotextiel tijdens ophoging

Het is opvallend dat de schade van locatie A op de overgang tussen originele uitvoering en ophoging optreedt. Ten tijde van de ophoging zijn de stenen van de kruin deels verwijderd, is het onderliggende geotextiel vrij gegraven maar niet teruggeslagen. De kruin is vervolgens verhoogd met zand en daarop is het nieuwe geotextiel geplaatst, overlappend met het originele geotextiel. Tot slot is de nieuwe breuksteen bekleding herplaatst.

Op locatie A bevindt de schade zich ter hoogte van deze overlap, waardoor er een oorzakelijk verband zou kunnen zijn met de hierboven omschreven uitvoeringswijze. Een dergelijk oorzakelijk verband is evenwel niet aannemelijk, omdat de schade bij locatie B lager op het talud zit, buiten de overlap, en er bij locatie D helemaal geen ophoging is geweest.

Opzetten waterstand bij vullen Compartiment Dun Slib

Het opzetten van de waterstand tot +0.9 m NAP heeft een waterstandsverschil van ongeveer 1.1 m veroorzaakt over de zand dam. Blijkens een versimpelde analyse (methode van Bligh) komt dit qua orde van grootte grofweg overeen met de kritieke waarde waarbij 'piping' (uitspoelen van zand) kan zijn opgetreden. De methode is echter niet nauwkeurig genoeg om hier met zekerheid een uitspraak over te doen.

Dit kan op zichzelf niet de oorzaak van scheurvorming in het geotextiel zijn. Het is wel mogelijk dat er hierdoor (extra) zand is uitgespoeld als er ten tijde van deze opzetting al gaten of scheuren in het geotextiel zaten. Dit is alleen mogelijk bij locatie A en B, omdat bij locatie D niet aan het Compartiment Dun Slib ligt. Piping als hoofdoorzaak van de schade ligt om die reden niet voor de hand.

5.6 Zakken van de teenbestorting

De teenbestorting is in het kader van de Beheer- en Onderhoudsverplichtingen ingemeten in juni 2021 (ref [7]). Hierbij zijn ter plaatse van de Harde Rand geen onregelmatigheden geconstateerd. Daarmee is deze hypothese niet waarschijnlijk.

5.7 Stormschade

De steenbestorting is ontworpen op enige mate van beweging / schade in stormcondities (schadegetal $S_d = 12$ in ontwerpcondities 1/50 jaar, onderhoudslicm $S_d = 7$). Het kan in theorie zo zijn dat beweging van de stenen in een storm enkele van de bovenstaande oorzaken heeft verergerd. Hiertoe is een analyse gemaakt van opgetreden stormen in de periode waarover meetdata beschikbaar zijn (voorjaar 2019 – voorjaar 2021). De daadwerkelijk geleverde dichtheid en mediaan gewicht (M_{50}) van de breuksteen is gemeten en gebruikt in de analyse. Hieruit blijkt dat de opgetreden golven geen schade van meer dan $S_d = 4.3$ kunnen hebben veroorzaakt. Hiermee ligt deze hypothese minder voor de hand.

6 CONCLUSIES

6.1 Meest waarschijnlijke oorzaak

Twee van bovenstaande hypothesen worden aangewezen als meest waarschijnlijke oorzaken, waarvan één hoofdoorzaak en een mogelijke medeoorzaak:

- Hoofdoorzaak: De ijsgang van begin 2018 heeft een bijzondere belasting veroorzaakt die conform de gestelde eisen niet is meegenomen in het ontwerp, wellicht in combinatie met de lage druksterkte van (een deel van) de breuksteen en daarmee gepaard gaande scherfvorming. Hierdoor kunnen de stenen of scherven daarvan door het doek gedrukt zijn.
- Medeoorzaak: Het toegepaste geotextiel, dat is ontworpen op basis van de toenmalig beschikbare richtlijnen en beschikbaarheid op de markt, is minder robuust is dan vandaag de dag zou zijn gespecificeerd op basis van de huidige inzichten.

Het is niet direct te achterhalen of één van deze twee een onafhankelijke hoofdoorzaak is, of dat beide in combinatie zijn opgetreden.

6.2 Vervolgmechanisme

Als eenmaal een gat of gaatje in het geotextiel zit, kan het onderliggende zand gaan uitspoelen, gedreven door bijvoorbeeld golfslag en/of de waterstandverhoging aan de binnenzijde van de Harde Rand ten tijde van het vullen van het Compartiment Dun Slib (bij locatie A en B). Dit is een langzaam proces. Als er een zekere hoeveelheid zand is weggespoeld kan een holte ontstaan onder het geotextiel wat daardoor vrij gaat hangen. Hypothetisch kan dit leiden tot spanningen in het doek dat daardoor kan gaan scheuren, zeker als het al verzwakt is. Hierdoor kan het proces dat eerst langzaam ging plotseling versneld worden. De geotechnische zettingen, met name in het gebied rond locatie B, kunnen dit proces verergerd hebben.

6.3 Consistentie met onderzoeksresultaten

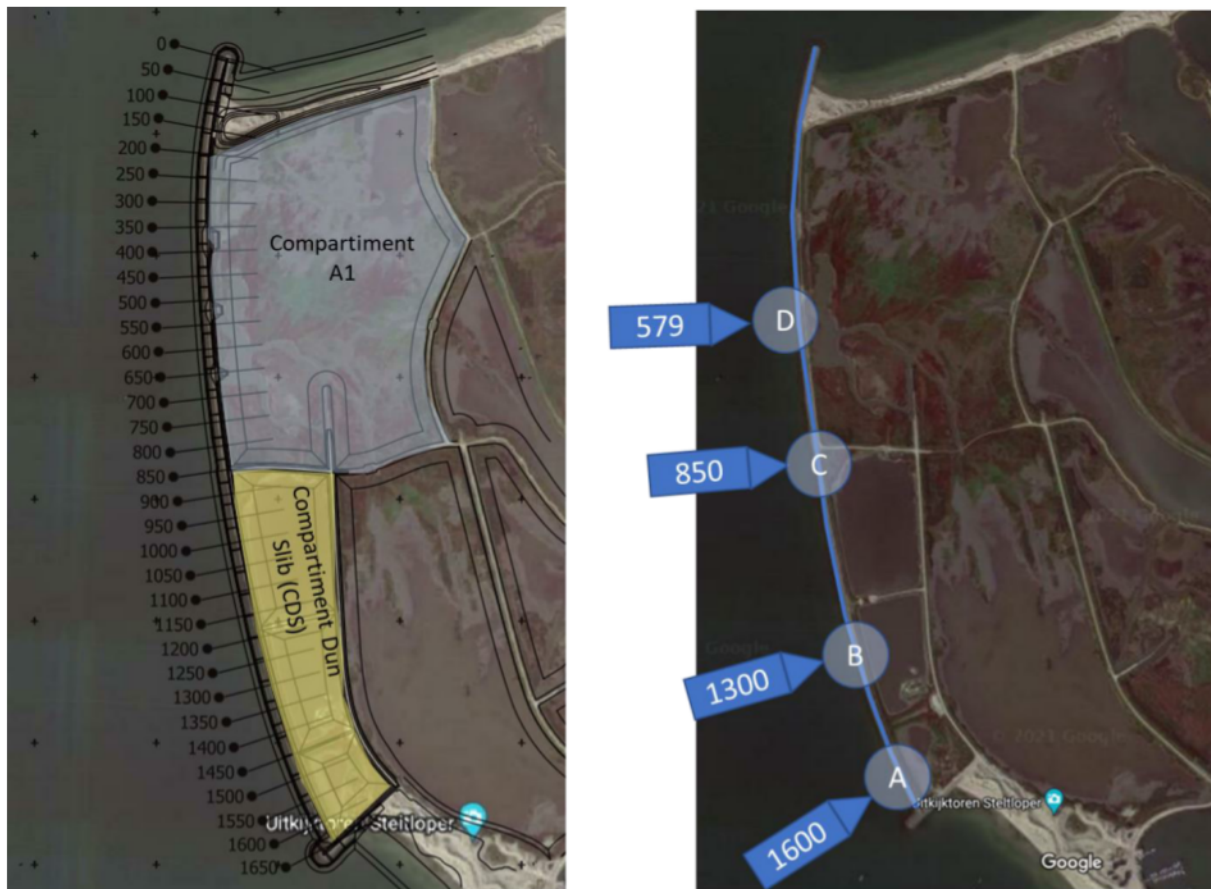
Een belangrijke aanwijzing is dat het geotextiel dat is gebruikt ten tijde van de ophoging geen schade vertoont aan het primaire weefsel. Dit geotextiel heeft een hogere sterkte, en is niet belast geweest door de ijsgang van 2018.

Doordat het vervolgmechanisme een langzaam proces is, kan er in de tijd niet een één op één relatie gelegd worden tussen het optreden van de initiële schade en het waarnemen van de gevolgen. Ook blijkt uit de surveys dat de sterkste profielvorming weliswaar begin 2019 heeft plaatsgevonden, maar dat het gat zich in het jaar daarna nog langzaam heeft verdiept.

Het bovenstaande mechanisme is daarmee niet in tegenspraak met de tijdlijn van gebeurtenissen en wordt ondersteund door de waarnemingen in het veld, de specificaties van de geleverde materialen en de resultaten van de aanvullende laboratoriumonderzoeken en data-analyse.

7 REFERENTIES

- [1] Natuurmonumenten (2014). Eerste fase Marker Wadden, Vraagspecificatie eisen, definitief, BA8757-107-101/R005/501063/402505/Nijm;
- [2] Boskalis (2016) Eerste fase Marker Wadden – Realisatiefase – Ontwerpnota UO harde rand (RA1), MW-UO-WP-OW02-1, versie 1.0, 18.03.2016
- [3] CUR 174 (2009) Geokunststoffen in de waterbouw, Tweede, herziene uitgave, Stichting CURNET, Gouda, 2009
- [4a] Ontwerprichtlijn voor geotextielen onder steenbekledingen, voorlopige versie van de eenvoudige methode CUR C205
- [4b] CUR 205 (2017) Ontwerprichtlijn Geotextielen onder steen bekleding, SBRCURnet, Delft, Maart 2017
- [5] CIRIA / CUR /CETMEF (2007) The Rock Manual; the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), C683, CIRIA, London
- [6] NNI (2002) NEN-EN 13383 Waterbouwsteen
- [7] Boskalis (2021) Beheer en Onderhoudsopname 2021 – Schouw en keuring harde randen, memo DT13084-JVDB-05-BBSP-M-001.B



Figuur 7: Gehanteerd referentiesysteem (links) en locaties waar schade is opgetreden (rechts)