

Handreiking zetsteen van baggerspecie

Ontwikkeling van een proefvak met zetsteen gemaakt van baggerspecie



Handreiking zetstenen van baggerspecie

Ontwikkeling van een proefvak met zetsteen gemaakt van baggerspecie

Auteur(s)

Jip Koster, Hugo Ekkelenkamp, Tsjerk van Doornik, Mark Klein Breteler, Mark de Bel, Mindert de Vries

| | |
|-----------------------|---|
| Opdrachtgever | Waterschap Scheldestromen |
| Contactpersoon | Jelle-Jan Pieterse |
| Referenties | HWBP Innovatie |
| Trefwoorden | Baggerspecie, Zetsteen, Dijkversterking, HWBP, Innovatie, Circulair, Hergebruik, Duurzaam |

Documentgegevens

| | |
|----------------------|---------------|
| Versie | 1.2 |
| Datum | Juni 2023 |
| Projectnummer | 219 |
| Document ID | NP.2019.219.4 |
| Pagina's | 30 |
| Classificatie | |
| Status | Definitief |

Samenvatting

Zetsteen van baggerspecie is een duurzaam alternatief voor betonnen zetsteenelementen. Het product wordt gemaakt middels de gepatenteerde GEOWALL®-techniek, die als kernmethode heeft om baggerspecie met bindmiddel (zoals cement) onder hoge druk samen te persen en zo te stabiliseren tot een vormvast bouwelement. De GEOWALL®-techniek wordt al met verschillende doeleinden succesvol toegepast; bijvoorbeeld als rifblokken (Eems Dollard projecten in Groningen), verticale oeverbescherming (langs het Oranjekanaal voor Waterschap Vechtstromen), geluidsscherm (Zwolle, ProRail) en klinkers (Gemeente Rotterdam).

De belangrijke eerste stap in de ontwikkeling van zetsteen van baggerspecie is door NETICS binnen een onderzoektraject van het Waterschap Scheldestromen gezet en mogelijk gemaakt door financiering van het HWBP. De innovatie is op labschaal getoetst en vervolgens in een proefvak te Hansweert op ware schaal getest als alternatief voor bestaande zetsteenelementen. Zodoende is er een TRL 6 niveau behaald waarbij de techniek is getest en gevalideerd in een relevante testomgeving.

De materiaalspecificaties van het product zijn op meerdere aspecten (druksterkte, buigsterkte, levensduur en dichtheid) al vergelijkbaar of zelfs beter dan regulier beton. Met een MKI-reductie van zo'n 15% (gebaseerd op het verschil in berekende MKI waarden voor Basalton versus Zetsteen van Baggerspecie) bij de Pilot Hansweert, is deze innovatieve zetsteen milieuvriendelijker dan bijvoorbeeld Basalton. Het GEOWALL®-persproces biedt daarnaast unieke mogelijkheden voor het simpel integreren van oplossingen zoals ecologische oppervlaktestructuren en andere bijzondere vormen.

De productie in de pilot Hansweert laat zien dat het product kostentechnisch in 2022 nog niet kan concurreren met regulier beton, maar bij het optimaliseren van de productiemethode wel in de buurt kan komen. Als milieukosten worden meegerekend in de businesscase kan dit ook gunstiger zijn voor het kostenplaatje. Het reduceren van inkoop en transport van primaire materialen zorgt nu al voor een significante reductie in materiaalkosten hetgeen nog verder toeneemt bij verdere optimalisatie van de receptuur en hiermee een hoger percentage baggerspecie.

Zetsteen van baggerspecie voldoet theoretisch al aan de algemene NEN-normering voor zetsteen (NEN 7024, deel 1) en kan na een aantal simpele praktijkproeven direct op de markt gezet worden als duurzaam alternatief voor betonnen elementen, mits aangetoond wordt dat het voldoet aan de robuustheidsproef en de wrijvingscoëfficiënt van het materiaal. Bij het certificeren en voorschrijven van het product dient er rekening mee gehouden te worden dat het materiaaltechnisch niet wordt gezien als betonproduct en dus ook niet primair als zodanig behandeld dient te worden. Om uiteindelijk een zo duurzaam en circulair mogelijke steenzetting aan te leggen, zal gekeken worden naar de functionele eisen van het product, gestuurd op zoveel mogelijk hergebruik van baggerspecie. Dit betekent dat het product niet altijd dezelfde samenstelling en dus materiaaleigenschappen zal hebben, maar wel zal voldoen aan de geldende functionele eisen zoals beschreven in de van toepassing zijnde NEN-normen.

Bij het voorschrijven van zetsteen van baggerspecie dient de opdrachtgever er rekening mee te houden dat er functionele eisen gelden aan het product die zich laten vertalen naar materiaalspecificaties. Op basis van de onderzoeksresultaten van de pilot Zetsteen van Baggerspecie Hansweert blijkt dat de zetsteen anders is dan beton kijkend naar de samenstelling, technische verschillen, MKI waarden, business case en ecologische meerwaarde. De opdrachtgever kan overwegen andere of aanvullende eisen te handteren op basis van de NEN-7024-2 voor betonproducten van zetsteen.

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Samenvatting | 3 |
| 1 | Inleiding | 5 |
| | 1.1 Aanleiding | 5 |
| | 1.2 Context | 5 |
| | 1.3 Leeswijzer | 5 |
| 2 | Ervaring met zetsteen van baggerspecie | 6 |
| | 2.1 GEOWALL®-techniek | 6 |
| | 2.2 Eerste pilots | 7 |
| | 2.3 Business case | 7 |
| 3 | Materiaalspecificaties | 9 |
| | 3.1 Samenstelling | 9 |
| | 3.2 Materiaaleigenschappen | 10 |
| | 3.2.1 Druk- en buigsterkte | 10 |
| | 3.2.2 Duurzaamheid/levensduur | 11 |
| | 3.2.3 Erosiegevoeligheid | 11 |
| | 3.2.4 Dichtheid/massa | 12 |
| | 3.2.5 Oppervlak | 12 |
| | 3.2.6 Uitloggedrag | 12 |
| | 3.3 Vorm en afmetingen | 12 |
| | 3.4 Milieuscore | 13 |
| | 3.5 Ecologische meerwaarde | 14 |
| 4 | Economische haalbaarheid | 17 |
| | 4.1 Positionering op de markt | 17 |
| | 4.2 Business case | 19 |
| 5 | Toepassing, ontwerp en certificering | 20 |
| | 5.1 Toepassingsmogelijkheden | 20 |
| | 5.2 Omschrijving zetsteen als toplaag | 21 |
| | 5.3 Stappenplan voor toetsing | 21 |
| | 5.4 Afmetingen en sterkte van de zetsteen | 22 |
| | 5.5 NEN-normering | 23 |
| | 5.6 Ontwerp en rekenregels (steentoets) | 25 |
| | 5.7 Kwaliteitscontrole | 25 |
| | 5.8 Certificering (BRL) | 26 |
| | 5.9 Inzet bij aanbestedingen | 27 |
| 6 | Ontwikkelstappen | 28 |
| 7 | Conclusie en aanbevelingen | 29 |
| | Referenties | 30 |

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Wereldwijd en in het bijzonder in de GWW-sector wordt nog steeds veel gebruikt gemaakt van betonnen producten, waaronder betonnen zetsteen. De betonindustrie is, door het gebruik van meer dan 15 procent aan milieubelastende cementfracties, één van de grootste bronnen van milieubelasting wereldwijd. Hoewel het verduurzamen van beton in de laatste jaren veel aandacht heeft gekregen, is er voor zetsteen producten nog geen volledig duurzaam en circulair alternatief beschikbaar.

Lokale overheden in Nederland willen wel in 2050 100% procent circulair werken. Daarbij is baggerspecie één van de grootste afvalstromen bij de decentrale overheden, zoals waterschappen en gemeenten. Circulair hergebruik van baggerspecie draagt bij aan de doelstellingen voor duurzaamheid, vermindering van CO₂ uitstoot en het oplossen van de stikstofproblematiek.

Aanleiding van deze handreiking is het doorlopend onderzoek van NETICS naar het circulair hergebruik van baggerspecie in geperst vormgegeven bouwstoffen (GEOWALL®). In het bijzonder is NETICS, in samenwerking met Waterschap Scheldestromen en Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), de laatste jaren bezig geweest om een duurzaam alternatief voor betonnen zetsteen te ontwikkelen, waarbij baggerspecie als primaire bouwstof wordt gebruikt

1.2 Context

In 2019 is NETICS in samenwerking met het waterschap Scheldestromen en het HWBP begonnen aan het haalbaarheidsonderzoek naar het produceren van zetsteen van baggerspecie, specifiek gefocust op de baggerspecie in Hansweert, Zeeland. In dit onderzoek is met succes onder laboratoriumcondities aangetoond dat een dergelijke circulaire zetsteen haalbaar is door onder zeer hoge druk baggerspecie gemengd met een bindmiddel (zoals cement) samen te drukken tot een betonachtig element.

In mei 2022 is begonnen met de tweede fase; uitvoering van een pilot op werkelijke schaal. Op het depot van Waterschap Scheldestromen zijn in de pilotfase ruim 400 zetstenen van baggerspecie geproduceerd. Dit is gedaan met een speciaal-ontwikkelde zetsteenpers, die elementen van 50x50x50 cm onder extreem hoge druk samenperst. Na productie zijn de zetstenen opgenomen in een proefvak bij dijkversterking Hansweert, zodat de stenen onder praktijkbelasting gemonitord en getest worden.

Na de gunstige resultaten van de pilot, waar aangetoond is dat zetsteen van baggerspecie een succesvolle vervanging kan zijn van betonnen zetsteenelementen, wordt gekeken naar de doorontwikkeling van het product. Hierbij is het doel om binnen enkele jaren het product zetsteen van baggerspecie dusdanig door te ontwikkelen dat het als volledig circulair en duurzaam alternatief op de markt gezet kan worden. Deze handreiking biedt een overzicht van de huidige stand van zetsteen van baggerspecie en geeft een doorkijk naar de potentie en ontwikkelstappen voor het product.

1.3 Leeswijzer

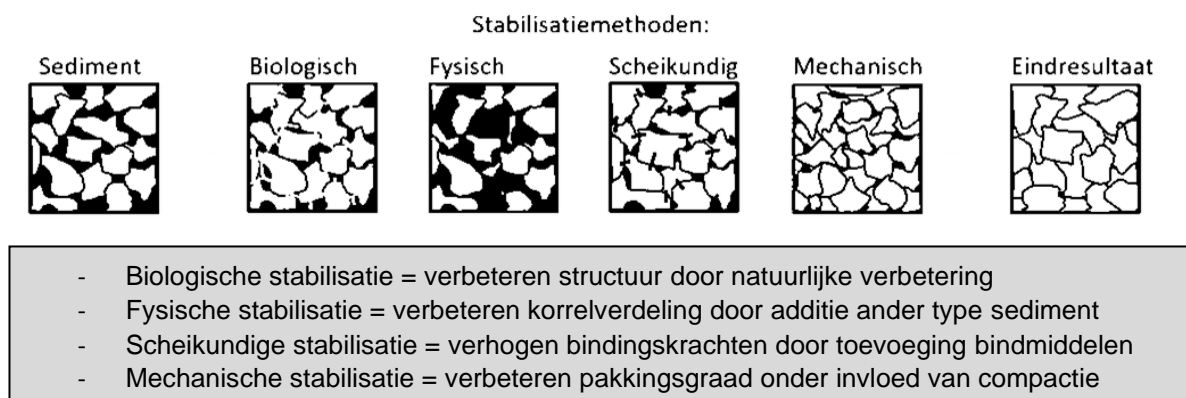
In hoofdstuk 2 van deze handreiking wordt een overzicht gegeven van de huidige ervaringen met de zetsteen van baggerspecie met daarbij een specifieke kijk op de techniek, de eerste pilots en de business case. Hoofdstuk 3 focust op de materiaalspecificaties nu en in de toekomst. Zowel de mechanische, esthetische, milieukundige als ecologische specificaties worden in dit hoofdstuk belicht. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de economische aspecten achter het concept zetsteen van baggerspecie, waarbij de positionering op de markt en de toekomstige business case centraal staan. De toepassing en certificering van het product zetsteen van baggerspecie zal besproken worden in hoofdstuk 5. De NEN-normering is de rode draad met betrekking tot toepassing en certificering. Tot slot wordt in hoofdstuk 6 en 7 vooruitgekeken naar respectievelijk de vervolgstappen tot het komen van een volledig toepasbaar product en de conclusies/aanbevelingen van deze handreiking.

2 Ervaring met zetsteen van baggerspecie

De zetsteen van baggerspecie maakt onderdeel uit van een bredere innovatie van NETICS, waarbij baggerspecie onder hoge druk samengeperst wordt tot constructieve elementen. Deze gepatenteerde innovatie (GEOWALL®-technologie) wordt in dit hoofdstuk nader toegelicht. Tevens wordt ingezoomd op de ervaringen met de productie van zetsteen van baggerspecie en business case die hierachter zit.

2.1 GEOWALL®-techniek

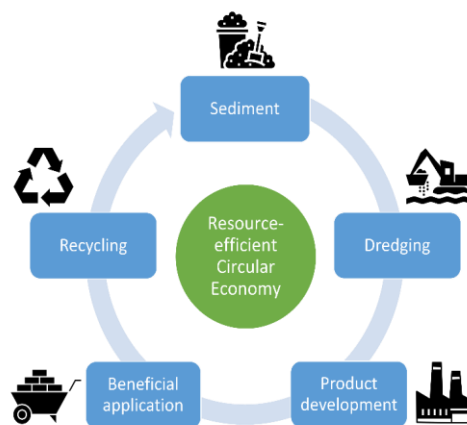
GEOWALL® is een eenvoudig, goedkoop, milieuvriendelijk en robuust alternatief voor alle typen betonnen elementen. GEOWALL® is vanwege het low-tech karakter van de techniek lokaal op locatie te produceren en toe te passen. De elementen worden gemaakt met lokaal vrijkomende baggerspecie (tot op heden schoon materiaal) met daaraan verschillende toeslagmiddelen toegevoegd. De huidige kennis en ervaring van NETICS op het gebied van de werking en het gebruik van stabilisatiemethoden vormt de basis voor de toepassing (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Stabilisatiemethoden voor baggerspecie. Bron: NETICS.

De kern van de innovatie is het koppelen van de bouwketen met de baggerketen waardoor er een duurzaam element geproduceerd wordt binnen een nieuwe circulaire keten. Bovendien zal het product aan het einde van zijn levensduur weer kunnen worden hergebruikt tot eenzelfde nieuwe toepassing, bijvoorbeeld door middel van het crushen van het materiaal (Figuur 2.2).

Het voordeel van de innovatie is dat er minder inkoop en transport van tegenwoordig schaarse primaire grondstoffen benodigd is. Dit zal voor een reductie van de milieu-impactkosten en op termijn lagere inkoopkosten zorgen. De innovatie geeft ook de mogelijkheid om custom-made eigenschappen te maken, waardoor niet onnodig veel cementachtige materialen toegevoegd hoeven te worden en waardoor ook extra ecologische meerwaarde wordt gecreëerd.



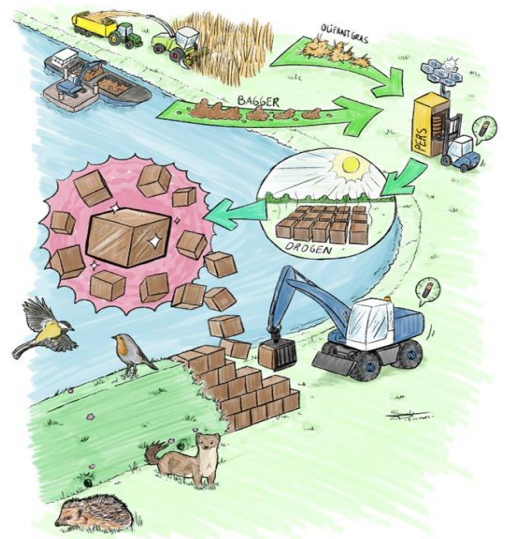
Figuur 2.2 Voorbeeld van een circulaire baggerketen. Bron: CircSed

De GEOWALL®-technologie is ontwikkeld en uitgebreid getest voor tal van beton-toepassingen, zoals keermuren, beschoeiingen, geluidsschermen en zetsteen. Op dit moment bevindt de GEOWALL®-toepassing al keermuur zich zelfs al in technologiefase TRL6; bewezen toepasbaar op bijna alle typen sedimenten en er zijn velen tests uitgevoerd aan erosie, sterkte, duurzaamheid en uitloging.

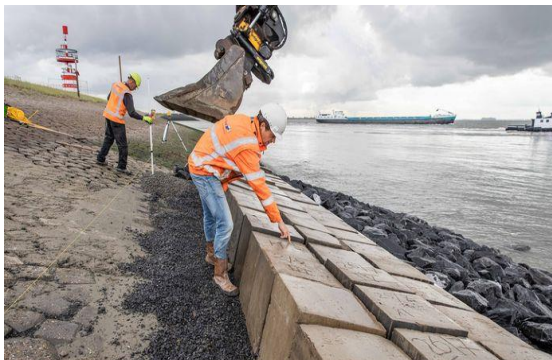
2.2 Eerste pilots

Het persen van baggerspecie met toeslagmateriaal (zoals zand, klei en grind) en bindmiddel (zoals cement) onder hoge druk is de kern van de gepatenteerde GEOWALL® innovatie. Het persen heeft als doel om baggerspecie en vrijkomende grond mechanisch te versterken zodat er minder chemische binders benodigd zijn om de technische eigenschappen te behalen.

Op locatie worden reststromen samengebracht en gestabiliseerd met eventuele alternatieven (figuur 2-3). De mengsels worden vervolgens gemonitord op zo'n 17 verschillende parameters, zoals vocht- en zoutgehalte. De ontwikkelde mobiele persinstallatie perst vervolgens onder enorm hoge druk verschillende vormvaste elementen die vervolgens weer in de buurt toegepast kunnen worden als bijvoorbeeld zetsteen. Daarnaast zijn er nog verscheidene andere toepassingen mogelijk zoals oeverbeschoeiing, geluidschermen, wegverhardingen, ribblokken en andere elementen waarvoor nu beton wordt gebruikt.



Figuur 2-3 Circulaire toepassing van baggerspecie in de praktijk. Bron: Van Oord BV



Figuur 2-4 Proefvak met zetsteen van baggerspecie. Bron: Van Oord B.V.

Tijdens de pilot Hansweert zijn op locatie van het Waterschap Scheldestromen ruim 400 zetstenen geproduceerd binnen korte tijd. Deze zetstenen zijn vervolgens in een proefvak gezet, bovenop de reguliere dijkbekleding (figuur 2-4).

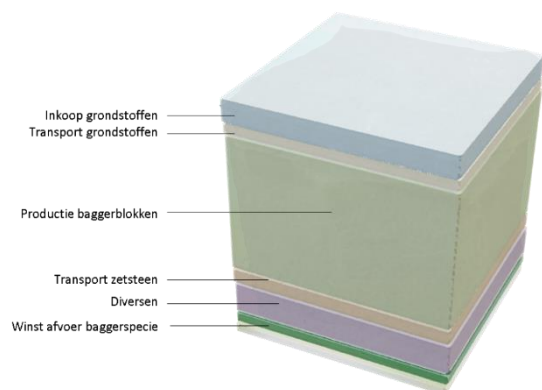
Na de succesvolle productie van de zetstenen van baggerspecie in de pilot Hansweert, zijn geen significante beschadigingen of gebreken tijdens productie, na productie of tijdens plaatsing waargenomen. Wel varieerde enkel de hoogte van de stenen, doordat er onder andere met verschillende vochtgehalten is gewerkt.

2.3 Business case

Tijdens de ontwikkeling van de zetsteen, waren naast de techniek, de kosten en milieu-impact van cruciaal belang voor het vervolg van de pilot. De vierkante zetsteen van baggerspecie, met een afmeting van 50x50x50 cm, kost voor de pilot (dus kleinschalige productie) € 21,- tot € 135,- om te produceren (figuur 2-5). Dit komt neer op € 80,- tot € 540,- per vierkante meter voor het proefvak.

De kosten voor de zetsteen van baggerspecie worden, door de innovatieve methodiek, op dit moment nog bepaald door de productiestappen. Daarnaast zijn diverse kosten, zoals onderzoek, monitoring, vastlegging en voorbereiding nog significant in deze berekening op pilotschaal.

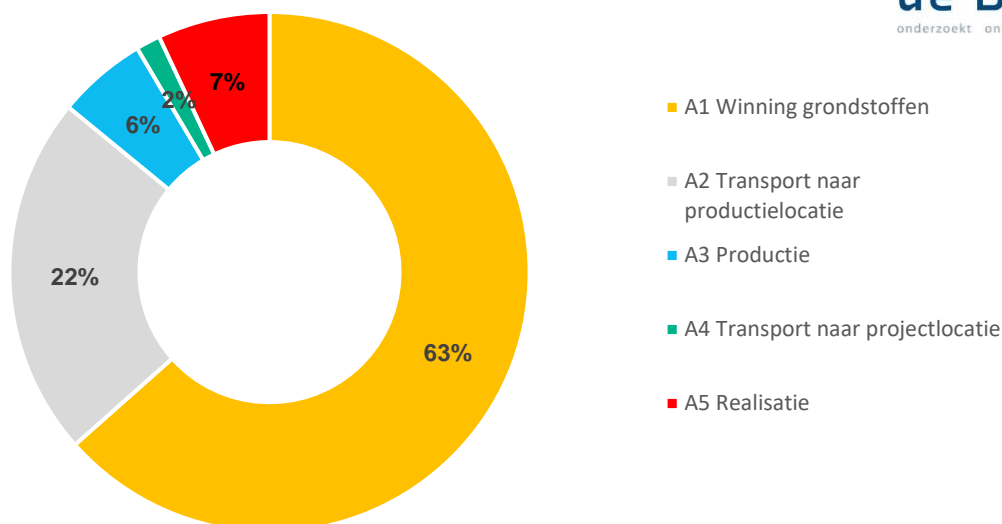
**ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE
€ 21,- tot € 135,- p.st.**



Figuur 2-4 Kostenindicatie van een zetsteen van baggerspecie. Bron: Ekkelenkamp et al., 2023

De grondstof inkoop- en transportkosten zijn al minimaal door de reductie aan benodigde primaire grondstoffen (zoals zand en grind). In de pilot is door een onafhankelijke partij een inschatting gemaakt van de milieukostenindicator (MKI) voor de productie van zetsteen van baggerspecie. Per kubieke meter zetsteen is de MKI (€ 15.41) (figuur 2-6).

**MKI Zetsteen van baggerspecie -
Pilot Hansweert:
€15,41 per m³ zetsteen**



Figuur 2-5 Inschatting van de milieukostenindicator (MKI) voor zetsteen van baggerspecie. Bron: Aveco de Bondt

De meeste milieubelasting wordt nog steeds veroorzaakt door de winning van de grondstoffen (Fase A1). Voor het vastgestelde recept, de combinatie van binder (zoals cement), toeslagmaterialen (zand en grind) en baggerspecie is dit lager dan vergelijkbaar constructiebeton, maar nog wel het grootste aandeel van het totaal. Doordat de productielocatie relatief afgelegen in Hansweert (Zeeland) lag, is er milieubelasting door aanvoer van primaire materialen (Fase A2). Hier staat tegenover dat er minimaal transport in fase A4 naar de plaatsingslocatie benodigd is. De productie door middel van het persen van baggerspecie gebeurt met een elektrische meng-, pers- en transport-installatie, waardoor de milieubelasting in fase A3 minimaal is.

In de opbouw van de berekende MKI waarde voor zetsteen van baggerspecie van Hansweert is er nog geen rekening gehouden met het voordeel van hergebruik van baggerspecie (zoals voorkomen van transport en verwerking) en het hergebruik van de toeslagstoffen (uit Project Afsluitdijk). Doordat dit per project verschilt en de huidige rekenmethoden hier nog geen eenduidige invulling aan geven zal dit voor toekomstige projecten individueel bepaald moeten worden zolang hier nog geen generieke methodiek voor is ontwikkeld. Daarnaast zal de optimalisatie van de productie een aanzienlijke bijdrage leveren aan de reductie van de MKI waarde.

3 Materiaalspecificaties

Tijdens de pilot Hansweert is er op lab- en pilotschaal veel informatie verzameld over de technische eigenschappen van de zetsteen van baggerspecie. Hoe verhouden deze eigenschappen zich tot conventionele materialen voor zetsteen? En hoe kunnen en zullen de technische eigenschappen van de zetsteen van baggerspecie in de toekomst eruitzien? Dit hoofdstuk omschrijft de maatgevende materiaalspecificaties voor zetsteen uit baggerspecie met als uitgangspunt voor deze handreiking de pilot Hansweert om een indicatie en context te kunnen geven. Uiteraard is ieder mengsel met baggerspecie anders en wordt een specifiek recept ontworpen met unieke eigenschappen.

3.1 Samenstelling

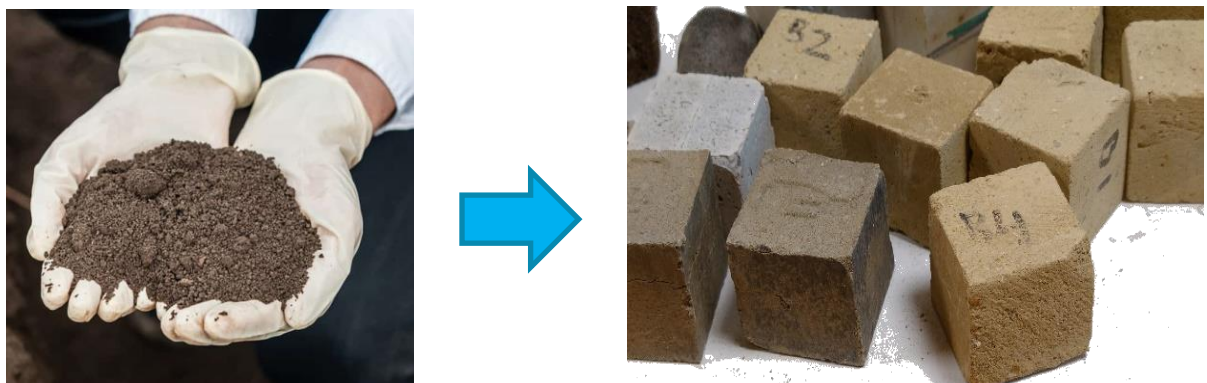
De zetsteen, gemaakt met de GEOWALL®-technologie, heeft als basisuitgangspunt zoveel mogelijk baggerspecie nuttig her te gebruiken. Over het algemeen bestaat het mengsel uit baggerspecie, zand, klei, grind en een kleine hoeveelheid binder zoals cement. De specifieke Zetsteen Hansweert receptuur bestaat voor ten minste 35% uit baggerspecie (tabel 3-1). Daarnaast wordt er zand, klei en (gerecycled) grind toegevoegd voor fysische stabilisatie. Er is voor het gekozen recept ca. 363 kg/m³ cement benodigd om tot de gewenste eigenschappen te komen.

Tabel 3-1 *Materiaaleigenschappen van zetsteen van bagger in de pilot Hansweert en Basalton. Bron: NETICS B.V.*

| Materiaal | Baggerspecie | Zand | Klei | Grind | Cement | Water |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] |
| Pilot Hansweert zetsteen van bagger | 574 | 424 | 222 | 303 | 363 | 324 |
| Basalton | 0 | 665 | | 1140 | 403* | 161 |

* Schipper et al., 2021

Het unieke van de zetsteen van baggerspecie is dat in theorie elk verschillend type baggerspecie gebruikt kan worden. NETICS bepaalt de mengverhouding op basis van haar geavanceerde receptenmodel, waar informatie over verschillende typen baggerspecie en toeslagstoffen van over de hele wereld is verwerkt. De recepten worden uitgebreid geverifieerd door het uitvoeren van onder andere druk- en levensduurtesten waardoor er wordt voldaan aan de eisen voor betonnen zetsteen.



Figuur 3-1 Het gebruik van verschillende types³ baggerspecie voor het produceren van GEOWALL®-blokken

Niet al het baggerspecie is even geschikt om toe te passen in zetsteen. Zo is sterk organisch slib (>10% veen) minder geschikt en is het wenselijk dat er niet meer dan 50% silt aanwezig is. De meest geschikte baggerspecie kan in een verhouding tot 1847 kg/m³ (84%) worden toegevoegd, waar het vochtgehalte afhankelijk is van de optimale hoeveelheid water dat in het mengsel mag zitten.

Op dit moment is de toepassing van baggerspecie nog gelimiteerd tot PFAS-arm en schone baggerspecie (bijv. wonen en industrie). Voor het toepassen van verontreinigd baggerspecie en PFAS-houdende grond is additioneel uitloogonderzoek benodigd. Op basis van ervaring met stabiliseren met additieven is het de verwachting dat de binders, zoals cement, eventuele toxische stoffen inkapselen en zo permanent immobiliseren zoals in Taba et al.(2021).

3.2 Materiaaleigenschappen

De materiaaleigenschappen zijn een essentieel aspect van de zetstenen zoals nu toegepast in waterkeringen. De zetsteen van baggerspecie heeft variërende eigenschappen afhankelijk van het type baggerspecie in een project. De meest belangrijke materiaaleigenschappen, zoals getest bij het voorbeeldproject Pilot Hansweert zijn opgesomd en vergeleken met een typische zetsteen, namelijk: Basalton (tabel 3-2):

Tabel 3-2 Materiaaleigenschappen van zetsteen van baggerspecie naast Basalton

| Materiaal | Cilinderdruksterkte na 56 dagen | Buigsterkte na 56 dagen | Dichtheid | Verwachte levensduur | Afmeting / vorm | Milieu-impact [MKI] | Structuur |
|---|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|---------------------|-----------|
| Zetsteen van Baggerspecie Pilot Hansweert | 21-31 MPa | ±6.29 MPa | 2210-2350 kg/m ³ | >50 jaar | Vierkant | € 9.42 - €15.41 | Grof |
| Basalton | 30 MPa (J. Knapton, 2003) | ±2 MPa | 2365 [kg/m ³] | >50 jaar | Unieke vorm | ±€ 18.21 | Fijn |

De specifieke materiaaleigenschappen worden in de volgende subparagrafen verder behandeld.

3.2.1 Druk- en buigsterkte

De druk en buigsterkte zijn eigenschappen die bij regulier beton min of meer vaststaan. Voor zetsteen zoals Basalton wordt vaak betonsterkte C30/37 gebruikt. Dit garandeert een bepaalde levensduur en functionaliteit van het materiaal.

Zetsteen van baggerspecie (figuur 3-2) kan niet op dezelfde manier ingedeeld worden als regulier beton (M. Klein Breteler 2023, persoonlijke communicatie, 16 Feb.). Tabel 3-1 laat al zien dat de verhouding druk- en buigsterkte ($\pm 4:1$) verschilt ten opzichte van beton ($\pm 15:1$). Ook omschrijft Ekkelenkamp et al. (2022) dat de cilinderdruksterkte en kubusdruksterkte nauwelijks lijken te verschillen (1:1) bij een zetsteen van baggerspecie terwijl dit bij beton een verhouding 30:37 is. Dit laat zien dat we hier met een ander materiaal met andere eigenschappen te maken hebben. De geldende rekenregels (zoals bijvoorbeeld beschreven in NEN 7024-2 gelden niet voor dit materiaal.



Figuur 3-2 Cilinder van GEOWALL®-zetsteen

Bij de zetsteen van baggerspecie zijn de druk- en buigsterkte waarden niet zo constant als bij beton. Zoals te zien in tabel 3-2 is er een variatie van bijna 33%. Beton C30/37 heeft een variatie van maximaal 16% (bron: IS-456). Ook zal het type baggerspecie en de hoeveelheid ook telkens invloed hebben op de absolute en relatieve waarde voor druk- en buigsterkte. Het gehalte aan baggerspecie en cement heeft invloed op de mechanische eigenschappen van het materiaal.

3.2.2 Duurzaamheid/levensduur

Levensduur van zetsteen wordt in de normen onderverdeeld in verschillende categorieën (tabel 3-3). Voor betonproducten in Nederland is aantasting door vries/dooi een belangrijke categorie en bepaalt voor een groot gedeelte de levensduur van het materiaal.

Tabel 3-3 Overzicht van levensduureisen in relatie tot de eigenschappen van baggerspecie

| Materiaal | Mechanische belasting | Biologische aantasting | Chemische aantasting | Aantasting door vorst/dooi | UV straling |
|---|-----------------------|--|----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Zetsteen van baggerspecie Pilot Hansweert | >50 jaar (veld) | Geen schimmelgroei* Geensignificante aantasting door bacteriën* | n.n.t.b. | >50 jaar (lab) | Geen significante aantasting* |

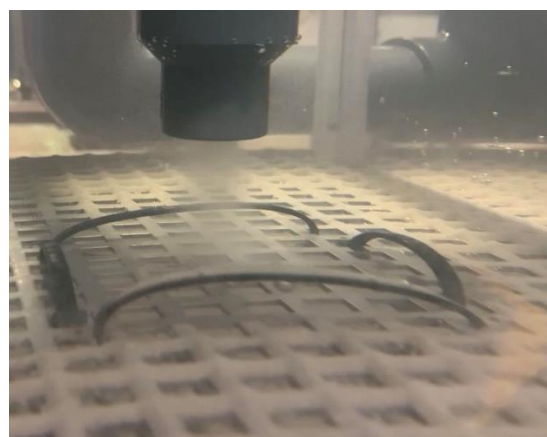
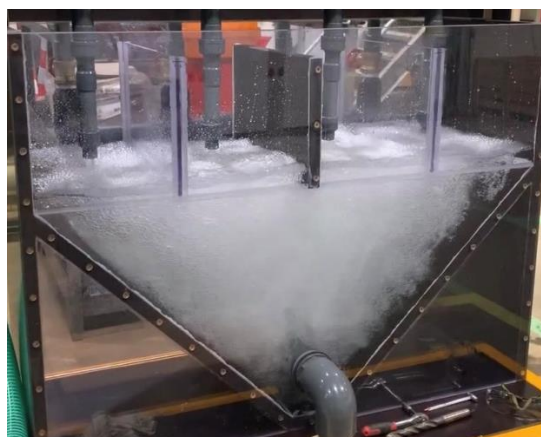
* Expert judgement; eerder getest bij een andere GEOWALL®-toepassing

Zetsteen van baggerspecie is specifiek in de pilot Hansweert getest op aantasting door vries-dooi in labcondities, waar het geen gebreken laat zien na simulaties overeenkomend met 50 jaar vries-dooi cycli. Aangezien de zetsteen in de praktijk betere eigenschappen laat zien dan in het lab, is de levensduur bepaald door vries-dooi tenminste 50 jaar.

In de toekomst zal de levensduur op basis van alle eisencategorieën van NEN-7024 beschouwd worden. Dit zal in de labcondities extern uitgevoerd worden voor één of meerdere recepten om een onafhankelijke inschatting te krijgen en de invloed te bepalen van een receptuurverandering. Het organische stof in baggerspecie heeft bijvoorbeeld een negatieve invloed op vriesdooi. Zodoende kan in de toekomst de levensduur gerelateerd worden aan bijv. de druksterkte en het baggertype en dient dit in sommige gevallen niet herhaald te worden.

3.2.3 Erosiegevoeligheid

Een voorbeeldsample vanuit het project Hansweert is in het laboratorium getest onder een sedimentstroom gedurende in totaal 4 maanden. Vanuit deze test en de mechanische eigenschappen van het materiaal, is het te verwachten dat zetsteen van baggerspecie, net als beton, weinig tot geen erosie zal vertonen in de praktijk.



Figuur 3-3 Foto's van lopende erosietesten in het NETICS-laboratorium

Naast de materiaaleigenschappen speelt ook de vormgeving een rol bij de bestendigheid tegen erosie. Wanneer voor de doorontwikkeling van de zetsteen van baggerspecie een bestaande vorm gekozen wordt, is de vorm al geoptimaliseerd voor het voorkomen van significante erosieve effecten.

3.2.4 Dichtheid/massa

De zetsteen van baggerspecie heeft bij de Pilot Hansweert een dichtheid van 2210 tot 2350 kg/m³. Het verschil zit hem in de diversiteit van het baggerspecie, maar ook de innovativiteit van het perssysteem en zo de compactiegraad. De materiaalsamenstelling is zo te kiezen dat uiteindelijk ook dichtheden van zwaarder beton (2350-2600 kg/m³) of licht beton (<2000 kg/m³) mogelijk zijn zonder verlies aan functionele eigenschappen. Denk aan het toevoegen van zware grindfracties of lichte vezelwapening.

In de toekomst kan het product zo ontworpen worden dat de dichtheid voldoet aan de specifieke eisen van het ontwerp. Een lichte uitvoering heeft als voordeel dat er per kubieke meter minder cement nodig is, een zwaardere uitvoering geeft meer stabiliteit aan de constructie. Het maken van een maatwerk materiaalsamenstelling is iets dat per type baggerspecie hoe dan ook nodig is, en geeft als voordeel dat alle andere eigenschappen ook per keer in te regelen zijn.

3.2.5 Oppervlak

De structuur van zetsteen van baggerspecie is anders dan regulier beton (figuur 3-4). Het persen van een 'droge' grondmix ten opzichte van het vloeibaar gieten van beton geeft een ruwere structuur aan de buitenkant. De GEOWALL®-technologie biedt tevens de mogelijkheid om de korrelverdeling aan te passen en de structuur nog grover te maken.

In de toekomst kan de GEOWALL®-technologie ook uitkomst bieden voor het maken van kunstmatig reliëf voor het verruwen van het oppervlak, door het meepersen van verschillende oppervlaktestructuren (hoofdstuk 3.5).



Figuur 3-4 Structuur en oppervlakte van zetsteen van baggerspecie Pilot Hansweert

3.2.6 Uitlooggedrag

Baggerspecie is vaak licht of sterk vervuild met verschillende toxische verbindingen, zoals zware metalen, minerale oliën of PFAS. Besluit bodemkwaliteit (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke ordening en milieubeheer, 2007) staat het toe om specie met categorie "altijd toepasbaar", "wonen" en "industrie" (mits uit dezelfde watergang) toe te passen op land. Zodoende kan baggerspecie zonder additionele uitloogtesten toegepast worden in een vormgegeven bouwstof.

Uitloging van eventuele verontreinigingen, ongeacht de chemische kwaliteitsklasse, is een complex onderdeel. Beton, zoals gecertificeerd loogt bepaalde basische chemicaliën uit (Rudnov & Belyakov, 2019). Zetsteen van baggerspecie zal ook dezelfde stoffen uitloggen wanneer cement wordt gebruikt in deze samenstelling. Daarnaast geeft het gebruik van baggerspecie, ongeacht de chemische kwaliteitsklasse, het risico dat er toxische verbindingen los kunnen komen. In literatuur is meerdere keren aangetoond dat de meeste toxische verbindingen geïmmobiliseerd worden door het samendrukken en binden van het materiaal (Taha, et al., 2021; Liang et al., 2022), zelfs voor sediment (Sun et al., 2022). Echter, sommige organische verbindingen kunnen ervoor zorgen dat er meer zware metalen loskomen (Todaro et al., 2020). Zodoende zal voor het voorkomen van uitloging bij het gebruik van verontreinigd sediment in de praktijk altijd maatwerk nodig zijn.

3.3 Vorm en afmetingen

De zetsteen van baggerspecie is dusdanig ontworpen zodat het productieproces is geoptimaliseerd op eenvoud en robuustheid. Dit betekent dat het product een vierkante vorm heeft van 50x50x50cm. De zetsteen die tegenwoordig veel wordt toegepast komt in verschillende vormen en maten. Vrijwel alle zetstenen zijn zodanig ontworpen dat ze door hun vorm en afmeting maatgevende hydraulische belastingen kunnen weerstaan en zodoende voldoen aan de geldende technische normen. In principe dient iedere nieuwe vorm een test in de golfgoot van Deltares (Deltagoot) te ondergaan.

De toekomstige zetsteen van baggerspecie zal ook een efficiënte en zo nodig hernieuwde vorm krijgen om zo breder toegepast te kunnen worden in verschillende situaties en ontwerpen. Daarnaast wordt er zo beter aangesloten bij de geldende technische eisen. In de rapportage zetsteen van baggerspecie (Ekkelenkamp et al., 2023) is een vergelijking gemaakt tussen de verschillende vormen op de markt en de praktische mogelijkheid om de GEOWALL®-zetsteen ook als zodanig te produceren. Hier is geconcludeerd dat het pers-proces de gelimiteerde mogelijkheid geeft om verschillende vormen en maten te genereren, mits dit met een persende beweging mogelijk is. Relatief regelmatige en/of simpele vormen zoals Basalton, voldoen aan de mogelijkheden. De precieze vorm- en afmetingen worden dan overgenomen. Meer afwijkende vormen met bijvoorbeeld nokken en verbindingen onderling zijn ingewikkelder en daarom qua haalbaarheid nog niet onderzocht.

De hoogte van de zetsteen wordt bepaald door de ontwerphoogte die voortkomt uit de eisen vanuit het specifieke project. De zetsteen van baggerspecie heeft uitgewezen vergelijkbare mechanische eigenschappen te hebben als regulier beton. Zodoende zijn er geen beperkingen aan de hoogte bij de uitvoering. Het persproces laat toe om elementen te produceren van ongeveer 10cm t/m 60cm dik. De compactieratio van de baggerspecie is hierbij essentieel en moet vooraf goed worden onderzocht.

In het geval van zetsteen van baggerspecie is er nog een ander aspect dat een rol speelt bij de keuze van de vorm en afmetingen ten opzichte van beton. In het geval van gegoten beton wordt de prijs met name bepaald door de grondstofkosten. Bij zetsteen van baggerspecie, zoals eerder omschreven, bepaald het productieproces aanzienlijk meer de totaalkosten en zijn de grondstoffen in verhouding beduidend goedkoper. Een element van 40cm persen geeft minimale extra kosten ten opzichte van een element van 30cm dik. Zodoende zou het zo kunnen zijn dat de opdrachtgever zou willen kiezen voor een dikker ontwerp voor de zetsteen van bagger, zodat er relatief meer baggerspecie hergebruikt kan worden. Sterker nog, een zetsteen van baggerspecie zou vanuit milieukostenoogpunt eventueel een lagere sterkte- en levensduureis mee kunnen krijgen in ruil voor een dikkere uitvoering die enige slijtage zou mogen hebben. Dit soort afwegingen, worden later in de handreiking uitgebreid besproken.

3.4 Milieuscore

Zetsteen van baggerspecie is mede ontwikkeld om een significante reductie te verwezenlijken in de milieu-impact ten opzichte van beton. Tijdens de pilot Hansweert, is door een onafhankelijke partij (Aveco de Bondt; Van Aspert & Verhulsdonck, 2022) een LCA uitgevoerd van het basisrecept. Het basisrecept is later aangepast en zodoende is ook de LCA aangepast. De reden voor aanpassing was het verhogen van de druksterkte. De resultaten staan in de tabel hieronder weergegeven (tabel 3-4):

| Fase | Pilot Hansweert versterkt recept | Basalton & Beton C30/37 (AVECO) | Pilot basisrecept (AVECO) |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| A1 Winning grondstoffen | € 9.78 | € 13.93 | € 5.75 |
| A2 Transport naar productielocatie | € 3.46 | | € 3.80 |
| A3 Productie | € 0.86 | | € 0.86 |
| A4 Transport naar projectlocatie | € 0.23 | € 3.19 | € 0.22 |
| A5 Realisatie | € 1.09 | € 1.09 | € 0.60 |
| | € 15.41 | € 18.21 | € 11.23 |

Tabel 3-4 Overzicht milieuscore van de zetsteen bij de pilot Hansweert vergeleken met Basalton per m³ materiaal.

De eerste versie van de Hansweert receptuur heeft een lagere MKI-score dan Basalton uit Van Aspert & Verhulsdonck, 2022. Per m³ zetsteen kan € 2.80 bespaard worden op de milieu-impact. Ten opzichte van Basalton geeft het uiteindelijk toegepaste recept (versterkt) een reductie van 15%. Hierin is nog niet meegenomen dat er verder transport/ verwerking van baggerspecie voorkomen wordt, er koolstof in de vorm van baggerspecie vast wordt gelegd en er groene stroom gebruikt kan worden voor de pers.

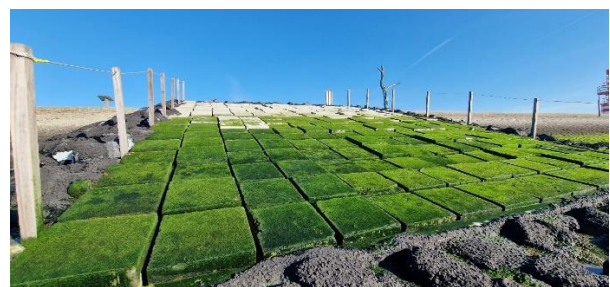
De milieubesparing bij zetsteen van baggerspecie zit hem vooral in de reductie van het gebruik van primaire grondstoffen zoals zand, grind en cement (fase A1). Ook is er minder transport benodigd van toeslagmateriaal. Uit de vergelijking met Basalton is op te maken dat het totale transport (fase A2 & fase A4) voor Basalton qua milieukosten lager ligt dan zetsteen uit Hansweert, terwijl zetsteen van baggerspecie op het depot en naast de plaatsingslocatie is geproduceerd. Dit komt doordat transport hier meegenomen is in Fase A1 van Basalton. (Ekkelenkamp et al., 2023)

De uitkomsten uit het labonderzoek zoals omschreven in Ekkelenkamp et al., 2023, tonen aan dat er met binder alsnog voldaan kan worden aan de geldende functie-eisen vanuit de geldende ontwerp- en rekenregels. Een verhoging van het percentage baggerspecie van 35% naar 50% zou i.v.m. een geoptimaliseerde materiaalsamenstelling voor verbetering van een aantal eigenschappen zorgen. Vanuit het onderzoek van Aveco de Bondt kan naar verwachting zeker tot 50% in de MKI-score bespaard worden per m³ zetsteen van baggerspecie ten opzichte van regulier zetsteen zoals Basalton. Een optimalisatie door focus op functie en niet op materiaaleigenschappen in relatie tot betonnen zetstenen zal mogelijk resulteren in een gunstigere milieuscore. Er zal namelijk minder sterkte en dus binder nodig zijn om toch aan de functie te voldoen. In die gevallen dient er aanvullend (praktijk)onderzoek uitgevoerd te worden naar de sterkte van de losse zetsteen elementen en het systeem als geheel.

Voor toekomstige projecten waarbij zetstenen uit baggerspecie voorgeschreven en geproduceerd worden zal op basis van de huidige bevindingen een gunstigere MKI waarde het toepassen van dit product aantrekkelijker maken. Als milieukosten worden meegerekend in de begroting van het project of bij aanbesteding, dan zal dit gunstig zijn voor de begrotingen. Het reduceren van inkoop en transport van primaire materialen zorgt voor een reductie in materiaalkosten hetgeen nog verder toeneemt bij verdere optimalisatie van de receptuur en hiermee een hoger percentage baggerspecie. Daarbij geldt de aanbeveling om tevens de besparingen door toepassen van baggerspecie (voorkomen van transport en stort) hierin mee te nemen.

3.5 Ecologische meerwaarde

In de pilot Hansweert is een vergelijking gemaakt tussen de ecologische meerwaarde van het materiaal zetsteen van baggerspecie ten opzichte van regulier beton. In het proefvak is te zien dat het materiaal nu al sterkte aantrekkingskracht op algen- en wiersoorten heeft en zo door het natuurlijke karakter een aantrekkelijk medium is voor ecologisch leven (figuur 3-5).

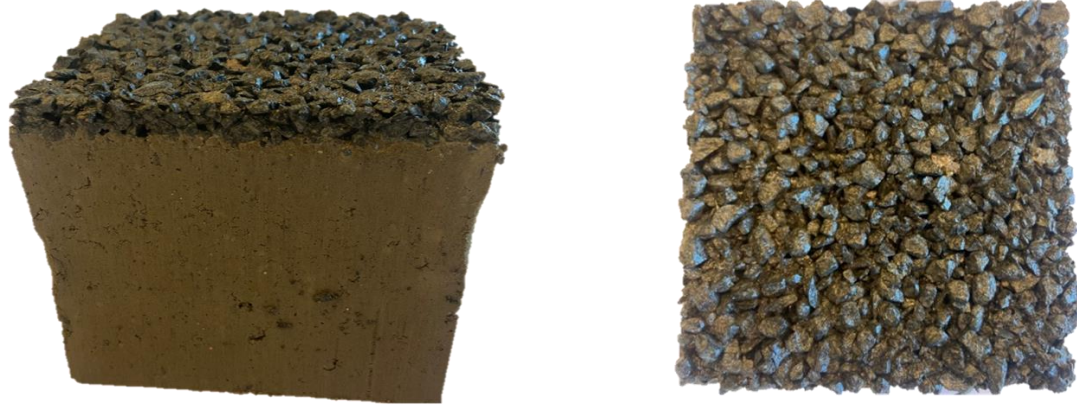


Figuur 3-5 Links: Proefvak Hansweert na 1 maand; Rechts: proefvak Hansweert na 6 maanden

Daarnaast zijn er in de toekomst nog aanpassingen mogelijk om het volledige ecologisch potentieel van het materiaal te benutten (Schoonees et al., 2019).

Ecotoppings

De GEOWALL[®]-techniek geeft een kans om een ecologische laag mee te persen. Boersema et al. (2017) geeft aan dat ecotoppings zoals lavakorrels, oesterschelpen of grind een optimale structuur bieden voor ecologisch leven. Dit extra materiaal kan relatief simpel geïntegreerd worden in de huidige productietechniek voor zetsteen van baggerspecie. Om de haalbaarheid op indicatief niveau voor deze handreiking te onderzoeken zijn enkele proefsamples met ecotoppings geproduceerd. (figuur 3-6).



Figuur 3-6 Ecologische structuur (ecotopping met lava stenen) op GEOWALL®-element (bron: NETICS)

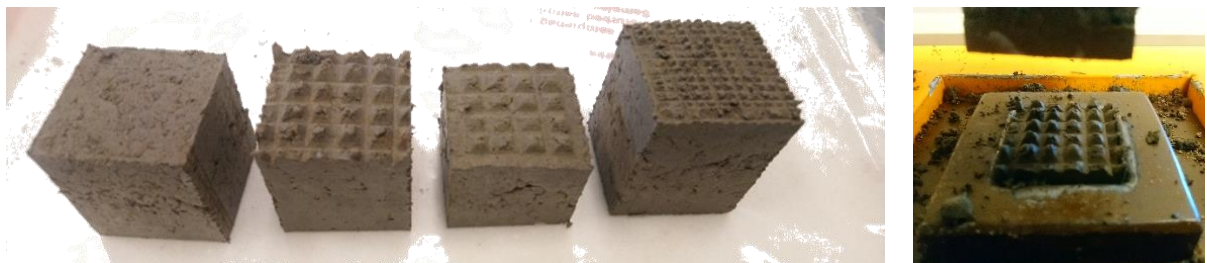
Microstructuur

Ook de microstructuur van het materiaal is essentieel om genoeg ruwheid te bieden om (aquatisch) ecologisch leven aan te trekken. In de pilot Hansweert is nu al te zien dat het ruwere oppervlak ten opzichte van beton extra algen en wieren aantrekt. NETICS heeft eerder aangetoond dat een ruwere structuur meegeperst kan worden bij het produceren van de zetstenen van baggerspecie (figuur 3-7). Het is aannemelijk dat speciale structuren aan de buitenkant significant meer divers leven aan zullen trekken (Boersema et al., 2017) (figuur 3-6).



Figuur 3-7 Ecologische optimalisaties in microstructuur van zetsteen (Boersma et al., 2017)

Om de haalbaarheid van deze microstructuren voor deze handreiking kwalitatief te onderzoeken zijn er enkele proefsamples geproduceerd met dergelijke structuren (figuur 3-8). Dit zou tevens in combinatie met blokken met ecotoppings kunnen worden onderzocht in toekomstige (pilot)projecten.



Figuur 3-8 Ecologische optimalisaties in microstructuur van GEOWALL® (bron: NETICS)

Holtes

Vanuit ecologisch perspectief zijn holtes aantrekkelijk voor de ontwikkeling van diverse soorten flora en fauna. Evans et al. (2016) onderbouwd dat grotere holtes (theekop-formaat) een additionele meerwaarde bieden aan ecologisch leven.

Na hoogwater zal er water in de grotere holtes blijven staan en zo bieden deze holtes een schuilplaats voor tal van organismen. Ook is het vasthouden van water goed tegen het uitdrogen van het materiaal. De zetsteen van baggerspecie kan dergelijke holtes simpel integreren in het persproces (figuur 3-8).



Figuur 3-9 Links: Theekop holtes in oeververdediging (Evans et al., 2016). Rechts: structuren in GEOWALL®-persproces

Bij toekomstige projecten waarbij de ecologische meerwaarde van de bekleding belangrijk is kan de zetsteen van baggerspecie ten opzichte van conventionele (betonnen) zetsteen het verschil maken doordat naast de micro- en macrostructuur ook gebiedseigen materiaal gebruikt wordt.

Materiaaleigenschappen

De materiaaleigenschappen hebben ook een belangrijk effect op het wel of niet aantrekken van flora en fauna. Zo geven kalkachtige schelpen in kustgebieden stoffen af die ervoor zorgen dat ecologisch leven liever vestigt (Barnigboye et al., 2020). Dezelfde stoffen komen vaak voor in gebiedseigen materiaal, zoals baggerspecie. De GEOWALL®-zetsteen van baggerspecie heeft daarbij, door het voorkomen van organische materialen in baggerspecie, als bijkomend voordeel dat het een lagere pH heeft dan beton en zo een gunstig effect heeft op vestiging van diversen organismen (Feng et al., 2023)

Momenteel wordt er binnen het ECODAMI project onderzocht wat de invloed is van de component baggerspecie en ontwikkeling van ecologische aquacultuur. Vanwege de goede verwerkbaarheid en grote toepasbaarheid is beton voor zetstenen nog het meest gebruikte materiaal. Beton heeft echter grote nadelen: 1) De cementindustrie is verantwoordelijk voor 5-7% van de wereldwijde CO₂-uitstoot en 2) op beton groeien door de suboptimale chemische samenstelling andere bentische gemeenschappen dan op natuurlijke riffen. Naast dat alternatieve materialen met een component baggerspecie een lagere CO₂ footprint hebben dan beton, kan op basis van huidig onderzoek verwacht worden dat zetstenen van baggerspecie ook ecologisch beter functioneren.

Steenslag

Tot slot zal er op basis van resultaten uit de literatuur significant ecologisch effect zijn wanneer er steenslag aanwezig is in het ontwerp van de steenzetting. Bij het integreren van een complexere vorm voor de zetsteen van baggerspecie, is het ook mogelijk om steenslag toe te voegen die niet uitspoelt. Holtes tussen de complexe vormen en de steenslag geeft een schuilplaats voor fauna. (Mindert de Vries, 2023, persoonlijke communicatie, 24 Feb). In dat geval moet nog wel de erosie van de blokken door steenslag, die door de golven over de het talud bewegen, worden onderzocht.

Zetsteen van baggerspecie leent zich hier naar verwachting heel goed voor. De complexere vormen zullen in de toekomst door de ontwikkeling van nieuwe mallen beschikbaar komen. Daarnaast komt uit de huidige onderzoeken naar voren dat de erosie door hydrodynamische in combinatie met steenslag beperkt blijft. Zodoende lijkt een combinatie van meerdere aanpassingen in vorm, structuur en steenslag een ecologische meerwaarde te kunnen geven aan de steenbekleding.

4 Economische haalbaarheid

4.1 Positionering op de markt

Zetsteen van baggerspecie heeft een unieke positie op de markt als het gaat om duurzaamheid. Het product geeft nu al een significante reductie op de milieu-impact en zal in de toekomst alleen nog maar meer als zodanig op de markt gezet kunnen worden.

Het product zetsteen van baggerspecie sluit perfect aan bij de huidige doelstellingen van lokale overheden waar gesteld wordt dat ze in 2050 100% circulair willen zijn. Daarnaast is baggerspecie één van de grotere reststromen in Nederland. Baggerspecie inzetten bij de productie van zetsteen slaat twee vliegen in één klap en is zo een mooi voorbeeld van een product dat circulariteit aanwakkert bij lokale overheden.



GEOWALL Solutions BV (GWS) is als onafhankelijke partij opgericht naar aanleiding van de eerste pilot in Hansweert. GWS heeft inmiddels ervaring met het inrichten van mobiele productielocaties en het optimaliseren van het productieproces. Daarnaast, is er veel uitvoerende kennis op het gebied van plaatsing van circulaire bouwelementen. Dit alles zorgt ervoor dat projecten worden gerealiseerd op een duurzame en veilige manier met de hoogste kwaliteitseisen

De komende jaren zal de GEOWALL®-zetsteen verder worden doorontwikkeld en wordt de productie opgeschaald met als doel om overheden een duurzamer en goedkoper alternatief te bieden voor de traditionele betonnen zetstenen. Dit proces zal altijd in nauwe samenwerking gaan met de eindgebruiker, in het geval van de GEOWALL®-zetsteen zal dit voornamelijk gaan om de waterschappen.

Aan het begin van het jaar hebben het HWBP (Innovatieversneller), GEOWALL Solutions en NETICS besloten om samen de zetsteen door te ontwikkelen van TRL 6 naar 9. In deze fase is het cruciaal dat er een waterschap is aangesloten om te kijken hoe dit product binnen toekomstige dijkversterkingen kan worden toegepast.

De verwachting is dat dit zal leiden tot het aantonen van de haalbaarheid en dat dit uiteindelijk resulteert in de toepasbaarheid van deze innovatie binnen dijkversterkingsprojecten in Nederland. Hiermee wordt een enorme stap gezet in het circulair bouwen van dijken.

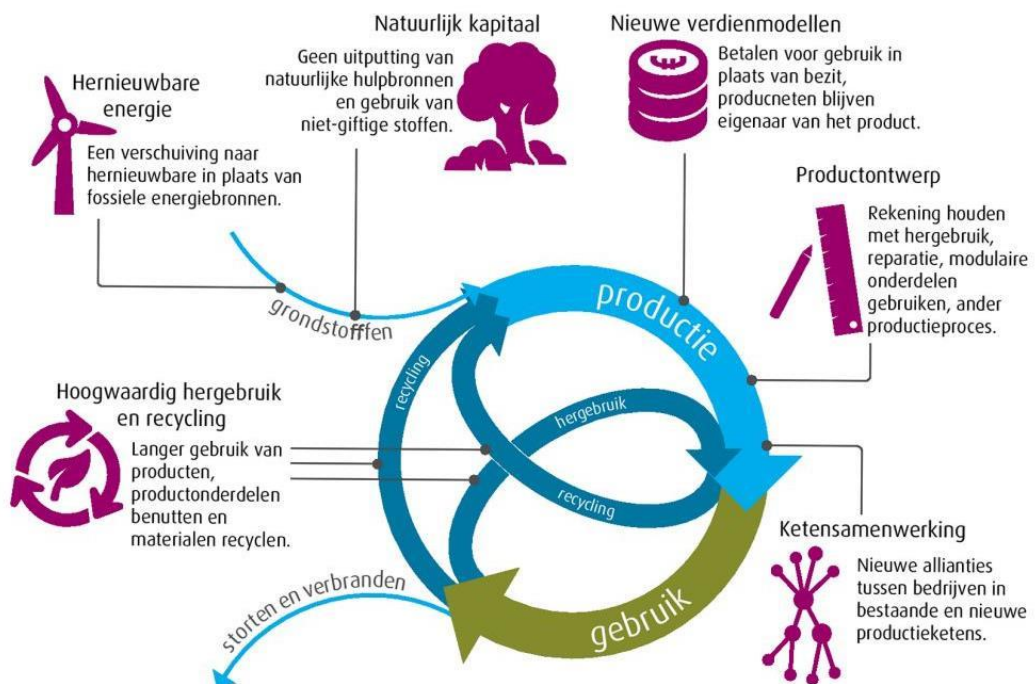
Daarnaast is het goed om te benadrukken dat alle opgedane kennis in dit project en toekomstige projecten met de GEOWALL®-zetsteen ten goede komen aan de verdere ontwikkeling van de NETICS GEOWALL®-technologie. Zoals men zich kan voorstellen zijn er verscheidene plekken in Nederland waar baggerspecie vrijkomt. Op deze plekken kunnen producten worden geproduceerd die lokaal nodig zijn, denk hierbij aan oeverbeschoeiing, grastegels, geluidschermen en rifblokken. Daarmee positioneert de zetsteen van baggerspecie zich tussen alternatieve betonproducten.

Al met al geeft dit gehele traject aan dat er voor circulair bouwen ook een integrale samenwerking nodig is tussen overheden, kennisinstituten, ingenieursbureaus en aannemers. Alleen als al deze partijen samenwerken is het mogelijk om de baggerketen circulair in te richten.

De rol van NETICS en GEOWALL Solutions zal dan ook niet alleen zijn als R&D/ ingenieurbureau en producent maar heeft ook als belangrijke taak om de verbinding te maken in de bouwketen.



Een mooi voorbeeld hiervan is CircSed dat door Deltares samen met NETICS is ontwikkeld om een inschatting te maken van de mate van circulariteit voor projecten van waterschappen.



Binnen het CircSed project is vastgesteld dat de GEOWALL®-techniek en het verbeteren van dijken, beiden gelden als circulaire toepassing voor baggerspecie in vergelijking tot bijv. het opslaan in een permanent of tijdelijk depot (NETICS & Deltares, 2022). In de toekomst kan deze tool ook ingezet worden om een concrete invulling te geven aan de circulariteitsdoelstellingen door het genereren van het label voor zetsteen van baggerspecie. Zodoende kan het product als zodanig in de markt gepositioneerd worden.

4.2 Business case

Naast de meerwaarde in circulariteit, biedt de zetsteen van baggerspecie een interessante toekomstige business case. In tabel 4-1 is de vergelijking met beton gemaakt voor de huidige en toekomstige zetsteen van baggerspecie.

Tabel 4-1 Indicatieve kosten per categorie en gegeven in Euro per m³ voor zetsteen van baggerspecie (Pilot Hansweert) en Basalton (bron: Waterschap Scheldestromen)

| Categorie | Zetsteen van baggerspecie (Pilot Hansweert) | Zetsteen van baggerspecie (toekomstige methodiek recept Pilot Hansweert) | Basalton (hoogte 50 cm) | Basalton (hoogte 30 cm) |
|--------------------------------|---|--|-------------------------|-------------------------|
| Inkoop en transport materialen | € 9 | € 6 | € 21 | |
| Productie | € 130 | € 18 | | € 13 |
| Winst afvoer baggerspecie | € -4 | € -4 | € 0 | € 0 |
| Totaal | € 135 | € 20 | € 22 | € 14 |

Het onderzoek in het kader van de pilot Hansweert richtte zich op het ontwikkelen van de innovatie TRL 2 naar TRL 6. Zodoende is er enkel op kleine schaal voor het eerst kennisgemaakt met de productietechniek, waardoor er een minimale productiesnelheid bereikt kon worden en relatief veel bijkomende kosten waren. Zodoende dient is de weergegeven prijs van 135 euro, waarbij de productie het voornaamste deel betreft, een indicatieve waarde.

Op basis van de eerste aanpassingen aan de GEOWALL® pers en wijze van productie zal in de toekomst de productietechniek geautomatiseerd worden en op grote schaal ingezet worden. Dit zal ervoor zorgen dat de productie- en arbeidskosten sterk reduceren en bijkomende kosten relatief laag gehouden worden. Vanaf dat moment, zoals bij beton het geval is, zijn de materiaalkosten grotendeels leidend. De zetsteen van baggerspecie geeft nu al een reductie in materiaalkosten, en zal in de toekomst met een geoptimaliseerde receptuur nog meer besparen op primaire toeslagmaterialen. Zodoende kan het product naar verwachting voor een prijs van ongeveer 20 euro per m³ op de markt gezet worden. Deze prijs is wel sterk afhankelijk van het type baggerspecie, de productielocatie en de ontwerpeisen. Hiervoor dient vooraf een goede inschatting gemaakt te worden volgens een integrale aanpak waarbij alle losse componenten in één systeem beschouwd worden; de Baggerfabriek®.

Tenslotte biedt het product het voordeel dat er bespaard wordt op de afvoer van baggerspecie. Mocht er in de toekomst verontreinigd baggerspecie gebruikt worden, kunnen besparingen zelfs nog verder oplopen tot 20 euro per m³ (Ekkelenkamp et al., 2023), wat zelfs een netto kostenbesparing zal opleveren ten opzichte van bijvoorbeeld Basalton. De voorwaarde is dan wel dat toxische stoffen tijdens en na einde levensduur niet meer vrijkomen (hoofdstuk 3.2.6).

Met de huidige ontwikkelingen op het gebied van klimaatverandering en uitputting van aardse grondstoffen zal er in de toekomst een vergrote kans op schaarste van primaire grondstoffen voor beton (zoals zand en grind). Hierdoor wordt de meerwaarde van het gebruik van baggerspecie steeds groter en daardoor de toekomstige business case van dit product steeds interessanter.

Samengevat; voor het opstellen van een businesscase waarbij zetsteen van baggerspecie als alternatieve oplossing wordt overwogen, zal er een integraal business model opgesteld moeten worden waarbij onder andere de stand der techniek, vraag uit de markt, ecologische en economische voordelen en ambitie van de (door)ontwikkeling van de innovatie zullen moeten worden uitgewerkt.

5 Toepassing, ontwerp en certificering

Bij het maken van een (definitief) ontwerp van een dijktracé, kunstwerk of ander type waterbouwkundige constructie waar zetsteen bij komt kijken, gelden reken- en ontwerpregels. Deze regels staan omschreven in de Handreiking Dijkbekledingen (Deltares 2015). Om vervolgens als gebruiker een innovatief product als zetsteen van baggerspecie op grote schaal toe te passen moet men rekening houden met de geldende regelgeving voor zetsteen (NEN normeringen). Daarnaast is het wenselijk dat het product in de toekomst gestandaardiseerd is en dus gecertificeerd wordt. Hiervoor is de BRL zetsteen van toepassing. Uiteindelijk zal het product dan ook in aanbestedingen voorgeschreven worden.

5.1 Toepassingsmogelijkheden

De zetstenen die in de civiele techniek gebruikt worden zijn gemaakt van natuursteen, beton of gebakken materialen zoals bakstenen. Voor deze materialen zijn in de loop der tijd tal van verschillende vormen bedacht met als doel hydrodynamische belastingen te doorstaan en beter op te vangen. Ontwerpen van waterkeringen waarbij de toplaag bestaat uit zetsteen zijn gebaseerd op tal van ontwerp- en rekenregels. Deze staan omschreven in diverse literatuur, onder andere over het ontwerp van (talud)bekledingen en waterkeringen. Daarnaast zijn er rekentools ontwikkeld waarmee dijkbekledingen ontworpen en doorgerekend kunnen worden.

Doordat de productietechniek van zetsteen van baggerspecie nog in ontwikkeling is, is het uitgangspunt voor zetsteen van baggerspecie op dit moment van schrijven dat de vorm en afmetingen van de zetsteen gebaseerd worden op conventionele (beton)blokken met rechte zijden en haakse hoeken. Te denken valt aan de volgende typen zetsteen:



Figuur 5-1 Voorbeelden van eenvoudige vormen zetsteen die gemaakt kunnen worden van baggerspecie blokken

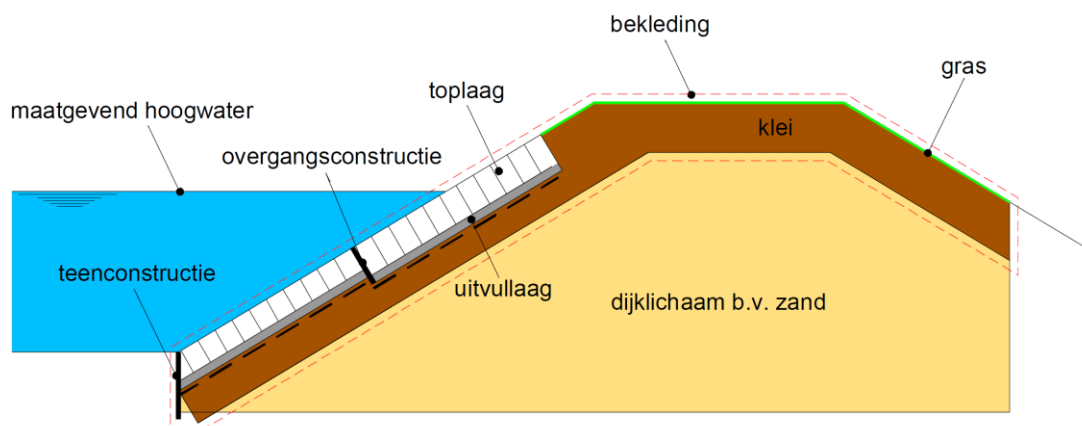
Gezien de ontwikkeling die zetsteen gedurende de vorige eeuw heeft meegemaakt lijken dergelijke vormen niet modern en gebruikelijk meer. Echter door het toepassen van baggerspecie als bouw materiaal worden ook 'oude' ontwerpen weer relevant waarbij de prikkel van het beperken van materiaal en slim omgaan met vorm juist het optimaal gebruiken van baggerspecie mogelijk beperken.

Ervaringen uit verschillende theoretische onderzoeken en de praktijktests wijzen echter uit dat aanpassingen in vorm en afmetingen leiden tot het beter functioneren van de zetsteen en als gevolg daarvan op significante besparingen op materiaalvolumes. In sommige gevallen is een halvering van het benodigde materiaal mogelijk. Dit betekent weliswaar een reductie in baggerspecie, maar ook in absolute volume aan benodigde binders. Ter overweging op de ontwikkeling van zetsteen van baggerspecie met andere vormen en afmetingen is er reeds nagedacht over alternatieve zetsteenblokken. Producten als Basalton® behoren hierbij tot de mogelijkheden.

Voor de ontwerpende partij die zetsteen van baggerspecie overweegt is het van belang te weten met welke bezwijkmechanismen er gerekend wordt en of de ontworpen bekleding voldoet aan de gestelde randvoorwaarden en eisen in combinatie met de optredende belastingen (steentoets). Het specifiek hiervoor gekozen toetsingskader wordt gebaseerd op de richtlijnen die gelden voor dijkbekledingen zetsteen van cementbeton en de rekentool Steentoets.

5.2 Omschrijving zetsteen als toplaag

Waterkeringen kunnen worden beschermd tegen hydrodynamische belastingen door toepassing van bekleding. Onder bekleding wordt verstaan het gehele pakket dat de kern van de waterkering of oever bedekt. Afhankelijk van het type kan de bekleding bestaan uit een toplaag, verschillende soorten tussenlagen en een onderlaag. (Handreiking Dijkbekleding, Deltares 2015)



Figuur 5-2 Schematisatie van bekleding met zetsteen (Handreiking Dijkbekleding, Deltares 2015)

Vanuit diverse wetgeving worden eisen aan bekledingen op een waterkering gesteld, bijvoorbeeld vanuit de Waterwet en het besluit Bodemkwaliteit. Eén van deze eisen is dat de dijkbekleding primair de veiligheid van de waterkering moet waarborgen, hetgeen harde eisen stelt aan bijvoorbeeld de erosiebestendigheid van een bekleding. Een dijkbeheerder kan een bekleding pas toepassen op een waterkering zodra de ontwikkelaar heeft aangetoond dat ook werkelijk voldaan wordt aan de eisen.

Veel waterkeringen vervullen ook secundaire functies zoals recreatief gebruik of verkeer. Deze secundaire functies leiden in het algemeen tot wensen. Als laatste dient er ook rekening te worden gehouden met aspecten die niet direct verband houden met de functie maar wel belangrijk zijn. Voorbeelden hiervan zijn beheer en onderhoud of duurzaamheid, wat leidt tot zogenaamde aspecteisen of wensen.

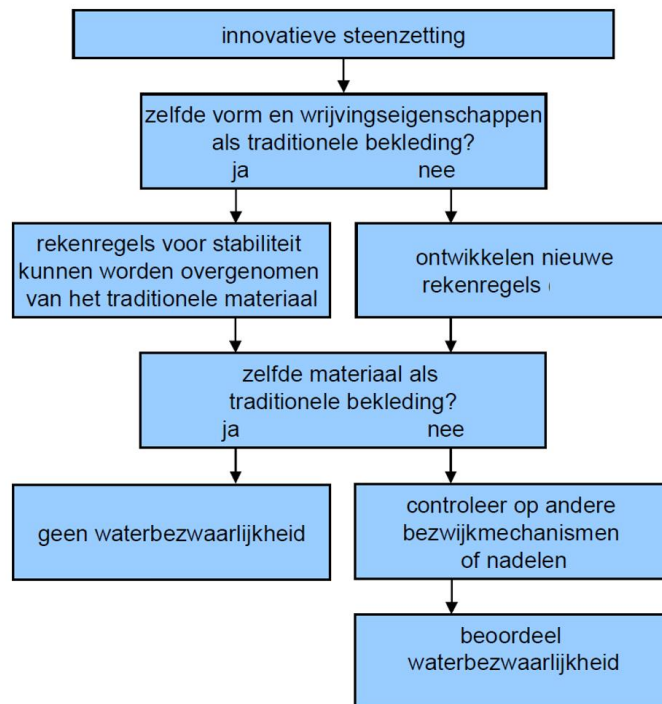
5.3 Stappenplan voor toetsing

Voor de ontwikkeling van de innovatie zetsteen van baggerspecie zijn er een aantal stappen die doorlopen worden voordat de zetsteen toegepast mag worden op de waterkering. In het kader van deze handreiking worden de toetsingscriteria benoemd zodat deze richting geven aan de te onderzoeken zetsteeneigenschappen tijdens het laboratoriumonderzoek.

Bij de uiteindelijke toetsing van het nieuwe type zetsteen zullen de volgende stappen kunnen worden doorlopen:

- Vaststellen toepassingsgebied;
- Controle op wettelijke eisen;
- Controle op overige aspecten;
- Dimensionering (toets- en ontwerpmethodede);
- Beoordeling bekleding door beheerders.

Vanuit dit stappenplan is het mogelijk om een stroomschema te maken dat gebruikt wordt bij het ontwikkelen van de zetsteen van bagger. Dit schema is hieronder weergegeven.



Figuur 5-3 Stroomschema voor ontwikkeling van innovatieve zetsteen (Handreiking Dijkbekleding, Deltares 2015)

De stappen die worden doorlopen zijn afhankelijk van de keuzes voor het type bekleding dat past bij de innovatie. Veelal zijn bepaalde stappen al doorlopen voor een vergelijkbaar product en is het verstandig qua typering aan te sluiten bij een bestaand product. Voor dit project is ervoor gekozen om in eerste instantie enkel te kiezen voor een innovatief materiaal, namelijk gestabiliseerde baggerspecie. Daardoor is het mogelijk om met dit innovatieve materiaal een innovatieve verbetering te realiseren op een bestaand product. Daardoor hoeven alleen de stappen die van toepassing zijn op het innovatieve gedeelte doorlopen te worden. Dit zijn product specifieke stappen zoals de dichtheden van het materiaal, de structuur en textuur, weersbestendigheid en milieuhygiënische kwaliteit van de zetsteen.

5.4 Afmetingen en sterkte van de zetsteen

De dimensies van het zetsteenblok vormen een belangrijke input parameter voor de berekening en toetsing van de zetsteen bekleding. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen losse en gekoppelde elementen. Een belangrijke maat is de dikte van de bekleding. Deze wordt getoetst tijdens het ontwerpen van de bekleding. De bekleding moet namelijk bestand zijn tegen de maatgevende belasting die hoort bij de beoogde toepassing.

Bij het ontwerpen van een waterkering worden namelijk de vereiste dimensies van de bekleding bepaald. Bij de ontwerpmethodode worden de vereiste dimensies met een bepaalde veiligheidsmarge bepaald en wordt de relatie tussen de sterkte van de bekleding en de belasting vastgesteld. Bij de toetsmethode, bijvoorbeeld via de rekentool Steentoets, dient duidelijk te zijn wat de sterkte van een bekleding is bij aanwezige dimensies. In de toetsmethode is de veiligheidsmarge doorgaans kleiner dan in de ontwerpmethodode. (Handreiking Dijkbekleding, Deltares 2015). Om te komen tot een ontwerp/toetsmethode zullen de volgende stappen worden doorlopen:

- 1 Het aantonen van de sterkte op basis van materiaalkundig onderzoek waarbij ontbrekende parameters bepaald worden. Hierdoor kan vervolgens worden aangetoond welke belastingen mogelijk zijn voor bepaalde dimensies van een bekleding;
- 2 Het opstellen van een rekenmethodiek op basis van de aangetoonde sterkte. In deze methodiek wordt de verhouding tussen belasting en sterkte vastgelegd. Doorgaans wordt de rekenmethodiek zo opgesteld dat bij een gegeven belasting de dimensies voor de bekleding bepaald worden waarbij de bekleding zeker niet zal bezwijken (conservatieve aanpak). De rekenmethodiek kan eenvoudig zijn. Bijvoorbeeld: een bekleding van minimaal 15 centimeter dikte voldoet voor een golfhoogte van 1 meter. De rekenmethodiek kan ook zeer uitgebreid zijn waarbij de benodigde dimensies afhangen van tal van parameters (golfperiode, golfhoogte, golfsteilheid, aantal golven, taludhelling, porositeit, dikte onderlaag, et cetera).

Vanuit de literatuur en geldende rekenregels worden er verschillende methoden voorgesteld om de sterkte van de zetsteen te bepalen. Er zijn verschillende sporen die leiden tot de gewenste aantoonbaarheid van sterkte:

- 1 Een vergelijking met bestaande systemen;
- 2 Het opstellen en uitvoeren van modelonderzoek;
- 3 Het aanleggen van proefvakken;
- 4 Afleiden van (ingewikkelde) rekenmethode;
- 5 Opstellen van numerieke modellen.

5.5 NEN-normering

Aangezien zetsteen van baggerspecie geen beton is en zich ook niet gedraagt als beton, is alleen de algemene NEN-norm voor zetsteen van toepassing (NEN 7024-1+C1) (tabel 5-1).

| Eis | Toelichting | Verificatiemethode | Status |
|-------------------------|--|----------------------------------|--------|
| Golfbelasting | Stabiliteit onder golfaanval | Steentoets (hfst. 5.2) | ✓ |
| Belasting door stroming | Stabiliteit onder stroming | Zie 4.2.2. | ✓ |
| Robuustheid | Belasting door onderhoudsmaterieel ten aanzien van beschadiging bij vervoer en opslag of bij plaatsing | Praktijkbeproeving | ~ |
| Uittredend water | Relatieve open oppervlakte | Berekening | ✓ |
| Openingen | Maximale opening | Berekening | ✓ |
| Flexibiliteit | Vorming op ondergrond | Materiaaleigenschap | n.v.t. |
| Duurzaamheid | Toepasselijke uitwerkingsnorm | Materiaaleigenschap (hfst. 3.2) | ~ |
| Afmetingen | Max. afwijkende afmeting | Steekproef productie (hfst. 5.4) | ~ |
| Natte dichtheid | Max. afwijkende afmeting | Steekproef productie (hfst. 5.4) | ~ |

Tabel 5-1 Overzicht van de eisen uit NEN 7024-1+C1, de verificatiemethode en de huidige verificatiestatus voor zetsteen van baggerspecie.

~ Nog niet getest, maar voldoet theoretisch aan de eisenstelling.

De zetsteen van baggerspecie kan al voldoen aan de golfbelastings- en stromingseisen door een bestaande vorm te kiezen, waarvoor reeds een stabiliteitsfactor is bepaald door middel van onderzoek met een grootschalige golfgoot. In hoofdstuk 5.2 is een voorbeeldberekening opgenomen die laat zien dat het product hieraan voldoet mits aangetoond wordt dat de wrijvingseigenschappen gelijk zijn aan die van beton.

De ervaringen bij de productie in de pilot Hansweert hebben uitgewezen dat er geen grote beschadigingen bij vervoer/opslag of plaatsing plaatsvinden. De belasting door onderhoudsmaterieel moet nog middels een praktijkbeproeving aangetoond worden, maar zal naar verwachting door de hoge druk- en buigsterkte geen problemen opleveren.

De diameter van de maximale openingen tussen de steenzettingen is afhankelijk van de vorm van de zetsteen. Wanneer een bestaande vorm gekozen wordt, zullen de openingen vastliggen en voldoen aan de normering.

De duurzaamheidseigenschappen van het zetsteen van baggerspecie zijn toegelicht in hoofdstuk 3.2.2 en behoeft maatwerk. De afwijkingen van de afmetingen en de natte dichtheid van het materiaal, moeten beheerst worden tijdens het productieproces en maken deel uit van de voorwaarde voor het ontwerpen van een bepaalde receptuur.

NEN-7024-2 beschrijft de technische eisen wanneer de zetsteen uit regulier beton zou bestaan (tabel 5-2). De zetsteen van baggerspecie is in de het labonderzoek en gedurende monitoring van de Pilot Hansweert (Ekkelenkamp et al., 2023) uitgebreid gespiegeld aan deze eisen.

Tabel 5-2 Overzicht van eisen uit NEN-7024-2, de verificatiemethode en verificatiestatus van zetsteen van baggerspecie.

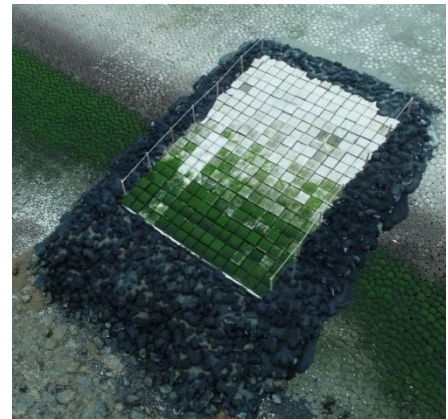
| Eis | Toelichting | Verificatiemethode | Status |
|---------------------------------------|---|--------------------|--------|
| Kubusdruksterkte | C30/37 | Steekproef | ✓* |
| Splijttreksterkte / buigsterkte | 3.6 MPa | Steekproef | ✓ |
| Wateropneming | <6% | Steekproef | ✓ |
| Vorstdooi-weerstand | VGI <1.5 kg/m ² VDg: <1.0 kg/m ² | Steekproef | ✓ |
| Textuur | Constante textuur | Steekproef | ✓ |
| Structuur | Geen structuurgebreken | Steekproef | ✓ |
| Kleur | Constante kleur | Steekproef | ✓ |

. *hoogste druksterkte voldoet

5.6 Ontwerp en rekenregels (steentoets)

De steentoets (Klein Breteler, M., 2014), zoals beschreven in NEN 7024-1+C1 is een middel om de stabiliteit van de steenzetting bij golfbelasting en belasting door stroming door te rekenen voor een specifiek ontwerp van een steenzetting. Deltares heeft een voorbeeldontwerp van de zetsteen van baggerspecie (figuur 5-1) doorgerekend, aannemende dat de wrijvingscoëfficiënt van het materiaal gelijk is aan dat van beton, en vergeleken met een steenzetting van Basalton.

Het ontwerp voor zetsteen van baggerspecie is gebaseerd op rechthoekige blokken (50x50cm) met een effectieve spleetbreedte van 11mm. Zetsteen van baggerspecie met een hoogte van 46cm is vergeleken met Basalton (dikte: 30cm).



Figuur 5-4 Bovenaanzicht van het proefvlak bij de pilot Hansweert

Uit de berekening blijkt dat beiden ontwerpen stabiel en dus vergelijkbaar zijn (M. Klein Breteler, 2023, persoonlijke communicatie, 17 feb). Zodoende is het nu al mogelijk, zonder het optimaliseren van de vorm en afmetingen, om een hydraulisch stabiele steenzetting van baggerspecie te produceren. Zodoende wordt in dit geval bij een hoogte van 46cm aan de NEN-norm-eis voor belasting door golven en stroming voldaan zodra aangetoond is dat de wrijvingscoëfficiënt gelijk of groter is dan beton.

5.7 Kwaliteitscontrole

Om aan te tonen dat het product zetsteen van baggerspecie voldoende kwaliteit heeft om constant aan de NEN-normen te voldoen, is een kwaliteitscontrole benodigd.

Door een constante monitoring van de eigenschappen van het inkomende baggerspecie (zoals watergehalte) en precieze afstelling van de equipment, kunnen de ingrediënten van de zetsteen van baggerspecie zo gemengd worden dat de uiteindelijke kwaliteit valt binnen de afwijkingruimte in de NEN-normering. De geoptimaliseerde methodiek ten opzichte van de eerste pilot in Hansweert, kan zo een voldoende constante afmeting (tabel 5-3) en dichtheid waarborgen. Dit wordt vervolgens gecontroleerd middels een steekproef beschreven in de NEN-norm.

Tabel 5-3 Aantal te beproeven zetstenen per beproeving (bron: NEN-7024-1)

| Eigenschappen | Paragraaf | Aantal zetstenen |
|---|---|------------------|
| Structuur | 5.2.1 | Partij |
| Textuur | 5.2.1 | Partij |
| Kleur | 5.2.2 | Partij |
| Hechtsterkte van de deklaag | 5.2.3 | 3 |
| Druksterkte | 5.2.4 | 5 |
| Splijttreksterkte (indien nodig; zie 4.6.1) | 5.2.5 | 5 |
| Wateropneming | 5.2.6.1 | 5 |
| Vorst-/dooibestandheid | 5.2.6.2 | 3 |
| Afmetingen | 5.2.7 | 5 |
| Natte dichtheid | 5.3.4 (NEN 7024-1) en 5.2.8 van deze norm | 5 |

5.8 Certificering (BRL)

Een projectoverkoepelende kwaliteitscontrole van de zetsteen van beton wordt voorgeschreven door BRL 9080 voor cementbeton. Het eerste gedeelte van deze BRL kan ook toegepast worden voor zetsteen van baggerspecie. Wanneer voldaan wordt aan BRL, kan een Komo[®]-productcertificaat verkregen worden. Voor het voldoen van BRL 9080 worden 2 tot 5 bezoeken gebracht. Tijdens het bezoek zullen alle relevante eisen uit de NEN-norm nagegaan worden zoals beschreven in tabel 5-4.

Tabel 5-4 Overzicht van de controle van de NEN-normen uit BRL 9080

| NEN 7024-1 Zetsteen- Algemene eisen | | | | | | |
|--|--------|------|----------|---|--|---------------------------|
| Item | Norm | Eis | Bepaling | Eis | Gebruiks- categorie I | Gebruiks- categorie II |
| Referentiemonster | 7024-1 | 4.1 | | 5 zetstenen samengesteld tussen afnemer en fabrikant. | Toepassing ongeacht gebruikscategorie | |
| Structuur/Textuur | 7024-1 | 4.1 | 4.1 | Bij twijfel toetsen aan referentiemonster. | | |
| Weerstand uittredend water | 7024-1 | 4.5 | 5.2.5 | Relatieve open oppervlakte van ten minste 0,5% | x | |
| Openingen | 7024-1 | 4.6 | 5.2.6 | Diameter van een cirkel tussen de opening van tegen elkaar geplaatste zetsteen moet < 50 mm bedragen. | x | |
| Flexibiliteit | 7024-1 | 4.7 | 5.2.7 | Afmeting losse zetsteen maximaal 1,5 meter. | x | x |
| Lengte | 7024-1 | 4.9 | 5.3.3 | Inidueel: L.nom. 5% of 2mm. (minst strenge criterium) | x | x |
| Breedte | 7024-1 | 4.9 | 5.3.3 | Inidueel: B.nom. 5% of 2mm. (minst strenge criterium) | x | x |
| Grootste hoogte | 7024-1 | 4.9 | 5.3.3 | Inidueel: H.nom. 5% of 2mm. H.nom.= $\geq \mu - 1,645\sigma$ (Alleen cat1) | x | x |
| Deklaag | 7024-1 | 4.9 | 5.3.3 | Deklaag nom. 10% of 2mm (minst strenge criterium) | x | x |
| Natte dichtheid | 7024-1 | 4.10 | 5.3.4 | Nd.nom.-2% en +6,5%. Nd.nom.= $\geq \mu - 1,645\sigma$ (Alleen cat1) | x | |

| NEN 7024-2 Zetsteen van cementbeton, zonder interlocking en zonder wapening | | | | | | |
|--|--------|-------|----------|---|--|--|
| Item | Norm | Eis | Bepaling | Eis | | |
| Referentiemonster | 7024-2 | 4.3.1 | | 5 zetstenen samengesteld tussen afnemer en fabrikant | | |
| Structuur | 7024-2 | 4.3.2 | 5.2.1 | Geen belangrijke afwijkingen t.o.v referentiemonster | | |
| Textuur | 7024-2 | 4.3.3 | 5.2.1 | Geen belangrijke afwijkingen t.o.v referentiemonster | | |
| Kleur | 7024-2 | 4.4 | 5.2.2 | Gelijkmatig van kleur. | | |
| Hechtsterkte | 7024-2 | 4.5 | 5.2.3 | $\geq 1,15$ MPa | | |
| Druksterkte | 7024-2 | 4.6.2 | 5.2.4 | C30/C37 | | |
| Splijttreksterkte | 7024-2 | 4.6.3 | 5.2.5 | NEN1338 (Facultatief) | | |
| Wateropneming | 7024-2 | 4.7.1 | 5.2.6.1 | Gem. $\leq 6\%$ (NEN-EN 1338:2003 artikel 5.3.2.2 Klasse 2) | | |
| Vorstdooi bestandheid | 7024-2 | 4.7.2 | 5.2.6.2 | $VD_i \leq 1,5 \text{ kg/m}^2$, $VD_g \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$. (NEN-EN 1338:2003 artikel 5.3.2.2 Klasse 3) Initieel per samenstelling. | | |
| Voetje | 7024-2 | 4.8 | 5.2.7 | $\leq 2\text{mm}$ | | |
| Vellingkant | 7024-2 | 4.8 | 5.2.7 | $7 \leq v \leq 10$ | | |
| Braam (breedte) | 7024-2 | 4.8 | 5.2.7 | $\leq 5\text{mm}$ | | |

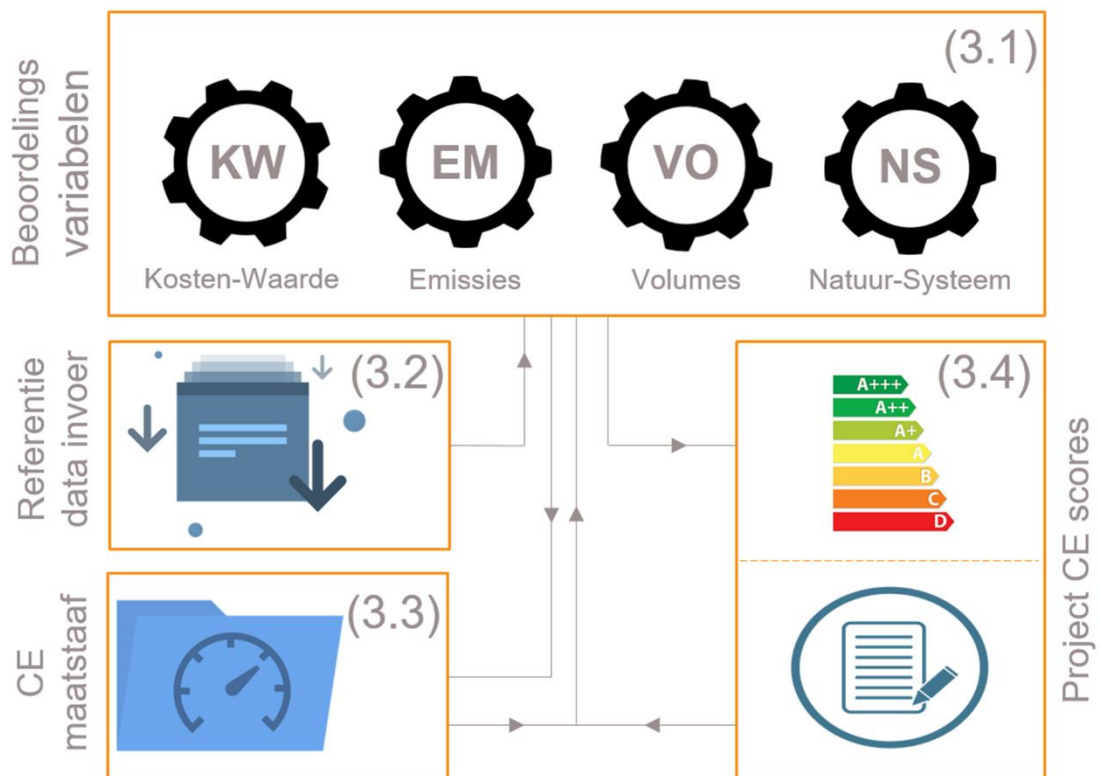
Het certificaat houdt niet direct rekening met een verschil in samenstelling van de materialen per project of productieslag. Bij een verandering van het type baggerspecie en daardoor de samenstelling van de zetsteen, kunnen bepaalde materiaaleigenschappen veranderen. Zo zal de natte dichtheid en druksterkte kunnen veranderen per type baggerspecie of de vries-dooi bestendigheid anders kunnen zijn. De NEN 7024-1 of BRL-9080 schrijft geen hands-on methode voor om een dynamisch product, zoals zetsteen van baggerspecie te certificeren. Omgaan met variaties in de materiaalsamenstelling en -eigenschappen dient daarom te gebeuren door te toetsen aan de functionele eisen uit de algemene norm (NEN 7024-1)

De eisen uit de NEN-7024-2 Zetsteen van cementbeton zijn dus niet direct van toepassing op certificering van de zetsteen van baggerspecie. Er dient wel rekening mee gehouden te worden dat de levensduur en stabiliteit van de steenzetting voldoende is. Dit kan in het geval van zetsteen van baggerspecie aangetoond worden middels labtesten op de maatgevende materiaaleigenschappen (hoofdstuk 3) die voor elk type baggerspecie en verschillend recept indicatief herhaald zullen worden.

Kijkend naar NEN 7024-1 zijn alle eisen gebonden aan de ontwerpspecificaties en zodoende constant wanneer de vorm en afmetingen constant zijn. De afmetingen en dichtheid mogen beperkt afwijken, zolang de stabiliteit van de gehele steenzetting er niet onder te lijden heeft. Zodoende mag lokaal de natte dichtheid best hoger zijn dan de gehanteerde rekenwaarde. De lengte en breedte zijn door het malsysteem per definitie constant, de hoogte wordt in het productieproces gereguleerd door constante monitoring van het mengsel.

5.9 Inzet bij aanbestedingen

De zetsteen van baggerspecie heeft vanuit de eerste pilotresultaten een interessante meerwaarde kijkend naar de gunstige milieu-impact ten opzichte van regulier beton. Wanneer de opdrachtgever de zetsteen van baggerspecie wil voorschrijven dient rekening gehouden te worden met de eisen die gesteld worden aan het product. Hierbij is het essentieel om te realiseren dat zetsteen van baggerspecie beduidend anders is dan regulier beton; niet alleen kijkend naar de technische verschillen maar ook de business case/milieu-impact en ecologische meerwaarde. Zodoende kan de opdrachtgever zich afvragen of de NEN-7024-2 voor betonproducten van zetsteen wel van toepassing is én of dezelfde technische eisen worden gehanteerd.



Figuur 5-5 Opzet toetsingsinstrumentarium (CircSed 2022, NETICS)

6 Ontwikkelstappen

In de voorgaande hoofdstukken van deze handreiking is uitgebreid aandacht besteed aan de huidige stand van zaken van de zetsteen van baggerspecie en hetgeen mogelijk is in de toekomst; zowel technisch als economisch. De resterende vraag is nu wat er concreet voor nodig is om het product in de toekomst volledig in te zetten; wat zijn de resterende ontwikkelstappen? In tabel 6-1 zijn de ontwikkelstappen opgesomd en toegelicht.

Tabel 6-1 Overzicht van de te zetten ontwikkelstappen voor het product zetsteen van baggerspecie tot een grootschalig inzetbaar product (TRL 9) en de positionering in de handreiking

| Aspect | Ontwikkelstap | Hfst. |
|-----------------------------|--|-------|
| Materiaal-specificaties | Cementaandeel verkleinen door optimalisatie receptuur en productietechniek | 1 |
| | Vergroten aandeel baggerspecie en vervangen additieven met extra reststromen | |
| | Lange-termijn data verzamelen over sterkte, duurzaamheid, erosie en ecologische meerwaarde | 2 |
| | Additionele duurzaamheidstesten uitvoeren | |
| | Uitlogingstesten uitvoeren op zetsteen van verontreinigd/PFAS-houdende bagger | |
| | Doorontwikkelen van de vorm voor de zetsteen van baggerspecie (bijv. rechthoekig) | 3 |
| | Hoogte zetsteen afstemmen op de vorm | |
| | Bijkomende milieuvoordelen meenemen in milieuscore-berekening | 4 |
| | Verschillend ecologische oplossingen testen met zetsteen van baggerspecie | 5 |
| Economische haalbaarheid | Zetsteen van bagger positioneren als duurzaam alternatief voor beton | 1 |
| | Productieproces versnellen t.b.v. verbeteren van de business case | 2 |
| Toepassing en certificering | Baggerspecie betrekken in de NEN-norm | 1 |
| | Framework ontwikkelen voor kwaliteitshandhaving | 3 |
| | Certificering aanvragen bij de BRL | 4 |

7 Conclusie en aanbevelingen

De zetsteen van baggerspecie is middels een pilot uitgebreid in de praktijk getest. In de pilot Hansweert is niet alleen gekeken naar de eigenschappen van het materiaal, maar ook naar de productiemethodiek en de economische haalbaarheid.

Zetsteen van baggerspecie heeft een aantal grote voordelen ten opzichte van reguliere zetsteen van beton. Zo geeft het proefrecept bij Hansweert al een MKI-reductie van 15% per m³ zetsteen ten opzichte van bijvoorbeeld Basalton en biedt de innovatie vele mogelijkheden voor het aantrekken van ecologisch leven op dit natuur-gebaseerde materiaal, bijvoorbeeld door ecologische structuren aan te brengen. Tegelijkertijd zijn de huidige specificaties zoals druksterkte, levensduur, dichtheid en erosiegevoeligheid vergelijkbaar met C30/37 beton en kan er bij een optimalisatie van het productieproces en de receptuur definitief aangetoond worden dat er constant wordt voldaan aan de normering.

Kijkend naar de mogelijke kosten van het product in de toekomst, valt er een grote besparing te realiseren op materiaalkosten, zeker als er een groter volume en lagere kwaliteit baggerspecie (her)gebruikt kan worden. Zetsteen van baggerspecie kan zodoende kostentechnisch concurreren met regulier betonnen zetsteen, zeker wanneer de productietechniek geoptimaliseerd is voor grootschalige levering.

In deze handreiking is een basis gelegd voor een aanpak voor het beoordelen van de algemene geschiktheid van het materiaal. Daarbij is een steentoets-berekening uitgevoerd, aannemende dat de wrijvingscoëfficiënt van het materiaal gelijk of groter is dan van beton. Hier komt naar voren dat het materiaal, zoals ontworpen voor de pilot Hansweert, onder een aantal aannames, nu al technisch geschikt is voor de functie als zetsteen in een steenzetting, dus in de huidige blokvorm.

Het is hierbij niet logisch om zetsteen van baggerspecie als beton te zien door het afwijkende technische en ecologische gedrag van het materiaal. Bij het gebruik van het product in aanbestedingen of het doorlopen van het certificeringstraject dient specifiek gekeken te worden naar de functionele eigenschappen en meerwaardes van het materiaal als onderdeel van een steenzetting. Dit betekent dat weliswaar de algemene NEN-normeringen gebruikt kan worden voor de toetsing van het product, maar dient er rekening gehouden moet worden met afwijkende eigenschappen telkens wanneer er ander baggerspecie gebruikt wordt. Daarbij is het vanuit milieuoogpunt raadzaam om te streven naar het gebruik van zoveel mogelijk baggerspecie en zo min mogelijk cement. Om dit te bereiken is een maatwerk aanpak nodig waarbij de ontwerpeisen functioneel beschouwd worden.

Aanbevolen toekomstig onderzoek focust zich op:

1. Het verbeteren van de receptuur door het verhogen van de fractie baggerspecie, en het verkleinen van het cementaandeel.
2. Het optimaliseren van het productieproces voor een gunstigere milieuscore en business case.
3. Het doorontwikkelen van de vorm en afmetingen van het product om nog beter binnen een eventueel ontwerp van steenzettingen te passen
4. Het doorlopen van het certificeringproces en het opstellen van een raamwerk voor het standaardiseren van het product binnen de geldende regelgeving en werkprocessen

Referenties

- Bamigboye, G. O., Okara, O., Bassey, D. E., Jolayemi, K. J., & Ajimalofin, D. (2020). The use of *Senilia senilis* seashells as a substitute for coarse aggregate in eco-friendly concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101811.
- Boersema M., Van Ooijen, T., Tangelder, M. & Vergouwen, S. (2017). Building for nature RAAK-PRO - Innovaties op dijken en vooroevers – Projectsamenvatting.
- Ekkelenkamp H.H.M, Pieterse J.J, Koster J & Brugman G. (2023). Eindrapportage zetsteen van baggerspecie: onderzoek en ontwikkeling van een proefvak met zetsteen gemaakt van baggerspecie.
- Evans, A.J., L.B. Firth, S.J. Hawkins, E.S. Morris, H. Goudge, and P.J. Moore. 2016. Drill-cored rock pools: An effective method of ecological enhancement on artificial structures. *Marine and Freshwater Research* 67 (1): 123–130. <https://doi.org/10.1071/MF14244>.
- Feng, Y., Yang, J., & Zhang, P. (2023). Effects of carbonation curing regimes on alkalinity of self-compacting concretes for marine artificial reef. *Construction and Building Materials*, 369, 130614.
- Klein Breteler, M. (2014). *Handleiding steentoets. Excel programma voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen*. Deltares. 1208045-009.
- Knapton, J. (2003). Ground bearing concrete slabs: specification, design, construction and behaviour. Thomas Telford.
- Liang, L., Zhang, J., Fang, P., & Suo, C. (2022). Study on Properties of Copper-Contaminated Soil Solidified by Solid Waste System Combined with Cement. *Sustainability*, 14(9), 5604.
- Ministerie van Volkshuisvestings, Ruimtelijke ordening en milieubeheer (2007), houdende regels voor de uitvoering van de kwaliteit van de bodem. *Staatscourant*, 247.
- NEN 7024-1+C1 (nl). (2015). Zetsteen – Deel 1: Algemene eisen. ICS 91.100.30: 93.160
- NETICS & Deltares. (2022). Circulair baggerheer, een toetsinginstrument om circulair om te gaan met regionale bagger. Fase II Handreiking.
- Rudnov, V. S., & Belyakov, V. A. (2019, December). Effective ways to reduce leaching and formation of efflorescence on structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 687, No. 2, p. 022025). IOP Publishing.
- Schipper S, Hövell M & Roosendaal J. (2021). LCA Rapportage categorie 3 data Nationale Milieudatabase. Hoofdstuk 52 Kust- en oeverwerken.
- Schoonees, T., Gijón Mancheño, A., Scheres, B., Bouma, T. J., Silva, R., Schlurmann, T., & Schüttrumpf, H. (2019). Hard structures for coastal protection, towards greener designs. *Estuaries and Coasts*, 42, 1709-1729.
- Sun, Y., Zhang, D., Tao, H., & Yang, Y. (2022). The Effects of Portland and Sulphoaluminate Cements Solidification/Stabilization on Semi-Dynamic Leaching of Heavy Metal from Contaminated Sediment. *Sustainability*, 14(9), 5681.
- Taha, Y., Benarchid, Y., & Benzaazoua, M. (2021). Environmental behavior of waste rocks based concrete: Leaching performance assessment. *Resources Policy*, 74, 101419.
- Todaro, F., De Gisi, S., & Notarnicola, M. (2020). Contaminated marine sediment stabilization/solidification treatment with cement/lime: leaching behaviour investigation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 21407-21415.
- Van Aspert, S & Verhulsdonck, B. (2022). Memo LCA quickscan Zetsteen uit bagger, versie 2.0
- Handreiking Dijkbekledingen. Deel 1: Algemeen. Deltares, 2015
- Handreiking Dijkbekledingen. Deel 2: Steenzettingen. Deltares, 2015