

EINDRAPPORTAGE ZETSTEEN VAN BAGGER

*Onderzoek en ontwikkeling van een proefvak
met zetsteen gemaakt van baggerspecie*

NP.2019.219.9.3 v3.1
augustus 2023

Eindrapportage Zetsteen van Baggerspecie

Onderzoek en ontwikkeling van een proefvak met
zetsteen gemaakt van baggerspecie

Auteurs H.H.M. Ekkelenkamp Msc. NETICS
J.J. Pieterse Msc.. Waterschap Scheldestromen
J. Koster MSc NETICS
T. van Doornik Msc. NETICS

Document nr. NP.2019.219.9.3

Datum augustus 2023

Consortium HWBP
Waterschap Scheldestromen
NETICS
Deltares

Pagina's 98

Document status Definitief

Versie v3.1

Copyright afbeeldingen

Cover Foto NETICS Proefvak na oplevering en start monitoring september 2022

Onder Officiële ingebruikname van de GEOWALL® pers samen met projectpartners



Inhoudsopgave

1	INLEIDING	7
1.1	ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE	8
1.2	BESCHIKBAARHEID BAGGERSPECIE	9
1.3	OMSCHRIJVING VAN DE PROEFLOCATIE	10
1.4	DOEL VAN HET ONDERZOEKSPROJECT	10
1.5	FASERING VAN HET ONDERZOEKSPROJECT	11
2	ONDERZOEKSKADER	13
2.1	DOELSTELLING	13
2.2	ONDERZOEKSMETHODEN	13
2.3	PROJECTFASES	13
2.4	ONDERZOEKSVRAGEN	14
3	FASE 1 - HAALBAARHEIDSONDERZOEK	18
3.1	GEOWALL®-TECHNOLOGIE	18
3.1.1	Stand van de techniek bij aanvang pilot	18
3.1.2	Stabilisatie van baggerspecie	19
3.1.3	Fysische stabilisatie	20
3.1.4	Scheikundige stabilisatie	21
3.1.5	Mechanische stabilisatie	22
3.1.6	Voorbeelden van toepassingen	23
3.1.7	Uitvoering met baggerfabriek	25
3.2	RECEPTONDERZOEK	26
3.2.1	Selectie en analyse van de baggerspecie	27
3.2.2	Fysische stabilisatie van de geselecteerde baggerspecie	28
3.2.3	Scheikundige stabilisatie van de geselecteerde baggerspecie	29
3.2.4	Mechanische stabilisatie van de geselecteerde baggerspecie	30
3.2.5	Uithardingsproces van de laboratorium samples	32
3.2.6	Vaststellen van het meest geschikte recept	32
3.2.7	Verbetering van het recept t.b.v. duurzaamheid	33
3.3	LABORATORIUMONDERZOEK	34
3.3.1	Productie van proefelementen	35
3.3.2	Dichtheid en afmetingen	36
3.3.3	Structuur, textuur en vochtdoorlatendheid	37
3.3.4	Hardheid en sterktes	37
3.3.5	Buigsterktes	39
3.3.6	Erosiebestendigheid en wateropname	40
3.3.7	Effect van weersinvloeden	41
3.3.8	Optimalisatie receptuur	42
3.4	ONDERZOEK ECOLOGIE EN DUURZAAMHEID	44
3.4.1	Initiële situatie ter plaatse van het proefvak	44
3.4.2	Proefopstellingen	47
3.4.3	Theoretisch kader ecologie	53
3.4.4	Meetresultaten jaar 1	54

4	FASE II – TECHNISCH ONTWERP ZETSTEEN EN BUSINESS	57
4.1	TECHNISCH ONTWERP VAN HET PROEFVAK	57
4.2	ONTWIKKELING UITVOERINGSMETHODIEK	59
4.2.1	Selectie van geschikte pilotlocatie	59
4.2.2	Productie van zetsteen van baggerspecie	60
4.2.3	Aanleg van het proefvak	62
4.3	LEVENSICYCLUSANALYSE (LCA)	67
4.3.1	Recepten zetsteen	67
4.3.2	Productie materialen	68
4.3.3	Transport materialen	69
4.3.4	Productie zetsteen van baggerspecie	69
4.3.5	Transport zetsteen van baggerspecie	70
4.3.6	Plaatsing van zetsteen	70
4.3.7	Resultaten MKI berekening	71
4.3.8	Analyse van de resultaten	72
4.3.9	Mogelijkheden voor optimalisatie	72
4.4	KOSTENANALYSE	73
4.4.1	Huidige uitvoeringsmethodiek	73
4.4.2	Toekomstige uitvoeringsmethodiek	74
4.4.3	Basalton	74
4.4.4	Baggerspecie versus Basalton	75
4.4.5	Invloed van receptuur	76
4.4.6	Besparing met gebruik baggerspecie	77
4.4.7	Transport van grondstoffen	78
4.4.8	Productie van de zetsteenblokken	78
4.4.9	Transport en plaatsing van de zetsteenblokken	79
4.4.10	De business case voor Zetsteen van Baggerspecie	80
5	FASE III – PRAKTIJKPILOT	81
5.1	UITVOERING	81
5.1.1	Foto's uitvoering en resultaten	81
5.1.2	Evaluatie uitvoering	82
5.1.3	Mogelijkheden voor productie andere vormen en maten	83
5.1.4	Monitoring van het proefvak	85
5.1.5	Monitoringsresultaten	86
6	DISCUSSIE	90
6.1	HAALBAARHEID	90
6.2	MILIEU EN ECOLOGIE	93
6.3	KOSTEN-BATEN ANALYSE	94
6.4	UITVOERBAARHEID	95
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	96
8	LITERATUUR EN REFERENTIES	98

Figuren en Tabellen

FIGUUR 1 BOVENAANZICHT VAN HANSWEERT, ZEELAND	7
FIGUUR 2 KOPPELEN VAN DE BOUW- EN BAGGERKETENS TOT EEN NIEUWE CIRCULAIRE KETEN	8
FIGUUR 3 KAART PROJECTLOCATIE HANSWEERT	9
FIGUUR 4 AANGEWZEN LOCATIE VOOR HET PROEFVAK	10
FIGUUR 5 EINDRESULTAAT VAN DE PRODUCTIE VAN ZETSTEENBLOKKEN VAN BAGGERSPECIE	12
FIGUUR 6 ONTWIKKELING GEOWALL® BLOKKEN DOOR DE TIJD	18
FIGUUR 7 VERSCHILLENDE METHODES VOOR STABILISATIE VAN BAGGERSPECIE	19
FIGUUR 8 VERSCHILLENDE TOEVOEGINGEN VOOR FYSISCHE STABILISATIE	20
FIGUUR 9 SEDIMENTKWALIFICATIE MET ADDITIEVEN VOOR SCHEIKUNDIGE STABILISATIE	21
FIGUUR 10 ONTWIKKELING VAN GEOWALL®-PERSEN DOOR DE JAREN HEEN	22
FIGUUR 11 ONTWIKKELING EN BOUW VAN DE GEOWALL® PERS	23
FIGUUR 12 KLEINE GEOWALL® BLOKKEN IN BIJZONDERE VORMEN	24
FIGUUR 13 VERSCHILLENDE TOEPASSINGEN VAN GEOWALL® BLOKKEN VAN BAGGERSPECIE	24
FIGUUR 14 UITVOERING VAN EEN GEOWALL® GELUIDSSCHERM VAN BAGGERSPECIE	24
FIGUUR 15 CONCEPT VAN DE BAGGERFABRIEK	25
FIGUUR 16 LABORATORIUMONDERZOEK RECEPTUUR ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE	26
FIGUUR 17 LUCHTFOTO EN KAART WINNING BAGGERSPECIE: DEPOT WILLEM ANNAPOLDER	27
FIGUUR 18 VELDBEZOEK DEPOT WATERSCHAP SCHELDESTROMEN	27
FIGUUR 19 IMPRESSIE VAN DE PRODUCTIE GEOWALL® ZETSTEEN SAMPLES VOOR LABORATORIUMTESTS	31
FIGUUR 20 OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE SAMPLES VOOR ONDERZOEK NAAR MATERIAALEIGENSCHAPPEN	32
FIGUUR 21 IMPRESSIE VAN HET ONDERZOEKSPROCES	35
FIGUUR 22 IMPRESSIE PROCES GIETEN, DROGEN EN TESTEN SAMPLES	36
FIGUUR 23 BINDING CEMENT TEN OPZICHT VAN KORRELS	37
FIGUUR 24 VERSCHILLENDE COATINGS EN STRUCTUREN AANGEBRACHT OP ZETSTEENBLOKKEN	37
FIGUUR 25 HET TESTEN VAN DRUKSTERKTE	37
FIGUUR 26 IMPRESSIE VAN BUIGSTERKTEPROEVEN	39
FIGUUR 27 IMPRESSIE VAN EROSIE TESTS DOOR ZAND EN WATER OP PROEFBLOKKEN	40
FIGUUR 28 IMPRESSIE VAN HET ONDERZOEK NAAR EFFECT VAN WEERSINVLOEDEN	41
FIGUUR 29 OBSERVATIES SLIJTAGE BLOKJES	43
FIGUUR 30 VERSCHILLENDE ECOLOGISCHE ZONES MET BEGROEIING	45
FIGUUR 31 VERSCHILLENDE ZONES VAN BEGROEIING IN METER BOVEN NAP	45
FIGUUR 32 PROEFVAK ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE NET NA AANLEG	46
FIGUUR 33 SCHEMATISATIE VAN DE PROEFOPSTELLING ECOLOGIE BESTAANDE UIT VIER ONDERZOEKSFAMES	47
FIGUUR 34 IMPRESSIE BOUW VAN DE ECOLOGISCHE ONDERZOEKSFAMES	48
FIGUUR 35 EERSTE OBSERVATIE VAN ECOLOGISCH FRAMES 1 EN 2	49
FIGUUR 36 IMPRESSIE VAN OBSERVATIE ECOLOGISCH FRAMES 1 EN 2 (SEPTEMBER 2022)	50
FIGUUR 37 IMPRESSIE VAN OBSERVATIE ECOLOGISCH FRAMES 3 EN 4 (JUNI 2023)	51
FIGUUR 38 SCHEMATISATIE VAN VERSCHILLENDE RECEPTEN SAMPLES IN ECOLOGISCHE FRAMES	52
FIGUUR 39 TYPOLOGIE VAN LEVENSGEMEENSCHAPPEN	53
FIGUUR 40 INDELING VAN LEVENSGEMEENSCHAPPEN	53
FIGUUR 41 WAARDERINGSSYSTEEM WIERBEGROEIING (MEIJER, 1998)	54
FIGUUR 42 OBSERVATIE VAN KLEIN SLAKJE OP SAMPLE BLOK FRAME 4	55
FIGUUR 43 MEEST BEGROEIDE SAMPLE MET BEDEKKING VAN 90% DARM -EN PURPERWIER	56
FIGUUR 44 TECHNISCH ONTWERP PROEFVAK	58
FIGUUR 45 GESELECTEERDE LOCATIE VOOR HET PROEFVAK MET ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE	59
FIGUUR 46 LUCHTFOTO'S EN FOTO'S TER IMPRESSIE PROEFGEBIED	60
FIGUUR 47 LUCHTFOTO INRICHTING PRODUCTIELOCATIE OP HET WATERSCHAPSDEPOT	61
FIGUUR 48 UITEINDELIJKE INRICHTING VAN DE PRODUCTIELOCATIE	61
FIGUUR 49 EEN LUCHTFOTO MET DE PROJECTLOCATIE (L) EN INRICHTING VAN DE BOUWPLAATS T.B.V. PROEFVAK	62
FIGUUR 50 FOTO'S VAN DE PROJECTLOCATIE	62

FIGUUR 51 WERKVOLGORDE	63
FIGUUR 52 HYDRAULISCHE GRAAFMACHINE IN ACTIE	64
FIGUUR 53 MILIEUPRESTATIE BOUWWERK	67
FIGUUR 54 BEREKENDE MKI-WAARDES VAN ZETSTENEN	71
FIGUUR 55 KOSTENPLAATJE ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE	75
FIGUUR 56 KOSTENVERDELING VERSCHILLENDE RECEPTEN	77
FIGUUR 57 WINST HERGEBRUIK BAGGERSPECIE PER RECEPT	77
FIGUUR 58 TOTAALPRIJS ZETSTEEN BIJ VERSCHILLENDE TRANSPORTAFSTANDEN VAN BULKGOEDEREN	78
FIGUUR 59 KOSTEN BIJ VERSCHILLENDE PRODUCTIESNELHEDEN	78
FIGUUR 60 PERSPROCES IN STAPPEN	82
FIGUUR 61 PROCES NEMEN VAN SAMPLES UIT BLOKKEN	86
FIGUUR 62 IMPRESSIE DICHTHEID BLOKKEN	86
FIGUUR 63 VOORBEELD STRUCTUREN BLOKJES	87
FIGUUR 64 IMPRESSIE VAN UITGEVOERDE DRUKSTERKTETESTEN	88
FIGUUR 65 EERSTE BEGROEIING OP ZETSTEENBLOKKEN	89
TABEL 1 ONDERZOEKSVRAGEN, METHODES EN STRATEGIEËN	15
TABEL 2 SAMENVATTING RESULTATEN ONDERZOEK BAGGERSPECIE	28
TABEL 3 INITIËLE RECEPTEN R1 T/M R9 VOOR BAGGERSPECIE TOEPASSING HANSWEERT	29
TABEL 4 OVERZICHT SCHEIKUNDIGE STABILISATIE RECEPTEN R1 T/M R9	30
TABEL 5 OVERZICHT RECEPTEN GESELECTEERD UIT PROJECTFASE 1	33
TABEL 6 OVERZICHT RECEPTEN R10	34
TABEL 7 OVERZICHT RECEPTEN R6, R10	34
TABEL 8 OVERZICHT BUIGSTERKTES VERSCHILLENDE FORMATEN BLOKKEN RECEPTEN R1 T/M R10 EN BETON	35
TABEL 9 DICHTHEDEN RECEPTEN R1-R10 EN BETON	36
TABEL 10 OVERZICHT VAN RESULTATEN	38
TABEL 11 DICHTHEDEN EN BUIGSTERKTES R6 EN R9	39
TABEL 12 RESULTATEN MONITORING GEWICHT	40
TABEL 13 RESULTATEN TESTS DRUKSTERKTE VOOR EN NA 28 DAGEN VRIES-DOOI	42
TABEL 14 RESULTATEN DRUKSTERKTETESTEN NA 28 DAGEN	42
TABEL 15 RESULTATEN BUIGSTERKTE TESTS R6 CEM III (II)	43
TABEL 16 MATERIALEN EN HUN EIGENSCHAPPEN	43
TABEL 17 GEKWANTIFICEERDE MATERIAALEIGENSCHAPPEN	44
TABEL 18 OMSCHRIJVING VAN ECOLOGIE TER PLAATSE VAN DE VERSCHILLENDE ZONES	46
TABEL 19 AANGETROFFEN TYPEN BEGROEIING MET HUN WETENSCHAPPELIJKE NAMEN	55
TABEL 20 RECEPTEN MEEGENOMEN IN MKI BEREKENING DOOR AVECO DE BONDT	68
TABEL 21 VERSCHILLENDE MATERIALEN EN HUN MILIEUPROFIELEN	68
TABEL 22 TRANSPORTAFSTANDEN TBV MKI-BEREKENING	69
TABEL 23 PRODUCTIEPROCES ZETSTEEN IN VIJF STAPPEN	70
TABEL 24 BENODIGDE WERKTIJD EN ENERGIEVERBRUIK MATERIEEL	70
TABEL 25 INITIËLE RESULTATEN INSCHATTING MKI DOOR AVECO DE BONDT	71
TABEL 26 KOSTEN ZETSTEEN VAN BAGGERSPECIE VERGELEKEN MET BASALTON	76
TABEL 27 VERGELIJKING PLAATSINGSKOSTEN VERSCHILLENDE TYPES ZETSTEEN	79
TABEL 28 PRODUCTIEPROCES IN TIJD UITGEDRUKT	82
TABEL 29 DE INVLOED VAN EEN EXTRA MAL OP DE TIJDSDUUR	83
TABEL 30 EIGENSCHAPPEN VERSCHILLENDE VORMEN EN MATEN ZETSTEEN	83
TABEL 31 RESULTATEN METINGEN DICHTHEID OP VERSCHILLENDE MOMENTEN	86
TABEL 32 RESULTATEN METINGEN DRUKSTERKTE OP VERSCHILLENDE MOMENTEN	88
TABEL 33 RESULTATEN METINGEN BUIGSTERKTES	88

1 Inleiding

Het onderzoek 'Zetsteen van Baggerspecie' richt zich op het ontwikkelen van een duurzame en circulaire zetsteen voor de toekomst waarbij gebruik van lokaal gewonnen baggerspecie voor de samenstelling van het bouwelement essentieel is. Tussen het idee en het testen van deze innovatie zitten een aantal ontwikkelstappen. Voor dit onderzoeksproject is de doelstelling om een eenvoudige zetsteen van baggerspecie te ontwerpen én testen om deze vervolgens in de praktijk te produceren en toe te passen in een proefvak.

Het onderzoeksproject "Zetsteen van Baggerspecie" heeft een sterke link met het dijkversterkingsproject Hansweert. Een deel van het traject Hansweert is afgekeurd in de landelijke derde toetsronde 2010 op hoogte en binnenwaartse stabiliteit. Het project Zuid-Beveland West, Westerschelde S1, Hansweert (kortweg HWBP Hansweert) heeft als doel om een waterveilige, toekomstbestendige en beheerbare waterkering te realiseren die voldoet aan de nieuwe normering, op basis van een bestuurlijk en maatschappelijk gedragen plan, ingepast in de omgeving en waar mogelijk aangevuld met meekoppelkansen.

Inmiddels is er veel interesse vanuit de markt voor deze innovatie. Dit komt mede door de timing waarop het onderzoeksproject plaatsvindt. Er ontstaat steeds meer behoefte aan meer duurzamere en circulaire toepassingen in de civiele techniek. Sinds de start van het project hebben er inmiddels diverse partijen, zoals waterbouwers, ingenieursbureaus, betonleveranciers, onderzoeksinstituten, waterschappen en onderwijsinstellingen contact gezocht met het projectteam. De aannemerscombinatie die de dijkverzwaring in Hansweert gaat uitvoeren kijkt ook met belangstelling mee. Dit draagvlak heeft de innovatie nodig om verdere ontwikkeling, ondersteuning en acceptatie mogelijk te gaan maken.

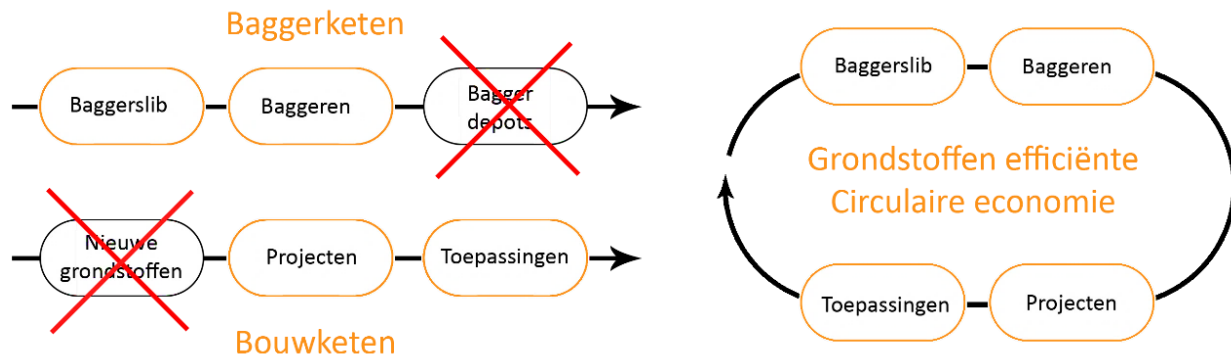


Figuur 1 Bovenaanzicht van Hansweert, Zeeland

Het belangrijkste doel van dit onderzoeksproject is het aanleggen en bestuderen van een proefvak van zetsteen van baggerspecie dat duurzamer is (lagere MKI-score) en prijstechnisch concurrerend met traditionele zetsteen van beton. Daarnaast moeten de sterkte-eigenschappen kunnen voldoen aan wet- en regelgeving voor dijkbekledingselementen. Parallel hieraan loopt het onderzoek naar de uitvoerbaarheid van het materiaal waaronder de productietechniek en uitvoeringsmethode vallen.

Door lokaal gebaggerd materiaal, dat vaak als afval behandeld wordt, ook lokaal in te zetten voor het maken van harde bekledingselementen, kan invulling worden gegeven aan een meer circulaire dijk. Door het koppelen van de baggerketen met de bouwketen ontstaat een nieuwe duurzame circulaire keten. Naast de voordelen op het gebied van uitstootreductie van broeikasgassen en andere milieubelastingen, zijn er ook economische winsten te behalen. Zo wordt transport van (bouw)materiaal beperkt tot de afstand vanaf de lokale baggerfabrieken worden kosten bespaard op de afvoerkosten van baggerspecie.

De kern van de innovatie is het koppelen van de bouwketen met de baggerketen waardoor er een duurzaam bouwproduct 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 het materiaal te crushen.



Figuur 2 Koppelen van de bouw- en baggerketens tot een nieuwe circulaire keten

Samengevat kan de innovatie de volgende voordelen opleveren:

- Goedkopere grondstoffen voor zetsteen → lagere bouwkosten
- Minder transporten i.v.m. lokale winning, productie (lokaal) en levering van zetsteen → Duurzamer (MKI), lagere kosten en minimaliseren van omgevingshinder doordat productie lokaal plaatsvindt
- Mogelijkheid om materiaal te crushen en te hergebruiken in dezelfde toepassing → Bouwelementen die 100% circulair zijn
- Geen grote hoeveelheden (schaarse) ruwe materialen nodig → zetsteen wordt voor een aanzienlijk deel uit baggerspecie gemaakt
- Zetsteen van baggerspecie heeft ecologische meerwaarde → door samenstelling uit lokale baggerspecie past het materiaal in het lokale ecologische systeem, dit bevordert ontwikkeling van flora en past bij aanwezige fauna.
- Blokken worden 'custom' gemaakt → Vrijwel alle eigenschappen van zetsteen kunnen worden ingeregeld zodat per situatie de zetsteen met de benodigde eigenschappen gemaakt wordt en zo geen onnodige extra bindmiddelen toegevoegd hoeven te worden.

1.1 Zetsteen van Baggerspecie

Het onderzoekstraject 'Zetsteen van Baggerspecie' bestaat uit een drietal onderdelen, namelijk de laboratoriumproeven, uitvoering van een proefvak (pilot) en het evalueren van de onderzoeksresultaten. Het laboratoriumonderzoek wordt uitgevoerd in het laboratorium van NETICS waar de faciliteiten zijn om proefblokken te maken, deze te beproeven en om uitvoeringsmethodieken te testen. Voor het proefvak zal een geselecteerd dijkvak bij Hansweert beschikbaar worden gesteld van tenminste 100 m².

De evaluatie van het onderzoek vindt plaats binnen een kennisalliantie waarbij overheid, onderzoeksinstellingen, ingenieursbureaus, aannemerij en afnemers van het product zijn aangesloten.

Als blijkt dat de zetsteen van baggerspecie goed functioneert, kan het concept worden doorontwikkeld en worden opgeschaald voor toepassingen in bijvoorbeeld latere dijkverzwaringen of dijkverbeteringen. Deze opschaling is geen onderdeel van de scope van de innovatie. Echter zal er gedurende het onderzoek wel bewust nagegaan worden wat opschaling betekent voor de technieken en uitvoering ervan.

Het uitgangspunt voor het onderzoek is dat zetsteen ontwikkeld wordt tot een TRL 6 niveau. Door het uitvoeren van deze pilot wordt de zetsteen van baggerspecie technisch, economisch en op duurzaamheid onderzocht waarbij het duidelijk wordt op welke manier het product op al deze vlakken kan concurreren met conventionele technieken. Daarbij wordt de volgende definitie gehanteerd;

TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)	<i>demonstratie prototype Zetsteen van Baggerspecie in relevante testomgeving: uitgebreid initieel testen en demonstreren van het innovatie concept in een relevante testomgeving</i>
--	---

1.2 Beschikbaarheid baggerspecie

Geografisch gezien beperkt het onderzoeksgebied van de baggerspecie zich tot de directe omgeving van het HWPB-project Hansweert. De polder waar Hansweert in ligt, is in 2020 gebaggerd en de vrijgekomen baggerspecie ligt dicht bij de projectlocatie opgeslagen. Van dit materiaal, dat jaarlijks vrijkomt, kan eventueel in de toekomst gebruik gemaakt worden. Dit is in theorie zelfs ruim voldoende materiaal om alle zetsteenbekleding voor het hele dijkversterkingsproject te produceren.

Vanuit het Waterschap Scheldestromen is het voor de afdeling waterbeheer interessant om de baggerspecie uit lokale waterlopen ook weer lokaal toe te passen in toepassingen zoals zetsteenblokken van baggerspecie. Bij het lokaal toepassen van (licht) vervuilde baggerspecie is het mogelijk het type vervuiling te spiegelen met achtergrondswaardes vanwaar de baggerspecie is gebaggerd. Naast dat het materiaal wordt toegepast in dezelfde waterloop, kan ook verondersteld worden dat de uitloging aanzienlijk minder is doordat het effectieve oppervlak wordt gereduceerd als er een blok van de baggerspecie gemaakt wordt. In alle gevallen zal er enerzijds milieuhygiënisch onderzoek plaatsvinden en anderzijds met het bevoegd gezag afstemming plaatsvinden.

Van het materiaal dat gebruikt wordt voor de pilot is er naast een fysisch en waterbodembkundig onderzoek ook een milieuhygiënisch onderzoek gedaan (onder andere AP04 onderzoek met specifieke toevoegingen zoals OCB's). Op basis hiervan is een selectie van de meest geschikte baggerlocatie uitgevoerd en is onderzocht of het materiaal kan worden toegepast. In eerste instantie is gefocust op schone baggerspecie. Bij lichte verontreiniging kan na onderzoek en afstemming met bevoegd gezag eventueel vervuilde baggerspecie toch gebruikt worden voor deze pilot. Dit was echter niet nodig voor deze pilot.

Voor dit onderzoeksproject zijn er door het Waterschap Scheldestromen twee depots geselecteerd. Enkele kilometers ten westen en ten oosten van de projectlocatie bevinden zich deze baggerdepots die in het beheer zijn van het waterschap (zie figuur 3). Op deze locaties liggen allerlei soorten baggerspecie uit de omgeving. Hiervan is een selectie gemaakt om te gebruiken voor de pilot. Afhankelijk van sediment analyses zijn combinaties gemaakt met de verschillende baggersoorten afkomstig uit de omgeving. Depot 1 ligt naast een waterzuivering van Waterschap Scheldestromen, zodat ook afvalstoffen van de waterzuivering gebruikt kunnen worden als bindmiddel. Te denken valt aan vezelversterking met behulp van cellulose. Bovendien is hier ruimte voor de productie van de zetsteen van baggerspecie.



Figuur 3 Kaart projectlocatie Hansweert

Doel is om lokaal een NETICS Baggerfabriek* in te richten die van baggerspecie bouwproducten maakt. De mogelijkheid wordt onderzocht om moderne typen zetsteen, wellicht onder licentie, te produceren.

**De NETICS Baggerfabriek is een speciaal ingerichte locatie vaak nabij een project waar baggerspecie wordt aangevoerd en bouwproducten worden geproduceerd en in het project worden toegepast. Het proces bestaat uit analyse baggerspecie, stabilisatie van de baggerspecie en afwerking tot eindproduct. Naast dat aanbod baggerspecieën vraag bouwstoffen samenkomen is er een focus op circulariteit en milieu.*

1.3 Omschrijving van de proeflocatie

Voor het uitvoeren het onderzoek is het proefvak met zetsteen van baggerspecie een essentieel onderdeel. Gezien het doel om de geselecteerde baggerspecie lokaal toe te passen is het logisch om de het proefvak nabij het geselecteerde depot toe te passen. Bovendien is het door de geplande werkzaamheden bij de dijkversterking Hansweert mogelijk om hier (tijdelijk) een vak in te richten. Aan de proeflocatie worden eisen gesteld die voortkomen uit de wensen vanuit het Waterschap Scheldestromen:

- Het proefvak moet dagelijks aan getijdenwerking worden blootgesteld;
- De blokken dienen zich zowel onderwater nabij de teen alsook boven de getijzone te bevinden;
- Het ontwerp is afgestemd op een hydraulische belasting met een terugkeertijd van 1X per 5 jaar op de locatie van het proefvak
- Voor het proefvlak moet een vlakke (niet gekromde) ondergrond van minimaal 100 m² beschikbaar zijn waardoor het proefvak stabiel is en representatieve metingen gedaan worden;
- Er moet ruimte zijn om het proefvak aan te leggen, om materiaal en materieel op te slaan (bij voorkeur niet direct naast recreatieve voorzieningen);
- Er bevindt zich onder het nieuw aan te brengen proefvak een steenbekleding, zodat falen van het proefvak niet leidt tot een verzwakking van de waterkering ten opzichte van de huidige situatie;
- Het proefvak bevindt zich binnen of dicht bij de projectlocatie Hansweert, maar vormt geen obstakel voor de dijkversterking, die naar verwachting vanaf eind 2022 zal gaan plaatsvinden.



Figuur 4 Aangewezen locatie voor het proefvak

1.4 Doel van het onderzoeksproject

Voor dit onderzoeksproject is het volgende doel gedefinieerd:

1. Het produceren en testen van een eenvoudige zetsteen van baggerspecie als kubuselement in zowel het laboratorium als in omstandigheden van werkelijke toepassing.

Subdoelen die daarbij gesteld zijn:

- a) Het produceren van een zetsteen element van baggerspecie op ware grootte door middel van een unieke nog te ontwikkelen pers;
- b) Het uitvoeren van tests in zowel het laboratorium als op ware schaal in het proefvak waarbij onderzocht wordt: dimensionering, sterkte, materiaaleigenschappen, weersbestendigheid, en ecologische kwaliteiten in zout aquatisch milieu.
- c) Het plaatsen van zetsteen van baggerspecie als proefvak ter plaatse van dijktafsluiting op ware schaal;
- d) De uitvoeringstechniek waarmee het proefvak met zetsteen van baggerspecie wordt gemaakt gebaseerd op gangbare uitvoeringstechnieken en machines;
- e) De zetsteen van baggerspecie duurzamer (lagere MKI score) en prijstechnisch concurrerend maken ten opzichte van vergelijkbare traditionele zetsteen van beton;
- f) De geselecteerde materiaaleigenschappen laten voldoen aan geldende wet- en regelgeving die van toepassing zijn op dijkbekledingselementen (zoals NEN-normen);

Bovenstaande doelen vormen de basis voor de opbouw en structuur van het onderzoeksproject. Dit heeft geleid tot een onderverdeling in vier fases. Per fase zijn er meer specifieke doelstellingen geformuleerd die in het volgende hoofdstuk nader worden toegelicht.

1.5 Fasering van het onderzoeksproject

Het onderzoeksproject is onderverdeeld in vier fases waarbij er gestart is met het verkennen en onderzoeken van de praktische zaken en theoretische achtergronden rondom de innovatie zetsteen van baggerspecie. Daaronder vallen een inventarisatie van mogelijkheden, literatuurstudie, het opstellen van toetsingskaders en een laboratoriumonderzoek. Vervolgens is op basis hiervan een technisch ontwerp gemaakt van een proefvak en is deze op ware schaal gerealiseerd. Zo zijn naast de ontwikkeling van het recept ook daadwerkelijk de eerste samples van zetsteen geproduceerd en beproefd. Het onderzoek is onderverdeeld in de volgende vier fases:

FASE 1 => Literatuurstudie en laboratoriumproeven

Stap 1: Voorbereiding van het onderzoek en vaststellen onderzoekskader

Stap 2: Selectie van baggerlocaties in de nabijheid van de proeflocatie

Stap 3: Veldbezoek projectlocatie en nemen van baggersamples incl. van uitvoeren sedimentanalyses

Stap 4: Bureaustudie naar ontwerp-eisen en toetsingskader zetsteen

Stap 5: Opstellen toetsingskader en plan laboratoriumonderzoek

Stap 6: Productie proefelementen en testen van labopstelling perstechniek

Stap 7: Beproeven van proefelementen op sterkte, duurzaamheid (levensduur) en ecologie

Stap 8: Rapportage geschiktheid zetsteen en opstellen Programma van Eisen voor technisch ontwerp

Stap 9: Beoordeling resultaten Fase 1 en toetsing randvoorwaarden=> GO/NO GO 1

FASE 2 => Uitwerking technisch ontwerp en uitvoeringsmethodiek

Stap 1: Tussenevaluatie en opstellen aanpak technisch ontwerp zetsteen

Stap 2: Testen van uitvoering met behulp van een prototype van de pers

Stap 3: Uitwerken van technisch ontwerp van het proefvak met zetsteen van baggerspecie

Stap 4: Uitwerken uitvoeringsmethodiek en monitoringsplan van de pilot (proefvak)

Stap 5: Uitwerken van de Businesscase; financiële en commerciële haalbaarheid

Stap 6: Beoordelen uitvoeringsontwerp en het uitvoeringsplan => GO/NO GO 2

FASE 3 => Uitvoering van de pilot proefvak met zetsteen van baggerspecie ware schaal

Stap 1: Selecteren baggerspecie en klaarzetten op productielocatie

Stap 2: Mobiliseren van werktuigen en pers op productielocatie => inrichten baggerfabriek

Stap 3: Begeleiding van de aannemer bij uitvoering van de zetsteenproductie

Stap 4: Productie van de zetsteen blokken van baggerspecie

Stap 5: Transport en plaatsing van de zetsteen van baggerspecie op proefvak

Stap 6: Testen en begeleiden van de uitvoering pilot en start monitoren proefvak

FASE 4 => Evaluatie innovatie en rapportage, publicatie en presentatie resultaat

Stap 1: Opstellen rapportage van de laboratoriumproeven en onderzoeksresultaten

Stap 2: Opstellen rapportage van de uitvoering en uitkomsten pilot op ware schaal

Stap 3: Schrijven van handreiking zetsteen van baggerspecie

Stap 4: Uitvoeren eindevaluatie van resultaten innovatieproject zetsteen van baggerspecie

Stap 5: Opstellen eindrapportage inclusief lessons learned en aanbevelingen

Stap 6: Kennisoverdracht door workshop, presentaties en wetenschappelijke papers

Tijdens de fases is er toegewerkt naar verschillende producten. De volgende producten zijn er ter voltooiing van het onderzoeksproject opgeleverd:

- Handreiking zetsteen van baggerspecie
- Eindrapportage onderzoekstraject Zetsteen van Baggerspecie



Figuur 5 Eindresultaat van de productie van Zetsteenblokken van baggerspecie

2 Onderzoekskader

2.1 Doelstelling

De doelstelling voor dit onderzoeksproject is zoals eerder gedefinieerd: *"Het produceren en testen van een eenvoudige zetsteen van baggerspecie als kubuselement in zowel het laboratorium als in omstandigheden van werkelijke toepassing."* Een belangrijk onderdeel dat hieraan ten grondslag ligt was de te ontwikkelen GEOWALL® pers. Om dit mogelijk te maken is er een intensief traject gestart waarbij er zowel een prototype pers (voor in het laboratorium) alsook een prototype op werkelijk schaal getest zijn. In beide gevallen is het nieuwe materiaal onderzocht.

2.2 Onderzoeksmethoden

Het onderzoek is gedaan op drie locaties, namelijk het sedimentlaboratorium van NETICS, de productiefaciliteit bij IHC en de baggerfabriek en proefvak in het veld. Tijdens alle proeven is er middels sensoren en een mobiel laboratorium real time data verwerkt.

2.3 Projectfases

Het onderzoek innovatie zetsteen van baggerspecie omvat een voorbereidend theoretisch deel, onderzoeksdeel in het laboratorium, de productie, uitvoering op verkleinde én ware schaal, realisatie van een pilot en evaluatie met wetenschappelijke onderbouwing. Het onderzoek is verdeeld over vier fases:

FASE 1 => Literatuurstudie en laboratoriumproeven

Bij start van het onderzoek naar de haalbaarheid van zetsteen van baggerspecie zijn allereerst de benodigde theoretische kaders onderzocht. Dit houdt in dat de geldende regelgeving, ontwerprichtlijnen, randvoorwaarden en uitgangspunten vanuit het bevoegd gezag en locatie-specifieke gegevens zijn vastgesteld en onderzocht. Met het onderzoekskader is het onderzoek omlijnt en vastgesteld.

In deze eerste fase is ook onderzoek gedaan naar de sedimentologie van het gebied door het nemen van verschillende sedimentsamples van baggerspecie dat Scheldestromen in beheer heeft. Op basis van vastgestelde sedimenteigenschappen en milieuhygiënische parameters, zijn er specifieke methoden voor stabiliseren ontwikkeld. Hierbinnen vallen mechanisch, fysisch, scheikundig en biologisch stabiliseren. Middels specifieke ontwerpsoftware is het ontwerp van de zetsteen op basis van de sedimenteigenschappen gemaakt. Nadat de sediment-specifieke receptuur is vastgesteld zijn er in het laboratorium proefblokken met een, speciaal voor dit project, nieuw ontwikkelde kleine pers geproduceerd. Deze blokken zijn beproefd op sterkte, duurzaamheid (levensduur) en ecologie.

FASE 2 => Uitwerking technisch ontwerp en uitvoeringsmethodiek

Fase 2 werd gestart na een GO/NO GO moment. Na de positieve evaluatie van Fase 1 (GO) is begonnen met de uitwerking van het technisch ontwerp van de pilot. Parallel hieraan is de pers op ware schaal ontwikkeld en zijn er productietests uitgevoerd. De uitkomsten hiervan zijn direct verwerkt in het technisch ontwerp van het proefvak met zetsteen van baggerspecie. Samen met de projectpartners en aannemer is onderzocht of de huidige uitvoeringsmethodieken moesten worden aangepast voor de uitvoering van de pilot. Hiervoor zijn op kleine maar ook grote schaal voorbereidende tests uitgevoerd. Het doel was om een baggerdepot van het waterschap in te richten als test en productielocatie.

Naast het uitwerken van de uitvoeringsmethodiek is parallel hieraan ook het monitoringsplan opgesteld. De monitoring omvatte het inmeten van de constructie bij aanvang (nulsituatie), bepalen van de (hydrodynamische) belastingen op de constructie, effecten belastingen op zetsteen zoals schade van de steen, bijhouden van de ontwikkeling van aquatische ecologie en de algehele eigenschappen van het proefvak zoals esthetische veranderingen.

Nadat het ontwerp was vastgesteld en de uitvoeringsmethodiek was onderzocht is de businesscase uitgewerkt. Hierbij is de financiële alsook de commerciële haalbaarheid van de innovatie zetsteen van baggerspecie onderzocht en uitgewerkt. Fase 2 werd afgesloten met een GO/NO GO moment waarbij technische haalbaarheid en uitvoerbaarheid van de innovatie zetsteen van baggerspecie wordt beoordeeld en getoetst aan de geldende regelgeving.

FASE 3 => Uitvoering van de pilot proefvak met zetsteen van baggerspecie ware schaal

Na de evaluatie van Fase 2 (GO) is de uitvoering van de pilot van start. Deze bestond hoofdzakelijk uit twee onderdelen, namelijk de productie van zetstenen van baggerspecie en de aanleg van een proefvak waarbij het streven om dit vak 100 m² groot te maken. Tijdens de eerste stap is samen met de aannemer en Scheldestromen als bevoegd gezag de uitvoeringsmethodiek doorgesproken en de baggerspecie geselecteerd. Vervolgens is de productielocatie op het depot gereedgemaakt en de pers opgesteld.

Tijdens de productie van de zetsteen van baggerspecie is in bouwteam verband de pilot doorgesproken en voorbereid. Het technisch ontwerp uit Fase 2 was hierin leidend. Nadat de zetsteen de juiste specificaties had bereikt, bijvoorbeeld na uitharding, is deze in het proefvak geplaatst. Tijdens de start van de uitvoering begon ook het monitoren van het proefvak conform het opgestelde monitoringsplan. Door het goed monitoren van zowel de productie als de uitvoering kon tijdig worden ingegrepen als de eisen niet gehaald werden en werden terugvalopties overwogen en mogelijk ingezet.

FASE 4 => Evaluatie innovatie en rapportage, publicatie en presentatie resultaat

Nadat het proefvak was aangelegd startte Fase 4 waarbij het onderzoeksproject is geëvalueerd en met deze rapportage gepubliceerd. De uitkomsten uit zowel het laboratoriumonderzoek als uit de uitvoering van de pilot zijn in deze rapportage samengevoegd en verwerkt. Parallel hieraan is er een handreiking "Zetsteen van Baggerspecie" geschreven waarin de belangrijkste ontwerpregels, aanbevelingen en voorbeelden van uitvoering zijn toegelicht. Ten behoeve van deze handreiking is er een vergelijking gemaakt tussen de MKI-score van zetsteen van baggerspecie en zetsteen van beton. Tenslotte is er onderzocht welke stappen er doorlopen worden voor verdere certificering en toetsing van de ontwikkelde zetsteen van baggerspecie.

Naast evaluatie van de innovatie zetsteen van baggerspecie was kennisdeling ook een cruciaal onderdeel van deze laatste fase. Door deelname aan onder andere internationale samenwerkingsverbanden en congressen/beurzen, wetenschappelijke publicaties en workshops zijn de resultaten gedeeld met zowel de markt als kennisinstututen, overheden en allianties. Hiermee is gestimuleerd dat de innovatie wordt doorontwikkeld in nieuwe trajecten om zo uiteindelijk tot een product met TRL 9 te komen.

2.4 Onderzoeksvragen

In de voorbereiding op het onderzoeksproject Zetsteen van Baggerspecie is ervoor gekozen om zowel een theoretische als praktische benadering te kiezen om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Dit houdt in dat relevante literatuur en ontwerprichtlijnen zijn bestudeerd, empirische modellen en kennis over sedimentstabilisatie zijn gebruikt, breed toegepaste ontwerpsoftware voor zetsteenberekeningen en dijkontwerp zijn ingezet, laboratoriumtests op kleine schaal en veldtests op werkelijke schaal zijn uitgevoerd, brainstormen en ontwerpessies om de businessmodellen te onderzoeken en productie- en plaatsingsmethoden met verschillend materieel en technieken om te testen.

De centrale onderzoeksvraag luidt;

"Zijn harde elementen gemaakt van baggerspecie geschikt om toe te passen als zetsteen voor dijken?"

Bij het beantwoorden van de onderzoeksvragen zijn de volgende methodes en strategieën gevolgd;

Tabel 1 Onderzoeksvragen, methodes en strategieën

	ONDERZOEKSVRAAG	METHODES EN STRATEGIE
ALGEMEEN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kunnen verschillende soorten gebiedseigen baggerspecie (afvalmateriaal) omgezet worden in bekledingselementen met een vereiste hoge druksterkte? ▪ Welke kansen biedt deze toepassing voor de vestiging en ontwikkeling van flora en fauna (ecologie)? ▪ Wat zijn de mogelijkheden om grote bekledingselementen van baggerspecie met vereiste druksterkte te ontwikkelen in massaproductie? ▪ Is zetsteen van baggerspecie (uitvoerings)technisch op korte termijn (1 jaar) haalbaar? ▪ Wat is de levensduur van deze elementen tijdens toepassing als zetsteen element? ▪ Wat zijn de kosten van deze elementen ten opzichte van betonnen bekledingselementen? ▪ Wat is het verschil in MKI-waarde tussen elementen van beton en van baggerspecie? (op basis van de LCA van beide producten) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sedimentonderzoek; op basis van selectie en analyse van de beschikbare baggerspecie wordt onderzocht op het mogelijk is met bekende stabilisatiemethoden een proefblok te produceren met hoge sterkte. ▪ Tijdens een veldonderzoek zal de ontwikkeling van aquatische ecologie worden onderzocht door blokken in de Westerschelde te plaatsen. ▪ Het opschalen van de productie zelf valt buiten de scope van het project. Echter wordt met behulp van tests uitvoeringstechniek wel geëxperimenteerd. ▪ Met het bouwen van de grote pers wordt onderzocht of het blok in ware grootte als zetsteen haalbaar is. ▪ Weersinvloeden, hydrodynamisch belastingen, zout milieu worden getest via vries/dooi, erosie onderzoek. ▪ Er worden voor verschillende situaties en ontwerpen businessplannen opgezet waaruit de kosten volgen. ▪ De MKI-waarde wordt berekend op basis van waardes die tijdens de gehele studie worden verzameld, o.a. recepten, uitvoeringsmethoden en duurzaamheid (LCA).
FASE 1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Is het sediment in de nabijheid van Hansweert qua samenstelling en eigenschappen geschikt om te gebruiken voor de productie van een zetsteenblok (milieu-hygiënische kwaliteit, fysische eigenschappen, pH, zoutgraad, organisch niveau, scheikundige samenstelling, vochtgehalte, etc.); ▪ Welke laboratoriumproeven zijn noodzakelijk om op schaal de werking van zetsteen van baggerspecie aan te tonen (stabiliseren van baggerspecie zoals fysisch, mechanisch, scheikundig, biologisch), dus welke perskracht, binder, mengmethodiek is noodzakelijk om de gewenste meetbare eigenschappen te verkrijgen (sterkte, duurzaamheid (levensduur), vormvastheid, etc.); ▪ Zijn er naast puur technische kwaliteiten ook methoden/proeven beschikbaar om de ecologische waarde van de blokken vast te stellen zoals doorgroeibaarheid (vegetatieontwikkeling), afgifte van gebiedseigen stoffen (voor vissen), vestigen van aquatische ecologie en andere flora/fauna voordelen; ▪ Is het mogelijk om op laboratoriumschaal de zetsteen van baggerspecie te onderzoeken op eigenschappen als sterkte, duurzaamheid (levensduur), fysische eigenschappen en vormvastheid; ▪ Kan de technische haalbaarheid van de zetsteenblokken door een proefvak op ware schaal worden onderzocht. ▪ Welke aspecten moeten worden onderzocht om na te gaan of het mogelijk is om een bestaand type zetsteen te maken, zoals Basalton, Ronaton, Hillblock, Quattroblock, C-Star. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Op basis van sedimentselectie en analyse wordt onderzocht of baggerspecie nabij Hansweert geschikt is om te gebruiken voor de productie van zetsteen blok. Naast het in kaart brengen van alle benodigde sedimenteigenschappen voor het receptenonderzoek wordt de kwaliteit van de proefblokken onderzocht door middel van uitlogingstests. ▪ Jarenlange ervaring met het stabiliseren van baggerspecie vormt de uitgangspositie bij de start van het bepalen van de receptuur voor de zetsteen. Door het spiegelen van de materiaaleigenschappen van de zetsteen van baggerspecie met die van betonnen zetsteen, wordt geconvergeerd tot een ideaal recept op basis van werking van de zetsteen. Hieruit volgt vervolgens de wijze van stabiliseren conform die werkmethode. ▪ Het is zeer ingewikkeld en kostbaar om in een laboratoriumomgeving onderzoek te doen naar de ecologische waarden van een zetsteenblok. Nabootsen van gebiedseigen milieucondities en verschaling van processen maken dit onder andere vrijwel onmogelijk. Het inzetten van een test met de blokken in de Westerschelde biedt hiervoor uitkomst. ▪ Omdat een groot aantal materiaaleigenschappen nauwkeurig en op kleine schaal gemeten kunnen worden in het laboratorium, is het mogelijk om eigenschappen als fysische eigenschappen, sterktes, en vormvastheid/afmetingen te onderzoeken in het lab. ▪ Zowel op laboratorium als werkelijke schaal (proefvak) worden de zetstenen beproefd. Met name de aanleg en metingen in het proefvak tonen de haalbaarheid. ▪ De literatuur alsook de specialisten zijn het met elkaar eens, een bijzondere vorm zetsteenblok maakt het naast interlocking ook mogelijk dat tot 50% van het gewicht bespaard kan worden. Er zullen voor dit onderzoek een aantal worden uitgedacht.

FASE 2 => Uitwerking technisch ontwerp en uitvoeringsmethodiek

De volgende vragen waren van belang tijdens deze fase:

- Welke eisen worden er gesteld aan de nieuwe zetsteenpers (perskracht, afmetingen, productiesnelheid, robuustheid, vormvastheid, etc.), met name gebaseerd op geldende regelgeving en optredende hydrodynamische belastingen;
- Welke eisen worden er zowel aan het zetsteenblok als aan de zetsteenpers gesteld bij uitvoering (ook in vergelijking met gangbare uitvoeringstechnieken door aannemers);
- Hoe ziet een technisch ontwerp van een dijkbekleding met zetsteen van baggerspecie eruit. Dit is onderzocht door een technisch ontwerp;
- Is het mogelijk om een zetsteen van baggerspecie te ontwerpen die zowel technisch (voldoet aan de ontwerp-eisen zoals gesteld) als commercieel haalbaar (qua duurzaamheid uitgedrukt in MKI) is en qua uitvoering aantrekkelijk is om zowel door opdrachtgevers als opdrachtnemers te worden toegepast. Dit is aangetoond met een uitgewerkt businessplan met verdienmodel;

NB. De ontwikkeling van zowel het laboratorium prototype zetsteenpers alsook het prototype zetsteenpers op ware schaal vonden plaats parallel aan Fase 1 en 2.

FASE 3 => Uitvoering van de pilot proefvak met zetsteen van baggerspecie op ware schaal

De volgende vragen waren van belang tijdens deze fase:

- Voldoet het ontwikkelde zetsteenblok van baggerspecie aan de geldende eisen die volgen uit regelgeving en optredende hydrodynamische belastingen? Is dit te meten met een proefopstelling?
- Welke gangbare en nieuwe monitoringstechnieken zijn er nodig om de zetsteenblokken van baggerspecie te toetsen aan de randvoorwaarden en (ontwerp)eisen? (te denken aan samples nemen, druksterktes meten, interlocking testen, effect van getijdewerking, erosie meten, materiaaleigenschappen monitoren, vries-dooi tests uitvoeren, visuele inspecties, etc.);
- Is het mogelijk om op ware schaal dezelfde tests uit te voeren als op laboratoriumschaal? Zijn de onderzoeksresultaten vergelijkbaar en treden dezelfde mechanismen op? Is de ecologische waarde van het zetsteenblok van baggerspecie net zo groot als blijkt uit de vegetatietests in de laboratorium opstelling?
- Is een dijkbekleding met zetsteen van baggerspecie qua uitvoeringsmethodiek haalbaar? Het streven is een proefvak van 100 m² in te richten conform het in fase 2 vastgestelde technische uitvoeringsontwerp.

FASE 4 => Evaluatie innovatie en rapportage, publicatie en presentatie resultaat

De volgende vragen waren van belang tijdens deze fase:

- Is de toegepaste zetsteen van baggerspecie qua duurzaamheid (levensduur) vergelijkbaar met beton? Is het mogelijk om aquatische ecologie te ontwikkelen op de zetsteenblokken? De pilotproef op werkelijke schaal is van belang om te onderzoeken of de zetsteen op ware schaal buiten het laboratorium geschikt is om hydrodynamische belastingen op te kunnen nemen. Naast het onderzoeken van de uitvoering was het dus van belang om de duurzaamheid en ecologische (meer)waarde van de zetsteen van baggerspecie te onderzoeken. Materiaaleigenschappen zoals bijvoorbeeld algengroei zijn vastgelegd en de ontwikkeling van zeewier is onderzocht en gemonitord. Uiteindelijk is de zetsteen van baggerspecie vergeleken met zetsteen van beton met behulp van een MKI-toets (onder andere LCA);

- Is het mogelijk om, gebaseerd op een gedetailleerde evaluatie tijdens en na het onderzoek en uitvoering van de pilot, vast te stellen dat de ontwikkelde zetsteen naast de technische haalbaarheid ook voldoet aan de commerciële haalbaarheid en daarbij een goed en duurzaam alternatief voor gangbare oeverbekleding vormt voor bevoegd gezag in Nederland en daarbuiten (prijs technisch, uitvoeringstechnisch, esthetisch, ecologisch, etc.)?
- Op welke wijze kan de ontwikkelde innovatie worden gepositioneerd in de huidige wet- en regelgeving? Welke resterende werkzaamheden moeten worden uitgevoerd om de certificering van zetsteen van baggerspecie in orde te krijgen? Is het mogelijk om de onderzoeksresultaten te verwerken in een bestaande of nieuwe leidraad? Dit is verwerkt in de Handreiking Zetsteen van Baggerspecie.

3 Fase 1- Haalbaarheidsonderzoek

3.1 GEOWALL®-technologie

NETICS heeft sinds 2012 ervaring opgebouwd met het toepassen van baggerspecie als harde constructie. GEOWALL® is een door NETICS gepatenteerde technologie die sinds 2014 wordt ontwikkeld door NETICS met als doel om met baggerspecie (civieltechnische) constructies te kunnen bouwen.

Een essentieel onderdeel van de innovatie Zetsteen van Baggerspecie is dat baggerspecie onder hoge druk wordt gestabiliseerd waardoor er ten opzichte van beton een minimale hoeveelheid primaire en secundaire binders nodig zijn. Zodoende is een unieke, specifieke, geschikte pers die het blok samenperst ontwikkeld.

3.1.1 Stand van de techniek bij aanvang pilot

Eind 2016 heeft NETICS een kleine pers ontwikkeld en deze door TNO laten testen. De pers produceert van baggerspecie bouwelementen met een afmeting van 30x14x15 cm met een sterkte van tussen 5 en 15 MPa. Deze relatief kleine blokken zijn door hun afmetingen niet geschikt om grote civieltechnische constructies (commercieel) mee te maken.

Tussen 2016 en 2019 heeft NETICS geprobeerd de techniek op te schalen met een bekisting waarin baggerspecie wordt samengeperst. Hierbij zijn blokken ontwikkeld met een afmeting van 150x80x80 cm. Echter, wat nog niet gelukt was is om deze blokken in één keer onder hoge druk samen te persen. Daarom zijn de blokken minder sterk en zijn er relatief hoge percentages binders nodig. De slibblokken hebben wel aangetoond dat van zoute baggerspecie grote blokken gemaakt kunnen worden. Echter blijkt het materiaal onvoldoende sterk te zijn om als zetsteen toegepast te worden. Ter illustratie volgen hierbij enkele voorbeelden.



Kleine steen (2014 – 2016)



Groot blok+bekisting (2016-2019)



Klein blok+bekisting (2017-2019)



GEOWALL® Kademuur bagger (2015)



Eerste resultaten van ecologische ontwikkeling op baggerblokken (2020)



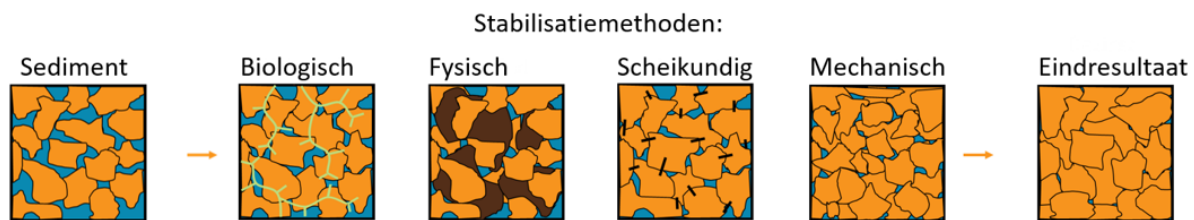
Figuur 6 Ontwikkeling GEOWALL® blokken door de tijd

De nieuw te ontwikkelen zetsteen van baggerspecie moest voldoen aan zeer strenge eisen die gelden voor een dergelijke steenbekleding. Daarom is er onder veel hogere druk en met specifieke binders geselecteerd op het type sediment een zetsteen blok helemaal opnieuw ontwikkeld. Bovendien is er onderzocht wat de nieuwe materiaaleigenschappen zijn in het kader van erosiegevoeligheid, robuustheid, vriesbestendigheid, etc. Kortom: een totaal nieuw product en ontwerp, met bijbehorende techniek, maar wel gebaseerd op de lessons-learned uit eerdere projecten.

3.1.2 Stabilisatie van baggerspecie

De toepasbaarheid van baggerspecie hangt sterk samen met de milieukundige en geofysische kwaliteit van het materiaal. De milieukundige kwaliteit van baggerspecie wordt gekenmerkt door de mate van verontreiniging en bepaalt of de wetgeving toestaat dat deze baggerspecie ergens mag worden toegepast. De geofysische kwaliteit anderzijds is bepalend voor de verwerkbaarheid van de baggerspecie en is dus een maat voor de potentie van baggerspecie om hergebruikt te worden als bouwstof.

Om van natte baggerspecie naar sterke en duurzame blokken te gaan, dient in elk geval de materiaalkundige kwaliteit van het product aanzienlijk verbeterd te worden. Hiervoor zijn verschillende stabilisatiemethoden beschikbaar welke grofweg zijn onder te verdelen in vier hoofdmethoden:



- Biologische stabilisatie = verbeteren structuur door natuurlijke rijping / landfarming.
- Fysische stabilisatie = verbeteren korrelverdeling door additie ander type grond.
- Scheikundige stabilisatie = verhogen bindingskrachten door toevoeging vezels&binders.
- Mechanische stabilisatie = verbeteren pakkingsgraad onder invloed van compactie.

Figuur 7 Verschillende methodes voor stabilisatie van baggerspecie

Binnen deze stabilisatiemethoden zijn verschillende opties beschikbaar, zoals perstechnieken, binders, sediment toevoegingen, (geo)polymeren en vezels. De stabilisatiemethode wordt geselecteerd op basis van het NETICS receptenmodel in combinatie met ervaring en literatuur. De volgende aspecten zijn hierin leidend:

- Optimalisatie op basis van modellering met NETICS receptenmodel
- Vormvastheid van het materiaal (afmetingen en structuur)
- Materiaalkundige eigenschappen (zoals doorlatendheid, dichtheid enhardheid)
- Erosiebestendigheid en duurzaamheid bij weersinvloeden
- Gunstige combinatie van prijs en MKI-score
- Ecologische meerwaarde van het product in relatie tot de omgeving

Een belangrijk aspect van GEOWALL®-bouwelementen is dat deze worden vervaardigd uit lokaal beschikbare baggerspecie. Dit betekent dat de samenstelling van de baggerspecie bepaalt of en op welke wijze deze gestabiliseerd kan worden tot bouwelement. Een hoog organische stofgehalte, specifieke zuurgraad, zoutgehalte en vele andere eigenschappen beïnvloeden de stabilisatiemethode. Zodoende is voor iedere baggersoort een specifiek receptenonderzoek noodzakelijk en zal het product ook per type/projectlocatie getoetst moeten worden op toepasbaarheid en milieu-hygiënische kwaliteiten.

3.1.3 Fysische stabilisatie

De meest eenvoudige en doeltreffende manier van sedimentstabilisatie is fysische stabilisatie. Dit houdt in dat andere type sedimenten worden toevoegt aan het basismateriaal (dit is de lokaal gewonnen baggerspecie die wordt gebruikt als basis). Voorbeelden van toevoegingen zijn zand, klei, leem, grind, maar ook het toevoegen van organische stoffen kan gezien worden als vorm van fysische stabilisatie, alhoewel dit een sterke overlap heeft met mechanische stabilisatie, bijvoorbeeld natuurlijke vezels zoals hennep en vlas. De belangrijkste doelen van fysische stabilisatie (zie Figuur 8) zijn het meer specifiek en vaak uniform maken van de compositie van het sediment zodat bij mechanische stabilisatie het percentage holle ruimten geoptimaliseerd wordt.

Een ander doel is het realiseren van een ideaal korrel skelet om de scheikundige stabilisatie te optimaliseren. Dit laatste doel heeft onder andere te maken met het vormen van de kristallijne structuur die een belangrijk onderdeel vormt van het uitharden van de blokken.



Figuur 8 Verschillende toevoegingen voor fysische stabilisatie

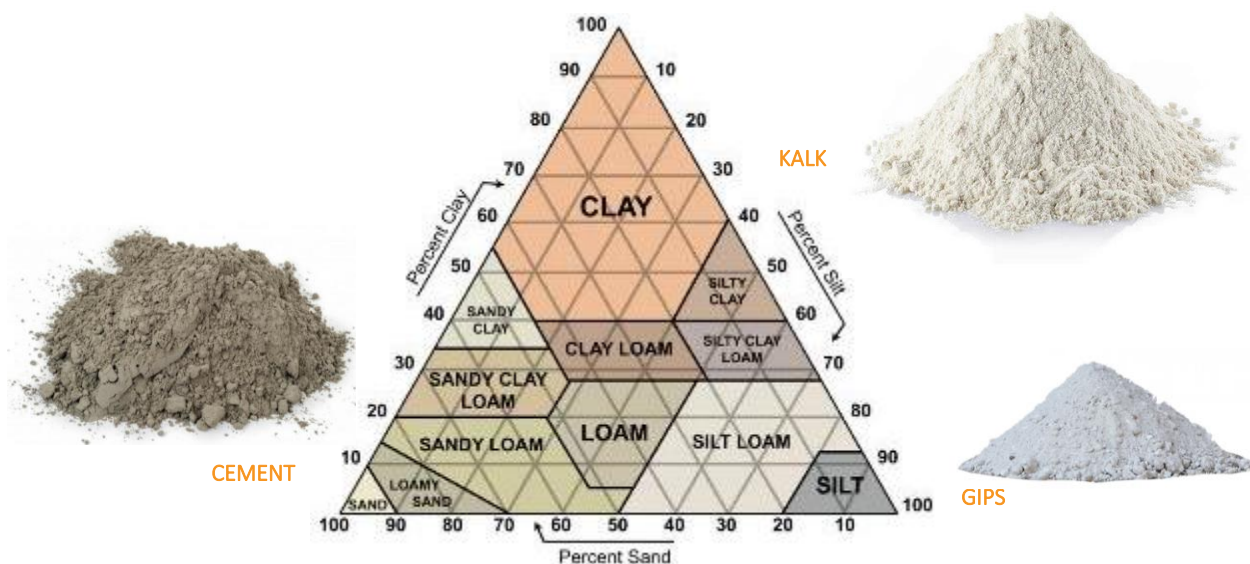
Een ander belangrijk aspect is de interactie tussen de korrelsoorten (die onder andere bepalend zijn voor het materiaal, de vorm/hoekigheid/sphericiteit etc.), bijvoorbeeld de relatie tussen klei en kalk of zand en cement. Naast dat het sediment invloed heeft op specifieke eigenschappen van het materiaal, bijvoorbeeld de sterkte-eigenschappen, kan de combinatie bepalend zijn voor andere eigenschappen zoals doorlaatbaarheid, buigstijfheid en vervormingscapaciteit (bijvoorbeeld voor het opvangen van krimp bij uitharding of uitzetting bij bevroering). Zodoende wordt het fysisch stabiliseren binnen het NETICS-receptenboek voor GEOWALL® blokken gezien als de eerste primaire stap die gezet wordt om het sediment te stabiliseren. De keuzes worden veelal gebaseerd op de compositie van het basismateriaal (sedimentanalyse), de wensen van de klant (bijvoorbeeld wel of geen gebruik van specifieke binders, eisen vanuit de MKI doelstellingen of circulariteit van de toepassing), de beschikbaarheid van grondsoorten of toevoegingen en uiteindelijk uiteraard ook de kostprijs van de mix. Dit laatste betekent in sommige gevallen dat er niet voor wordt gekozen de ideale fysische mix samen te stellen, maar juist meer te focussen op andere vormen van stabiliseren, bijvoorbeeld omdat de materiaalprijzen dit niet toelaten. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van zand in Azië waar er door tekorten hoge zandprijzen gelden en het financieel aantrekkelijk is om meer binders toe te passen.

3.1.4 Scheikundige stabilisatie

Nadat het ideale korrel skelet is bepaald, wordt een geoptimaliseerd recept samengesteld. Het toevoegen van stoffen aan het basismateriaal (uiteraard ook in combinatie met aanwezige zaken zoals water en organische stoffen) wordt gezien als scheikundige stabilisatie. Het selecteren van deze toevoegingen, vaak binders, vindt onder andere plaats op basis van de specifieke samenstelling van de mix, aanwezige stoffen, zuurgraad, etc.

Het basismateriaal voor dit project bestaat uit lokaal gewonnen baggerspecie. Om deze organische baggerspecie als bouwstof te kunnen gebruiken, zijn de bodemsoort- en eigenschappen belangrijke aspecten die vooraf moesten worden vastgelegd. De classificatie van de bodem en de geotechnische eigenschappen maken het mogelijk om enkele voorspellingen te doen van de interacties met bijvoorbeeld de bodembinders en de effectiviteit van de sedimentstabilisatie. Door een scala aan fysische en chemische mechanismen en de aanwezigheid van biota, bestaan sedimenten vaak uit een poreus mengsel van baggerspecie, zand, klei en organisch materiaal. Voor het geschikt maken van baggerspecie voor gebruik als bouwblok zijn tegenwoordig een aantal scheikundige sedimentstabilisatiemethoden beschikbaar. Dit proces betreft het toevoegen van specifiek afgestemde bindmiddelen conform recept.

Scheikundige stabilisatie omvat de introductie en/of optimalisatie van chemische reacties tussen de sedimentmineralen en stabilisatoren. Dit kan worden bereikt door cementachtig materiaal en/of puzzolaanmateriaal aan de baggerspecie toe te voegen. Ongebonden materialen kunnen scheikundig gestabiliseerd worden door toevoeging van bindmiddelen zoals cement, kalk, vliegias, bitumen, zeolieten, gips of combinaties van deze additieven zichtbaar in Figuur 9. Zelfs het toevoegen van geopolymeren behoort tot de mogelijkheden.



Figuur 9 Sedimentkwalificatie met additieven voor scheikundige stabilisatie

Het uiteindelijk gebruikte recept is gebaseerd hing af van welke materiaaleigenschappen aangepast of geoptimaliseerd moesten worden. Dit waren bijvoorbeeld de mechanische sterkte, samendrukbaarheid, permeabiliteit, volumestabiliteit of duurzaamheid. Het stabilisatierecept is zo ontworpen en uitgevoerd dat het na stabilisatie het geschikt blijft voor het gebruik waarvoor het nodig is. Voor het recept waren zowel laboratorium- als veldtesten vereist om de technische en milieu-eigenschappen te bepalen. Voor dit project zijn er kleine blokken in labomgeving en grote blokken in pilotomgeving gemaakt.

3.1.5 Mechanische stabilisatie

Nadat eventuele toevoegingen aan de baggerspecie voor het specifieke stabilisatierecept waren uitgedacht is het materiaal samengeperst. Mechanische stabilisatie vormt een cruciaal onderdeel van de GEOWALL®-technologie waarbij door de hoge perskracht een groot deel van de holle ruimten in de mix wordt opgevuld en alle korrels zodanig opeen worden geperst dat een ideaal korrelskelet ontstaat. Dit zorgt ervoor dat het effect van de scheikundige stabilisatie wordt geoptimaliseerd doordat er een zeer goede kristallijne structuur en verbinding wordt gevormd. Dit zorgt ervoor dat de benodigde materiaaleigenschappen van de blokken zijn verkregen.

Sinds 2013 is de perstechniek van de GEOWALL® in ontwikkeling. Gedurende de jaren zijn tal van innovaties bedacht om de energie efficiënter en nauwkeurig op het blok over te brengen. NETICS heeft onder andere geëxperimenteerd met horizontaal persen, verticaal persen, meerdere kleine cilinders, grote cilinders, verschillende typen materiaal voor mallen, vormen van perskoppen, snelheid en intensiteit van persen, aantal persslagen, positionering van de perskamer en het produceren van blokken met afwijkende vormen en uitsparingen. Tijdens deze ontwikkelingen is veel onderzoek gedaan naar effecten op het blok zodat in kaart kon worden gebracht wat er zich precies afspeelt in de perskamer en welke wijze van mechanisch stabiliseren leidt tot een specifiek resultaat gekoppeld aan het basismateriaal.

Inmiddels heeft NETICS tal van GEOWALL®-persen ontwikkeld en uitgetest. Deze persen hebben een variërende grootte en produceren blokken met diverse afmetingen en materiaaleigenschappen. Onderstaande figuur toont enkele van deze persen die zijn ontwikkeld.

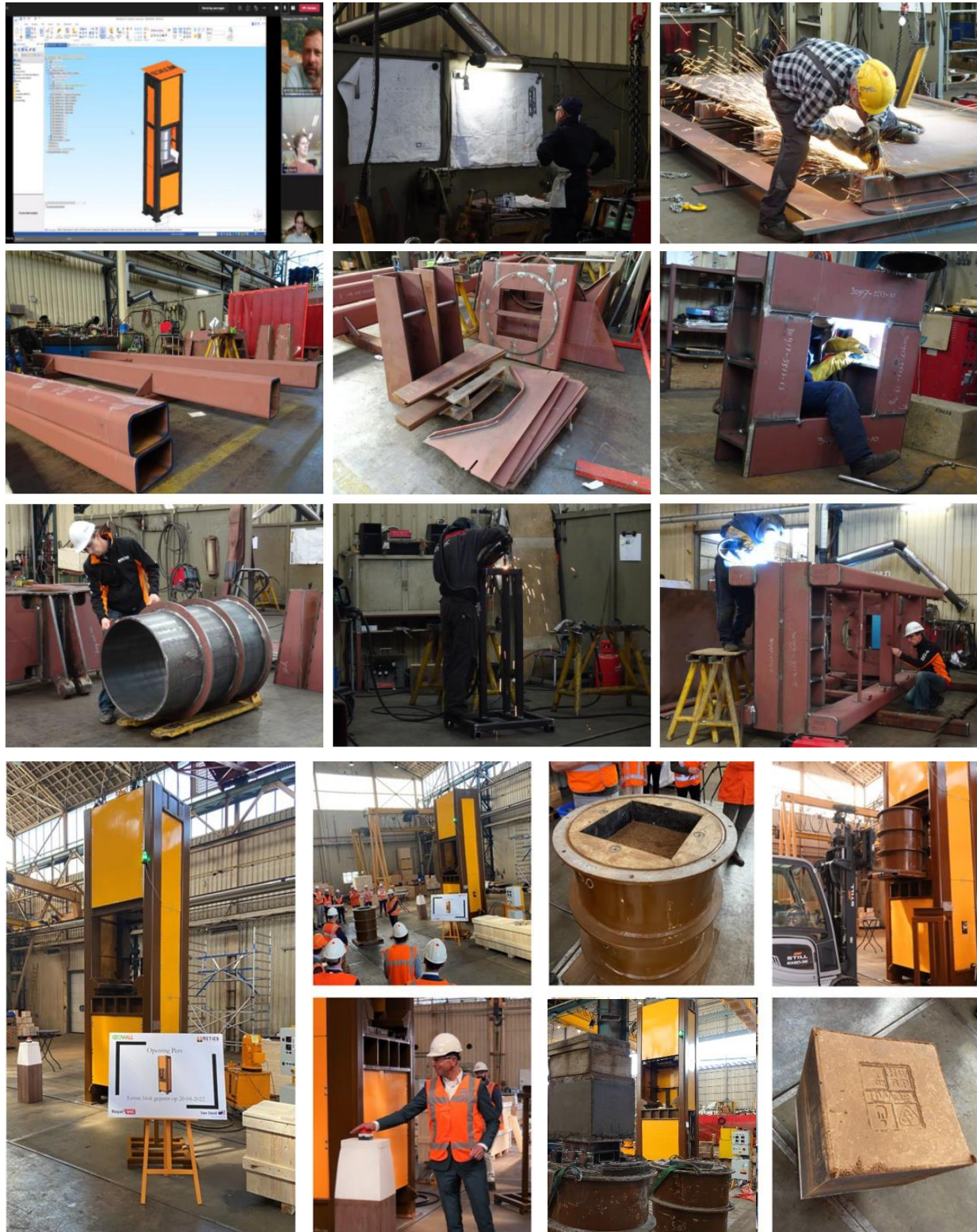


Figuur 10 Ontwikkeling van GEOWALL®-persen door de jaren heen

Voor het innovatieproject Zetsteen van Baggerspecie ontwikkelde NETICS een nieuwe pers die tot het volgende in staat is:

- Mobiliteit; op elke willekeurige locatie te plaatsen als onderdeel van een Baggerfabriek;
- Hoge druk > perskracht te leveren op het GEOWALL® blok;
- Perskracht op alle vlakken van het blok uit te oefenen;
- Blokken tot een maximaal formaat van 50 bij 50 centimeter te produceren;
- In de toekomst de mogelijkheid om blokken met verschillende vormen/uitsparingen te produceren;

De GEOWALL® pers die door NETICS is ontwikkeld is gemaakt van hoge sterkte staal en heeft grote cilinders die de noodzakelijke perskracht leveren. De mallen zijn in eerste instantie geschikt voor de productie van rechthoekige zetsteen blokken, echter bestaat de mogelijkheid om in de toekomst te experimenteren met verschillende vormen en uitsparingen. De eerste onderzoeken en proeven hiervoor zijn inmiddels ingezet. De afbeeldingen in Figuur 11 illustreren het ontwerp- en productieproces.



Figuur 11 Ontwikkeling en bouw van de GEOWALL® pers

3.1.6 Voorbeelden van toepassingen

Binnen de civiele techniek zijn tal van toepassingen denkbaar met GEOWALL® blokken. Dit project focust zich op het ontwikkelen van de Zetsteen van Bagger-specie. Dit is een relatief hoogwaardige toepassing omdat er hoge eisen gesteld worden aan vorm, materiaaleigenschappen, duurzaamheid, dichtheid en productiesnelheid.

Op kleine schaal zijn een aantal van deze aspecten inmiddels beproefd en bewezen. Zo is het mogelijk materiaal te maken met een specifieke druksterkte en zijn er blokken geproduceerd met verschillende vormen en uitsparingen.

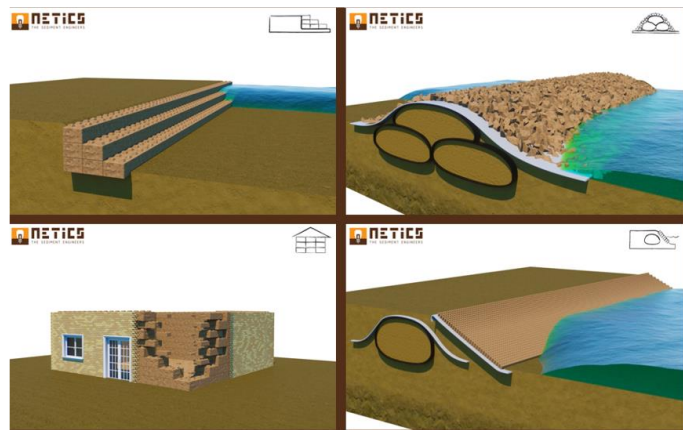


Figuur 12 Kleine GEOWALL® blokken in bijzondere vormen

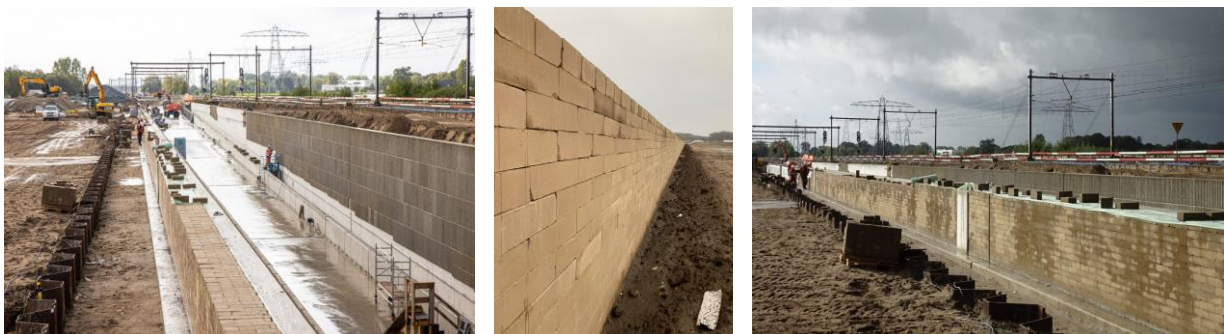
Met de voor dit project ontwikkelde GEOWALL® pers is het nu gelukt blokken groter dan baksteen formaat te maken die tevens de gewenste, of aanzienlijk hogere, materiaaleigenschappen hebben. Dat maakt dit project tot een uitdaging en tegelijkertijd toonaangevend in de wereld.

Als het lukt om Zetsteen van Bagger-specie te produceren, dan kunnen ook andere applicaties met de ontwikkelde kennis ontwikkeld worden. Te denken valt aan de volgende toepassingen:

- Vertikale kademuren
- Kunstmatige rifblokken
- Zetsteen
- Breuksteen
- Wegverhardingen
- Woningen en bouwerken
- CO2 absorberende blokken



Figuur 13 Verschillende toepassingen van GEOWALL® blokken van baggerspecie



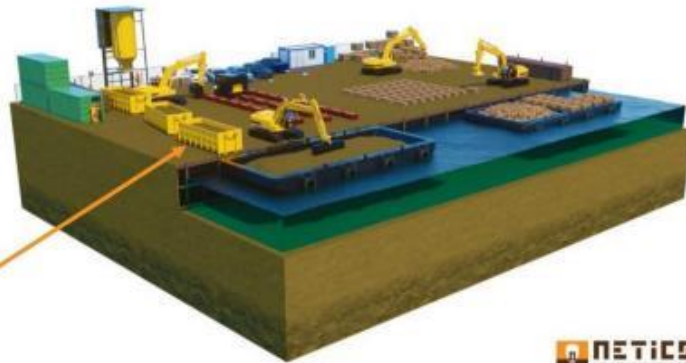
Figuur 14 Uitvoering van een GEOWALL® geluidsscherm van baggerspecie

3.1.7 Uitvoering met baggerfabriek

Samengevat kan de uitvoering als volgt worden beschouwd.

STAP 1 -> SEDIMENT ANALYSE

Het gebaggerde materiaal wordt getransporteert naar de baggerfabriek waar het vervolgens met een mobiele installatie wordt geanalyseerd en gemonitord. The sediment gegevens vormen cruciale input voor het receptenmodel.



STAP 2 -> RECEPT TOEPASSEN

Gebaseerd op een specifiek ontwikkeld recept wordt de baggerspecie fysisch en scheikundig gestabiliseerd door toevoeging van andere sedimenten en/of binders. Dit kunnen primaire en secundaire binders, puzzolanen, geopolymeren en zelfs ook vezels zijn.



STAP 3 -> MECHANISCHE STABILISATIE

De GEOWALL® pers gebruikt unieke eken gecombineerd met een enorme dynamische drukkracht van meer dan 400 bar om het mengsel samen te persen tot specifiek ontworpen blokken van baggerspecie met een bepaalde vorm, structuur, sterkte en afmeting.



STAP 4 -> SPECIFIEKE TOEPASSING

De GEOWALL® bouwelementen worden geproduceerd in elk gewenste vorm met karakteristieke eigenschappen. Voor elke businesscase wordt een specifieke toepassing geproduceerd. Het materiaal kan bovendien worden bewerkt, gebroken en gecrushed, circulair zelfs voor hergebruik!



Figuur 15 Concept van de Baggerfabriek

3.2 Receptenonderzoek

Om tot een specifiek recept voor Zetsteen van Baggerspecie te komen is een laboratoriumonderzoek en praktijktest uitgevoerd. Dit betekent dat eerst is onderzocht hoe de baggerspecie maximaal kan worden gestabiliseerd om aan de eisen te voldoen. De percentages die genoemd worden in de GEOWALL® recepten hebben betrekking op gewichtspercentages. Vervolgens is deze stabilisatiemethode opgeschaald en getoetst in zowel een proefopstelling op schaal alsook in een werkelijk proefvak. Er is onderzocht of de ontwikkelde techniek voldoet aan de randvoorwaarden en eisen. Door een continue monitoring is nagegaan hoe de zetstenen zich houden bij diverse type belastingen en onder wisselende weersinvloeden.



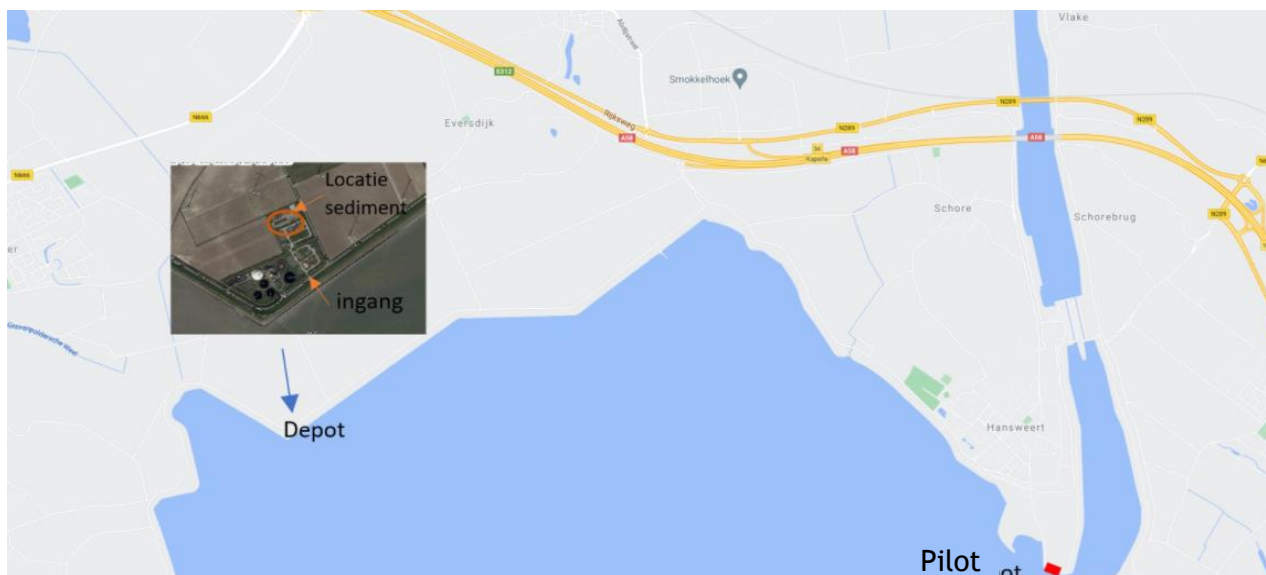
Figuur 16 Laboratoriumonderzoek receptuur Zetsteen van Baggerspecie

Tijdens de eerste fase zijn recepten geselecteerd die in het laboratoriumonderzoek (zie Figuur 16) beschouwd worden. De nieuw te ontwikkelen zetsteen is voor een aanzienlijk deel vervaardigd uit lokaal gebaggerd hoog organisch sediment. Om de stenen van elk type baggerspecie te kunnen produceren zijn er unieke recepten ontwikkeld. Deze recepten maken gebruik van een combinatie van verschillende stabilisatiemethoden zoals in hoofdstuk 3.1 omschreven.

Naast de keuze van de juiste toevoegingen en perskracht, zijn binders mogelijk. De werking van puzzolanen, geopolymeren, vezels zoals cellulose en tal van andere beschikbare binders zijn onderzocht. Tijdens de scheikundige stabilisatie is ook de mechanische stabilisatie een essentieel onderdeel van het productieproces. Door de steen onder een hoge drukkracht samen te persen krijgt deze de juiste vorm, sterkte en duurzaamheid (levensduur). Het bepalen van het juiste recept en de drukkracht gebeurt tijdens hoogwaardige praktijktests. Uiteindelijk wordt de zetsteen getest op sterkte, dichtheid, stabiliteit, erosiegevoeligheid, vervorming, structuur en uitloging. Ook is nagegaan of de ontwikkelde zetsteen geschikt is om op grote schaal, met de huidige uitvoeringstechnieken en machines, te worden gebruikt. Daarnaast werd de MKI-score van de ontwikkelde zetsteen vergeleken met die van betonnen zetsteen elementen.

3.2.1 Selectie en analyse van de baggerspecie

Na een uitgebreide analyse van beschikbare soorten baggerspecie die opgeslagen liggen in verschillende depots van het Waterschap Scheldestromen is besloten om ter plaatse van het baggerspeciedepot Willem Annapolder (zie de foto's in Figuur 18) een partij afgekeurde baggerspecie te gebruiken voor dit pilotproject. In toekomstige projecten is het doel om de winlocatie in de nabijheid van de toepassingslocatie te houden en de productielocatie van de zetsteen eveneens dichtbij. Voor deze pilot bleek dat de benodigde ruimte voor productie van de zetsteen nabij het proefvak in Hansweert niet voorhanden was. Daarom is besloten om de Baggerfabriek (productielocatie) op het depot te installeren. Dit betekent bij het depot direct de baggerspecie wordt omgezet tot zetsteenblokken.



Figuur 17 Luchtfoto en kaart winning baggerspecie: depot Willem Annapolder



Figuur 18 Veldbezoek depot Waterschap Scheldestromen

Op het depot zijn verschillende partijen baggerspecie onderzocht. Van iedere geselecteerde partij baggerspecie zijn op verschillende plaatsen samples genomen en in luchtdicht gesloten emmers gedaan. Van iedere emmer is een analyse gedaan en is een waterbodemonderzoek uitgevoerd. Deze analyse omvat de korrelgrootteverdeling en een selectie van scheikundige parameters. De resultaten van het onderzoek zijn samengevat in Tabel 2 op basis van het volledige onderzoek.

Tabel 2 Samenvatting resultaten onderzoek baggerspecie

	Klei (<2um)	Silt (2um-63um)	Zand (63um-2000um)	Grind (>2000um)	Organische stoffen	Chemische geschiktheid
Sample 1	5.3%	31.4%	63.3%	0.0%	6.2%	Klasse B
Sample 2	5.5%	52.4%	42.1%	0.0%	6.7%	Klasse A
Sample 3	8.7%	58.6%	32.7%	0.0%	4.2%	Klasse A

Met behulp van de NETICS Receptentool is vastgesteld dat de baggerspecie uit partij 1 (sample 1) het meest geschikt is voor het stabiliseren tot zetsteenblokken van baggerspecie. Deze partij betrof ook baggerspecie die voldoende is gerijpt en klaar was om uitgeklaard te worden.

Door het relatief lage percentage silt en lage gehalte aan organische stof is deze baggerspecie relatief gemakkelijker te stabiliseren. Daarnaast bevat sample 2 teveel organische stof, terwijl sample 3 een groot overschot heeft aan silt. Tot slot is de chemische uitloging op papier beperkt, maar laat sample 1 het minste risico op uitloging zien door het lagere gehalte aan minerale olie.

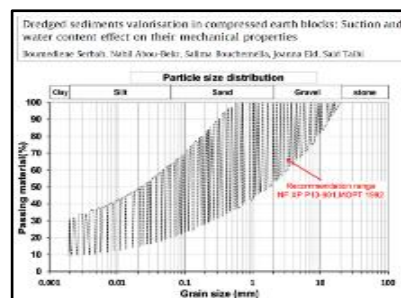
Het gehele onderzoek is gebaseerd op deze baggerspecie (sample 1). Voor de productiefaciliteit (Baggerfabriek) van de zetsteenblokken is voldoende werkruimte gereserveerd en is bovendien 40 m³ aan materiaal apart gehouden. De vervolgstappen in het ontwikkelen van de zetsteen zijn binnen dit project gedaan met sample 1. Om die reden is ook extra materiaal op een later moment opgehaald om de proefblokken voor het laboratoriumonderzoek van te kunnen maken.

3.2.2 Fysische stabilisatie van de geselecteerde baggerspecie

NETICS heeft uitgebreid kennis verzameld over de ideale samenstelling om blokken te produceren. Op basis van literatuur en jarenlange ervaring wordt bepaald welke korrelverdeling het meest geschikt is voor het inzetten van de GEOWALL®. Een heterogene korrelverdeling zal bijvoorbeeld resulteren in een betere binding door de interactie van sedimentdeeltjes die variëren in grootte.

De kennis van fysisch stabiliseren is vertaald naar een mathematisch NETICS-rekenmodel dat met empirische data met de tijd steeds nauwkeuriger en slimmer wordt. Dit rekenmodel bepaalt op basis van de sedimentcompositie welke wijze van stabilisatie het meest geschikt is, los van de kostprijs. Het streven was om zo een geoptimaliseerde korrelsamenstelling te krijgen. Omdat de beoogde toepassing zetsteen is werd een optimum nagestreefd. Bij het stabiliseren van de Hansweert baggerspecie zijn er met betrekking tot fysisch stabiliseren een aantal belangrijke observaties:

- De lokale baggerspecie is zeer organisch. Organische stof heeft een negatief effect op de ontwikkeling van sterkte en andere fysisch-chemische eigenschappen zoals vorstweerstand, permeabiliteit en flexibiliteit. Om voor het hoge organisch stofgehalte te compenseren zijn toevoegingen nodig, waarvan onder andere klei de chemische binding van organisch materiaal kan stimuleren;



- De zandfractie in de baggerspecie was relatief hoog, terwijl het klei-gehalte relatief laag was. Dit zorgde voor een toevoeging van juist fijner materiaal om het korrelskelet te optimaliseren.
- Er was geen grind aanwezig in de baggerspecie. Bij een optimaal recept is dit één van de belangrijkste fysische bestanddelen om sterke elementen te maken. Grind is daarom toegevoegd.

Op basis van de bovenstaande waarnemingen zijn er met het NETICS-model vijf verschillende hoofdrecepten gekozen met een wisselend percentage baggerspecie (basismateriaal voor dit onderzoek) tussen 25% en 100%. Tevens is gevarieerd in de hoeveelheid toevoegingen waarbij gekozen is voor zand, klei en grind. Met deze aanpak kon het effect van deze sedimenten op de fysische eigenschappen bepaald worden. Deze varianten van fysische stabilisatie werden later gecombineerd met ander type stabilisatietechnieken. Tabel 3 toont negen initiële recepten die een richting geven voor het bepalen van het meest ideale recept.

Tabel 3 Initiële recepten R1 t/m R9 voor baggerspecie toepassing Hansweert

	Baggerspecie	Zand	Klei	Grind	Binder (hfst .4.3)
R1					
R2	95%	-	-	-	5%
R3	75%	20%	-	-	5%
R4	49%	21%	11%	15%	4%
R5	29%	41%	11%	15%	4%
R6	39%	26%	13%	17%	5%
R7	37%	27%	13%	18%	8%
R8	33%	25%	12%	29%	8%
R9	37%	17%	21%	17%	8%

3.2.3 Scheikundige stabilisatie van de geselecteerde baggerspecie

Bij het scheikundig stabiliseren is voor deze pilot gebruik gemaakt van de grondbeginselen voor het maken van beton waarbij scheikundige binders gebruikt worden om een kristallijne structuur te krijgen waarbij deeltjes aan elkaar worden gebonden. Voor de geselecteerde baggerspecie is het bovendien van essentieel belang dat de organische deeltjes ook gebonden werden. Voor receptenonderzoek is gekeken naar een groot scala aan binders, maar zijn in de basis relatief goedkope en eenvoudige binders geselecteerd, namelijk cement, hydraulische kalk en een geopolymer.

Cement is gekozen zodat een degelijke vergelijking gemaakt kan worden met een betonnen zetsteen. Bovendien zijn de kosten van cement per gerealiseerde druksterkte relatief laag (ten opzichte van het stabiliserende effect) en is het ook mogelijk om hele hoge druksterkten te halen. Hydraulische kalk daarentegen kan in combinatie met cement een positieve bijdrage leveren aan de sterkteontwikkeling en heeft een positieve invloed op het stabiliseren van meer organisch basismateriaal. Geopolymeren zijn een volledige vervanging van cement en dienen als een alternatieve scheikundige stabilisatiemethode die, in potentie, meer resistent is tegen externe (weers)invloeden en erosie, dan standaard beton (bijvoorbeeld C30/37). Ten opzichte van beton ligt de prijs van geopolymeren een stuk hoger, maar zijn de ecologische kosten (onder andere vertaald in milieu-impact) in veel gevallen lager.

Voor het scheikundig stabiliseren werd gewerkt van grof naar fijn en zijn initieel vier verschillende combinaties van binders gekozen op basis van kleinschalige labproeven. Tijdens deze tests is onderzocht in hoeverre het basismateriaal reageert met specifieke binders. Binnen de ontwikkelde recepten variëren de toevoegingen van 6% tot maximaal 15% ten opzichte van het totale mengsel (incl. binders).

Voor recept R1 t/m R5 is ongeveer 5% cement gebruikt bij een variërende samenstelling. Voor recept R6 zijn vier verschillende scheikundige stabilisatietechnieken gebruikt. Voor recept R7 en R8 wordt een variant met cement en geopolymer getest. Recept R9 is een mix tussen cement en kalk. Deze is toegevoegd omdat kalk een relatief gunstig effect heeft bij het binden van organisch materiaal. Tot slot is een later stadium recept R10 toegevoegd. Recept R10_GP1, R10_GP2 en R10_GP3 zijn vergelijkbaar, maar zijn te onderscheiden van de vorm waarin het geopolymer toegevoegd wordt. Recept R10_GP1 bevat vloeibare geopolymeren. Recept R10_GP2 bevat droog waterglas en NaOH. Recept R10_GP3 bevat alleen droog waterglas. Recept R10 is, ten behoeve van duurzaamheid, ook uitgebreid met één variant met hoogovencement (26%).

In Tabel 4 is een overzicht weergegeven van recept R1 t/m R9, een selectie van de ontwikkelde recepten. Voor de recepten R6,R7 en R8 is er een variant ontwikkeld met een geopolymer. De reden hiervoor is dat er al in een vroeg stadium van het project rekening wordt gehouden met een terugvaloptie. Dit betekent dat als het recept in een later onderzoekstadium niet blijkt te voldoen aan de geldende eisen, er een potentieel betere variant beschikbaar is met geopolymeren, echter met naar verwachting hogere kostprijs maar wel lagere MKI.

Tabel 4 Overzicht scheikundige stabilisatie recepten R1 t/m R9

		Chemische stabilisatie			
		CEM I	Kalk	Geo-polymer	CEM III/b
R1	R1_CEM I	4.6%	-	-	-
R2	R2_CEM I	4.8%	-	-	-
R3	R3_CEM I	4.3%	-	-	-
R4	R4_CEM I	4.5%	-	-	-
R5	R5_CEM I	5.2%	-	-	-
R6	R6_CEM I	8.4%	-	-	-
	R6_Kalk	-	8.4%	-	-
	R6_GP	-	-	8.4%	-
	R6_CEM III	-	-	-	8.0%
	R6_CEM III (2)	-	-	-	18.0%
R7	R7_CEM I	8.9%	-	-	-
	R7_GP	8.2%	-	8.2%	-
R8	R8_CEM I	8.2%	-	-	-
	R8_GP	-	-	8.2%	-
R9	R9_CEM I	8.1%	4.0%	-	-

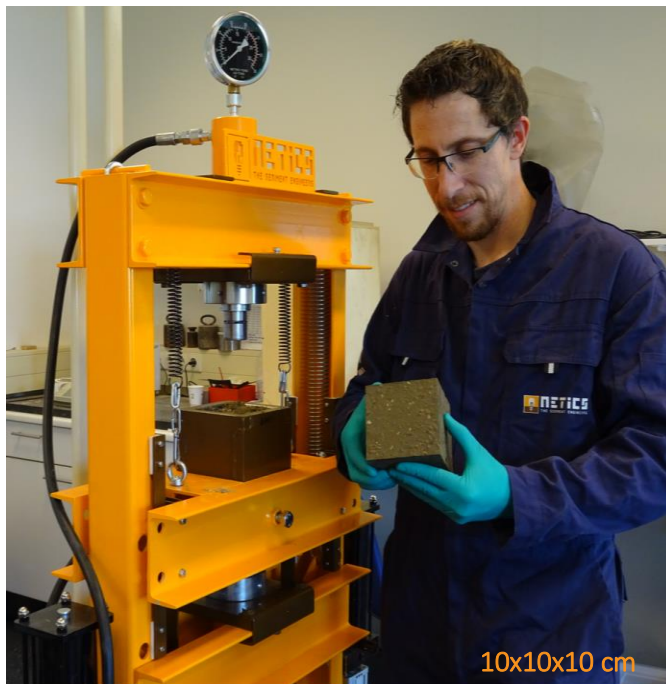
3.2.4 Mechanische stabilisatie van de geselecteerde baggerspecie

Naast de scheikundige stabilisatie is ook de mechanische stabilisatie een essentieel onderdeel van het productieproces. Door de mix (baggerspecie met toevoegingen) onder een hoge drukkracht samen te persen krijgt deze de juiste vorm, sterkte en duurzaamheid (levensduur). Het bepalen van de drukkracht gebeurt tijdens hoogwaardige praktijktests. Tijdens deze tests wordt gemeten wat de exacte perskracht in de perskamer is. Met behulp van 3D simulaties zijn er door NETICS modellen ontwikkeld waarmee per recept en dus ook type baggerspecie er bepaald kan worden met welke perskracht geperst moet worden.

Aspecten zoals korrelsamenstelling, vochtgehalte, organisch niveau en receptuur bepalen de wijze van mechanisch stabiliseren. Het ontwateren van het materiaal vormt hier een onderdeel van. Door de afkomst en samenstelling van de baggerspecie die voor dit project als basismateriaal is gebruikt is het voor de scheikundige reacties niet wenselijk een eerste ontwateringslag uit te voeren.

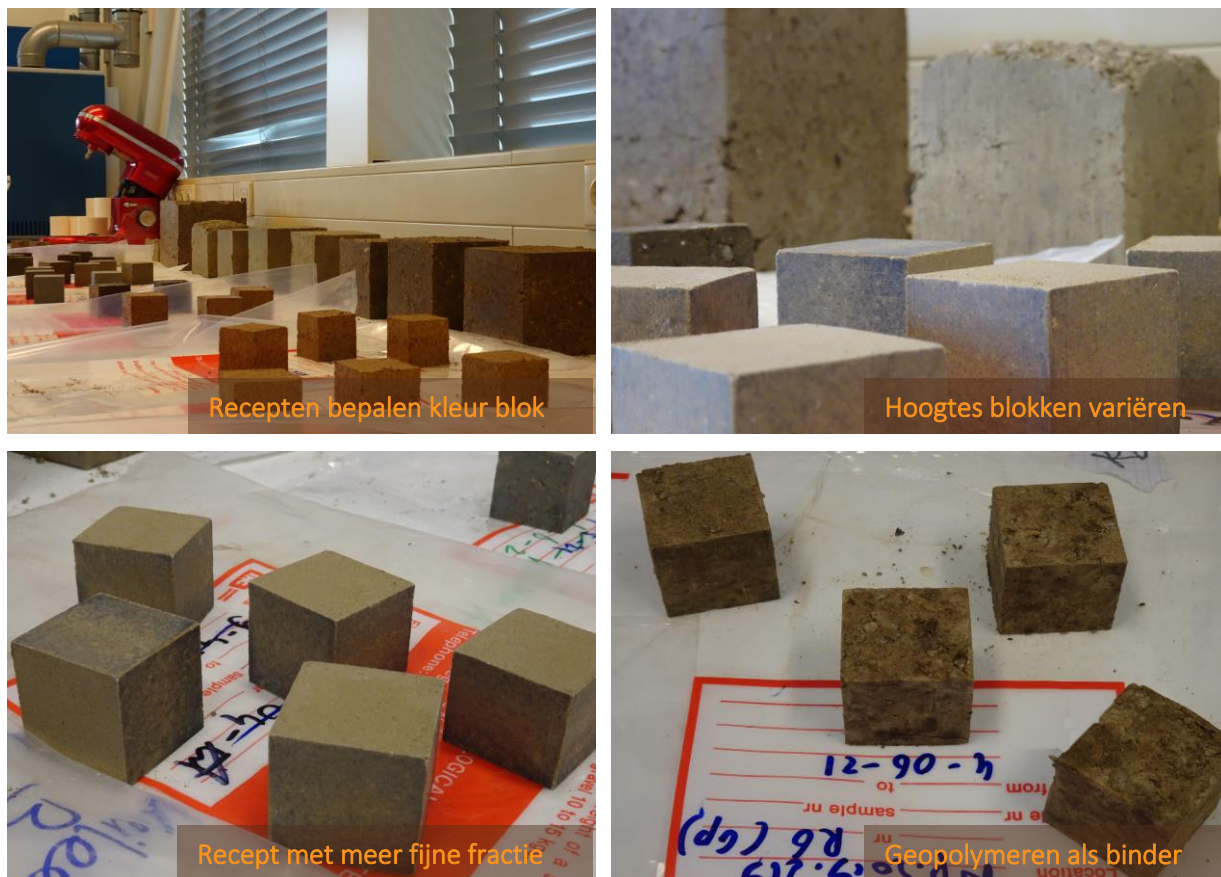
Om de juiste perskracht en uitvoeringsmethodiek te onderzoeken zijn alle proefblokken gemaakt met een labopstelling van de pers (zie hiernaast). Daarbij zijn kleine blokken (4x4x4 cm) geproduceerd die zijn gebruikt voor metingen zoals maatvastheid, dichtheid, druksterkte en duurzaamheid (onder andere vriesdooi). Ook werden er grotere blokken (10x10x10 cm) geproduceerd die ingezet zijn voor andere tests zoals onderzoek naar erosiebestendigheid en interactie met aquatische ecologie. Tenslotte zijn er langwerpige blokken gemaakt (16x4x4) die nodig waren om de buigsterkte van het materiaal te onderzoeken en de krimp die ontstaat als gevolg van (te snelle) droging en uitharding van het materiaal.

Onderstaande beelden tonen de verschillende afmetingen die tijdens de laboratoriumtest zijn geproduceerd zodat specifieke onderzoeken op het materiaal konden worden uitgevoerd.



Figuur 19 Impressie van de productie GEOWALL® zetsteen samples voor laboratoriumtests

Uitgangspunt voor het te ontwikkelen zetsteen waren onder andere uniforme afmetingen en kwaliteit van het oppervlak zoals vormvastheid, structuur en menging. Door verschillen in samendrukbaarheid (doordat mengels varieerden qua samenstelling en vochtgehalte) varieerde de hoogte in alle gevallen (ongeveer 1 – 5% van de breedte of lengte). Dit bleek zich voor te doen doordat minimale verschillen in de mix zorgen voor een andere compactieratio en daardoor andere hoogte van het blok.



Figuur 20 Overzicht van de verschillende samples voor onderzoek naar materiaaleigenschappen

3.2.5 Uithardingsproces van de laboratorium samples

Het uithardingsproces vormt een essentieel onderdeel van een GEOWALL® blok. Dit is vergelijkbaar met beton, echter verloopt de sterkte-ontwikkeling anders. Dit wordt bepaald door de sterktes op 7, 14, 28 en 56 dagen te meten. Dit geeft direct ook aan dat het voor dit onderzoek niet mogelijk is veel recepten tot in detail te onderzoeken. Van ieder recept zijn er namelijk meerdere blokken geproduceerd (in meervoud) en op verschillende dagen getest. Daarnaast is ervoor gekozen om in dit eerste stadium al te onderzoeken hoe het uithardingsproces verloopt en of dit is te beïnvloeden. Bijvoorbeeld door het afdekken of inpakken van de blokken net na productie. Tijdens eerdere onderzoeken is namelijk gebleken dat bij de blokken niet te snel mogen uitdrogen om scheurvorming te voorkomen.

Voor dit onderzoek zijn een deel van de blokken gedurende de eerste 7 dagen ingepakt in plastic. Hierdoor bleef het vochtgehalte in het blok langer constant en vond de uitharding sneller plaats zonder optreden van scheuren. Om deze reden is ervoor gekozen om alle verdere onderzoeken te doen met blokken die gedurende de eerste week zijn ingepakt. Parallel aan dit project is een uithardingsonderzoek gedaan. Alhoewel de resultaten goed waren, zal er in de toekomst gezocht worden naar meer duurzame technieken en materialen (zoals een alternatief op het gebruikte plastic).

3.2.6 Vaststellen van het meest geschikte recept

Op basis van de drie toegepaste stabilisatietechnieken is er een selectie gemaakt op basis van eerste afmetingen, dichtheden, krimp en druksterktes. Doordat voor dit onderzoek als uitgangspunt is genomen dat het materiaal vergelijkbaar moet zijn als beton (zodat bij de berekeningen in Steentoets verhoudingsgewijs eenzelfde ontwerp gemaakt kan worden als met beton), zijn dichtheden tussen 2150 en 2350 kg per kubieke meter, druksterktes tussen 30 en 40 MPa na 28 dagen geselecteerd en zijn krimp percentages tussen 1 en 3% aangehouden.

Uit de eerste laboratoriumproeven zijn negen recepten geselecteerd (R1 t/m R9) die in Tabel 5 beschreven zijn. Voor deze recepten is een stabilisatie met zowel primaire binders zoals cement als een geopolymer onderzocht en uitgewerkt. Hierbij is in deze fase nog gebruik gemaakt van CEM I om goed vergelijk te kunnen maken met betonnen zetsteen producten. In een latere fase is ook CEM III als toevoeging onderzocht hetgeen in de volgende paragraaf staat omschreven.

Tabel 5 Overzicht recepten geselecteerd uit projectfase 1

		Bronmateriaal	Fysische stabilisatie			Chemische stabilisatie			
		Nat Hansweert-sediment	Zand	Klei	Grind	CEM I	Kalk	Geo-polymeer	CEM III/b
R1	R1_CEM I	95%	-	-	-	5%	-	-	-
R2	R2_CEM I	75%	20%	-	-	5%	-	-	-
R3	R3_CEM I	49%	21%	11%	14%	4%	-	-	-
R4	R4_CEM I	28%	41%	11%	15%	4%	-	-	-
R5	R5_CEM I	38%	26%	13%	17%	5%	-	-	-
R6	R6_CEM I	37%	25%	13%	17%	8%	-	-	-
	R6_Kalk	37%	25%	13%	17%	-	8%	-	-
	R6_GP	37%	25%	13%	17%	-	-	8%	-
R7	R7_CEM I	33%	27%	13%	18%	9%	-	-	-
	R7_GP	31%	24%	12%	16%	8%	-	8%	-
R8	R8_CEM I	26%	25%	12%	29%	8%	-	-	-
	R8_GP	26%	25%	12%	29%	-	-	8%	-
R9	R9_CEM I	35%	16%	20%	16%	8%	4%	-	-

3.2.7 Verbetering van het recept t.b.v. duurzaamheid

Vanuit aanvullende eisen op het gebied van verduurzaming en verbetering van de MKI waarde is er besloten om nieuwe richtlijnen te stellen bij het verbeteren van de recepten:

- Verhoging van de druksterkte van de recepten tot bij voorkeur 30 MPa
- Reductie van vries-dooi effecten (inherent aan verhoging druksterkte)
- Verhoging van de relatieve hoeveelheid baggerspecie in de recepten
- Verbetering van milieukosten (MKI) door gebruik van andere binders (CEM III of geopolymeren)

Vanuit deze richtlijnen zijn nieuwe recepten ontwikkeld via twee verschillende sporen ter verbetering van de initiële recepten. Het eerste spoor maakt gebruik van geopolymeren als binder. Vergeleken met de eerder ontwikkelde geopolymer-recepten is er hierbij voor gezorgd dat er effectief meer baggerspecie hergebruikt wordt. Om een daling van de druksterkte te voorkomen, is er meer geopolymer-binder toegevoegd. Om de toevoeging van extra (zandig) baggerspecie te compenseren is er minder zand en meer grind toegevoegd. Zodoende is recept R10 ontwikkeld.

Recept R10_GP1, R10_GP2 en R10_GP3 zijn gebaseerd op een mengsel dat 44% baggerspecie en 34% geopolymer bevat. Recept R10_GP4 en R10_GP5 respectievelijk bevatten 26% en 16% geopolymer binder en daardoor 49% en 56% baggerspecie. Tabel 6 omschrijft de daadwerkelijke percentages gebaseerd op een totaal van 100% mengsel en baggerspecie met 75% droge stof.

Tabel 6 Overzicht recepten R10

		Bronmateriaal	Fysische stabilisatie			Chemische stabilisatie		
		Baggerspecie*	Zand	Klei	Grind	Cement	Kalk	Geopolymeer
R10**	R10_GP1,2,3	44%	-	-	22%	-	-	34%
	R10_GP4	49%	-	-	25%	-	-	26%
	R10_GP5	56%	-	-	28%	-	-	16%

*gebaseerd op baggerspecie met een droge stof gehalte van 75%

**gebaseerd op daadwerkelijke hoeveelheden

Recept R10_GP1, R10_GP2 en R10_GP3 zijn vergelijkbaar, maar zijn te onderscheiden van de vorm waarin het geopolymer toegevoerd wordt. Recept R10_GP1 bevat vloeibare geopolymeren. Recept R10_GP2 bevat droog waterglas en NaOH. Recept R10_GP3 bevat alleen droog waterglas.

Het tweede spoor dat onderscheiden wordt is het gebruik van CEM III in de bestaande recepten. CEM III (hoogovenement) stoot over de hele cyclus slechts ~30% van de totale hoeveelheid CO₂ uit vergeleken met CEM I (Portland cement). Recept R6_CEM III, R6_CEM III (2) en R10_CEM III zijn ontwikkeld om te onderzoeken wat het effect van CEM III in plaats van CEM I is op de sterkte-eigenschappen van zetsteen van de al bestaande recepten. Daarnaast is onderzocht of het mogelijk is om meer CEM III toe te voegen in combinatie met meer baggerspecie, zonder een verlies aan sterkte-eigenschappen. Dit gedaan voor recept R6. Dit heeft de volgende recepten opgeleverd:

Tabel 7 Overzicht recepten R6, R10

		Bronmateriaal	Fysische stabilisatie			Chemische stabilisatie		
		Baggerspecie*	Zand	Klei	Grind	Cement	Kalk	Geopolymeer
R6**	R6_CEM III	39%	24%	12%	16%	9%	-	-
	R6_CEM III (2)	35%	21%	11%	15%	18%	-	-
R10**	R10_CEM III	49%	-	-	25%	26%	-	-

*gebaseerd op baggerspecie met een droge stof gehalte van 75%

**gebaseerd op daadwerkelijke hoeveelheden

3.3 Laboratoriumonderzoek

De recepten die zijn bepaald, zijn één voor één geproduceerd in de vorm van kleine testblokjes. Hierdoor kunnen verscheidene testen uitgevoerd worden die relevant zijn voor de uiteindelijke toepassing in zetsteen:

- Afmetingen en dichtheid
- Structuur, textuur en doorlatendheid
- Hardheid en druksterktes
- Buigsterkte
- Erosiebestendigheid
- Ecologische meerwaarde
- Bestendigheid tegen weersinvloeden

Volgend op de bovenstaande testen wordt ook gekeken of zetsteen geschikt is om op grote schaal, met de huidige uitvoeringstechnieken en machines, te worden gebruikt. Daarnaast wordt de MKI-score van de ontwikkelde zetsteen vergeleken met die van betonnen zetsteen elementen.

3.3.1 Productie van proefelementen

De recepten zijn tijdens productie van de testblokken in kubusvormige blokjes geperst met een hydraulische pers. Vervolgens is een deel van de blokjes luchtdicht (7 dagen) verpakt voor uitharding en een deel niet. In Tabel 8 staat weergegeven om welke recepten het gaat. In onderstaande figuur is een visuele impressie weergegeven van het onderzoeksproces.



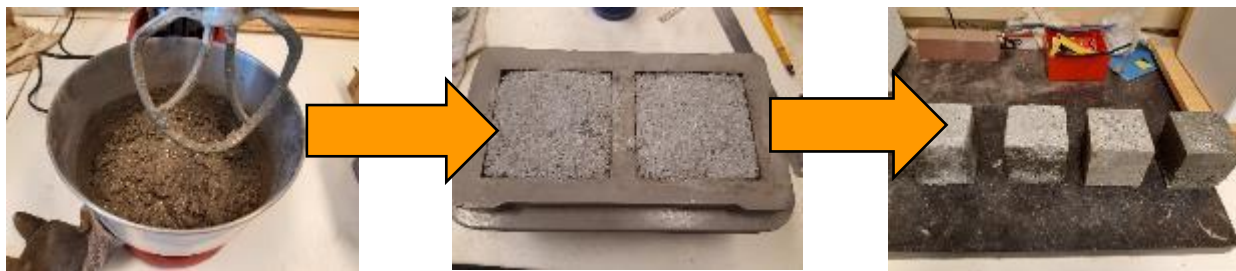
Figuur 21 Impressie van het onderzoeksproces

De blokken zijn na de receptvorming onder hoge druk geperst tot blokken met een hydraulische pers, zoals in Figuur 21 weergegeven. De hydraulische pers kan kleine blokjes (4x4x4 cm) produceren, maar ook grotere blokken (10x10x10 cm). De kleine blokken zijn met name bedoeld voor het testen van druksterkte. De grotere blokken zullen later in het onderzoek gebruikt worden. Ook kan de pers staven maken van (16x4x4 cm). Deze zijn uitsluitend bedoeld om de buigsterkte te bepalen. In Tabel 8 is een overzicht gemaakt van de verschillende afmetingen van proefblokken die geproduceerd zijn:

Tabel 8 Overzicht buigsterktes verschillende formaten blokken recepten R1 t/m R10 en beton

	R1	R2	R3	R4	R5	R6					R7	
	R1_CEM I	R2_CEM I	R3_CEM I	R4_CEM I	R5_CEM I	R6_CEM I	R6_Kalk	R6_GP	R6_CEM III	R6_CEM III (2)	R7_CEM I	R7_GP
Klein (4x4x4)	6	6	6	6	6	36	6	2	6	6	2	2
Groot (10x10x10)	-	-	-	-	-	2	-	2	2	-	2	2
Staven (16x4x4)	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-

	R8		R9	R10						Beton	
	R8_CEM I	R8_GP	R9_CEM I	R10_GP	R10_GP2	R10_GP3	R10_GP4	R10_GP5	R10_CEM III	Beton_CEM I	Beton_CEM III
Klein (4x4x4)	2	2	6	6	6	6	6	6	6	8	-
Groot (10x10x10)	2	2	-	2	-	-	-	-	2	4	2
Staven (16x4x4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4



Figuur 22 Impressie proces gieten, drogen en testen samples

Voor het produceren van de C30/37 betonblokken is een betonmal gebruikt van 4x4x4 cm. Het beton is vervolgens in vloeibare vorm in de mal gegoten en eveneens gedurende dezelfde tijd gedroogd en getest.

Na het produceren werden de blokken uitgehard voor een periode van totaal 28 dagen (zie Figuur 22) om er zeker van te zijn dat de eindsterkte wordt bereikt en de procedure voor beton te dupliceren. Na deze periode worden de blokken meteen getest op 28 dagen.

3.3.2 Dichtheid en afmetingen

Gedurende het productieproces is de dichtheid van de kleine testblokken gemeten. Over het algemeen geldt dat een hogere dichtheid gepaard gaat met een hogere druksterkte. Er zijn ook echter ook andere factoren die bijdragen aan een hogere druksterkte zoals de receptsamenstelling en uithardingsmethode.

De dichtheden van recepten R6, R7 en R8 zijn nagenoeg gelijk (zie Tabel 9) ondanks de variatie in ingrediënten. De dichtheid van een zetsteen is een belangrijke parameter m.b.t. stabiliteit in de ontwerpberoeeningen. Het heeft hier dus de voorkeur om recept R6 te kiezen aangezien de dichtheid nagenoeg gelijk is als recepten R7 en R8 en de hoeveelheid basismateriaal hoger is.

Tabel 9 Dichtheden recepten R1-R10 en beton

	R1	R2	R3	R4	R5	R6					R7	
	R1_CEM I	R2_CEM I	R3_CEM I	R4_CEM I	R5_CEM I	R6_CEM I	R6_Kalk	R6_GP	R6_CEM III	R6_CEM III (2)	R7_CEM I	R7_GP
Dichtheid (kg/dm ³)	1.41	1.48	1.61	1.83	1.84	2.08	1.82	2.09	2.15	2.21	2.09	2.11

	R8		R9	R10						Beton	
	R8_CEM I	R8_GP	R9_CEM I	R10_GP	R10_GP2	R10_GP3	R10_GP4	R10_GP5	R10_CEM III	Beton_CEM I	Beton_CEM III
Dichtheid (kg/dm ³)	2.13	2.11	1.90	2.14	2.19	2.06	2.08	2.32	2.15	2.0-2.6	2.0-2.6

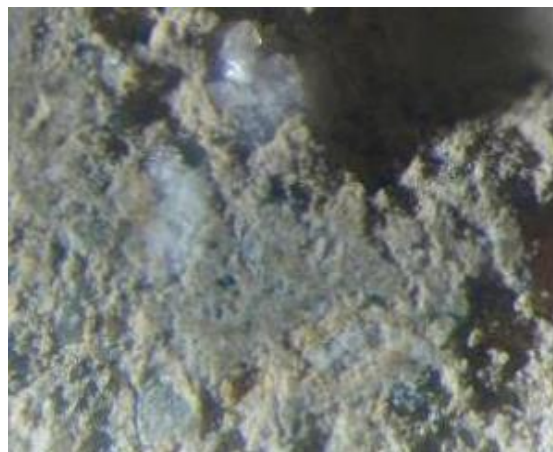
In het algemeen verhouden de dichtheden van recept R6 t/m R8 redelijk met 'normaal' beton van 2.0-2.6 kg/dm³. Recept R10 geeft de hoogste dichtheden van 2.06 tot 2.32.

3.3.3 Structuur, textuur en vochtdoorlatendheid

De structuur, textuur en vochtdoorlatendheid is gedurende het labonderzoek gemonitord door middel van visueel onderzoek.

De structuur van het materiaal is bepaald middels microscopisch-onderzoek. Hier is te zien hoe cement bindt ten opzichte van de korrels in het korrelskelet.

Vervolgens is bekeken in hoeverre de structuur toereikend is voor het maken van patronen en reliëf in de zetsteenblokken. Dit met het doel om uiteindelijk verschillende vormen en maten te produceren. De patronen in de zetsteenblokken laten duidelijk zien dat er een groot aandeel aan zand (fijn en grof) in het blok aanwezig is. Desalniettemin is de structuur stabiel.

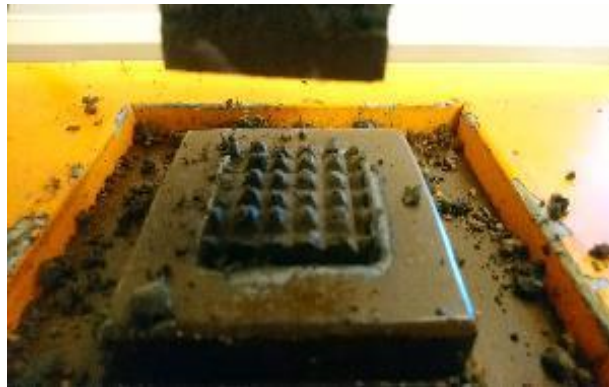


Figuur 23 Binding cement ten opzicht van korrels



Verschillende structuren kunnen aangebracht worden in de zetsteenblokken, die zelfs over langere tijd stabiel zijn. Dit is in eerder onderzoek vastgesteld:

De vochtdoorlatendheid is indicatief vastgesteld door 16x4x4 cm blokken bloot te stellen aan water over langere tijd. Hier is te zien dat de structuur weliswaar water opneemt, maar dat de structuur, textuur en sterktes nauwelijks aangetast worden. Deze observaties zijn tot in detail in een later stadium gedurende de testen van weersinvloeden, vastgesteld middels metingen



Figuur 24 Verschillende coatings en structuren aangebracht op zetsteenblokken

3.3.4 Hardheid en sterktes

De resultaten van de druktests en de analyse van samenstelling/eigenschappen van de recepten staan verder omschreven in de bijlage. Voor de meest veelbelovende recepten (R6, R7 en R8) zijn druktests uitgevoerd na een uithardingsperiode van 28 dagen. Ook deze resultaten kunnen worden teruggelezen in de resultatentabel van de bijlagen en zijn in Tabel 10 samengevat. Deze tabel kan worden gezien als de receptenkaart.



Figuur 25 Het testen van druksterkte

Tabel 10 Overzicht van resultaten

		Bronmateriaal	Fysische stabilisatie			Chemische stabilisatie				Testen
		Nat Hansweert- sediment	Zand	Klei	Grind	CEM I	Kalk	Geo- polymeer	CEM III/b	Gemiddelde Druksterkte (MPa)
R1	R1_CEM I	95%	-	-	-	5%	-	-	-	1.48
R2	R2_CEM I	75%	20%	-	-	5%	-	-	-	1.15
R3	R3_CEM I	49%	21%	11%	14%	4%	-	-	-	2.39
R4	R4_CEM I	28%	41%	11%	15%	4%	-	-	-	2.50
R5	R5_CEM I	38%	26%	13%	17%	5%	-	-	-	3.16
R6	R6_CEM I	37%	25%	13%	17%	8%	-	-	-	10.59
	R6_Kalk	37%	25%	13%	17%	-	8%	-	-	2.09
	R6_GP	37%	25%	13%	17%	-	-	8%	-	3.35
	R6_CEM III	39%	24%	12%	16%	-	-	-	8%	6.56
	R6_CEM III (2)	35%	21%	11%	15%	-	-	-	18%	17.44
R7	R7_CEM I	33%	27%	13%	18%	9%	-	-	-	12.19
	R7_GP	31%	24%	12%	16%	8%	-	8%	-	3.85
R8	R8_CEM I	26%	25%	12%	29%	8%	-	-	-	13.29
	R8_GP	26%	25%	12%	29%	-	-	8%	-	4.41
R9	R9_CEM I	35%	16%	20%	16%	8%	4%	-	-	12.59
R10	R10_GP	44%	-	-	22%	-	-	35%	-	30.10
	R10_GP2	44%	-	-	22%	-	-	35%	-	24.21
	R10_GP3	44%	-	-	22%	-	-	35%	-	10.88
	R10_GP4	50%	-	-	25%	-	-	25%	-	14.36
	R10_GP5	56%	-	-	28%	-	-	17%	-	15.37
	R10_CEM III	49%	-	-	25%	-	-	-	26%	18.64

Uit Tabel 10 volgt dat recepten R1 t/m 9 onvoldoende druksterkte (<30 MPa) geven om de eigenschappen van beton te reproduceren. Recept R10, met name als geopolymeren gebruikt worden, geven de hoogste druksterktes (10-30 MPa). Echter, hier is significant veel geopolymeerbinder (tot 35%) gebruikt. Zodra de hoeveelheid binder afneemt en er meer baggerspecie wordt hergebruikt, nemen de druksterktes af. Het optimum ligt bij recept R6_CEM III (2), waar nog steeds 35% baggerspecie wordt hergebruikt, en een gemiddelde druksterkte behaald wordt van 17.44 MPa.

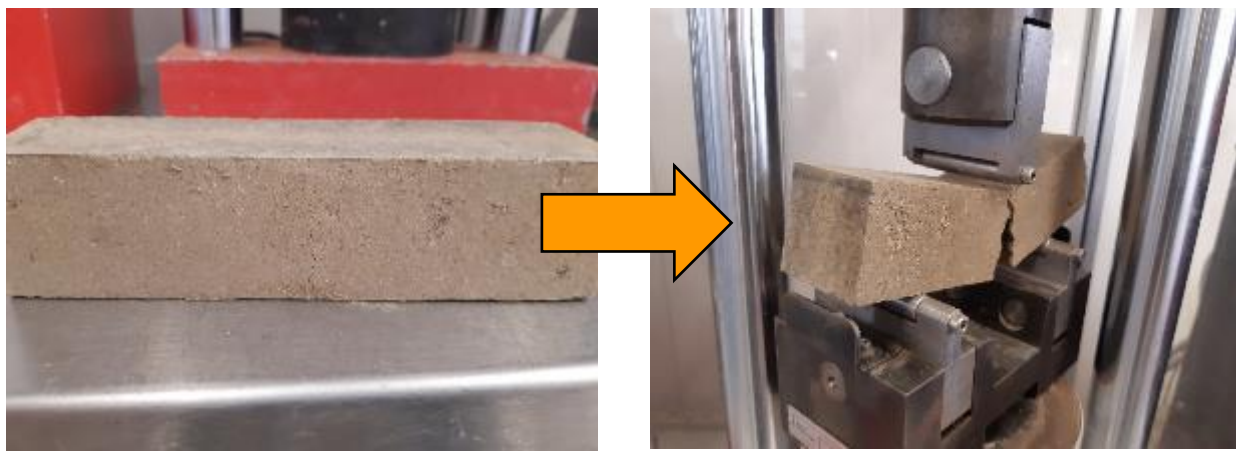
De hoge druksterktes op labschaal van recepten R6, R7 en R8 en R10 zijn het resultaat van:

- Een (nog) betere verdeling en samenstelling van sedimentfracties (fysische stabilisatie)
- Toevoeging van grind (fysische stabilisatie)
- Hogere cementfractie (van 6% naar 10%). (chemische stabilisatie)
- Luchtdicht verpakken van geproduceerde blokken (1^e 7 dagen van het uithardingsproces).

Daarnaast kan men zien dat de recepten met Kalk (R6_kalk) en geopolymere (R6_GP, R7_GP, R8_GP en R10_GP), per percentage binder relatief lagere sterktes geven dan de tegenhangers met Cement (R6.1, R7.1, R8.1). Dit betekent dat cement het meest effectief is als primaire binder voor de baggerspecie. Het cementtype (CEM I of CEM III) maakt geen significant verschil voor de druksterktes.

3.3.5 Buigsterktes

Bij het bepalen van de geschiktheid van zetsteen, is naast de druksterkte ook de buigsterkte relevant. Voor recept R6 zijn twee staven van 16x4x4 cm gemaakt. Deze staven zijn geoptimaliseerd qua afmetingen om de buigsterkteproef uit te voeren. Na het breken van de staven zoals in figuur te zien is, is er op het restant en een zelfde blok een additionele druksterkte proef uitgevoerd. Dit leert hoe de buigsterkte zich ten opzichte van de druksterkte verhoudt.



Figuur 26 Impressie van buigsterkteproeven

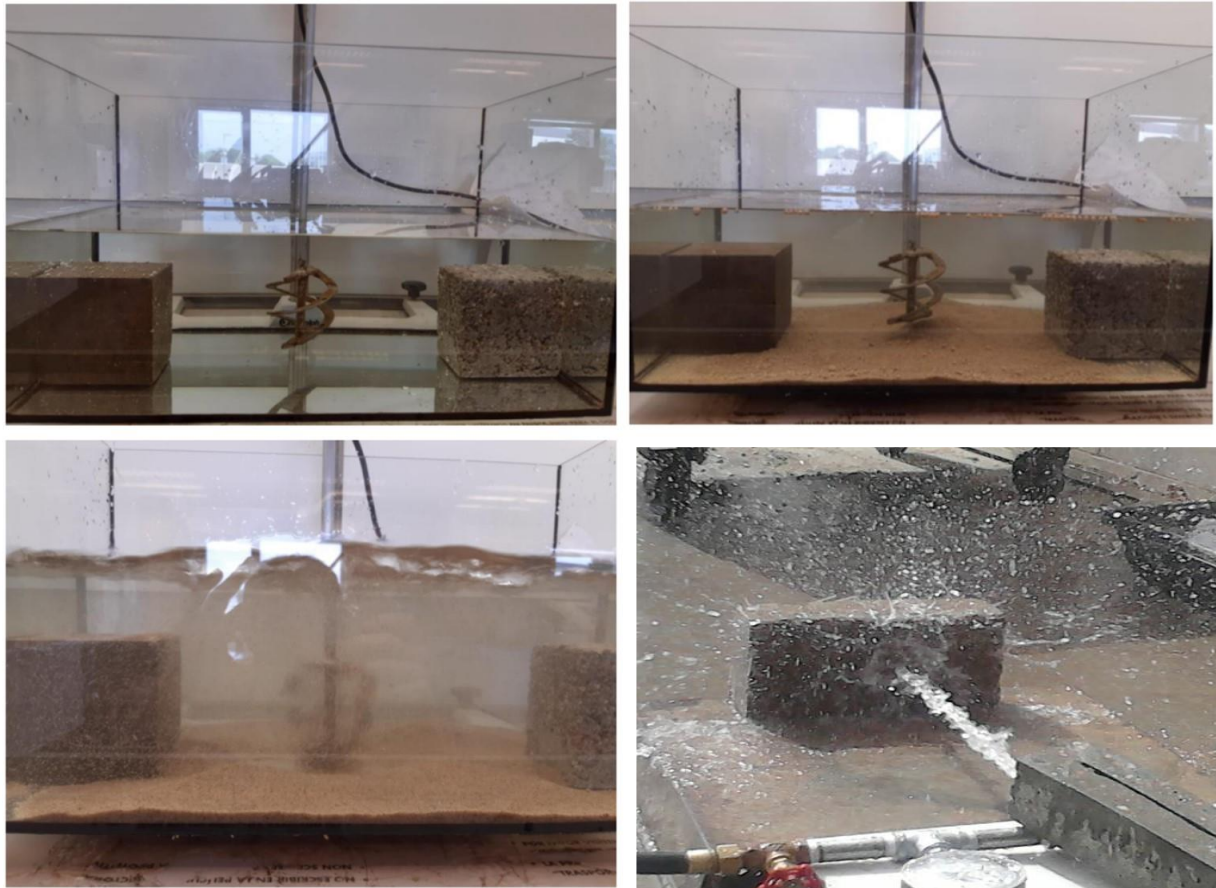
De buigsterkteproeven laten een vergelijkbare dichtheid zien als de 4x4 cm proefstukken uit recept R6 (zie Tabel 11). De buigsterkte laat een ratio van 9-19% ten opzichte van de druksterkte zien. Deze ratio is gemiddeld gezien vergelijkbaar ten opzichte van beton (10%). De buigsterkte (max. 1.97%) is lager dan beton. Dit is echter logisch vanwege de het productieproces van de blokken. Blokken die in vaste toestand gedrukt worden zijn minder homogeen dan gegoten beton, dat door de vloeibare toestand perfect gemixt is. De imperfecties in gedrukte blokken van baggerspecie zorgen ervoor dat de buigsterkte ratio niet gehaald wordt. Tot slot is buigsterkteproef geoptimaliseerd voor grotere sterktes dan 1-2 MPa. Het kan zo zijn dat er door deze methode onzekerheden geïntroduceerd worden in de proef. Echter kwalitatief komt er een duidelijk beeld naar voren qua dichtheden en buigsterktes waarbij de ratio in enkele gevallen bijna verdubbelde ten opzichte van beton. Dit zou het gevolg kunnen zijn van aanwezige (organische) vezelverbindingen of structuren ten gevolge van de samenstelling van baggerspecie. Bovendien zou de samendrukking door de GEOWALL® perstechniek kunnen zorgen voor extra stevige verbindingen.

Tabel 11 Dichtheden en buigsterktes R6 en R9

	Gemiddelde Dichtheid (kg/dm ³)	Gemiddelde Buigsterkte (Mpa)	Ratio buigsterkte/ druksterkte
R6_CEM I	2.04	1.97	18.9%
R9_CEM I	2.05	1.17	9.2%

3.3.6 Erosiebestendigheid en wateropname

De erosie van de zetsteen van baggerspecie is indicatief getest middels een erosietest. Dit is een indicatieve test waarmee een stroomgootprincipe wordt toegepast. Gedurende zes maanden is een significante stroming met zand (mix van fijn en grof zand) in suspensie gebracht en langs de samples gestroomd. Daarbij is een sample van recept R6 vergeleken met een genormeerd betonnen blok C30/37. De erosie is gemeten door dagelijks de proefblokken te wegen en visueel te beoordelen op schades. Onderstaande figuur geeft een impressie van deze proef. Tenslotte is er ook een test uitgevoerd met behulp van een waterstraal waarbij onderzocht is wat de schade is bij incidentele hoge belastingen.



Figuur 27 Impressie van erosietests door zand en water op proefblokken

Gedurende de test zijn verschillende blokken gemonitord op gewicht met daarbij de volgende resultaten

Tabel 12 Resultaten monitoring gewicht

	Initieel droog gewicht	Initieel nat gewicht	Gewichtstoename
Beton	2065 g	2122 g	2.7%
R6	1960 g	2086 g	6.0%

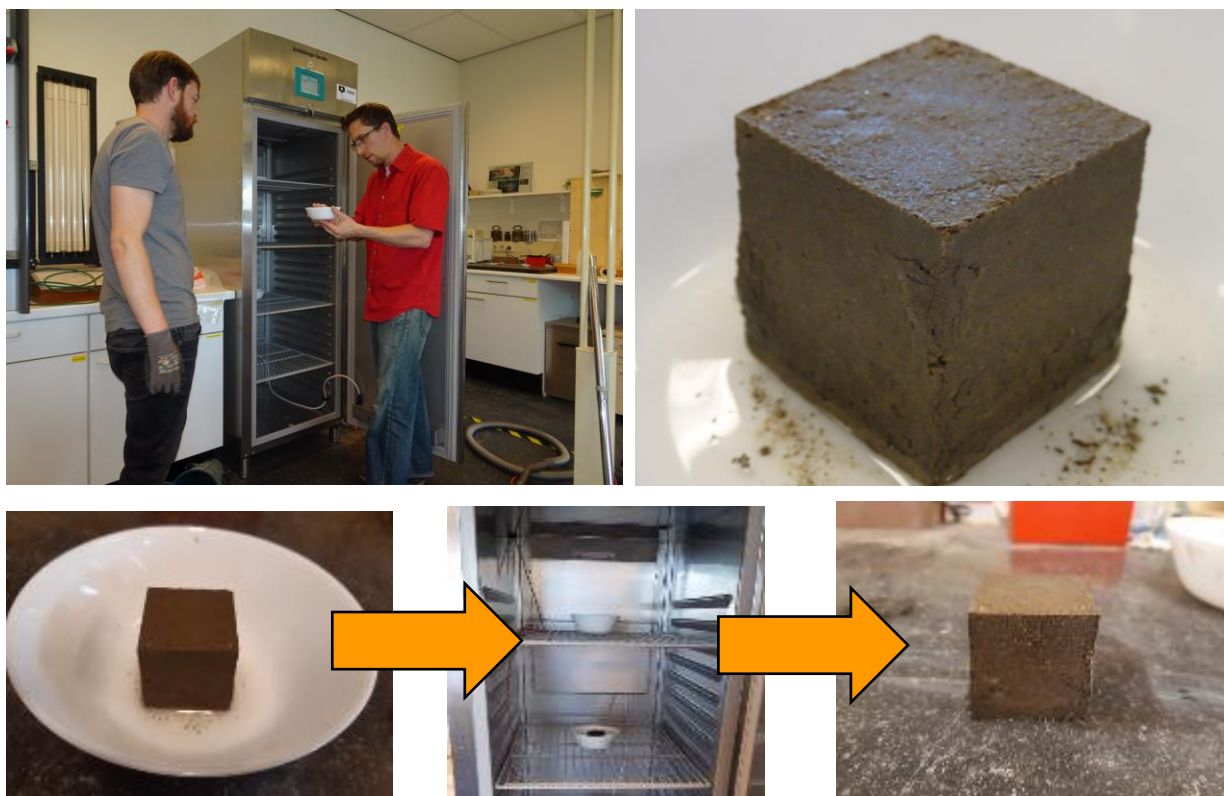
	Initieel nat gewicht	Gewicht na water mixing	Gewicht na zand mixing	Gewicht na zand en gravel mixing	Gemiddeld gewichtsverlies (%)
Beton	2122 g	2122 g	2121 g	2121 g	0.05%
R6	2086 g	2086 g	2084 g	2082 g	0.19%

Recept R6 geeft een gewichtstoename na inweken van 6.0% dat exact overeenkomt met de NEN-normen voor wateropneming van maximaal 6%.

Recept R6 geeft een gewichtsverlies van 0.19% over 6 maanden, terwijl beton een verlies van 0.05% geeft. Dit geeft de verwachting dat over een periode van bijvoorbeeld 100 jaar de erosie minimaal zal zijn. In een later stadium zal NETICS aanvullende erosietests uitvoeren met een nieuw ontwikkelde proefopstelling waarbij met behulp van sensoren nauwkeurig de stroming en dichtheid van het de stroom kan worden ingeregeld. Dit onderzoek zal naar verwachting meer kwantitatieve resultaten opleveren.

3.3.7 Effect van weersinvloeden

Het effect van weersinvloeden kan op verschillende manieren getest worden. Aangezien weersinvloeden lastig in het lab te simuleren zijn, is er gekozen voor een opzet met twee proeven: onder labcondities en in het veld. De samples van recept R6.1 zijn getest in het lab door ze bloot te stellen aan een vries-dooi-cycli-test (conform NEN-normering zoals die voor beton geldt). Recept R6.1 is gekozen aangezien deze als beste uit de eerdere tests kwam. Deze blokjes zijn zoals andere blokjes eerst 28 dagen uitgehard. Hierna zijn deze 3 dagen in een 3% NaCl oplossing in water worden blootgesteld alvorens ze de vries-dooi kast ingingen. In de vries- dooi kast zijn de blokjes in een bakje gezet met een klein laagje water (1cm) die om de drie dagen vervangen is. Deze cyclus duurt 28 dagen waarbij er een alternerend temperatuur-regime is van -20 tot 20 graden Celsius.



Figuur 28 Impressie van het onderzoek naar effect van weersinvloeden

Op dag 3, 7 en 28 dagen werden er foto's genomen voor de visuele inspectie en is het gewicht van de blokjes gemeten zoals in Figuur 28 weergegeven. Daarnaast zijn er op dag 28 druksterkte-tests gedaan en vergeleken met de druksterkte van de resterende R6 blokjes op 28 dagen. Dit geeft een goed inzicht in het effect van de vries-dooi cycli op de druksterkte.

Tabel 13 Resultaten tests druksterkte voor en na 28 dagen vries-dooi

	Gemiddeld Startgewicht	Gewicht na 7 dagen vries-dooi	Gewichtsverlies gemiddeld	Gemiddelde Druksterkte vóór vries-dooi	Gemiddelde Druksterkte na 28 dagen vries-dooi
R6	133.58	127.90	4.2%	9.33	4.58
R9	131.92	130.70	0.9%	12.12	3.63

Er is visueel te zien dat de blokken geen significante mankementen (zoals scheurtjes, erosie, textuur verandering etc.) vertonen na blootstelling aan de vries-dooi-test. Dit betekent dat de blokken bij een extreem scenario van 28 dagen vries en dooi in een rij, nog intact blijven. Het maximale verlies aan gewicht is 5% (zie Tabel 13) en er zullen bij langere blootstelling hooguit enkele scheurtjes op de hoeken voorkomen. Deze scheurtjes worden veelal veroorzaakt door het hoge gehalte aan organisch materiaal in het basismateriaal. Hierdoor is er na het produceren nog veel water aanwezig in de blokken, dat niet gebonden kan worden en daardoor uitzet en krimpt tijdens de vries-dooi-test. Recept R9, een variant van recept R6, is ontwikkeld om deze problemen te overkomen. De verwachting is dat het gewichtsverlies en de scheurvorming aanzienlijk verkleind zullen worden.

De testblokken blijven intact bij blootstelling aan de vries-dooi-test voor beton, maar er zouden vorderingen geboekt kunnen worden door het hoge gehalte aan organisch materiaal te binden (zie paragraaf 3.3.8)

3.3.8 Optimalisatie receptuur

De geoptimaliseerde recepten zijn getest op druksterkte, Tabel 14 geeft deze sterkte na 28 dagen.

Tabel 14 Resultaten druksterketesten na 28 dagen

		Bronmateriaal			Fysische stabilisatie			Chemische stabilisatie		
		Baggerspecie*	Zand	Klei	Grind	Cement	Kalk	Geo-polymeer	Gem. druksterkte (MPa)	
R6	R6_CEM III	39%	24%	12%	16%	9%	-	-	6.72	
	R6_CEM III (2)	35%	21%	11%	15%	18%	-	-	17.44	
R10	R10_GP1	44%	-	-	22%	-	-	34%	30.10	
	R10_GP2	44%	-	-	22%	-	-	34%	15.37	
	R10_GP3	44%	-	-	22%	-	-	34%	10.88	
	R10_GP4	49%	-	-	25%	-	-	26%	24.21	
	R10_GP5	56%	-	-	28%	-	-	16%	14.36	
	R10_CEM III	49%	-	-	25%	26%	-	-	18.64	

*gebaseerd op baggerspecie met een droge stof gehalte van 75%

**gebaseerd op daadwerkelijke hoeveelheden

De eerste resultaten wijzen uit dat recept R10 met 30-36% geopolymer-binder een druksterkte heeft die overeenkomt met de sterkte van betonnen zetsteen (+30 MPa). Daarnaast kan er met recept R10 zo'n 10-15% meer baggerspecie worden hergebruikt dan bij eerdere recepten het geval was. De productiemethode van de geopolymeren lijkt echter wel een groot verschil te maken. Recept R10_GP1, geproduceerd met NaOH-oplossing en waterglas-oplossing presteert beter dan andere recepten waar Waterglas-poeder (R10_GP3) of Waterglas- en NaOH-poeder (R10_GP3) is gebruikt. Recept R10_CEM III en R6_CEM III(II) geven vergelijkbare resultaten met het gebruik van hoogovencement, maar recept R6_CEM III(II) gebruikt een kleinere hoeveelheid cement en is dus minder milieubelastend.

Tabel 15 Resultaten buigsterkte tests R6 CEM III (II)

	Gemiddelde Dichtheid (kg/dm ³)	Gemiddelde Buigsterkte (Mpa)	Ratio buigsterkte/ druksterkte
R6_CEM III (II)	2.21	3.09	17.7%

Ook de buigsterketesten in Tabel 15 geven een verbeterde buigsterkte voor recept R6_CEM III (II) weer ten opzichte van het oorspronkelijke recept met Portland cement (CEM I). De buigsterkte van 3.09 MPa is vergelijkbaar met beton (3-4 MPa). Aanvullend op de druk- en buigsterketesten zijn de effecten van weersinvloeden getest zoals beschreven in sectie 3.3.7 voor recept R6_CEM III (II).



Figuur 29 Observaties slijtage blokjes

Uit bovenstaande observatie is te zien dat beide blokken vergelijkbare sterktes en buigratio hebben. Afgezien van afgebroken scherpe kanten zijn de blokken nog steeds functioneel en lijden deze weinig aan erosie. Wel is te zien dat, aangezien ongeveer 35% van de zetsteen uit baggerspecie bestaat de wateropname erg hoog is tijdens de testen in tegenstelling tot normaal beton. Op basis van de resultaten weergegeven in Figuur 29 is een additioneel onderzoek ingezet om te kijken naar verbeteringen van de bestaande recepten door additieven te vervangen door duurzame reststromen.

Tabel 16 Materialen en hun eigenschappen

Materiaal	Eigenschappen
Beton / Menggranulaat	Beton- en menggranulaat kan goed worden gebruikt als grind vervanger. Hierdoor gaat de MKI omlaag en word het materiaal hergebruikt. Aangezien dit een reststroom is en een niet homogeen product, kunnen de resultaten verschillen.
Glas granulaat	Glas kan worden gebruikt als alternatief voor zand. Heeft een iets lichtere dichtheid dan zand. Naar verwachting zal glas een hogere sterkte kunnen bereiken. Door middel van hoge temperatuur versterkt het zand tot glas. Aangezien hierbij gebruikt wordt gemaakt van glas granulaat (scherven zijn indien ook mogelijk) als reststroom zal de MKI dalen.
Vezels	Als natuurlijk alternatief materiaal zijn diverse vezels onderzocht. Hierbij is gebruikgemaakt van: Olifantengras (<i>Miscanthus giganteus</i>), een houtachtig meerjarig gewas. Het heeft een relatief laag vochtgehalte en kan opgroeien tot 3.5 meter hoog. Japanse Duizendknoop (<i>Fallopia japonica</i>) de meest invasie soort ter wereld, vormen vaak een bedreiging aan inheemse soorten en de biodiversiteit. Dit is mogelijk een alternatief voor Olifantengras. Stro, hierbij is gebruikgemaakt van Agir-stro tarwe haksel. Hiervan zijn alleen initiële testen uitgevoerd, en niet verder onderzocht.

De resultaten van de studie zijn in Tabel 17 weergegeven.

Tabel 17 Gekwantificeerde materiaaleigenschappen

	Bron	Fysische stabilisatie					Scheik stab.	Vezel		Testen
	Bagger-specie	Zand	Glas-zand	Klei	Grind	Meng-granulaat	Cement	Jap. Duiz. knoop	Olifanten-gras	Gem. druksterkte (MPa)
A (R6_CEM III)2	35%	21%		11%	15%		18%	-	-	17.44
B (R6_CEM I)	37%	25%		13%	17%		8%	-	-	8.74
C (glaszand)	35%		21%	11%	15.0%		18%	-	-	13.68
D (menggran.)	35%	21%		11%		15.0%	18%	-	-	14.90
E (vezels)	34%	21%		11%	15%		18%	1%	-	8.69
F (vezels)	34%	21%		11%	15%		18%	-	1%	11.55
G (vezels)	35%	20%		11%	14%		18%	2%	-	5.33
H (vezels)	35%	20%		11%	14%		18%	-	2%	7.39
I (vezels)	33%	19%		11%	14%		18%	5%	-	2.59
J (combi)	35%	-	21%	11%	-	15%	18%	-	-	2.27
K (combi)	35%	-	21%	11%	-	14%	18%	1%	-	13.76
L (combi)	35%	-	21%	11%	-	14%	18%	-	1%	10.72

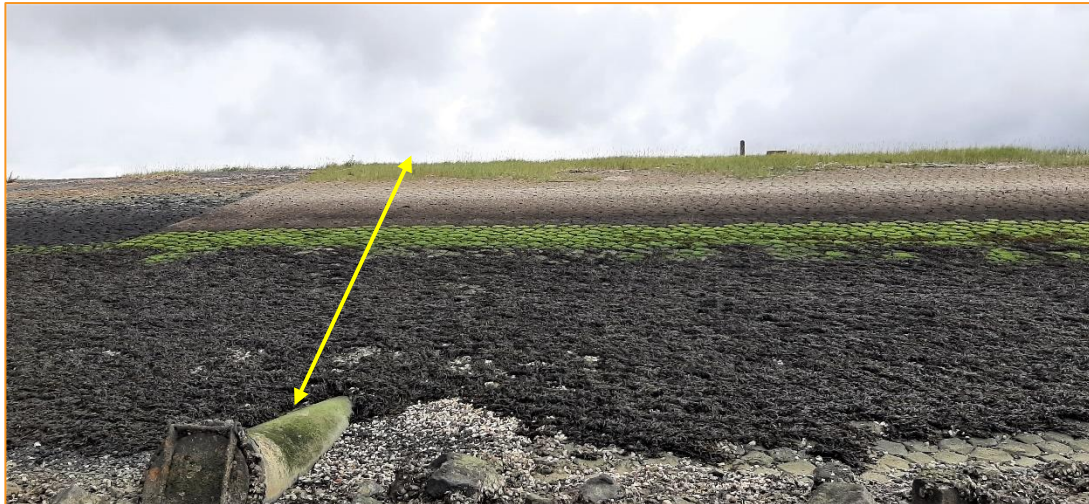
Alle alternatieven met duurzame reststromen leiden tot een lagere druksterkte dan de referentie R6_CEM III (II). Menggranulaat en Glaszand zijn het meest effectief en kunnen in een vervolgstadium eventueel overwogen op het gebied van duurzaamheid. Echter, op korte termijn voegen de alternatieven met betrekking tot functionele eigenschappen niet direct iets toe aan recept R6_CEM III(II).

3.4 Onderzoek ecologie en duurzaamheid

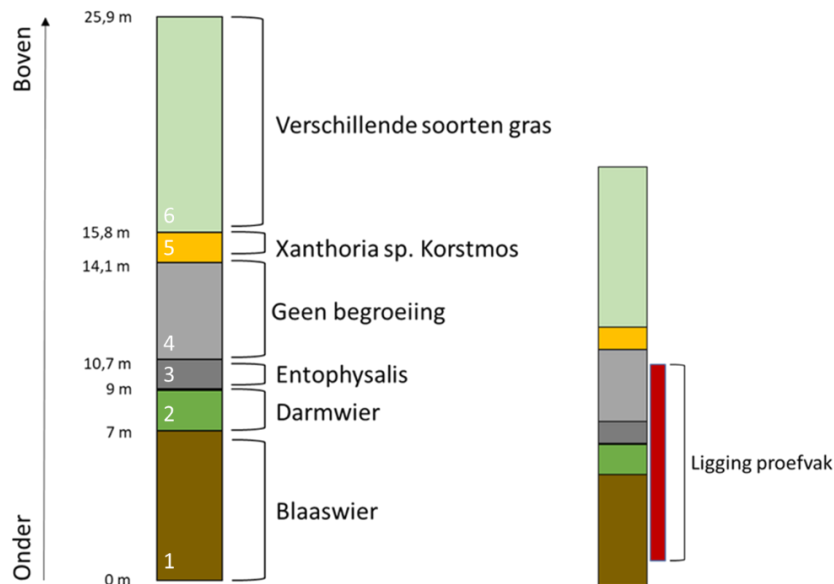
3.4.1 Initiële situatie ter plaatse van het proefvak

De ecologie ter plaatse van het proefvak en proefopstellingen is onderzocht door Peter Meininger (Bureau MaGRID) met daarbij ondersteuning van HZ Middelburg en Lise de Groen. Om de initiële situatie in kaart te brengen zijn er verschillende nulmetingen uitgevoerd. De dijkbekleding ter plaatse van het proefvak is onderzocht en tevens is er nabij de proefopstellingen ecologisch onderzoek verricht. De huidige dijkbekleding op de locatie van het proefvak bestaat uit zuilen van Basalton, een type dijkbekleding gemaakt van beton. Dit type dijkbekleding is doorgaans redelijk goed begroeibaar voor wieren. Ter plaatse van de teen van de dijk ligt een kreukelberm van breuksteen, die begroeid is met oesters. Dit is echter geen onderdeel van de nulmeting, omdat de nulmeting enkel gericht is op de locatie van het proefvak. De kreukelberm van breuksteen maakt hier geen onderdeel van uit.

De nulmeting heeft plaatsgevonden op 26 juni 2022, tijdens laagwater. Het waterniveau lag ver beneden de teen van de dijk, wat ervoor zorgde dat het gehele dijktaalud zichtbaar was. De meting is gedaan vanaf de eerste steen aan de voet van de dijk, tot aan de asfaltweg boven aan de dijk. Deze afstand bedraagt 25,9 m, waarbij 0 m onderaan en 25,9 m bovenaan de dijk is. Binnen deze afstand zijn 6 verschillende zones met begroeiing waar te nemen. Deze zijn in Figuur 30 te herkennen aan de verschillende kleuren. De determinatie van de ecologische zones is uitgevoerd als nulmeting. De resultaten hiervan zijn in Figuur 31 nader omschreven. Er worden in totaal zes zones onderscheiden waarbij begonnen wordt nabij de laagwaterlijn met de eerste zone. Het proefvak zal geplaatst worden op de huidige bekleding, op ongeveer +1m boven NAP. Het proefvak zelf wordt 10 meter lang en zal in totaal 4 begroeiingszones bedekken.



Figuur 30 Verschillende ecologische zones met begroeiing



Figuur 31 Verschillende zones van begroeiing in meter boven NAP

Van onder naar boven zijn er de zones 1 t/m 6. Zone 1 gedefinieerd vanaf 0 tot 7 m boven NAP. Deze zone bestaat geheel uit blaaswier (*Fucus vesiculosus*) en bevindt zich tijdens hoogwater vrijwel altijd onderwater. Zone 2 bestaat geheel uit klein darmwier (*Blidingia minima*) en bevindt zich eveneens vrijwel altijd onderwater. Zone 3 bestaat uit *Entophysalis* (*Entophysalis deutsa*) en correspondeert met de spatwaterzone. Deze zone is te herkennen aan het zwarte uiterlijk. Zone 4 is kaal en bevat geen verdere begroeiing. Zone 5 bevat enkele vaatplanten en kleurt geel door de aanwezigheid van korstmos (*Xanthoria* sp.). Verdere begroeiing ontbreekt echter in deze zone. Zone 6 bevat de meeste variatie in begroeiing, doordat deze zone het verst van de Westerschelde af ligt en weinig tot niet in aanraking komt met het water. De variatie van planten loopt van korstmos (*Verrucaria* sp.) tot Engels raigras en bevat een vergelijkbare vegetatie als aan de andere kant van de dijk. (P. L. Meininger, 2022)

Alle soorten begroeiing zijn weergegeven in Tabel 18 op de volgende pagina.

Tabel 18 Omschrijving van ecologie ter plaatse van de verschillende zones

Zones	Hoogte (in m boven NAP)	Soort begroeiing
Zone 1	0-7	Blaaswier, <i>Fucus vesiculosus</i>
Zone 2	7-9	Klein darmwier, <i>Blidingia minima</i>
Zone 3	9-10,7	<i>Entophysalis deutsa</i>
Zone 4	10,7-14,1	Geen beplanting
Zone 5	14,1-15,8	Korstmos, <i>Xanthoria sp.</i>
Zone 6	15,8-25,9	Bezemkruid, <i>Senecio inaequidens</i> Hertshoornweegbree, <i>Plantago coronopus</i> Melkkruid, <i>Glaux maritima</i> Engels raaigras, <i>Lolium perenne</i> Korstmos, <i>Verrucaria sp.</i>

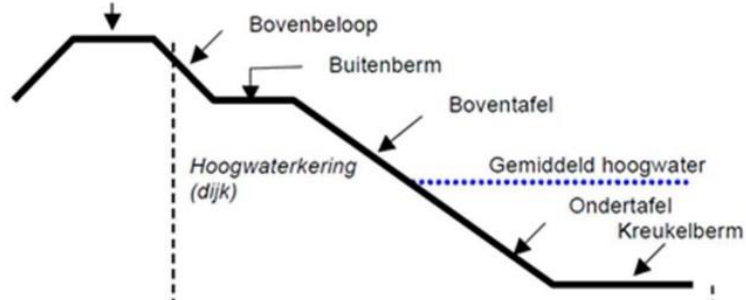
Doordat het proefvak met GEOWALL® Zetsteenblokken van baggerspecie en enkele betonnen blokken in september 2022 op de ondertafel is aangelegd, was het niet mogelijk om een relevante ecologische waarneming uit te voeren.



Figuur 32 Proefvak zetsteen van baggerspecie net na aanleg

(P. L. Meininger, 2022)

De monitoring omvat het inmeten van de constructies bij aanvang (nulsituatie), het bepalen van de (hydrodynamische) belastingen op de constructie en het vaststellen van de effecten van belastingen op zetsteen (zoals schade aan de steen) en de algehele eigenschappen van het proefvak (zoals esthetische veranderingen). Ook de ontwikkeling van de flora en de fauna zullen gedurende enkele jaren worden bijgehouden: de ecologische monitoring.



De ecologie zal in de periode 2023 tot en met 2025 worden gemonitord door onder andere de HZ Middelburg en ecologische specialisten.

Voor het onderzoeken van de ecologie zijn er twee belangrijke onderzoeksrichtingen gedefinieerd;

1. Invloed van verschil in substraten op de vestiging en ontwikkeling van flora
2. Kwalitatieve analyse van ontwikkeling op de verschillende typen substraten

Voor de ecologische analyse is het volgende schema aangehouden (Figuur 33)



Figuur 33 Schematisatie van de proefopstelling ecologie bestaande uit vier onderzoeksframes

3.4.2 Proefopstellingen

Naast het evalueren van de civieltechnische eigenschappen van zetsteen, is een ander doel van dit onderzoek het stimuleren van ecologische ontwikkeling op de zetsteen van baggerspecie. Om dit te onderzoeken is een specifiek monitoringsplan opgesteld waarbij verschillende ecologische aspecten getoetst zijn. Eerste aanzet tot dit onderzoek is het plaatsen van een raamwerk met proefblokken ter plaatse van de pilotlocatie in Hansweert. Naast ecologische ontwikkeling zijn hierbij ook andere eigenschappen zoals erosiebestendigheid onderzocht. In deze paragraaf wordt een beknopte omschrijving van dit onderzoek gegeven.

Het wel of niet vestigen van ecologisch leven op de zetsteenblokken van baggerspecie is moeilijk te voorspellen. Er zijn talloze factoren van invloed of er wel of niet succesvol nieuw leven op een hard substraat zal vestigen. Zodoende lopen er binnen Nederland al verscheidene onderzoeken waarbij harde substraten, zowel in water als op land, getest worden met het doel om ecologisch leven te stimuleren. Het testen van ecologisch leven op zetsteen van baggerspecie is een uniek concept. Zetsteen van baggerspecie ten opzichte van conventioneel beton kan een positieve invloed geven op het vestigen van zeeleven. Mogelijke factoren die hierbij een rol spelen zijn het lokaal variëren in hardheid van het substraat, potentiële aantrekkelijke scheikundige eigenschappen en/of het ruwere oppervlak van baggerblokken.

Het doel van dit eerste verkennende onderzoek was om globaal een beeld te krijgen van de potentie voor het vestigen van ecologisch leven, maar ook om een inschatting te maken van de invloed van randeffecten, zoals de standplaats, het type substraat, de golfdynamiek en van getijden op de ontwikkelde blokken. Zodoende kunnen de lessen die in dit gedeelte van het onderzoek geleerd worden, meegenomen worden in Fase 3 waarin een uitgebreid ecologisch onderzoek wordt uitgevoerd.

Voor dit onderzoek is een methode ontwikkeld waarbij gebruik is gemaakt van vier frames (die in een zeer zout milieu kunnen worden gebruikt) waarin verschillende blokken (drie rijen van drie blokken 10x10x10 cm) zijn geplaatst.



Figuur 34 Impressie bouw van de ecologische onderzoeksframes

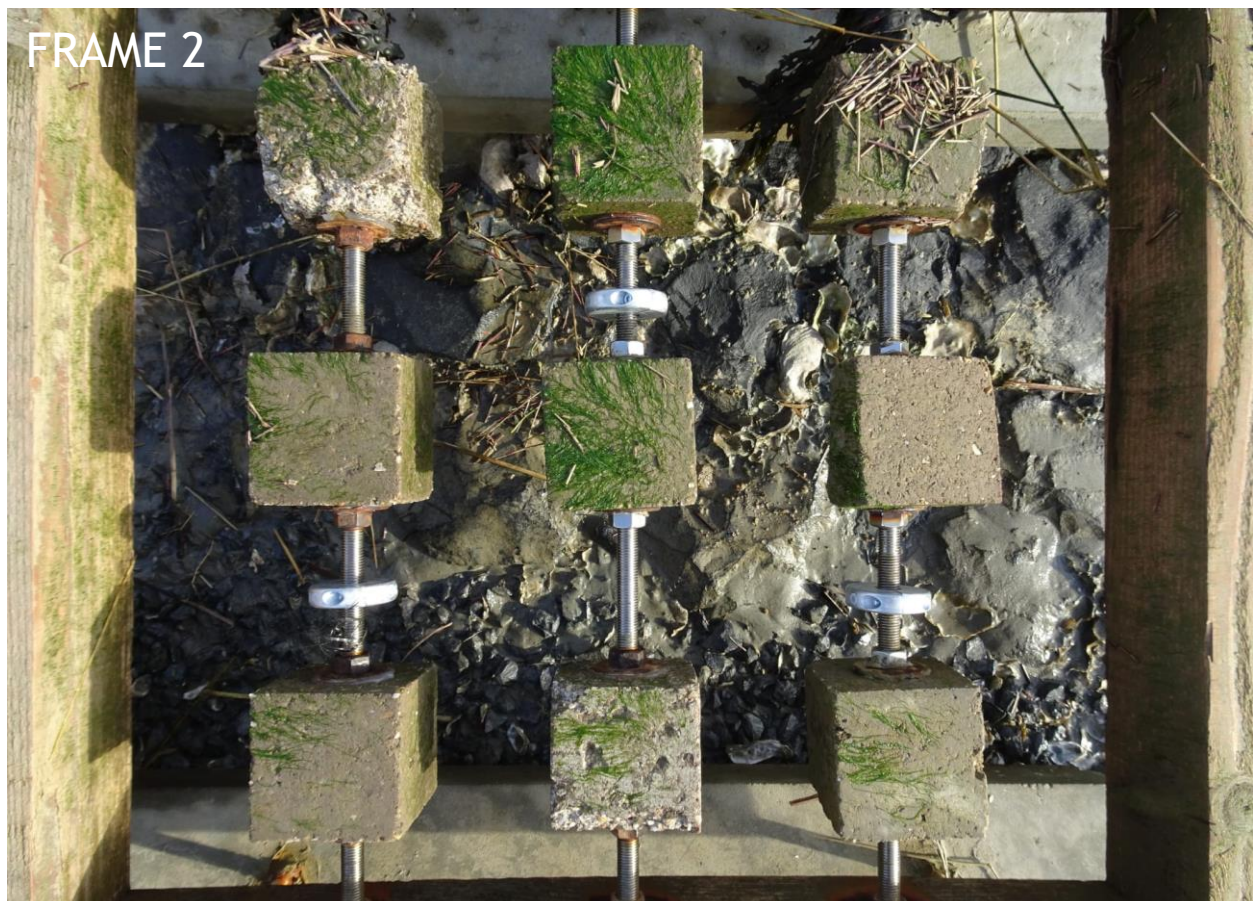
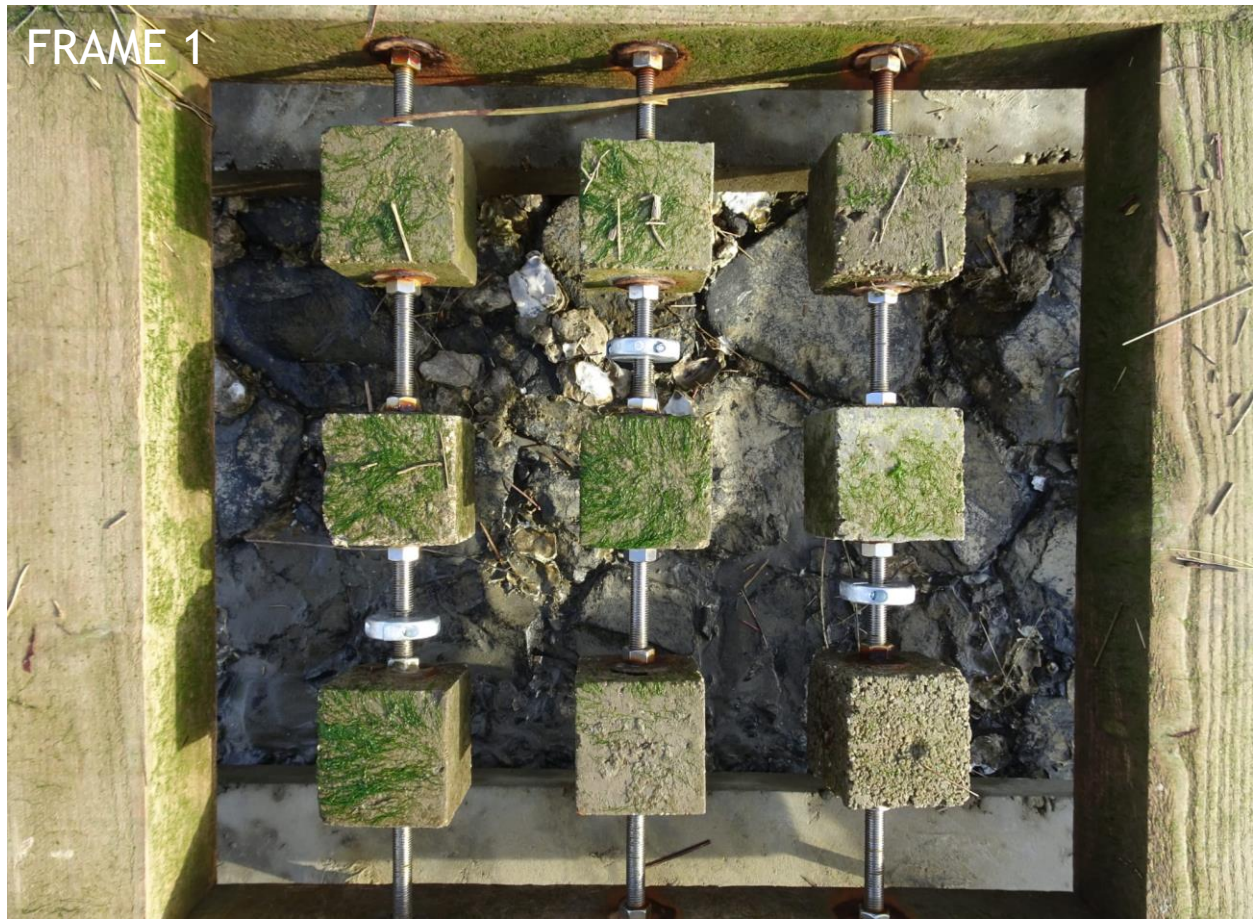
De resultaten van de monitoring van deze proefframes worden over langere tijd vastgesteld en meegenomen bij de algemene monitoring van het proefvak. Het doel is daarom ook dat de frames tot 2025 blijven liggen om zo een goede indicatie te geven van de ontwikkeling van ecologie en eventueel stabiliteit van het substraat (zoals erosie). De vier frames zijn in de subtidale zone geplaatst. Over de vier frames zijn in totaal 36 blokken verdeeld met een afmeting van 10x10x10 cm. De blokken zijn eerst 56 dagen uitgehard voordat ze geplaatst zijn om te verzekeren dat ze de maximale eindsterkte bereikt hebben. De blokken worden blootgesteld aan de volgende invloeden:

- Variaties in nat/droog
- Zout milieu
- Golven en stromingen

Sfeerimpressies van de geplaatste frames zijn in Figuur 35 weergegeven:



Figuur 35 Eerste observatie van ecologisch frames 1 en 2

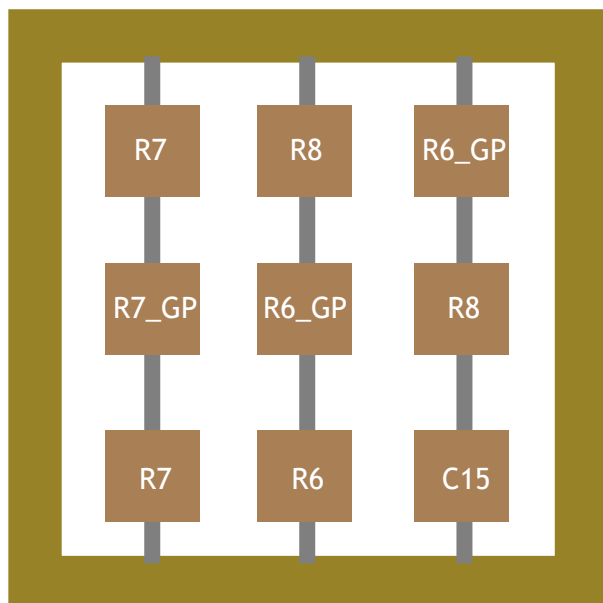


Figuur 36 Impressie van observatie ecologisch frames 1 en 2 (september 2022)

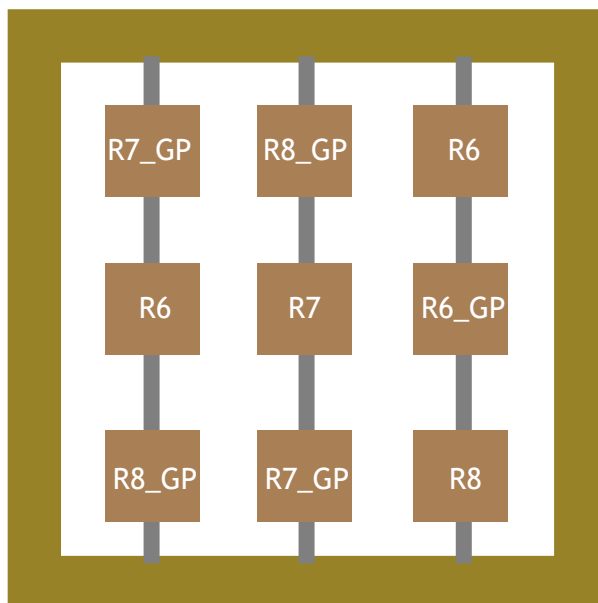


Figuur 37 Impressie van observatie ecologisch frames 3 en 4 (juni 2023)

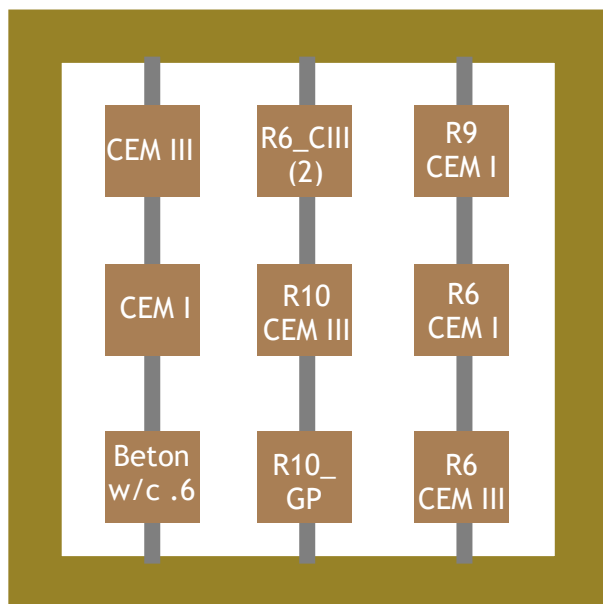
FRAME 1



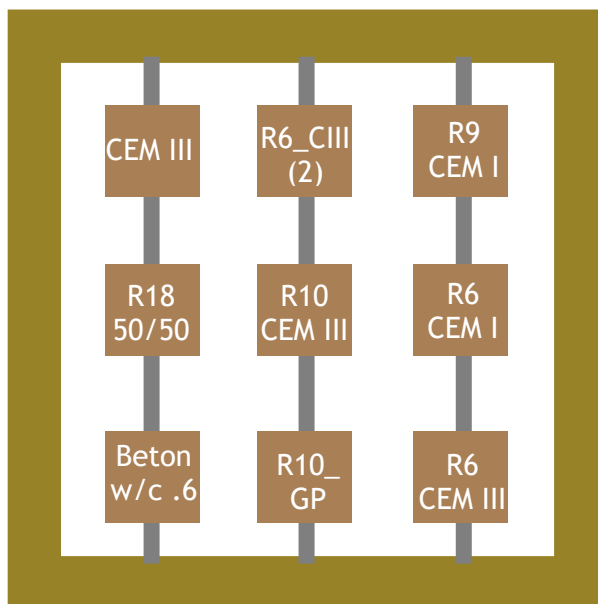
FRAME 2



FRAME 3



FRAME 4



Figuur 38 Schematisatie van verschillende recepten samples in ecologische frames

Gezien de ontwikkeling van nieuwe geoptimaliseerde recepturen R6 t/m R10 was het relevant om een twee set ecologische onderzoek frames te plaatsen (Frames 3 en 4). Daarbij zijn ook samples van C30/37 beton met zowel CEM I als CEM III aangebracht. Door de geoptimaliseerde recepturen te testen is er veel inzicht gekregen in werkelijk sterkte van de blokken op de lange termijn en ecologische ontwikkeling op de toplaag.

Zodoende zijn recept R6_CEM III, R6_CEM III (II), R9_CEM I, R10_GP en R18 in combinatie met twee typen beton (CEM III en CEM I) in de twee nieuwe frames geplaatst. Uiteindelijk is ervoor gekozen om de samples in duplo te onderzoeken om zo een beter beeld te krijgen van de duurzaamheid zoals gedefinieerd als levensduur.

3.4.3 Theoretisch kader ecologie

Classificatie ecologie

De aangetroffen levensgemeenschappen die zich naar verwachting zullen ontwikkelen op de blokken zijn geclassificeerd conform de methodiek van Meijer & van Beek (1988). De levensgemeenschappen zijn representatief voor de bijbehorende faunagroepen. Zichtbare fauna, zoals slakken en zeepissenbedden zijn geteld, maar mogelijk niet altijd tot op soort gedetermineerd.

Door het maken van foto's kunnen onderlinge ecologische verschillen tussen substraten (bijvoorbeeld samenstellingen van zetsteenblokken), maar ook van dezelfde blokken in de tijd worden onderzocht en kwalitatief worden vastgesteld. Hierbij is gefocust op de aangetroffen representatieve begroeiing van de blokken en van de aangetroffen dieren. De volgende classificatie is gebruikt:

Doordat elke wiersoort en diersoort zijn eigen tolerantie heeft wat betreft zoutgehalte en overspoelingsduur, komt elke soort in een bepaalde zone op het harde substraat in de getijdenzone voor. Verschillende soorten vormen combinaties, deze zijn te typeren als "levensgemeenschap" met hun eigen karakteristieke flora (wieren) en fauna (dieren). Op basis van ruim 5000 opnamen langs de Oosterschelde is een typologie ontwikkeld, die ook in de Westerschelde gebruikt kan worden (Meijer & Van Beek, 1988). Deze typologie omvat 13 levensgemeenschappen, waarvan de naam is gebaseerd op de dominante soorten:

- 1 Korstmossen gemeenschap
- 2 *Entophysalis* gemeenschap
- 3 Groefwier gemeenschap
- 4 Klein darmwier gemeenschap
- 5 Zeepokken en alikruiken gemeenschap
- 6 Darmwieren gemeenschap
- 7 Kleine zee-eik gemeenschap
- 8 Blaaswier gemeenschap
- 9 Gezaagde zee-eik gemeenschap
- 10 Knotswier gemeenschap
- 11 Zeepokken, alikruiken, Japanse oester en mossel gemeenschap
- 12 Japanse oester gemeenschap
- 13 Mossel gemeenschap

Figuur 39 Typologie van levensgemeenschappen

Op basis hiervan de indeling van levensgemeenschappen in op harde substraten in de getijdenzone als volgt opgezet (naar Meijer & van Beek 1988):

zonering en soortengroepen op hardsubstraat in de getijdenzone																	
boven GHW	hogere planten	specifiek zouttolerante vaatplanten (zie eerste deel in deze publicatie)															
	korstmossen	vaak als "gele zone" en "grijze zone" herkenbaar. Afhankelijk tot hoe hoog het hardsubstraat doorloopt is er een meer of minder brede zone waarin korstmossen voorkomen.															
spatwaterzone	Cyanobacterieën	vaak als "zwarte zone" herkenbaar.															
tussen GHW en GLW	een zonering van soortencombinaties met soorten uit de groepen:																
	groenwieren	microwieren, Klein darmwier, diverse darmwieren, Zeesla.															
	bruinwieren	Kleine zee-eik, Blaaswier, Knotswier, Gezaagde zee-eik, microwieren.															
	roodwieren	purperwieren, Kernwier, korstwieren, buiswieren, microwieren.															
	fauna	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>Wadslakje</td> <td>Havenpissebed</td> <td>zeepokken</td> </tr> <tr> <td>alikruiken</td> <td>vlokkreeftjes</td> <td>Paardenanemoon</td> </tr> <tr> <td>Blauwe springstaart</td> <td>Japanse oester</td> <td>Mossel</td> </tr> <tr> <td>Schaalhoorn</td> <td>Purperslak</td> <td>Slibanemoon</td> </tr> <tr> <td>hydroïdpoeliepen</td> <td>zakpijpen</td> <td>sponzen</td> </tr> </table>	Wadslakje	Havenpissebed	zeepokken	alikruiken	vlokkreeftjes	Paardenanemoon	Blauwe springstaart	Japanse oester	Mossel	Schaalhoorn	Purperslak	Slibanemoon	hydroïdpoeliepen	zakpijpen	sponzen
Wadslakje	Havenpissebed	zeepokken															
alikruiken	vlokkreeftjes	Paardenanemoon															
Blauwe springstaart	Japanse oester	Mossel															
Schaalhoorn	Purperslak	Slibanemoon															
hydroïdpoeliepen	zakpijpen	sponzen															

Figuur 40 Indeling van levensgemeenschappen

Alleen de bovenzijde van ieder blok werd bekeken en gefotografeerd. Op basis van de foto's is (op het oog) een schatting gemaakt van de bedekking met wieren en zo mogelijk de soort(groep) vastgesteld. Om een beeld te krijgen welke recepten voor zetsteen van baggerspecie een meer of minder goed ontwikkelde begroeiing hebben, wordt gebruikt gemaakt van het waarderingssysteem dat is ontwikkeld door Meijer (1988). Op grond van de gemiddelde bedekking, de levensgemeenschappen en de samenstelling, kan de begroeiing van de blokken worden verdeeld in verschillende typen. De verschillende typen zijn als volgt:

type 0:	Hier zijn geen hard substraat-soorten/gemeenschappen aanwezig. Het betreft: type 0-A: Geen hard substraat: gedeelten waar geen harde glooiing aanwezig is, of waar een kreukelberm ontbreekt: een duin, een stuifdijk of een groene dijk. type 0-B: Hoog en kaal hard substraat: glooiingen die hoog t.o.v. de laagwaterlijn liggen (bijvoorbeeld langs schorren) en waarop hard substraat gemeenschappen ontbreken. type 0-C: Kaal hard substraat: glooiingen die wel met hard substraat bedekt zijn, maar waarop geen soorten voorkomen. Voor de glooiingen zijn waar nodig de typen 0-A, 0-B en 0-C toegepast, voor de kreukelbermen alleen type 0-A.
type 1:	Marginaal begroeid. Het aantal soorten en gemeenschappen is (zeer) beperkt (voornamelijk 1-2 gemeenschappen) Het betreft op de dijkglooiing vooral pionierstadia (Zeepokken gemeenschap, Darmwieren gemeenschap) of de hoger gelegen gemeenschappen (Korstmossen - gemeenschap, Entophysalis gemeenschap en/of Klein darmwier gemeenschap). Op de kreukelberm betreft het de Zeepokken/Alikruiken gemeenschap en/of Darmwieren gemeenschap. Grotere bruinwieren ontbreken geheel.
type 2:	Matig-redelijk begroeid. Het aantal soorten en gemeenschappen is groter dan in type 1 (voornamelijk 2-5 gemeenschappen), er is echter nog een geringe presentie van grote bruinwieren (Blaaswier, Knotswier). De levensgemeenschappen vormen een zekere zonerings, bijvoorbeeld Korstmossen gemeenschap, Entophysalis gemeenschap, Darmwieren gemeenschap, Zeepokken/alikruiken gemeenschap, en in een smalle zone Blaaswier gemeenschap. De laatste drie gemeenschappen zijn ook op de kreukelberm aanwezig.
type 3:	Goed begroeid. De grote bruinwieren zijn in dit type mede aspectbepalend en vormen gesloten vegetaties. De zonerings is min of meer compleet te noemen (4-6 gemeenschappen): Korstmossen gemeenschap, Entophysalis gemeenschap, Klein darmwier gemeenschap, Darmwier gemeenschap, Kleine zee-eik gemeenschap, Blaaswier gemeenschap, Gezaagde zee-eik gemeenschap of Knotswier gemeenschap. De laatste drie gemeenschappen zijn ook op de kreukelberm aanwezig. De soortensamenstelling neigt naar type 4, maar een onderbegroeiing van kleinere wiersoorten ontbreekt.
type 4:	Optimaal begroeid. Er is een min of meer complete zonerings van gemeenschappen aanwezig (zie type 3), in ieder geval vormen de grote bruinwieren zone's met een hoge biomassa en is er een onderbegroeiing van kleinere wieren aanwezig (zoals hoorntjeswieren, Kernwier, lers mos, buiswieren en/of Rotswier. Dit stadium is in de Westerschelde als optimum-situatie te onderkennen in vergelijking met de typen 0 t/m 3.

Figuur 41 Waarderingsysteem wierbegroeiing (Meijer, 1998)

3.4.4 Meetresultaten jaar 1

Ecologische ontwikkeling

Tijdens waarnemingen op verschillende momenten (oktober 2021 tot en met juni 2023) is te zien dat er binnen beide frames diverse begroeiing ontwikkeld is op met name de bovenzijde van de blokken. Het lijkt hier met name om zeewiersoorten te gaan. Wat betreft de bedekkingsgraad van zeewier is er geen eenzijdig patroon te herkennen. Qua vegetatie op de blokken is er tussen Frame 1 en 2 geen groot verschil dat zo passen buiten de normale variabiliteit. Voor Frame 3 en 4 is dit vergelijkbaar. Voor frame 1 en 2 zijn beide blokken die in het midden zijn geplaatst, zijn aanzienlijk begroeid, maar er kan niet met zekerheid bepaald worden of dit een duidelijk patroon is.

Determinaties die uit veldbezoeken op 22, 26 en 30 september 2022 zijn gedaan gaven een beeld dat de aangetroffen levensgemeenschappen kunnen worden geclassificeerd conform de methodiek van Meijer & van Beek (1988). De levensgemeenschappen zijn representatief voor de bijbehorende faunagroepen. Zichtbare fauna, zoals slakken en zeepissebedden zijn geteld en zo mogelijk tot op soort gedetermineerd.

De begroeiing van de meeste blokken was over het algemeen vrij gering, laag en weinig soortenrijk. Na nog geen jaar gaat het nog steeds om de pionierfase, die gekenmerkt wordt door een weinig ontwikkelde begroeiing van darmwier spec. (*Ulva cf. intestinaloides* en/of *Blindiga marginata*) en purperwier (*Porphyria spec.*). Van de wiersoorten die kenmerkend zijn voor de wierzone, zoals blaaswier *Fucus vesiculosus* en kleine zee-eik *F. spiralis*, werden vrijwel alleen aangespoelde fragmenten van blaaswier aangetroffen. Ontwikkeling van een echte wierzone zal meerdere jaren duren. Hierbij wordt aangetekend dat de vorm en het geringe formaat van de blokken de vestiging van grotere wieren lastig zal maken. Vermoedelijk is er rond de blokken sprake van een zeer dynamisch milieu door golfwerking en stroming: meer dan bij een normale verharde glooiing. (P. L. Meininger, 2022)

Tabel 19 Aangetroffen typen begroeiing met hun wetenschappelijke namen

Soort(groep)	Wetenschappelijke naam
Bruinwieren: Blaaswier	<i>Fucus vesiculosus</i>
Groenwieren: darmwier spec. (in de tabel darmwier genoemd)	<i>Ulva cf. intestinaloides</i> en/of <i>Blindiga marginata</i> Er zijn monsters genomen waarvan door de Universiteit van Gent door middel van DNA-onderzoek de soort zal worden vastgesteld
Purperwieren: <i>Porphyria cf. porphyria</i> (in de tabel purperwier genoemd)	Er zijn monsters genomen waarvan door de Universiteit van Gent door middel van DNA-onderzoek de soort zal worden vastgesteld

Bij de inspectie van de blokken in de frames werd nauwelijks zichtbare fauna, zoals slakken of zeepissebedden, aangetroffen. Alleen op blok CEM III (2) van frame 4 (dit is overigens ook het recept dat uiteindelijk voor de zetsteenblokken van het proefvak is gebruikt) werd waarschijnlijk een klein slakje aangetroffen. Aan de zijkanten van sommige blokken en op de frames werden hier en daar zeepokken *Sessilia* waargenomen. (P. L. Meininger, 2022)



Figuur 42 Observatie van klein slakje op sample blok frame 4



Figuur 43 Meest begroeide sample met bedekking van 90% darm -en purperwier

Het meeste begroeide blok is aangetroffen op Frame 1, dit had een bedekking van 90% groenwieren (darmwier spec) en purperwier; ook exemplaar van blaaswier. Het blok lijkt flink geërodeerd en mede daardoor snel begroeid. Geconcludeerd wordt dat de blokken tussen de <50% en 90% waren begroeid met wieren die bestonden uit een combinatie van groen- en darmwieren. (P. L. Meininger, 2022)

Duurzaamheid (levensduur)

De duurzaamheid van de blokken, hier gedefinieerd als levensduur, laat zich voor dit onderzoek uitdrukken in stabiliteit bij belasting. Voornamelijk is met de frames onderzocht wat de erosie en afslag is bij hydrodynamische belastingen.

In de Frames 1 en 2 zijn in totaal zeven verschillende recepten verwerkt. Recept R6,R6_GP,R7, R7_GP en R8 zijn drie keer in de frames verwerkt. Recept R8_GP twee keer en er is één recept met C15 beton geplaatst. De blokken zijn willekeurig verdeeld over de frames verdeeld om de afhankelijkheid van de standplaats te minimaliseren. In Frames 3 en 4 zijn in totaal tien verschillende recepten verwerkt waaronder het opnieuw verbeterde recept R6 CEM III (2) dat is gebruikt voor de zetsteenblokken voor het proefvak.

Erosie is met name te herkennen bij de blokken gemaakt met geopolymeren (aangeduid met _GP). Dit is mogelijk te verklaren door de geringe druksterkte (3-4 MPa) van de geopolymerblokken die zijn gemaakt zonder optimalisatie van het recept voor gebruik van geopolymeren. Hieruit blijkt dat de recepten met geopolymeren nog moeten worden doorontwikkeld om qua sterkte en duurzaamheid te voldoen.

Blokken met een hogere druksterkte eroderen niet of nauwelijks. Dit is in lijn met de resultaten van de erosieproeven in het laboratorium. Enkel de randen zijn bij de blokken afgebrokkeld. Dit kan veroorzaakt worden door een combinatie van wind, stroming en regen. Het is te verwachten dat dergelijke randeffecten minder optreden wanneer een aaneengesloten structuur van blokken aanwezig is. Bovendien kunnen de randen mogelijk wat minder scherp worden geproduceerd. Vanuit dit onderzoek lijkt een druksterkte van ten minste 8-10 MPa vereist te zijn op substantiële erosie te voorkomen.

4 Fase II – Technisch ontwerp zetsteen en business

4.1 Technisch ontwerp van het proefvak

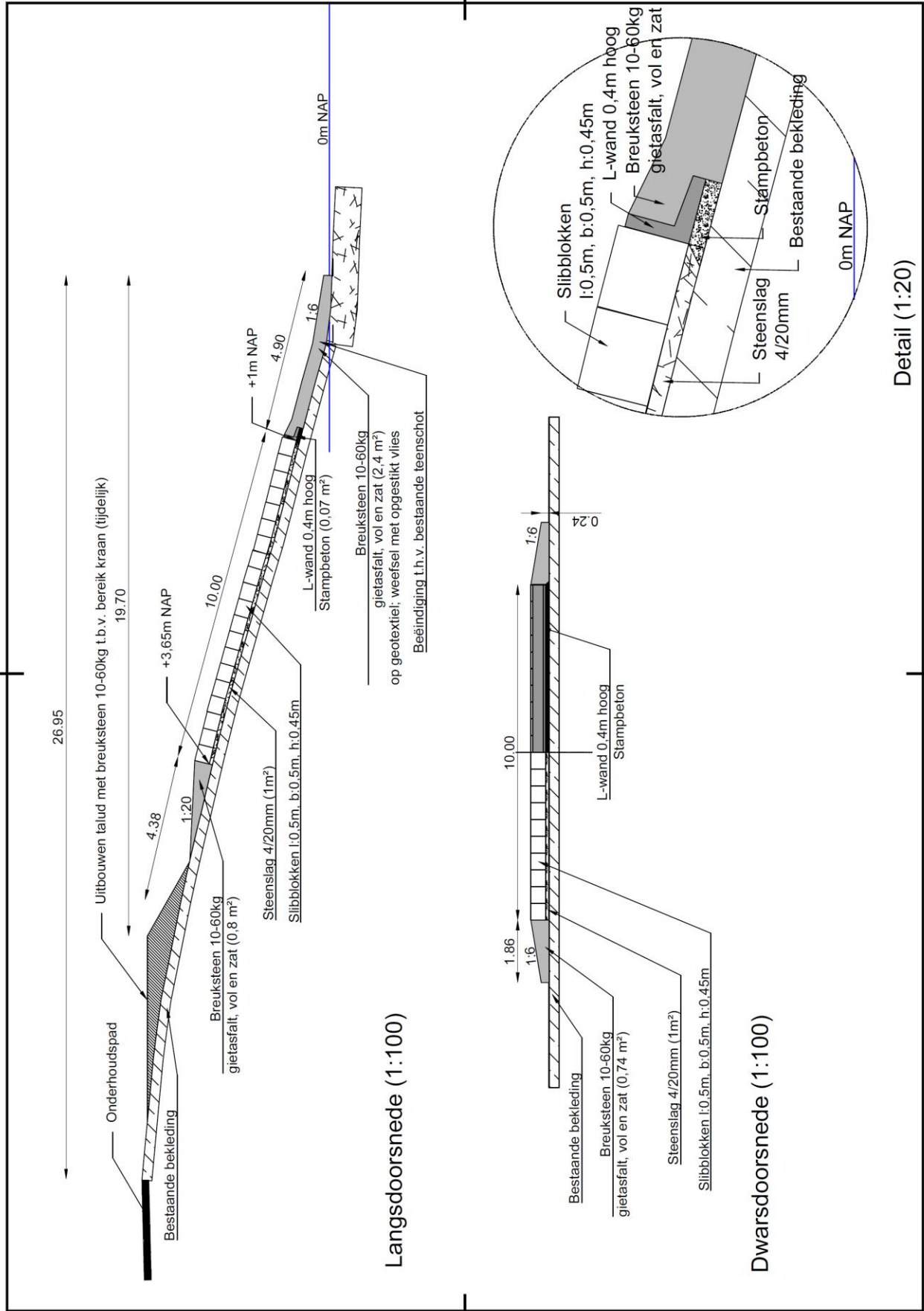
Voor de locatie van het proefvak van zetsteenblokken is het belangrijk dat deze onder vergelijkbare omstandigheden als reguliere zetsteen dagelijks wordt belast, echter waarbij eventuele optredende schade geen (groot) gevolg heeft voor de veiligheid van de waterkering. Gekozen is het proefvak aan te leggen op de ringdijk van het baggerdepot direct ten westen van de Voorhaven Hansweert. De ringdijk rond het baggerdepot is onderdeel van de primaire waterkering en wordt dagelijks belast met golven en stroming vanuit de Westerschelde. Het achterliggende baggerdepot is erg breed en de afstand tot de kruin van de dijk is daardoor groot. Schade aan de ringdijk heeft slechts indirect gevolg voor de waterkering. Tenslotte is het Baggerdepot onderdeel van een versterkingsopgave binnen project dijkversterking Hansweert, waardoor de proeflocatie nadien binnen het project Hansweert kan worden opgeruimd of ingepast in het nieuwe ontwerp. Dit maakt de locatie ideaal als proeflocatie voor de zetsteenproef.

Bij de uitwerking van het ontwerp waren de volgende zaken van belang.

- Dagelijkse golfbelasting op de zetsteenblokken is noodzakelijk om de sterkte van de bekleding te kunnen beoordelen. De zetsteenblokken dienen daarom geplaatst te worden in de golfklapzone. De onder- en bovengrens van de zetsteenblokken is vastgesteld op respectievelijk NAP +1,0m en +3,65m NAP;

De sterkte van de waterkering dient zo min mogelijk aangetast te worden. Hiertoe is ervoor gekozen de zetsteenblokken te plaatsen op de reeds aanwezige steenbekleding op het buitentalud. Een overlaging door toepassing van een extra bekledingslaag voegt sterkte toe en verzwakt de huidige sterkte van de waterkering niet;
- Er dient een voldoende sterke overgangsconstructie te komen tussen de nieuwe en de oude bekleding. Hiertoe is ervoor gekozen om rond het vak zetsteen en kader van gepenetreerde breuksteen aan te brengen. De gepenetreerde breuksteen verbindt met een talud van 1:6 het hoogteverschil tussen de nieuwe en oude bekleding. Gepenetreerde breuksteen is een zeer sterk bekledingstype welke flexibel is (opvangen zetting), gemakkelijk aan te brengen, en door het ingieten met gietasfalt een waterdichte aansluiting maakt. Omdat het nieuwe ontwerp van dijkversterking Hansweert uitgaat van een volledige overlaging van gepenetreerde breuksteen op de ringdijk is dit ontwerp goed inpasbaar in de nieuwe situatie;
- Aan de onderzijde van de zetsteen dient een overgangsconstructie te worden aangebracht waarmee een recht lijn ontstaat waartegen de zuilen in rechte lijn geplaatst kunnen worden. Hiertoe is ervoor gekozen een keerwand te plaatsen op stampbeton, waarop aan de onderzijde de gepenetreerde breuksteen wordt aangesloten. Hiermee ontstaat een sterke en dichte overgangsconstructie.
- Onder de zetsteen dient een filterlaag te worden toegepast om enerzijds waterdrukken onder de bekleding te kunnen afvoeren en tevens de ondergrond voor het zetten van de blokken netjes geplaatst kunnen worden. De dikte van de filterlaag mag niet groter zijn dan 0,1m.

Voor de realiseren van het ontwerp zijn enkele tijdelijke voorzieningen nodig. Zo wordt op het bovenste deel van het talud een verbreding gemaakt door een aanvulling van breuksteen. Hierdoor ontstaat meer werkruimte en kan een kraanmachine dicht op het werk staan. Tenslotte wordt op het baggerdepot een deel depotruimte ingericht voor tijdelijke opslag van materiaal en materieel.



Figuur 44 Technisch ontwerp proefvak

4.2 Ontwikkeling uitvoeringsmethodiek

Ideeën voor een geschikte configuratie

- Een proefvak van 100 m² op de bekleding van de dijk rondom het baggerdepot
- Dit is in het projectgebied Hansweert, maar heeft qua locatie relatief weinig raakvlakken met de dijkversterking, natuurlijk wel met de toepassing zetsteen.
- Een locatie op de bestaande harde bekleding, die in dijkversterking Hansweert overlaagd zal worden met ingegoten breuksteen.
- Rondom het proefvak kan een kader van ingegoten breuksteen worden aangebracht, waar de toekomstige overlaging op aansluit. Dan kan het proefvak eventueel blijven liggen als de overlaging plaatsvindt. Project DV Hansweert moet dan een bedrag reserveren om op een later tijdstip de zetsteen van baggerspecie alsnog te verwijderen en het kader van 100 m² ook met ingegoten breuksteen te overlagen.
- De ondergrond is bij voorkeur recht, dus heeft geen kromming in de lengterichting van de waterkering
- Door zowel de locatie, uitvoeringswijze en aansluiting op de dijkversterking Hansweert, is het proefvak zo ontworpen dat dit in theorie voor meerdere jaren kan blijven liggen. Dit maakt het mogelijk om goed praktijkonderzoek te kunnen doen naar de duurzaamheid van de zetsteen, o.a. op het vlak van ecologie, verwerking en stabiliteit bij hydrodynamische belasting.

4.2.1 Selectie van geschikte pilotlocatie

De zuidzijde van het baggerdepot is het meest geschikt voor de proef met zetsteen. Er ligt hier een bekleding van betonnen elementen, waar de pilot overheen kan worden aangelegd. Als het proefvak zich juist ten oosten van de overgang van basalt naar basalt bevindt, zit er geen kromming in het talud. Er bevindt zich op de plek geen bankje voor recreanten, deze bankjes staan iets verder naar het oosten. Landwaarts van het onderhoudspad (fietspad) bevindt zich op deze locatie niet direct een sloot, maar een ruimte van circa 8x8 m² die als opstelruimte voor materiaal zou kunnen dienen:



Figuur 45 Geselecteerde locatie voor het proefvak met zetsteen van baggerspecie



Figuur 46 Luchtfoto's en foto's ter impressie proefgebied

4.2.2 Productie van zetsteen van baggerspecie

Voor de uitvoering van de pilot, het produceren van de zetsteenblokken en het plaatsen ervan tot een proefvak, is aannemer Van Oord geselecteerd op basis van het plan van aanpak en prijs. Van Oord maakte samen met NETICS en Waterschap Scheldestromen deel uit van het bouwteam.

Toepassingsgebied

In het uitvoeringsplan van Van Oord waren de volgende werkzaamheden beschreven:

- Produceren van de baggerblokken
- Het maken van het proefvak

Mobiliseren en inrichten depot

Het depot van waterschap Scheldestromen is gelegen langs de Fransweg in Kapelle. Bij het depot lag alle benodigde baggerspecie voor het maken van de zetsteen van baggerspecie. Het terrein was deels verhard met stelconplaten. Dit is een geschikt gebied voor het produceren van de blokken.

Voor het produceren van de zetsteen werd het terrein ingericht conform onderstaande afbeelding en bestond uit de volgende onderdelen:

- De pers, Hydraulic Power Unit (HPU) en control panel
- Schaftunit + Dixi
- Aanrijdbeveiliging

- Bok (t.b.v. ontkisten)
 - De blokken worden geperst in een houten mal die weer in een stalen mal zit. Middels de bok wordt de stalen mal van de houten mal gescheiden
- Depot t.b.v. materialen
 - De zetstenen bestaan o.a. uit de volgende materialen: bagger, ophoogzand , grind, binder



Figuur 47 Luchtfoto inrichting productielocatie op het waterschapsdepot



Figuur 48 Uiteindelijke inrichting van de productielocatie

4.2.3 Aanleg van het proefvak

Het proefvak was gelegen aan de zuidelijke kant van de Voorhaven. Langs het fietspad lag een fietsroute met diverse objecten. Naast het fietspad lag de glooiing en aan de andere zijde een smalle buitenberm. Vanwege de beperkte ruimte moesten beide zijden van het fietspad benut worden voor het opslaan van de zetsteen en de benodigde materialen voor het maken van het proefvak. Voor de veiligheid van de gebruikers van het fietspad was het essentieel om het fietspad gedurende de werkzaamheden af te sluiten. Voor start uitvoering wordt hier een omleidingsroute voor uitgewerkt en verstrekt aan waterschap Scheldestromen.

Het projectgebied wordt conform de onderstaande afbeelding ingericht en bestaat uit de volgende onderdelen:

- Opslag, de zetsteen werd langs het fietspad opgeslagen
- De breuksteen 10-60kg werd opgeslagen langs het proefvak. Dit materiaal kon direct gebruikt worden voor het uitbouwen van het talud
- Op het fietspad t.b.h.v. het proefvak werden stalen rijplaten gelegd. Onder de stalen rijplaten werd ook nog zand gestrooid om schade aan het asfalt te minimaliseren.

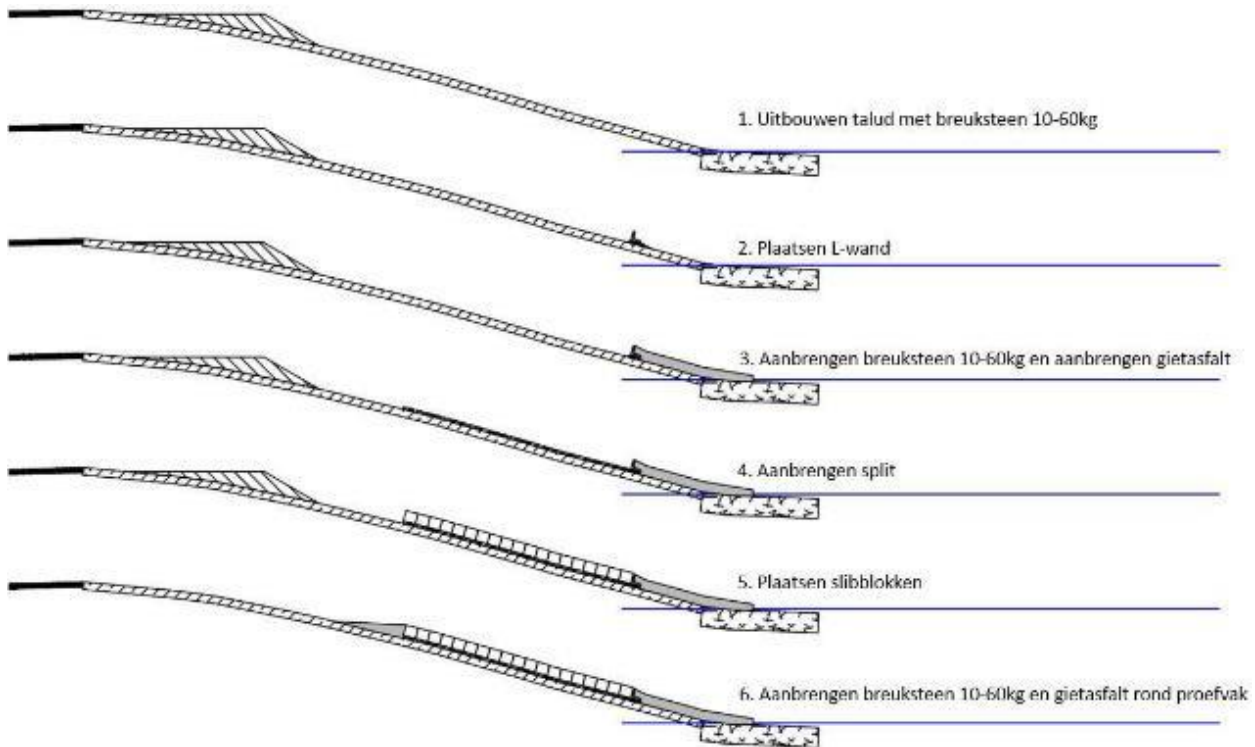


Figuur 49 Een luchtfoto met de projectlocatie (I) en inrichting van de bouwplaats t.b.v. proefvak



Figuur 50 Foto's van de projectlocatie

Werkvolgorde



Figuur 51 Werkvolgorde

Werkmethode

Uitbouwen talud met breuksteen

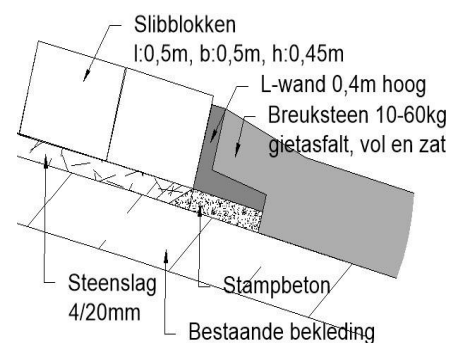
Voor het uitbouwen van het talud werd breuksteen 10-60kg gebruikt. Dit materiaal was ook nodig voor het opsluiten van het proefvak. De breuksteen 10-60kg werd per as aangevoerd. Een longreach kraan heeft de breuksteen 10-60kg, geleverd door de vrachtwagens, verspreid langs het proefvak.

Plaatsen L-wand

Voor het proefvak waren 5 betonnen L-wanden (0,4m hoog, 2m lang) benodigd en deze werden per as geleverd. De L-wanden werden geplaatst op stampbeton om de L-wanden te kunnen stellen.

De afstand vanaf de uitbouw tot onderkant constructie was circa 20 meter. Deze afstand kon alleen overbrugd worden met behulp van een longreach kraan. De longreach kraan heeft met de bak het stampbeton verspreid. Een grondwerker zal het stampbeton verder verspreiden. Na het plaatsen van het stampbeton werden de L-wanden geplaatst met behulp van hijsogen.

De L-wanden werden geplaatst op circa NAP +1m. Dit gebied was getij afhankelijk. Daarom moesten de geplaatste L-wanden binnen hetzelfde getij afgedekt worden met de breuksteen 10-60kg. Anders was er een risico dat de L-wanden verplaatsten door het water. Het gietasfalt werd vervolgens tijdens het volgende getij aangebracht.



Aanbrengen split & plaatsen zetsteen van baggerspecie

Het split (4/20mm) is per as aangevoerd en gestort op de rijplaten. De zetstenen van baggerspecie zijn vanaf de productielocatie in een tijdelijke depot bij het projectgebied opgeslagen.

De hydraulische graafmachine heeft een laag split van circa 10 centimeter aangebracht. De zetstenen zijn door een shovel, vanaf het tijdelijke depot naar het proefvak gebracht en één voor één met behulp van een vacuüm lifter geplaatst (zie figuur hiernaast voor een voorbeeld). Hierdoor was de kans op het beschadigen van de blokken minimaal.



Figuur 52 Hydraulische graafmachine in actie

Aanbrengen breuksteen 10-60kg en aanbrengen gietasfalt

Het proefvak werd opgesloten met breuksteen 10-60kg en gietasfalt. De breuksteen 10-60kg was reeds geleverd voor het uitbouwen van het talud. Het gietasfalt werd per as geleverd.

De hydraulische graafmachine verspreidde de breuksteen 10-60kg conform het ontwerp rond het proefvak. Het gietasfalt werd per as aangevoerd en gelost in een asfaltbak. Vanuit de asfaltbak verwerkte de hydraulische graafmachine het gietasfalt met zijn bak over de stenen.

Ten behoeve van de uitvoering van het werk zijn een aantal meldingen vereist bij bevoegd gezag, hieronder beschreven. Het aanvragen van de benodigde vergunningen wordt verzorgd door de opdrachtgever (ook verkeersvergunning t.b.v. afsluiten fietspad).

BLBI melding (besluit lozen buiten inrichting)

Voor het realiseren van het proefvak werd uiterlijk vijf weken voor start een BLBI melding gedaan.

Omleidingsroute t.b.v. afsluiting fietspad

Van Oord heeft het Verkeersplan en bijbehorende tekeningen aangeleverd en de desbetreffende omleiding in werking gesteld. Afstemming met bevoegd gezag werd verzorgd door opdrachtgever.

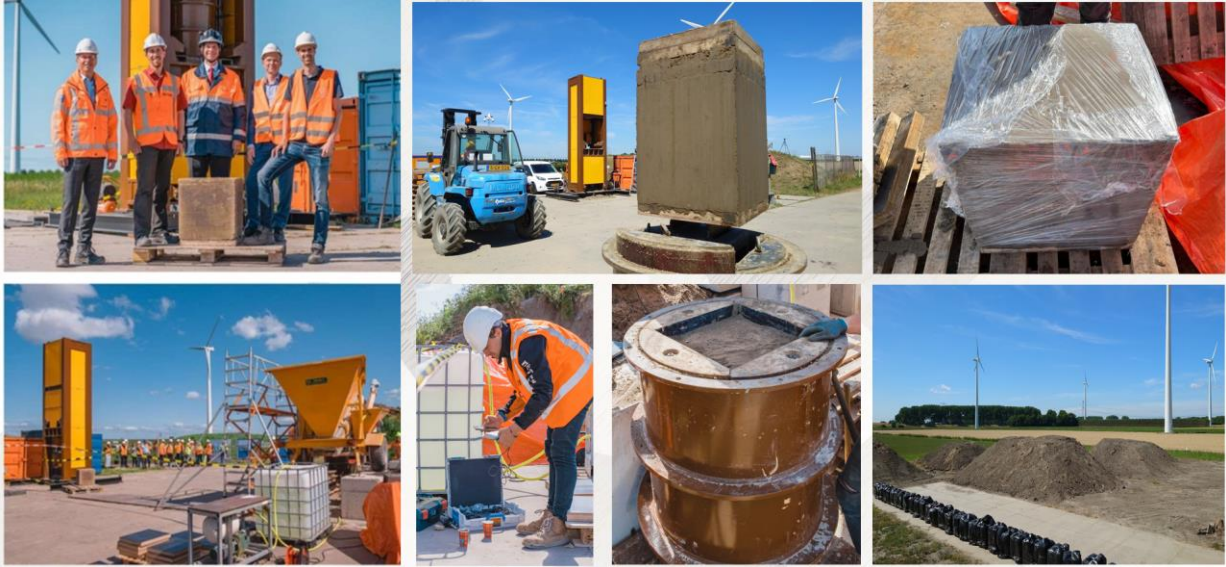
Veiligheid, gezondheid & milieu

Het doel van dit proces was het waarborgen dat het werk op een, voor alle betrokken natuurlijke en rechtspersonen, veilige en gezonde wijze tot stand komt.

Het veiligheidsbeleid van Van Oord werd vastgelegd in de volgende documenten

- V&G-plan
- Calamiteitenplan





ECOLOGICAL FRAMES

PILOT SET UP

Oprachtgever en directie Waterschap Scheldestromen

Pilotproject voor Innovatie Zetsteen van Baggerspecie

Waterschap Scheldestromen onderhoudt waterkeringen. Hierbij komt baggerspecie vrij als afvalproduct.

Daar het baggerspecie wordt verwerkt tot waterschap baggerspecie.

Ook de toekomstige dijkversterkingen worden erom meer innovatie mogelijk gemaakt. Het gebruik van zand en baggerspecie wordt de milieuvriendelijke baggerspecie.

Financierder:
HWBP voor sterke dijken

Aannemer:
NETICS Van Oord GEOWALL



Jelle-Jan Pieterse
Technisch manager
Waterschap Scheldestromen

Hugo Ekkelenkamp
Directeur en hoofd Research & Development
NETICS

[Lees meer over de innovatie op pagina 41](#)

interview

interview

“Als dit ons lukt, gaat er een wereld aan **nieuwe mogelijkheden open**”

Een sterke en toekomstbestendige dijk, bekleed met zetstenen die gemaakt zijn van baggerspecie. In een innovatietraject rondom de dijkversterking Hansweert laten **Jelle-Jan Pieterse** en **Hugo Ekkelenkamp** zien dat het mogelijk is.

Bagger wordt nog vaak gezien als afval. Terwijl het vol zit met waardevolle grondstoffen die je kunt hergebruiken. Dijken krijgen nu vaak zetstenen van beton, maar de kosten en de milieupaat daarvan zijn relatief hoog. Daarom wil waterschap Scheldestromen samen met onderzoeks- en adviesbureau NETICS aantonen dat zetstenen geproduceerd kan worden van lokaal gewonnen bagges.

Hoogwaardig opwaarderen
Jelle-Jan en Hugo zijn studievrienden met een gezamenlijke interesse in duurzaam bouwen met bagges. “Ook na werkijd hebben we het dus vaak over de technische mogelijkheden van baggerspecie”, vertelt Hugo. “Zo gingen we een keer samen wisternen langs de dijk en kreeg Jelle-Jan een lekkende band.” Jelle-Jan: “Dat was toevallig bij de Museumgolfing van het Watersnoodmuseum. Bij het zien van al die zetstenen dachten we: ‘Dat moet toch ook van bagges kunnen?’”

Receptenboek
NETICS ontwikkelde een unieke GEOWALL®-pers die onder extreem hoge perdruk stevige zetstenen van baggerspecie produceert. Door het samendrukken hoeft je maar weinig binders toe te voegen, waardoor de blokken een lage CO₂-voetprint hebben. Ze zijn bovendien 100% circulair en de bagges komt uit de omgeving van Hansweert. Met laboratoriumtests van verschillende samenstellingen bekielt het team alvast hoe de zetstenen zich in de praktijk gedragen, vertelt Hugo. “We kijken hoe sterk de verschillende recepten zijn, maar bijvoorbeeld ook of planten en dieren zich thuis voelen op de baggerspecie. De prestaties van de verschillende sa-

menstellingen nemen we op in een receptenboek.” Zetsteen moet een hoge eisen voldoen, aldus Jelle-Jan. “Maatschappij ligt het droog en wordt het door krachtige zouten geloven overspoeld. Daarom maken we een proefom te de zetstenen op ware grootte een aantal jaren achter elkaar te monitoren.”

Succes en uitdagingen
Het waterschap, NETICS, de aannemer Van Oord, Deltares en een visiehoofdgroep: er zijn veel partners bij het project betrokken. Gelukkig verloopt de samenwerking soepel. Jelle-Jan: “Wat daarbij helpt, is dat we de taakverdeling direct helder hebben vastgelegd. In deze fase betekent dat bijvoorbeeld dat het waterschap zorgt voor de faciliteiten en dat NETICS samen met de aannemer de pakt uitvoert. Maar we betrekken elkaar wel constant bij het proces.” Just in zo'n pilotproject is daar ruimte voor, merkt Hugo. “Dit team zit vol enthousiasme en ideeën. Dat zorgt voor leuke overleggen. In een innovatietraject deel je de successen, maar ook de uitdagingen.”

Bouwen met bagges
Niet alleen waterschappen kijken reiknazend uit naar de resultaten. Ook bijvoorbeeld samenners, overheden en de wetenschappelijke wereld tonen interesse. Logisch, vindt Hugo: “Als dit ons lukt, gaat er een wereld aan nieuwe mogelijkheden open. Broekwateren, bouwblokken voor bijvoorbeeld geluidswallen, bestrating: deze baggerspecie kan het allemaal.” Het doel van dit project is dat bouwen met bagges gemeengoed wordt in de hele sector, vertelt Jelle-Jan: “Een belangrijke stap op weg naar het behalen van de klimaatdoelstellingen.”

4.3 Levenscyclusanalyse (LCA)

Aveco de Bondt heeft een in een onafhankelijke studie voor dit project een MKI (milieu kosten indicator) -inschatting gemaakt van de recepten voor zetsteen van baggerspecie (bijlage 2) Het ging hier over een LCA (life cycle analysis)-quicksan voor het onderzoeken van de milieu-impact in alle fases van het proces van leveren grondstoffen zoals in Figuur 53 weergegeven (op basis van recepten) tot de realisatie van het dijktaalud met zetsteen. Dit hoofdstuk vat de onderzoeksresultaten van deze studie samen.



Figuur 53 Milieuprestatie bouwwerk

4.3.1 Recepten zetsteen

Voor de MKI-berekening is gekozen om initieel vier recepten door te rekenen. Het ging hierbij om recept R6, R9, R6_GP en R3. Recept R6 en R9 hebben de beste resultaten opgeleverd als het gaat om technische eigenschappen zoals druksterkte, buigsterkte en vries-dooi-bestendigheid. Hierbij zijn in de basis recept R6 en R9 geselecteerd om toegepast te worden in de pilot (fase 3). Zodoende is het logisch om deze ook door te rekenen voor de MKI-score. Als alternatief is er aanvullend gekozen om een geopolymeer recept door te rekenen aangezien dit eventueel in een vervolgfase van belang kan zijn. Geopolymeren zijn naar rato milieuvriendelijker dan normaal cement en bestaan in dit geval uit een combinatie van hoogovenslak, waterglas en natriumhydroxide. Tot slot is recept R3 als 'duurzaam' alternatief meegenomen, aangezien hiervoor een groot aandeel aan baggerspecie gebruikt wordt. Belangrijke vermelding hierbij is dat R3, met betrekking tot technische eigenschappen, met name de druksterkte, niet voldoet aan de eisen voor zetsteen van beton. Het geeft echter wel een goed referentiekader voor de toekomst, waarin beoogd wordt een grotere ratio aan baggerspecie te gebruiken, zoals beoogd wordt met de ontwikkeling van nieuwe recepten beschreven in hoofdstuk 1.

De grondstoffen die noodzakelijk zijn voor recepten R6, R9, R6_GP (geopolymeer) en R3 in deze berekening meegenomen. Hierbij geldt dat het percentage binders, bijvoorbeeld 10%, moet worden berekend op basis van de hoeveelheid droge stof in de totale hoeveelheid grondstromen. Dit wordt gedaan om te voorkomen dat het totale percentage binder gedurende de uitvoering varieert door een variatie in hoeveelheid water. Dit zou kunnen terwijl het water in het totale mengsel niet of nauwelijks invloed heeft op het effect van binders. Hierdoor is het totaal percentage van alle recepten hoger dan 100%. De mengverhouding in kg, kan wel 1 op 1 gebruikt worden in de uitvoering en voor de MKI-berekening.

De recepten zijn door Aveco de Bondt vergeleken met het basisprofiel van Basalton (zetsteen type van beton) in de nationale milieudatabase. Dit Basalton is gemaakt met cement III (hoogovencement) in een standaard volume-verhouding 1:2:3 (cement:zand:grind). Dit komt neer op een percentage cement in verhouding op het totale mengsel van 24%.

De recepten in zijn door Aveco de Bondt meegenomen in de MKI-berekening.

Tabel 20 Recepten meegenomen in MKI berekening door Aveco de Bondt

MKI recepten ontwikkeld door NETICS									
		Grondstromen				Binders op droge stof			Totaal
		Baggerspecie	Zand	Klei	Grind	CEM I	Geopolymeer	Kalk	
R6	Inhoud	37%	25%	13%	17%	8%	-	-	100%
	Kg	671	575	288	384	192	-	-	2110kg
R9	Inhoud	36%	16%	20%	16%	8%	-	4%	100%
	Kg	624	357	446	357	178	-	89	2050kg
R6_GP	Inhoud	37%	25%	13%	17%	-	8%	-	100%
	Kg	665	570	285	380	-	190	-	2090kg
R3	Inhoud	49%	22%	11%	14%	4%	-	-	100%
	Kg	1034	464	232	295	84	-	-	2110kg

*gebaseerd op sediment met 75% droge stof/25% vochtgehalte..

4.3.2 Productie materialen

De eerste stap die meegenomen is door Aveco de Bondt bij de LCA is de productiefase. Hierbij werd nagegaan hoe de te gebruiken materialen bij de leverancier geproduceerd worden. Om de bijdrage van deze fase te duiden, werd er gebruik gemaakt van zogenaamde milieuprofielen per materiaal.

Tabel 21 Verschillende materialen en hun milieuprofielen

Materiaal	Milieuprofiel
Baggerspecie	0229-fab&Zand, uit baggerwerk of graafwerk (werk met werk = 0-waarden want 'vrij van milieulast')
Zand	Sand {RoW} gravel and quarry operation Cut-off, U
Klei	Clay {RoW} clay pit operation Cut-off, U
Grind	Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation Cut-off, U
Cement (CEM I)	0172-fab&Cement, CEM I (o.b.v. CEM I 52.5 R)
Kalk	Lime {RoW} production, milled, loose Cut-off, U
Waterglas	Sodium silicate, without water, in 48% solution state {GLO} market for Cut-off, U
Natriumhydroxide	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} chlor-alkali electrolysis, membrane cell Cut-off, S
Hoogovenslak	Granulated blast furnace slag {RoW} market for granulated blast furnace slag Cut-off, U

Aveco de Bondt heeft bij het kiezen van de milieuprofielen de volgende aannames gemaakt:

- Baggerspecie is vrij van milieubelasting in fase A1, het werk wordt namelijk gecompenseerd
- Voor alle materialen is een waarde voor {RoW} (rest of the world) of {GLO}. Dit betekent dat wereldwijd geldende of bijna wereldwijd geldende waarden worden genomen
- Bulkproducten (zand, klei, grind) worden via uitgravingen gewonnen en zijn dus geen restproducten.
- Zowel CEM I als CEMIII zijn als cementsoort gebruikt conform de MKI geselecteerde recepten.
- Waterglas wordt gebruikt in een 48% oplossing en natriumhydroxide in een 50% oplossing. De productiemethode is willekeurig genomen.

Voor de aannames gold dat het kiezen van 50% Natriumhydroxide niet geheel correct is en daardoor niet overeenkomt met de doorgerekende hoeveelheid toegevoegde stof. Er is hiervoor een correctie doorgevoerd in de berekeningen.

4.3.3 Transport materialen

De grondstoffen waar in Tabel 21 naar verwezen is, dienen in een eerder stadium getransporteerd te worden. In de MKI-berekening is daarom per grondstof een transportafstand meegenomen. Deze transportafstand is inclusief de terugreis. Voor de bulkgoederen zoals zand en grind, is een afstand van 50 km genomen. Dit is een standaardwaarde in de MKI-berekening en werd ook als zodanig meegenomen in DuboCalc. Voor andere specifieke goederen zoals kalk en hoogovenslak is direct een leverancier aangenomen en de bijbehorende afstand berekend. De meegenomen afstanden zijn in Tabel 22 weergegeven:

Tabel 22 Transportafstanden tbv MKI-berekening

Onderdeel	Eenheid	Baggerspecie	Zand	Klei	Grind
Leverancier			Aanname	Aanname	Aanname
Adres leverancier		Hansweert	Standaard	Standaard	Standaard
Transportmethode 1	Per schip/per trein/per as	Per as	Per as	Per as	Per as
Transportafstand 1 (retour)	km	0	50	50	50

Onderdeel	Eenheid	Waterglas	Na hydroxide	Hoogovenslak
Leverancier		Univar	Pq silicas	Ecocem
Adres leverancier		Zwijndrecht	Amersfoort	Moerdijk
Transportmethode 1	Per schip/per trein/per as	Per as	Per as	Per as
Transportafstand 1 (retour)	km	170	320	130

4.3.4 Productie zetsteen van baggerspecie

Het produceren van zetsteen van baggerspecie werd gedaan met de specifiek ontwikkelde GEOWALL® pers. Hierbij is het gehele persproces meegenomen. Het transporteren en mobiliseren van de pers, werd echter door Aveco de Bondt buiten beschouwing gelaten, aangezien dit is een eenmalige actie betreft en de bijdrage hiervan op de totale MKI volledig afhankelijk is van de hoeveelheid zetsteen die geproduceerd gaat worden. Daarnaast is het onbekend wat de transportafstand van de pers werd, maar naar verwachting heeft dit geen significante impact op de MKI van zetsteen.

Met name bij grootschalig gebruik van de pers zal één retour rit verwaarloosbaar zijn ten opzichte van het transport van bulkgoederen in grote hoeveelheden.

Het productieproces zetsteen van baggerspecie bestaat uit de volgende stappen en werktijden (per blok):

Tabel 23 Productieproces zetsteen in vijf stappen

Stap	Beschrijving	Benodigd materieel	Werktijd (min.)
Stap 1	Mengen materialen	Mengbak, graafmachine	5
Stap 2	Schoonmaken en prepareren mal	-	1.5
Stap 3	Vullen mal	Graafmachine	2
Stap 4	Mal in de pers zetten en persen zetsteen	Heftruck; Zetsteenpers	3.5
Stap 5	Ontkisten en wegleggen blok	Heftruck	5

Er wordt door Aveco de Bondt aangenomen dat al het materieel, gebaseerd op keuzes binnen het project Dijkversterking Hansweert, volledig elektrisch is en dat het gebruikte materieel zo kleinschalig mogelijk is.

De volgende waarde voor het verschillende materieel is bij de berekening meegenomen:

Tabel 24 Benodigde werktijd en energieverbruik materieel

		Uur/m ³	KwH/m ³
Pers	15.00	0.47	7.00
Mengbak	3.70	0.67	2.47
Graafmachine	25.00	0.27	6.67
Heftruck	11.00	0.27	2.93
Totaal opgeteld			19.07

Het totale stroomverbruik in stap A3 bedraagt op basis van de werktijden en specificaties van het te gebruiken materieel: 19.07 kWh per m³ zetsteen.

4.3.5 Transport zetsteen van baggerspecie

Voor het transport van het geproduceerde zetsteen naar de toepassingslocatie bedroeg de uiteindelijke afstand tussen de 400 meter en 6.5 kilometer enkele afstand. Er is daarin aangenomen dat dit gemiddeld 2km bedraagt. Er werd hier aangenomen dat dit met een vrachtwagen gebeurt.

4.3.6 Plaatsing van zetsteen

Voor de constructiefase werden de forfaitaire waarden aangehouden zoals die vermeld staan in het DuboCalc profiel van Basalton. Bij deze fase zijn dezelfde waarden aangehouden die worden gebruikt voor de graafmachine en vrachtwagenkraan om Basalton te plaatsen op de projectlocatie. Bij de constructiefase wordt rekening gehouden met 3% installatieverlies. Hierbij is de aanname dat het constructieafval wordt hergebruikt en opnieuw in de pers (A3) gaat voor de productie van nieuwe zetstenen. De afvalverwerking van het constructieverlies is daarom niet meegenomen.

4.3.7 Resultaten MKI berekening

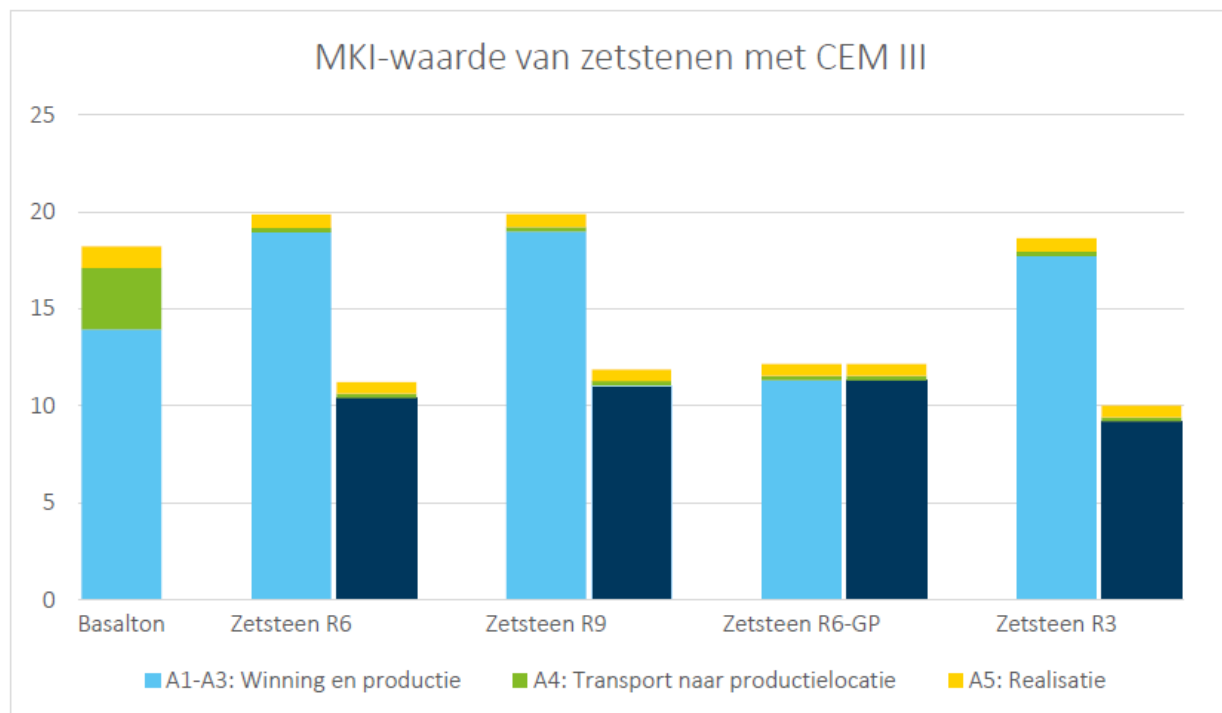
De eerste resultaten van de eerste inschatting van de MKI door Aveco de Bondt van de 4 verschillende recepten en een referentiescenario zijn in Tabel 25 weergegeven.

Tabel 25 Initiële resultaten inschatting MKI door Aveco de Bondt

Recept	MKI/m ³	MKI t.o.v. Basalton/ m ³
R6	€ 19.86,-	109%
R6_CEM III	€ 11.23,-	62%
R6_GP	€ 12.14,-	67%
R9	€ 19.89,-	109%
R9_CEM III	€ 11.88,-	65%
R3	€ 18.64,-	102%
R3_CEM III	€ 10.02,-	55%
Basalton	€ 18.21	100%

Als men kijkt naar de MKI-waarden van de recepten, scoren de recepten met geopolymeren en CEM III gunstiger dan de referentie (Basalton). Het recept R6 en R9 zijn vergelijkbaar met elkaar en Recept R3 is minimaal beter, maar nog wel iets slechter dan Basalton.

Het toepassen van bijvoorbeeld recept R6_CEM III (na correctie €11.23,-) zal een MKI-reductie tot 67% ten opzichte van referentiebeton (€ 18.21,-) opleveren. De voorwaarde is dan wel dat er CEM III cement gebruikt wordt in dezelfde hoeveelheden als oorspronkelijk voor CEM I gebruikt is. Zoals eerder geconcludeerd in de labtesten is CEM III een volledig alternatief voor CEM I voor het binder van baggerspecie.



Figuur 54 Berekende MKI-waardes van zetstenen

Voor de oorspronkelijke resultaten geldt dat het merendeel van het MKI bepaald wordt door fase A1-A3, ook wel winning en productie genoemd (Figuur 54). De grootste winst bij de alternatieven ten opzichte van basalton zit hem in de transport en productiefase, waarbij winst geboekt wordt op transportkilometers van grondstoffen en productie op locatie met elektrisch materieel. Daarnaast is het gebruik van baggerspecie in plaats van bulkgoederen zoals zand en grind gunstig voor de MKI-score. Recepten voor zetsteen gebruiken ook een kleinere hoeveelheid cement (8-10%) ten opzichte van basalton (15-20%). Dit wordt mogelijk gemaakt door het proces van mechanische stabilisatie (persen) door middel van de recent ontwikkelde zetsteenpers, dat minder cement vereist om dezelfde sterktes te halen. De realisatiefase is zoals ingevoerd identiek voor alle scenario's.

4.3.8 Analyse van de resultaten

Er zijn 5 verschillende recepten (4 alternatieven en 1 referentiescenario) doorgerekend voor alle fases binnen de productieketen. In het eerste onderzoek naar de MKI-waardes van deze recepten is de levenscyclus van productiematerialen tot en met productie van zetsteen geanalyseerd. Er komt hieruit naar voren dat de recepten die gebruikmaken van geopolymeren gunstiger scores vergeleken met het referentiescenario Basalton. De recepten die gebonden zijn met CEM I (portlandcement) scoren ongunstiger in de MKI-score, met uitzondering van recept R3, waar meer baggerspecie hergebruikt is. Deze analyse geeft echter geen eerlijke vergelijking tussen de alternatieven voor zetsteen en het referentiescenario van Basalton. Dit komt doordat Basalton geproduceerd wordt met milieuvriendelijkere cement III (CEM III). Zodoende is een analyse uitgevoerd voor een meer representatieve MKI-vergelijking. Deze wijst uit dat recepten gemaakt met CEM III tot 55% gunstiger scores vergeleken met Basalton. Alle alternatieven leveren hierbij een besparing op in de MKI-score in vergelijking met traditioneel Basalton van maximaal 8 euro/m³.

Gezien de MKI-analyse lijkt zetsteen van baggerspecie een geschikt alternatief voor zetsteen van beton. Op basis van de LCA quickscan in deze fase van het onderzoek blijkt dat de MKI-score van zetsteen van baggerspecie gelijkwaardig of enigszins tot significant beter is ten opzichte van het veel gebruikte betonnen zetsteentype Basalton. In fase 3 en 4 van het innovatietraject zal aan de hand van nog meer details een uitgebreidere LCA-analyse kunnen plaatsvinden. Daarbij zal het verschil in MKI-waarde tussen zetsteen van baggerspecie en zetsteen van beton met een kleinere onzekerheid bepaald kunnen worden.

4.3.9 Mogelijkheden voor optimalisatie

Voor alle scenario's is de winning en productiefase de grootste fractie van het totaal. De meeste verbetering valt dus te halen in deze fases. Het is daarom aan te raden om de recepten en/of de leverantielocaties, te her-evalueren voor een optimalisatieslag met betrekking tot de MKI-waarde. Een eerste stap is hiervoor al gemaakt bij het presenteren van de resultaten. Hier wordt een verandering in receptuur voorgesteld, waarbij het vervangen van CEM I met CEM III, zoals ook gedaan is bij het Basalton referentiescenario, is toegepast. Hier is te zien dat deze vervanging een enorme reductie in MKI-waarde genereert en daardoor alle alternatieven beter scoren dan Basalton. Daarnaast zijn de effecten van een vervanging van het type cement op de fysieke eigenschappen van de recepten van zetsteen minimaal. Andere winst in de winning en productiefase kan behaald worden door het toevoegen van grotere hoeveelheden baggerspecie ten opzichte van toeslagstoffen zoals klei en grind. Dit doen zonder de prestaties te beïnvloeden is een uitdaging, aangezien het baggerspecie een minder gunstige invloed heeft dan andere traditionele bouwmaterialen op de eigenschappen van het zetsteen. Dit komt door de fracties aan organisch materiaal en zeer fijne stoffen, die in vergelijking met zwaardere grovere delen zoals zand en grind, minder stabiliteit geven. Er dient daarom gecompenseerd te worden door het toevoegen van extra bindende middelen.

Het is aan te raden om extra CEM III toe te voegen in plaats van toeslagstoffen. Hierdoor kan zal meer baggerspecie hergebruikt kunnen worden, en zullen de prestaties naar verwachting gelijk blijven.

Hetzelfde kan behaald worden door de toeslagstoffen te vervangen met extra geopolymeren. Geopolymeren scoren vergelijkbaar met CEM III en staan erom bekend beter te presteren wanneer hoge sterktes behaald dienen te worden. Naast het aanpassen van de recepten en milieuprofielen, is het ook mogelijk om winst te behalen in fase A2 (transport naar productielocatie). Deze fase bedraagt ongeveer 20-30% van de MKI als het gaat om alternatieven voor zetsteen van beton. Het is aan te raden om producten zo dichtbij als mogelijk af te nemen. Daarbij kan het zo zijn dat er winst behaald kan worden door een bepaalde grondstof in grotere getalen af te nemen en zodoende het recept te veranderen. De voorkeur heeft daarbij om ook andere reststromen her te gebruiken. Denk aan het vervangen van grind door betongranulaat. Tot slot zijn er over de gehele MKI kleine winsten te boeken door bijvoorbeeld te transporteren per schip in plaats van as, HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)-diesel of groene stroom te gebruiken of het productieverlies te beperken.

In deze vervolgfase kan men kijken naar verbeteringen in de analysestrategie. Zo is het bij fase A1 (winning en productie) belangrijk om te evalueren wat het effect is van het kiezen van bepaalde milieuprofielen voor materialen die gebruikt worden voor alternatieven van zetsteen. In deze analyse is aangenomen dat milieubaarden voor 'rest of the world' en 'global' representatief zijn voor Nederland. Echter, dit is niet altijd het geval. Als het gaat om het profiel voor natriumhydroxide, is het bijvoorbeeld zo dat het 'rest of the world' profiel 70% ongunstiger scoort in MKI voor fase A1 dan het 'europa'-profiel. Daarnaast kan het zo zijn dat de productiemethode van een materiaal anders is dan het milieuprofiel aanneemt. Neem bijvoorbeeld de productie van zand, waarvan aangenomen wordt dat het in een zanduitgravingsgebied plaats zal vinden, terwijl dit ook in zee kan zijn. Voor een definitieve MKI is het daardoor belangrijk om de milieuprofielen te heroverwegen.

4.4 Kostenanalyse

4.4.1 Huidige uitvoeringsmethodiek

Op dit moment is de productiemethode voor zetstenen van baggerspecie door gebruik te maken van een mobiele zetsteenpers. Deze pers is nog in ontwikkeling. Hierdoor zijn er meerdere onzekerheden die ervoor zorgen dat er niet met 100% zekerheid een inschatting gemaakt kan worden van de business case. Desondanks zijn er meerdere aannames gedaan om tot een gedegen inschatting te komen van de huidige status. Hierbij wordt aangenomen dat:

- De huidige zetsteenpers maximaal 4 blokken per uur kan produceren. Dit zal in de toekomst theoretisch minimaal 10 blokken per uur zijn.
- Er maximaal 120 dagen per jaar, 7 uur per dag gewerkt kan worden. Dit komt overeen met 840 werkuren in een jaar. Dit is de situatie wanneer er verschillende projecten, op verschillende momenten worden gedraaid en de zetsteenpers dus gedeeltelijk stil staat.
- In een conventionele situatie wordt de zetsteenpers pas ingezet wanneer minimaal 1km aan bekleding wordt toegepast. Dit komt overeen met een minimale projectgrootte van 4500m³.
- Elk additioneel materieel dat benodigd is wordt voor de business case van tevoren aangeschaft. Bij voorkeur als occasion. Het gaat hier over klein materieel voor de productielijn en groter materieel zoals een graafmachine of vorkheftruck, maar ook de zetsteenpers zelf. Alleen de aankoop van de zetsteenpers en nieuw terreinmaterieel zorgt voor jaarlijkse onderhoudskosten van 10%
- Er zijn geen engineeringkosten meer van toepassing.
- Er is 2.5 Ha nodig voor de productielocatie. Er is een huurprijs van 80 euro per m³ aangenomen
- Alle transportafstanden die genoemd zijn, zijn heen-en-terug. Een transportafstand van 100km betekent 50km heen en 50km terug.
- Er zijn 3 personeelsleden nodig, die 100% van de tijd aanwezig zijn. Personeelskosten zijn zonder overhead berekend. Er wordt dus vanuit gegaan dat personeel intern ingezet wordt.

- De besparing op afvoer van baggerspecie, door baggerspecie in de zetsteenblokken te gebruiken, is meegenomen als 'korting' op de baggerblokken. Het gaat hier over transportkosten en acceptatiekosten van baggerspecie.
- De kosten van zetsteen zoals hier berekend, zijn exclusief de plaatsing. Er wordt later in dit hoofdstuk vergelijking gemaakt tussen de plaatsing van Basalton en zetsteen van baggerspecie. Het transport van productielocatie naar toepassingslocatie wordt wel meegenomen.
- Recept R6 van zetsteen is, wanneer niet anders vermeld, gebruikt voor de berekening van materiaalkosten en -transport.

4.4.2 Toekomstige uitvoeringsmethodiek

In de toekomst is het mogelijk om de productie van zetsteen van baggerspecie middels de zetsteenpers te optimaliseren. Hiervoor is er een optie om een nieuwe pers te bouwen met betere prestatiemogelijkheden of de huidige zetsteenpers te optimaliseren. Voor het berekenen van de toekomstige uitvoeringsmethodiek is gekozen om optimalisatie van de huidige zetsteenpers door te rekenen.

Hiervoor zijn de volgende aannames gedaan:

- De operationele uren per jaar kunnen in een ideale situatie omhoog. Wanneer grotere projecten gedraaid kunnen worden, wordt aangenomen dat er vergelijkbare uren gedraaid kan worden als in de bouw gebruikelijk is. Dit is 2300 uur per jaar.
- De projectgrootte bij een opschaling en optimalisatie van de productie, zal ook omhooggaan. De projectgrootte gaat van 4500m³ naar 9000m³ per project. Hierdoor gaat de kosten voor de aan- en afvoer van materieel omlaag per geproduceerde zetsteen en zullen diverse kosten zoals administratie per zetsteen ook afnemen.
- Het huren van een productielocatie zal per dag goedkoper worden naarmate grotere projecten aangenomen worden. Een andere mogelijkheid is dat er vaste productielocaties geselecteerd worden of zelfs overgenomen worden. Naar verwachting kan de huurprijs per ha zeker gereduceerd worden tot 20 euro/m²/jaar.
- Zodra er op grotere schaal geproduceerd wordt, kunnen er interne tarieven gehanteerd worden. Zodoende gaat het uurtarief van 50 euro naar 38 euro per uur.
- Tot slot zal naarmate het productieproces geoptimaliseerd is, minder ruimte benodigd zijn. Zodoende is aangenomen dat ook het benodigde gebied van 0.25 ha gehalveerd wordt naar 0.125 ha.

Los van de bovenstaande aannames, zijn de aangenomen waarden uit identiek aan de huidige uitvoeringsmethodiek.

4.4.3 Basalton

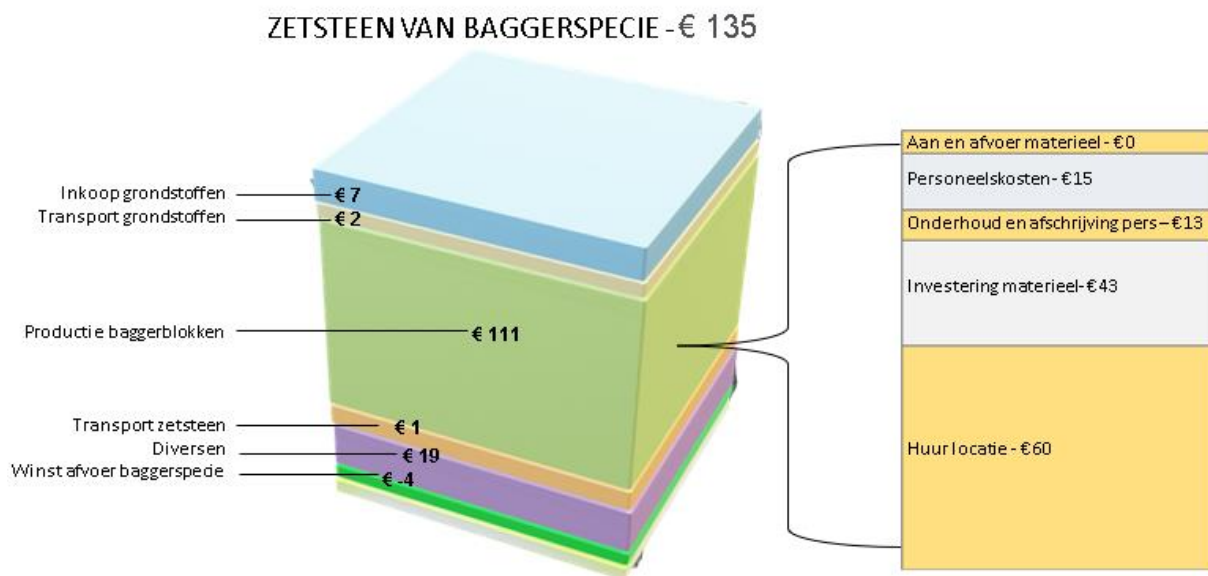
In deze analyse wordt gekeken naar zetsteen als vervanging van betonnen dijkbekleding. Een populair product voor betonnen dijkbekleding is Basalton. Voor Basalton geldt tevens dat de vorm, dichtheid, sterkte en plaatsing relatief vergelijkbaar is met de beoogde zetstenen van baggerspecie. Zodoende is Basalton een goed vergelijkingsmiddel voor de businesscase van zetsteen van baggerspecie. In deze analyse wordt voor Basalton aangenomen dat:

- Basalton wordt als prefab-elementen aangekocht. Dit betekent dat, anders dan bij de zetsteen van baggerspecie, de kosten voor de inkoop van grondstoffen, het transport van grondstoffen, diversen kosten en de fabricage/productie van de stenen inbegrepen zit in de kostprijs.

- Het transport van Basalton naar de toepassingslocatie is losgekoppeld van de kostprijs en aangenomen vergelijkbaar te zijn met de transportkosten van bulkgoederen en zetsteen van baggerspecie. Dit is 0.3 eur/km/m³ Basalton.
- De transportafstand van Basalton wordt aangenomen 150 km retour te zijn (75 km enkele afstand)
- Voor Basalton geldt dat het in sommige gevallen mogelijk is om slechts een element van 30cm te plaatsen. In andere projecten is 50 cm hoogte uiterst benodigd. Zodoende zijn beiden gevallen in de berekening meegenomen.
- In Basalton, gemaakt van beton (C30/37), wordt momenteel geen baggerspecie gebruikt

4.4.4 Baggerspecie versus Basalton

Op basis van de bovenstaande aannames zal één zetsteen van baggerspecie met een afmeting van 50x50x50cm ongeveer 153 euro kosten. Ter vergelijking is een Basalton element met dezelfde afmeting tussen de 50 en 80 euro per element. Het staat echter voorop dat een dergelijk element gemaakt van baggerspecie prijstechnisch nog niet kan concurreren met conventioneel beton.



Figuur 55 Kostenplaatje zetsteen van baggerspecie

De kosten van een zetsteen van baggerspecie bestaat voor het grootste deel (85%) uit productiekosten. Hierbinnen zijn de investeringskosten van het materieel, zoals de zetsteenpers en het huren van de locatie, de grootste oorzaken van de hoge productiekosten. Naast de productiekosten zijn inkoop van grondstoffen en diversen kosten, zoals overhead, administratie en boekhoudkosten, een aanzienlijk aandeel van het totaal. De winst die is behaald met het verbeteren van de MKI-score of het hergebruiken van baggerspecie is nog relatief klein, maar kan wel de kosten van de inkoop van grondstoffen dekken. De transportkosten van het zetsteen zijn relatief laag door de kleine transportafstand.

Voor een goede vergelijking tussen zetsteen van baggerspecie en Basalton is het belangrijk om eerst te kijken naar het potentieel van de productie van zetsteen van baggerspecie. Eerder is uitgelegd waar de toekomstige uitvoeringsmethodiek op gebaseerd is. Ook is beschreven hoe Basalton doorgerekend is. Voor Basalton is gekeken naar elementen van 30cm hoog en 50cm hoog.

Tabel 26 Kosten zetsteen van baggerspecie vergeleken met Basalton

Kosten	Zetsteen van baggerspecie (huidige methodiek)	Zetsteen van baggerspecie (toekomstige methodiek)	Basalton (hoogte 50 cm)	Basalton (hoogte 30 cm)
Inkoop materialen	€ 7	€ 7		
Transport materialen	€ 2	€ 2		
Productie	€ 111	€ 17	€ 21	€ 13
Transport zetsteen	€ 1	€ 1	€ 1	€ 1
Diversen	€ 19	€ 0	€ 0	€ 0
Winst afvoer baggerspecie	€ -4	€ -4	€ 0	€ 0
Totaal	€ 135	€ 21	€ 22	€ 14

Zoals eerder geconcludeerd kan zetsteen van baggerspecie in de huidige methodiek niet concurreren met basalton vanwege de hoge productiekosten (111,-). Echter, de toekomstige uitvoeringsmethodiek kan in potentie een productiekosten van 17 euro per steen. Dit leidt uiteindelijk tot een totale kosten per zetsteen van 21 euro voor de toekomstige zetsteen van baggerspecie, hetgeen vergelijkbaar is met basalton. Hiervoor is naast andere kleine optimalisaties een productiesnelheid van 10 blokken per uur, 1600 werkbare uren per jaar en een gemiddelde projectgrootte van 9000 m³ voor benodigd. Het verschil in een toekomstige methodiek ten opzichte van de huidige methodiek zit hem in de productiekosten. Deze gaan exponentieel omlaag wanneer de productie efficiënter wordt. Zodoende gaan de totale kosten ook sterk omlaag.

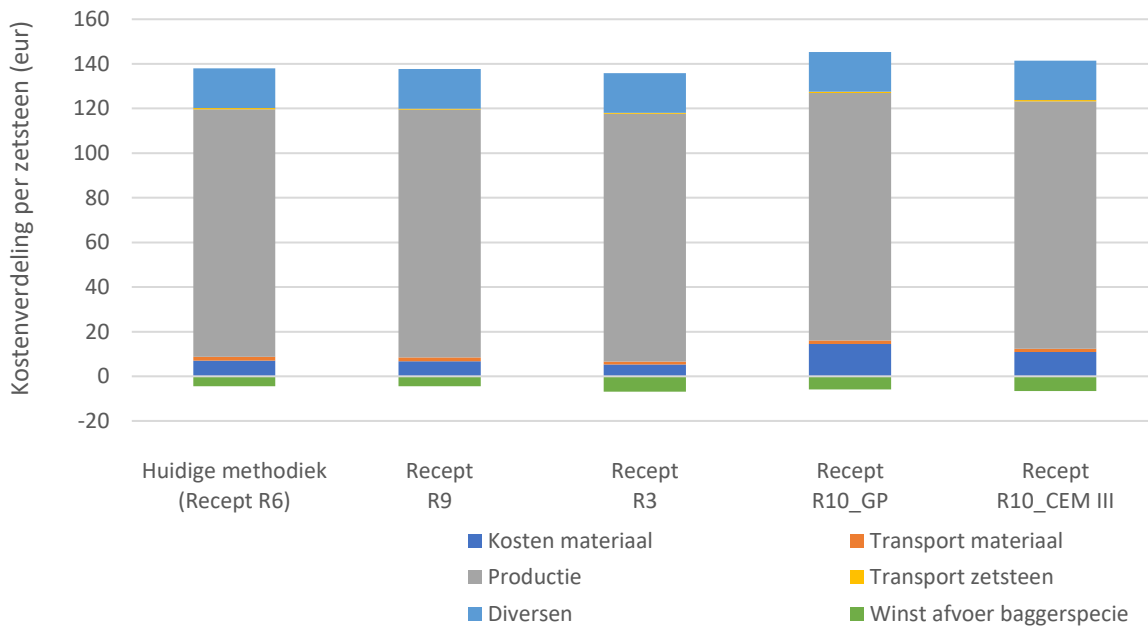
Een vergelijking met Basalton leert dat de kosten voor een zetsteen van baggerspecie met de toekomstige methodiek tussen een Basaltonblok (50cm) en een Basaltonblok (30cm) kan zitten. De meeste winst ten opzichte van Basalton wordt geboekt op het transport (0,- t.o.v. 1,-) en de winst op afvoer van baggerspecie (4 euro per steen winst). De productie van zetsteen van baggerspecie kan vergelijkbaar zijn met een Basalton 50cm blok, maar is duurder dan een Basalton 30cm blok.

Om te analyseren waar in het proces van inkoop tot productie de grootste winst te behalen valt, dient de gehele keten stap voor stap doorlopen te worden.

4.4.5 Invloed van receptuur

De inkoop van materialen is een relatief klein gedeelte van de totale kosten van een zetsteen van baggerspecie. Echter, het kan zo zijn dat wanneer andere recepten gekozen worden, er zowel een reductie in aanvoerkosten als een verhoging van de winst op de afvoer van baggerspecie, gerealiseerd kan worden.

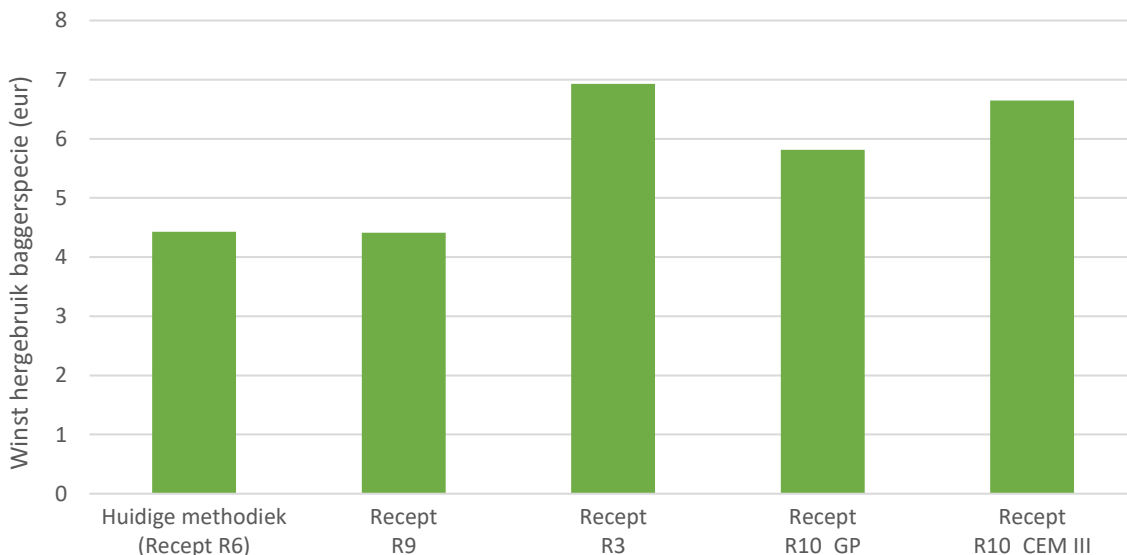
Voor de verschillende recepten die onderzocht zijn in eerdere fases van het onderzoek, zijn de kosten ten opzichte van het standaardscenario in paragraaf 1 berekend. De kostenverdeling is in Figuur 56 weergegeven. Recept R3, bestaande uit meer dan 50% baggerspecie scoort relatief gunstig met een reductie van 5% kosten ten opzichte van het standaard. Andere recepten zorgen niet voor een grote reductie. Zelfs alternatieven (R17 & R14) met meer baggerspecie, maar meer (dure) binders, kunnen geen grote reductie in kosten bewerkstelligen.



Figuur 56 Kostenverdeling verschillende recepten

4.4.6 Besparing met gebruik baggerspecie

Als er los van de recepten, specifiek gekeken wordt naar het hergebruik van baggerspecie en de (reductie in) kosten die dit meebrengt, valt een vergelijkbaar scenario te zien als in paragraaf 1.2. Het gebruiken van meer dan twee keer zoveel baggerspecie (R3 - 70%) ten opzichte van de standaard (R6 - 35%), zorgt voor een maximale reductie van de kosten van 100% naar 95%, zoals in Figuur 57 weergegeven:

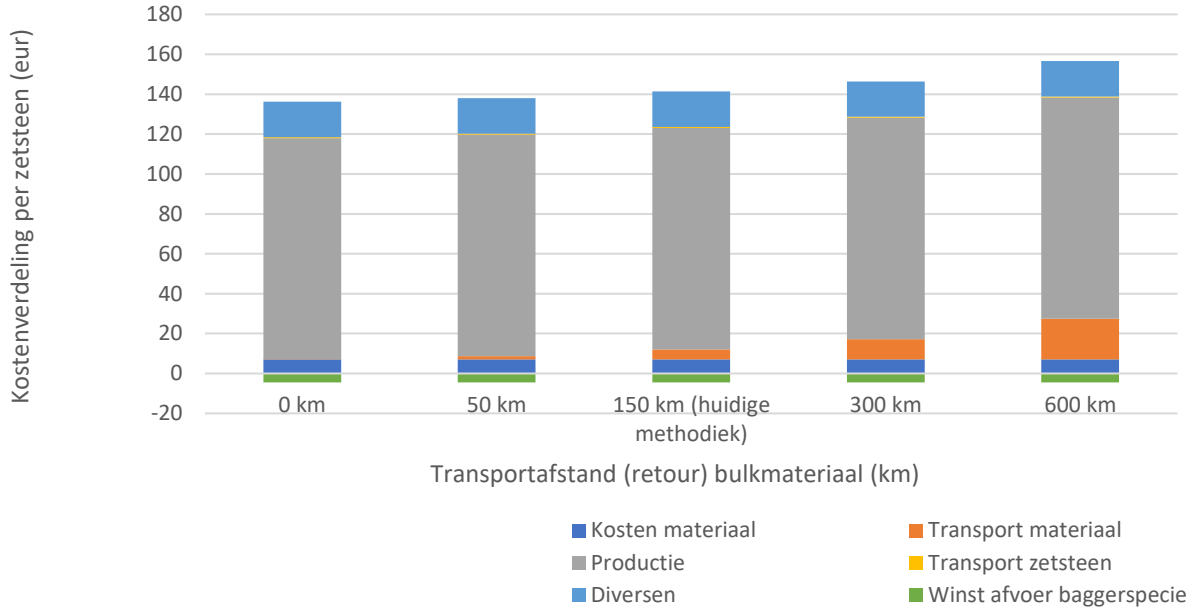


Figuur 57 Winst hergebruik baggerspecie per recept

Een vergelijkbaar scenario speelt zich af als men kijkt naar de afstand die de baggerspecie afgelegd zou hebben, wanneer deze naar een stortlocatie gebracht zou worden. Het afleggen van een enkele afstand van 600km naar een stortdepot, levert maximaal 5% winst op ten opzichte van het referentiescenario.

4.4.7 Transport van grondstoffen

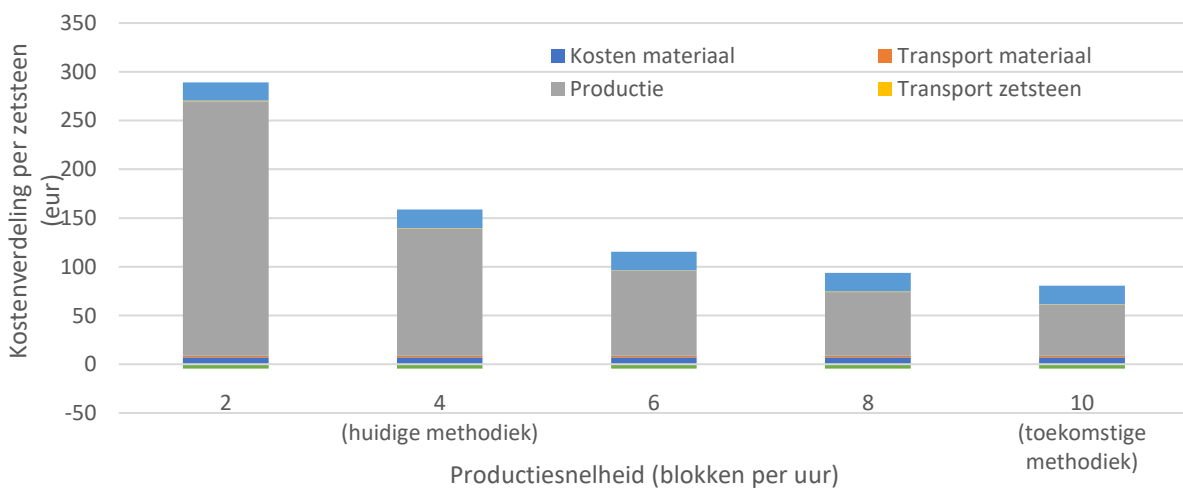
Transport van bulkmaterialen zoals zand, grind, klei en cement, kan een grote factor zijn bij het produceren van zetsteen. Zodoende is er gekeken wat de invloed is van de transportafstanden van bulkgoederen ten opzichte van de totaalprijs van een zetsteen. Dit is in Figuur 58 weergegeven:



Figuur 58 Totaalprijs zetsteen bij verschillende transportafstanden van bulkgoederen

4.4.8 Productie van de zetsteenblokken

De productiefase is ruim 85% van de gehele kosten van de zetsteen. Dit wordt met name veroorzaakt doordat er geïnvesteerd moet worden in materieel en er een productielocatie nodig is om productie te faciliteren. Doordat er op dit moment nog geen hoog rendement (4 blokken per uur) gehaald kan worden, is het aandeel van eenmalige en huurkosten relatief hoog. In theorie is een hogere productiesnelheid van minimaal 10 blokken per uur in de toekomst haalbaar.



Figuur 59 Kosten bij verschillende productiesnelheden

Een verhoging van het rendement van 4 blokken naar 10 blokken per uur zal minimaal een reductie van 50% teweegbrengen. Dit zou ervoor zorgen dat één zetsteen om en nabij 80 euro zou kosten. Dit is vergelijkbaar met het conventionele alternatief. Het verhogen van het rendement, belangrijk genoeg, is niet recht evenredig met het verlagen van de kosten. Een verandering van rendement naar 4 blokken per uur, geeft een reductie van maar liefst 75% ten opzichte van een rendement van 2 blokken per uur.

Terwijl van 8 naar 10 blokken slechts een reductie geeft van maximaal 20%. Zodoende is er grote winst te behalen door het rendement uit te breiden. Een situatie waarbij 10 blokken per uur geproduceerd zouden worden, zorgt voor een situatie waarbij de kosten van materiaal een relatief groot aandeel innemen van de totale kosten, wat meer gebruikelijk is.

Om uiteindelijk een voldoende productie te halen om de zetsteen ook daadwerkelijk in te kunnen zetten in dijkprojecten is een productie van ongeveer 100 blokken per uur nodig. Daarmee kan de businesscase geschikter worden voor dijkversterkingen.

4.4.9 Transport en plaatsing van de zetsteenblokken

Voor het transport van zetsteen naar de toepassingslocatie is een verwaarloosbare afstand aangenomen. De kosten voor dit transport zijn daardoor ook verwaarloosbaar ten opzichte van de productiefase.

De plaatsing van de zetsteenblokken is niet meegenomen in de prijs voor het produceren van zetsteen. Echter, er kan wel nader ingezoomd worden op de verschillende methodieken voor de plaatsing en een beeld voor de toekomst geven.

De huidige plaatsing van zetsteen zoals is gekozen voor het pilotproject kent de volgende stappen:

- Aanbrengen teenconstructie
- Profileren bestaande ondergrond
- Aanbrengen filterdoek
- Aanbrengen steenslag
- Plaatsen dijkbekleding
- Inwassen met steenslag

Deze stappen moeten zowel uitgevoerd worden bij de plaatsing van Basalton als de plaatsing van zetsteen van baggerspecie. Aangenomen wordt dat de stappen, anders dan het daadwerkelijk aanbrengen van de dijkbekleding, identiek zijn voor beide alternatieven (Basalton en zetsteen van baggerspecie). Er wordt verwacht dat zetsteen van baggerspecie dezelfde functionele eigenschappen biedt, zodat er geen verschil is in bijv. hoeveelheid steenslag, filterdoek of het type teenconstructie. Echter, er kan pas na het uitvoeren van de pilot met zekerheid gezegd worden of dit echt het geval is.

Wat op dit moment wel bekend is, is dat de plaatsing van dijkbekleding van zetsteen van baggerspecie verschilt van de plaatsing van Basalton. In de huidige methodiek wordt er door Van Oord een vacuum lifter gebruikt (85 euro per dag). Deze kan één blok per keer plaatsen. Voor Basalton geldt dat een klem (100 euro per dag) wordt gebruikt die meerdere blokken tegelijk kan plaatsen en dus veel efficiënter is. Om ook baggerblokken met een klem te kunnen plaatsen, moet een speciale klem worden ontwikkeld. Van Oord schat de kosten van deze klem op 500 euro per dag (toekomstige uitvoeringsmethodiek). Een vergelijking tussen de plaatsingskosten van de verschillende types zetsteen zijn in Tabel 27 weergegeven:

Tabel 27 Vergelijking plaatsingskosten verschillende types zetsteen

Plaatsingsstap	Kosten basalton [eur/m ²]	Kosten zetsteen van bagger calc. Van Oord [eur/m ²]	Kosten zetsteen van bagger toekomstig [eur/m ²]
Profileren bestaande ondergrond	€0.80	€0.80	€0.80
Aanbrengen filterdoek (incl leveren)	€2.47	€2.47	€2.47
Aanbrengen filterlaag	€0.65	€83.01	€0.65
Plaatsen dijkbekleding	€2.60		€3.10
Inwassen met steenslag	€2.15	€2.15	€2.15

4.4.10 De business case voor Zetsteen van Baggerspecie

Gedurende de huidige ontwikkeling van de zetsteenpers zijn de productiekosten van één zetsteen afgerond 135 euro. Terwijl de conventionele Basalton-elementen slechts 60-80 euro per vergelijkbaar element te bedragen. Deze kloof tussen realiteit en het uiteindelijke streven is logische gezien het feit dat zetsteen van baggerspecie nu nog een innovatie is. De huidige fase van zetsteen van baggerspecie faciliteert nog geen renderende business case. Dit wordt met name veroorzaakt door de lage productiesnelheid en het innovatieve karakter van de zetsteen. Het is op dit moment belangrijker om te kijken naar mogelijkheden om uiteindelijk de business case sluitend te maken. Zodoende is er ingezoomd op de verschillende aspecten die bijdragen aan de prijs van het zetsteen van baggerspecie.

Hier is uitgekomen dat de productiefase van het zetsteen verreweg (>85%) van de totale kosten inneemt, terwijl de kosten van materiaal en diversen kosten minimaal bijdragen. Zodoende valt ook de grootste winst te behalen bij factoren binnen de productiefase in plaats van factoren binnen de inkoopfase. Het is daarom aan te raden om voor het besparen van puur de kosten niet te kijken naar het aanpassen van de recepten, het hergebruiken van meer baggerspecie of het reduceren van transportafstanden. Deze stappen zullen maximaal 5% reductie in kosten opleveren en zouden moeten dienen als 'finetuning' van de business case.

Het belangrijkste is om de optimalisatieslag in te gaan voor het verhogen van de productie per jaar. Het gaat hier dan over de productiesnelheid per uur en de werkbare uren per jaar. Ondanks dat dit een meer dan logische stap lijkt, is de winst die hier te behalen valt niet lineair. Er is te zien dat de eerste stappen vanaf het punt waar we nu zijn: het verhogen van de productiesnelheid van 4 blokken naar 6 blokken en het verhogen van de werkbare uren van 840 naar 1300, een enorme verbetering van de kosten teweegbrengt. Vergeleken met latere stappen die voorkomen bij 10 blokken per uur en 2820 uren per jaar, is deze verbetering in kosten onevenredig groot. Daarnaast is het reduceren van het aantal benodigde arbeidskrachten (bijv. door het automatisch maken van de pers) een belangrijke manier om de kosten te verlagen en de productie te versnellen. Een dergelijke verbetering kan naar verwachting al een prijs voor zetsteen van baggerspecie teweegbrengen die vergelijkbaar is met de duurste klasse Basalton (80 euro).

Om een grotere productie per jaar te kunnen realiseren, kunnen een aantal stappen gezet worden. Er kan bijvoorbeeld 1) gekeken worden naar een verbetering van de huidige HPU (Hydraulische Power Unit, verpompt de olie naar en door de cilinders 2) gewerkt worden met een systeem van meerdere mallen 3) werkzaamheden tijdens onconventionele uren uit te voeren. 4) het automatiseren van de pers.

Los van de optimalisatie van het productieproces zou er goed gekeken moeten worden naar de levensduur van de zetsteenpers. Een grote levensduur kan de relatieve investeringskosten reduceren. De investeringskosten en 'verloren' uren kunnen ook gereduceerd worden door te zorgen dat de pers verhuurd wordt aan externe partijen. Tot slot is een groot gedeelte van de productiekosten het huren van een productielocatie. Er zijn situaties waarbij het denkbaar is dat de kosten voor de productielocatie te verwaarlozen zijn, aangezien deze bijvoorbeeld in beheer is bij de opdrachtgever. Daarbij is het goed om kritisch te heroverwegen hoeveel ruimte er nodig is voor de productie en opslag van blokken.

5 Fase III – Praktijkpilot

5.1 Uitvoering

5.1.1 Foto's uitvoering en resultaten

Om zeker te zijn van een goed verloop van het productieproces is er voorafgaand een uitgebreide instructie cursus verschaft aan het uitvoerende personeel. Dit is gedaan door intensief samen te zitten, iedere stap van productie nauwkeurig te beschrijven en uit te schrijven op een whiteboard. De productie valt onder te verdelen in zes stappen, namelijk: **1)** Mal gereedmaken, **2)** Mengen van de baggermix, **3)** Vullen van de mal, **4)** Persen van de baggermix in de mal, **5)** Ontkisten van de mal, **6)** Uithardingsproces.

Stap 1) Preparatie mal

Voorafgaand aan de productie wordt de mal geïnspecteerd en eventueel ontdaan van vuiligheid dat het productieproces kan beïnvloeden, waarna de juiste bodemplaat geplaatst in de onderzijde van de mal. Na deze stap is de mal gereed voor productie



Stap 2) Mengen

Mengen van de verschillende grondstromen tot een homogeen mengsel. Daarnaast wordt in de meeste gevallen de baggermix voorafgaand aan productie eerst door onze sediment ingenieurs getest op belangrijke factoren e.g. watergehalte, korrelverdeling en verhouding cement ten opzichte van baggerspecie.



Stap 3) Vullen mal

Na een goedgekeurde inspectie wordt de baggermix met juiste hoeveelheid in de GEOWALL® mal gegoten en wordt de bovenplaat op de baggermix geplaatst.



Stap 4) Persen

De mal wordt in de GEOWALL® pers geplaatst en de baggermix wordt hydraulisch gecompriëerd tot zetsteenblok.



Stap 5) Ontkisten

Na het persen wordt het gefabriceerde zetsteenblok ontkist uit de mal, overgeplaatst op een pallet waar het wordt ingepakt met folie.



Stap 6) Uitharding

De blokken harden uit in folie, na 14 dagen wordt het folie en de onderplaat verwijderd. Bij sommige zetsteenblokken worden er kernboringen genomen die gebruikt worden voor de monitoring



Figuur 60 Persproces in stappen

5.1.2 Evaluatie uitvoering

Het gehele proces van productie is gedocumenteerd op film, het beeldmateriaal is gebruikt om te evalueren waar de meeste tijdswinst te halen valt (zie Tabel 28).

Tabel 28 Productieproces in tijd uitgedrukt

	Tijd (minuten)	Tijd Cumulatief (minuten)
Stap 1	3	3
Stap 2	1	4
Stap 3	4	8
Stap 4	12	20
Stap 5	3	23
Stap 6	4	27
Totaal	1 blok in 27 minuten	

Door met behulp van twee mallen te werken kunnen proces stappen simultaan worden uitgevoerd. Dit betekent dat er op de langste stap, stap 4 niet gewacht hoeft te worden en het productieproces met circa 50% verminderd kan worden (Tabel 29)

Tabel 29 De invloed van een extra mal op de tijdsduur

	Tijd mal 1 (minuten)		Tijd mal 1 (minuten)	Tijd Cumulatief (minuten)
Stap 1	3	Stap 4	10	3/10
Stap 2	1	Stap 5	3	4/13
Stap 3	4	Stap 6	4	8/17
Stap 4	10	Stap 1	3	18/20
Stap 5	3	Stap 2	1	21/21
Stap 6	4	Stap 3	4	25/25
Totaal	2 blokken in 24 minuten			


Dit komt neer op ongeveer een productie van een zetsteen per 12 minuten en dus vijf zetstenen per uur.

5.1.3 Mogelijkheden voor productie andere vormen en maten

Naar aanleiding van het productieproces bij het depot te Hansweert, is een analyse gedaan voor de mogelijkheden voor de productie van complexere vormen. Hiervoor zijn als voorbeeld de volgende producten genomen: Basalton, Rona®-ton, Hillblock®, C-star, Rona®-taille, Verkalit® mgv en Verkalit® GOR

Om te beoordelen of het mogelijk is om dergelijke formaten te produceren zijn een drietal criteria opgenomen. Er is gekeken naar **1)** de complexiteit van de vorm: kan er überhaupt met een pers systeem een dergelijke vorm gefabriceerd worden **2)** sterkte/vormvastheid. Als het mogelijk is om een dergelijke vorm te produceren, is deze vorm dan sterk en vormvast, kijkend naar de huidige eigenschappen van zetsteen van baggerspecie en **3)** Is het praktisch om deze formaten in massa productie op te nemen. Dit is met name gerelateerd aan de pasvorm in een malsysteem.

Tabel 30 Eigenschappen verschillende vormen en maten zetsteen

	Haalbaarheid			Referentie
	Complexiteit vorm	Sterkte / vormvastheid	Pasvorm / massa productie	
Basalton	Goed	Goed	Slecht	

Rona [®] -ton	Goed	Redelijk	Redelijk/ Goed	
Hillblock [®]	Slecht	Slecht	Slecht	
C-star	Redelijk	Goed	Slecht /redelijk	
Rona [®] -taille	Slecht	Slecht	Slecht	
Verkalit [®] mgv	Slecht	Slecht	Slecht	
Verkalit [®] GOR	Slecht	Slecht	Slecht	

5.1.4 Monitoring van het proefvak

Onderzoeksvragen ecologie

Welke kansen biedt de toepassing van Zetsteen blokken van Baggerspecie als toplaag van een dijktaald voor de vestiging en ontwikkeling van flora en fauna. Zijn er verschillen met andere substraten?

Inrichting proefvak

Op basis van de te verwachten ecologische ontwikkeling wordt het proefvak specifiek ingericht om kwalitatieve verschillen tussen locatie van zetsteenblokken in het dwarsprofiel en verschillende samenstellingen van zetsteenblokken te kunnen onderzoeken.

- Blokken van vergelijkbare samenstelling plaatsen in een baan van laag naar hoog.
- Rekening houden met de toegankelijkheid van het proefvak, bijvoorbeeld door het aanbrengen van leuning of ringen, waaraan een touw kan worden bevestigd. De glooiing kan immers glad worden door algen en wieren.
- Voorkomen dat het morfologische onderzoek interfereert met het ecologische onderzoek, bijvoorbeeld door betreding van het proefvak op verschillende momenten en via alternatieve routes zodat de begroeiing minimaal zal worden aangetast
- Tussen de blokken worden neutrale zones gemaakt waarover gelopen kan worden. Hierdoor kunnen de blokken visueel worden geïnspecteerd zonder dat deze worden aangetast.
- Het aanbrengen en registreren van een duidelijke nummering van de blokken, zowel die van de frames als van het proefvlak. Deze nummering kan worden gebruikt voor alle monitoring.

De monitoring op sterkte en vorm focust zich op de verificatie van de labresultaten: zijn de resultaten op labschaal representatief op grotere schaal. Hiervoor dient rekening te worden gehouden met het verschil in omstandigheden. Voor het monitoren van sterkte en vorm worden de volgende parameters bepaald:

- Dichtheid en afmetingen
- Structuur, textuur en vochtdoorlatendheid
- Druksterkte
- Buigsterkte
- Erosiebestendigheid
- Effect van weersinvloeden

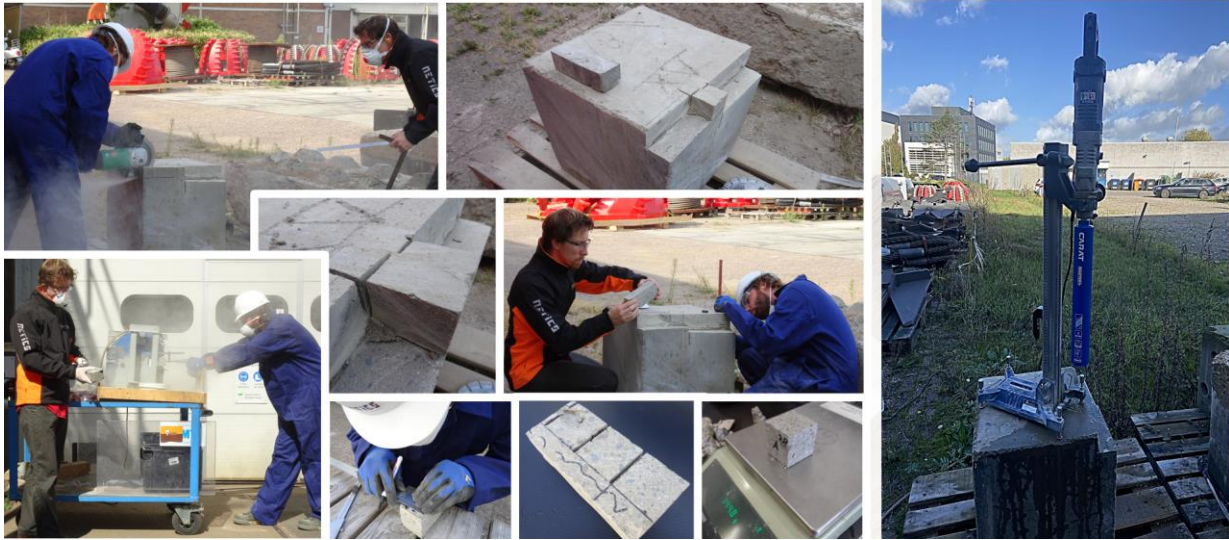
Fysische eigenschappen, zoals dichtheid, afmetingen, structuur, textuur, vochtdoorlatendheid, druksterkte en buigsterkte worden verkregen door middel van een monsternamen die periodiek uitgevoerd wordt. Deze periodes zijn 7, 14 en 28 en 56 dagen na productie. Daarna wordt meerdere keren per jaar een inspectie uitgevoerd, waarbij tevens monsters genomen worden.

De erosiebestendigheid en het effect van weersinvloeden, wordt simultaan bekeken door periodieke meerjaarlijkse inspecties. Erosie kan bepaald worden door middel van visuele metingen. Weersinvloeden worden waargenomen door de structuur, sterkte en dichtheid integraal te bestuderen in vergelijking met eerdere resultaten.

De monitoringsresultaten worden uiteindelijk gebundeld in een rapport waar een uitspraak gedaan kan worden over de levensduur van de zetsteen van baggerspecie over langere tijd. Hierbij worden de levensduurresultaten van Basalton vergeleken met de resultaten van de zetsteen van baggerspecie rekening houdend met omstandigheden.

5.1.5 Monitoringsresultaten

Blokjes van 4x4x4 cm zijn verkregen uit een 50x50x50 cm blok afkomstig uit de GEOWALL® pers op locatie, waarna ze in het laboratorium naar de juiste afmetingen zijn vervaardigd door middel van het gebruik met een diamantzaag en een steenslijper. De blokjes zijn tot nu toe verkregen p 7,14,28 en 56 dagen na productie van de stenen. Belangrijk in dit proces (zie onderstaand) is dat uiteindelijk de test monsters een haaks en gladde oppervlakte hebben, dit is essentieel voor een nauwkeurige meting.



Figuur 61 Proces nemen van samples uit blokken



Figuur 62 Impressie dichtheid blokken

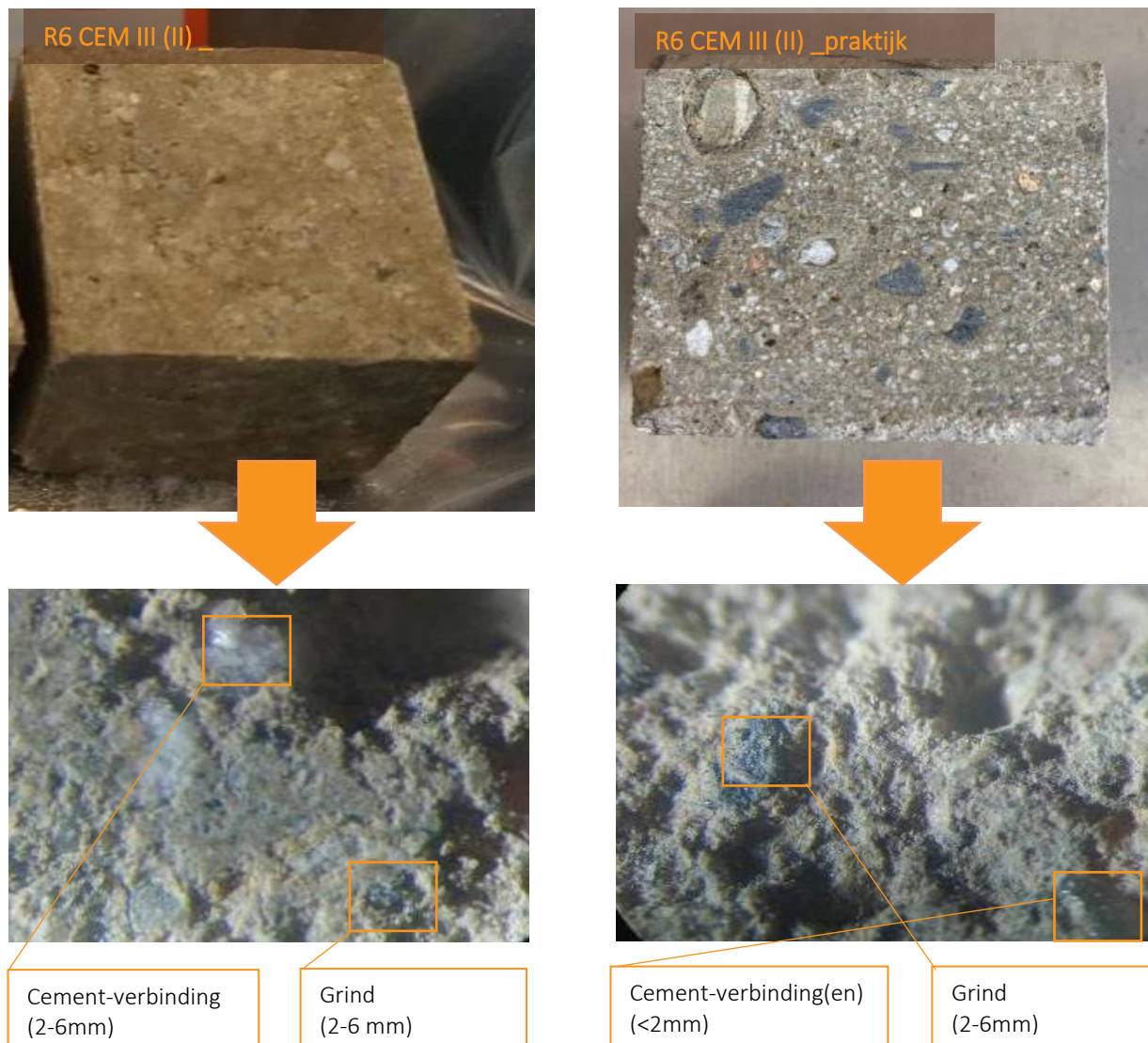
De dichtheid en afmetingen zijn bepaald voor in totaal 15 proefstukken. Voor elk proefstuk zijn de dichtheid en afmetingen bepaald. De resultaten voor de dichtheid zijn vervolgens vergeleken met de labresultaten op 56 dagen en in Tabel 31 weergegeven:

Tabel 31 Resultaten metingen dichtheid op verschillende momenten

	Lab R6_ CEM III (2)	Lab R10_ GP5	Praktijk R6 CEM III (2)			
	56 dagen	56 dagen	7 dagen	14 dagen	28 dagen	56 dagen
Dichtheid (kg/dm ³)	2.21	2.32	2.34	2.27	2.23	2.35

De zetsteenblokken uit de grote pers met recept R6_CEM III(2) hadden een dichtheid van ten minste 2.23 g/cm³. De hoogste dichtheid van 2.35 g/cm³ werd behaald op dag 56. Deze dichtheid is aanzienlijk hoger dan de labresultaten op 56 dagen voor hetzelfde recept. De dichtheid was vergelijkbaar met recept R10_GP5 en beton dat tussen de 2.1 en 2.6 g/cm³ weegt.

De structuur en textuur van het materiaal is onderzocht door middel van onderzoek met een microscoop. Er is gewerkt met een vergroting van 10x. De geproduceerde blokjes in het lab zijn vergeleken met de blokjes in de praktijk met de grote zetsteenpers. Onderstaand figuur laat een typisch voorbeeld zien van een aantal vergeleken blokjes:



Figuur 63 Voorbeeld structuren blokjes

De structuur van de labblokjes laat duidelijk de grinddeeltjes zien. Deeltjes kleiner dan 2mm kunnen niet specifiek onderscheiden worden. Cement-verbindingen zijn duidelijk te zien en zeer groot aanwezig.

De structuur van de samples uit de zetsteenpers laat weer duidelijk de grinddeeltjes zien (zwart). Echter, zijn de cement-verbindingen minder goed zichtbaar, aangezien ze veel kleiner zijn.

Het verschil tussen de twee samples uit het lab en de praktijk, duidt op een verschil in menging en perskracht.



Figuur 64 Impressie van uitgevoerde druksterketesten

In totaal 15 proefstukken zijn getest op druksterkte. De gemiddelde resultaten 7, 14, 28 en 56 dagen zijn in onderstaande tabel verwerkt en vergeleken met hetzelfde recept (R6 CEM III(2)) dat in het lab geproduceerd en getest is:

Tabel 32 Resultaten metingen druksterkte op verschillende momenten

	Lab R6_ CEM III (2)	Praktijk R6 CEM III (2)			
	56 dagen	7 dagen	14 dagen	28 dagen	56 dagen
Druksterkte (MPa)	17.44 MPa	16.90 MPa	22.68 MPa	20.68MPa	24.69MPa (max. 31.23 MPa)

De druksterkte na 56 dagen was gemiddeld 24.69 MPa. De toename in druksterkte is niet uniform. De maximale gemeten druksterkte op 56 dagen echter, was 31.23 MPa. Deze sterkte is aanzienlijk hoger vergeleken met de labresultaten voor R6_CEM III (2) 17.44 MPa. De druksterkte na 7 dagen van 16.90 MPa is vergelijkbaar met de druksterkte na 56 dagen in het lab. De druksterkte van 24.68 MPa is vergelijkbaar met de streefwaarden voor beton van 30 MPa.

De gemeten buigsterktes zijn in onderstaande tabel verwerkt.

Tabel 33 Resultaten metingen buigsterktes

	Gemiddelde Druksterkte (MPa)	Gemiddelde Buigsterkte (MPa)	Ratio buigsterkte/druksterkte
R6_CEM I	10.59	1.97	19%
R9_CEM I	12.59	1.17	9%
R10_CEM III	18.64	3.09	17%
Praktijk_R6_CEM III (2)	24.68	6.29	26%
Basalton	30.00	3.00	10%

De gemiddelde buigsterkte in de praktijk voor recept R6_CEM III (II) is 6.29 MPa. Dit is aanzienlijk hoger dan gemeten in het lab voor andere recepten. De minimumbuigsterkte voor beton is 3-4 MPa.

De verhouding tussen druk- en buigsterkte is 26%, dat ook hoger is dan de gemiddelde verhouding voor andere recepten. De verhouding van druk en buigsterkte van 26% is ongeveer 2.5 keer zo hoog als dat voor beton geldt (10% voor meeste betonsoorten).

De erosiebestendigheid wordt over langere tijd bepaald. De eerste resultaten op de ecologische frames is positief en is vermeld in sectie 3.4.6.

De ecologische meerwaarde wordt over langere tijd vastgesteld. Definitieve resultaten kunnen pas over meerde jaren vastgesteld worden. Echter, de eerste resultaten na 1 maand geven de volgende resultaten:



Figuur 65 Eerste begroeiing op zetsteenblokken



De eerste monitoringsresultaten laten een duidelijk verschil zien met de resultaten op de ecologische frames. Daar was te zien dat ook betonnen elementen pas na een periode van 1-2 maanden begroeid raakten met mos.

Het effect van weersinvloeden wordt over langere tijd bepaald. De monitoring van zowel duurzaamheid (levensduur) alsook ecologie zal in de periode 2023 t/m 2025 worden doorgezet.

6 Discussie

6.1 Haalbaarheid

In Fase 1 is de haalbaarheid van een zetsteen van baggerspecie als vervanging van betonnen zetsteen onderzocht. In deze fase is gekeken naar verschillende stabilisatiemethoden (fysisch (grind, zand, klei), scheikundig (geopolymeer, kalk, portland cement, hoogovencement) en mechanische stabilisatie (perstechnieken) om het Hansweert-baggerspecie op te werken tot zetsteenelementen. Verschillende combinaties van stabilisatiemethoden zijn onderzocht middels een groot aantal recepten. Deze recepten zijn vervolgens getest op de eisen voor zetsteen.

Het sediment van Hansweert is onderverdeeld in verschillende samples, waarbij de samples met meer silt (sample 2 & 3) uitgesloten zijn. Het uiteindelijke recept bestond voor 35% uit het gekozen baggerspecie (bestaande uit klei: 3.5%, silt: 31.4%, zand: 63.3%, org. 6.2%). Naast het baggerspecie uit Hansweert, moest er relatief veel klei en grind toegevoegd worden op fysische stabilisatie mogelijk te maken, maar door de grote fractie zand in het baggerspecie, was fysische stabilisatie met zand niet benodigd.

Een ander negatief aspect aan het baggerspecie, was de aanwezigheid van organische stof (6.2%) en fysische verontreinigingen (zoals plastic, glas e.t.c). Beiden stoffen hebben vergeleken met vaste deeltjes zoals zand en grind, een negatief effect op het stabilisatieproces, waardoor toevoeging van extra binders (zoals cement) vereist is. Dit is ook de reden dat cement beter werkte dan geopolymere. De activatoren in geopolymere reageren namelijk met organische stof. De werking van puzzolanen zou in theorie moeten hebben voor binden van organische stof; kalk en gips kunnen namelijk een binding aangaan met organische stof, echter was de werking hiervan minimaal doordat er weinig klei in het mengsel (kalk en klei versterken elkaar) en kalk met name zorgde voor meer waterabsorptie en daardoor gevoeligheid voor vries-dooi cycli.

Daartegenover stond dat het baggerspecie een zeer gunstig vochtgehalte had (<25%) waardoor het tijdens de productie mogelijk was om het vochtgehalte te controleren door het extra toevoegen van vocht tijdens het mengen. Ook maakt het lage vochtgehalte, wat uiteindelijk veroorzaakt wordt het hoge zand gehalte, de menging van materiaal gemakkelijker.

De ontwikkeling van de huidige zetsteen van baggerspecie is gebaseerd op één type baggerspecie (zandige baggerspecie) dat verkregen is uit het depot in Hansweert. Voor het gebruik van een ander type baggerspecie (bijv. kleilig baggerspecie) voor dezelfde toepassing, is ook een andere receptuur/mengverhouding benodigd voor verkrijgen van dezelfde eigenschappen van de zetsteen. Het NETICS-receptenmodel faciliteert in het leveren van een maatwerkoplossing per type baggerspecie. Er kan telkens relatief gemakkelijk een nieuw recept ontwikkeld worden voor een nieuw type zetsteen van baggerspecie.

Voor het toepassen van verontreinigd baggerspecie is additioneel onderzoek benodigd. In theorie zullen de binders, zoals cement, eventuele verontreinigingen inkapselen en zo immobiliseren. Echter, aangezien we te maken hebben met een product dat blootgesteld wordt aan extreme elementen, zoals hydrodynamische belasting, bestaat er een kans dat eventuele erosie van de zetstenen tevens uitloging van verontreinigingen uit verontreinigd baggerspecie met zich mee kunnen brengen. Hetzelfde kan eventueel optreden bij hergebruik na einde levensduur. De huidige pilot en additioneel onderzoek moet hierop antwoord geven.

Het labonderzoek heeft uitgewezen dat de benodigde functionele eisen voor zetsteen op labschaal behaald kunnen worden. De dichtheid van beton (2.1 -2.3 kg/dm³) is voor meerdere recepten behaald (R6-R10). De structuur en textuur sluit aan bij de theorie dat de korrels perfect op elkaar aansluiten. De sterkte-eis van 30MPa is alleen behaald door middel van recept R10, maar recept R6-R10 voldoen wel aan de eisen voor erosiebestendigheid en effect van weersinvloeden op labschaal.

De buigsterkte voldoet aan de verhouding ten opzichte van de drukkracht. Hierdoor en door de relatief gunstige MKI-score en kosteneffectiviteit is als afsluiting van fase I recept R6_CEM III (II) gekozen als recept en vervolgens op grotere schaal geproduceerd voor de plaatsing van een proefvak. Het proefvak is in de eerste maanden meerdere keren gemonitord op sterkte, vorm en ecologie.

De monitoringsresultaten op het gebied van sterkte en vorm, laten nadrukkelijk positievere resultaten zien dan gemeten zijn tijdens het labonderzoek. Hiervoor kunnen verschillende oorzaken aangewezen worden:

- De hogere absolute persdruk van de zetsteenpers zorgt ervoor dat de zetsteenblokken sterker en compacter worden dan met de kleinere labpers het geval is. De essentie van de GEOWALL®-technologie is het onder druk samenpersen van verschillende korrelafmetingen, waardoor het mengsel zo compact mogelijk wordt en er zo min mogelijk open holtes overblijven. De druk die hiervoor zorgt is een relatieve druk per oppervlakte. De zetsteenpers heeft omgerekend per oppervlakte dezelfde drukkracht als de labpers. Echter het kan zo zijn dat ook de absolute drukkracht een rol speelt bij het compactieproces. Denk bijvoorbeeld aan een verschil in verdeling van de druk, de frictie tussen deeltjes, het genereren van warmte en randeffecten.
- Het verschil in grootte van het blok (50x50x50cm vs 4x4x4cm) zorgt ervoor dat de uitharding anders verloopt. De uitharding van de binders (cement) verloopt door de reactie met water. Deze reactie verloopt door het hele blok heen. Een blok van 4x4x4cm hardt anders uit dan een groot blok, aangezien een groot blok relatief een veel kleiner percentage heeft dat blootgesteld is aan de buitenlucht. Hierdoor kan bijvoorbeeld de warmte die geproduceerd wordt bij de reactie van cement vastgehouden worden in het blok en/of is de verdeling en verwijdering van water uit het blok anders dan bij een klein blok het geval is.
- De hoge temperaturomstandigheden buiten (zomer) dan in het lab zorgen ervoor dat de uitharding anders verloopt. De uitharding van cement verloopt anders bij andere temperaturen. In het lab is er altijd een vaste temperatuur (kamertemperatuur) waaronder blokjes uitharden. Tijdens de productie bij Hansweert lag de maximale temperatuur boven kamertemperatuur, waardoor het eventueel zo zou kunnen zijn dat de uitharding beter verloopt dan in het lab het geval is.

Andere redenen kunnen zijn:

- Grootschalig mengen met een dwarsmenger zorgt voor een betere menging dan mengen met een kleine deegmenger in het lab.
- Het verschil in het materiaal van de mal zorgt voor een andere verdeling van de druk.

Bij voorbaat is uitgesloten dat **1)** de toegevoegde hoeveelheden anders zijn, dit is tijdens de productie en in de monitoring in het lab bekeken door middel van korrelgrootteanalyses **2)** andere materialen zijn gebruikt dan beoogd: hetzelfde type (nieuwe) cement als op labschaal is gebruikt, hetzelfde Hansweert-proefvak is gebruikt als bemonsterd in het labonderzoek, hetzelfde type zand (vloerenzand) is gebruikt, dezelfde gradatie grind is gebruikt (2-6mm). **3)** De monsters van grote blokken niet vergeleken kunnen worden met labsamples. Het testen van blokken met een afwijkende grootte of vorm, zorgt er juist voor dat de resultaten negatief uitpakken. **4)** het baggerspecie van betere kwaliteit is geworden door het rijpen van organisch materiaal. Het sediment is in het stadium van produceren nog onderzocht op korrelgrootte en organische stof. **5)** door het verschil in vochtgehalte van het baggerspecie een andere hoeveelheid baggerspecie toegevoegd is. Door een lager vochtgehalte is er relatief meer baggerspecie toegevoegd, wat zou moeten zorgen voor een lagere sterkte.

Doordat de labresultaten niet helemaal overeenkomen met de resultaten in de praktijk, is het ook lastiger om uitspraken te doen over specifieke eigenschappen van het materiaal zonder deze in de praktijk gemonitord te hebben. Eigenschappen zoals de druksterkte, buigsterkte en dichtheid zijn tot nu toe wel in de praktijk gemonitord. Hiervan is het aannemelijk om de labresultaten als ontwerpeisen te zien en de praktijkresultaten te gebruiken als definitieve resultaten. Dit is geldig om de resultaten in de praktijk ook in het gevolg zullen gelden. Ook geven de praktijkresultaten een beter beeld van de uiteindelijke potentie van het product. Als men kijkt naar de praktijkresultaten is een beeld te zien waarbij zetsteen, niet alleen qua structuur, maar ook op andere eigenschappen nadrukkelijk lijkt op beton. De dichtheden komen al overeen met beton, terwijl er baggerspecie is gebruikt dat een lagere dichtheid heeft bijv. zand. Dit is gunstig teken, want het betekent dat de huidige blokken al even goed bestendig zijn tegen golfkrachten zonder te verschuiven.

De druksterkte is al uitgebreid gemonitord op meer dan 15 verschillende blokjes. De gemiddelde druksterkte na 56 dagen was 24.69 MPa. Deze (kubus)druksterkte komt in de buurt van eis van 30 MPa wat bij betontype C30/C37 hoort. De maximale druksterkte was 31.23 MPa. Deze maximale druksterkte kan niet gebruikt worden als representatieve meting voor het gehele blok, maar is wel een indicatie wat potentieel bereikt kan worden. Sterker nog, het bemonsteren van het blok is tot nu toe gedaan middels het slijpen van kleinere blokjes. Vervolgens zijn de blokken, die niet precies 4x4x4cm glad waren, getest op druksterkte. Over het algemeen geldt dat kubussen die niet precies kubusvormig en gepolijst zijn, een lagere druksterkte geven. Dit is ook te zien aan de relatief grote spreiding aan sterktes die uit de testen komen bij de monitoring. Dit is echter niet het geval bij de metingen van de buigsterktes, die, door het testen van een groter oppervlak, relatief robuuster zijn. De buigsterktes van zetsteen van baggerspecie (6 MPa) zijn aanzienlijk hoger dan typische buigsterktes van beton (3-4 MPa). De buigsterktes zijn voor de ontwikkeling van zetsteen, relatief minder belangrijk door dat weinig belasting en buigkrachten op zetsteen komen, maar de buigsterkte is wel een uitstekende indicatie van de staat van het materiaal aangezien de meting robuuster is. Zodoende, kijkend naar de maximale druksterkte, de monstertechniek en de buigsterkte, is het niet onrealistisch om te verwachten dat de druksterkte in de praktijk boven 30 MPa ligt en dus vergelijkbaar is met C30/C37 beton. Ook de buigsterkte is al bijna een factor twee hoger dan beton. Dit kan verklaard worden door de aanwezigheid van het baggerspecie dat specifiek organische stoffen en verontreinigingen bevat die ervoor zorgen dat er extra rek in het materiaal komt.

De levensduur, wat een combinatie is van dichtheid, structuur, hardheid, sterktes, erosiebestendigheid en het effect van weersinvloeden, kan in theorie in het lab bepaald worden door de eerder genoemde processen te versnellen. Een gedeelte van deze proeven is uitgevoerd in het lab. De blokken waren volledig erosiebestendig en werden over langere tijd niet aangetast door zout. Ook is er gekeken naar het effect van vries-dooi-cycli, wat voor beton als één van de belangrijkste levensduurfactoren geldt. Hier is te zien dat blokjes van recept R6 28 cycli standhouden (28 jaar) en blokken van het uiteindelijke recept R6_CEM III (II) zelf meer dan 50 cycli (>50 jaar). Op basis van de observatie dat blokken in de praktijk sterker zijn dan in het lab het geval is, is de verwachting dat de blokken een levensduur hebben van tenminste 50 jaar. Echter, hierbij moet nog rekening worden gehouden met andere levensduurprocessen, waarbij het effect van zout, watererosie en slijtage door het botsen van blokken als meest significant beschouwd worden en over langere tijd gemonitord worden in het proefvak.

Op dit moment zijn Basalton en de zetsteen van baggerspecie met betrekking tot dimensionering niet één op één te vergelijken. Naar aanleiding van de resultaten van deze pilotproef en verdere ontwikkeling kan meer duidelijk worden over de dimensionering van de zetsteen van baggerspecie en zodoende opnieuw een vergelijking getrokken worden. Op dit moment echter is een globale vergelijking gemaakt op basis van dezelfde dimensionering om een zo eerlijk mogelijk vergelijking te krijgen. Op dit moment worden de vergelijkingen voor kosten en milieuimpact per kuub zetsteen uitgevoerd. Dit doen we omdat we een vergelijking met Basalton willen uitvoeren die onafhankelijk is van de dikte van het zetsteen. Het is namelijk op dit moment nog onbekend wat de uiteindelijke dikte moet worden van de zetsteen van baggerspecie. In de toekomst is een vergelijking per m² gewenst.

6.2 Milieu en ecologie

Gedurende fase I, II en III zijn verschillende proefopzetten voor de ontwikkeling van ecologie vervaardigd: in totaal zijn vier ecologische frames geplaatst met blokken van verschillende recepturen en is er een groot proefvak geplaatst waarbij blokken gemonitord kunnen worden op onder andere ecologische ontwikkeling. Zodoende is er een uitstekende kans gecreëerd om het effect van een andere type substraat; zetsteen van baggerspecie, op de ecologische ontwikkeling op substraten te testen.

Ecologische ontwikkeling op een zetsteen van baggerspecie biedt enorme kansen omdat:

- Zetsteen van baggerspecie als licht organisch en natuurlijk product aantrekkelijke stoffen kan afgeven voor de vestiging van ecologie, bijv. doordat het een lage pH heeft dan beton.
- Zetsteen van baggerspecie geproduceerd is door middel van de GEOWALL®-perstechniek. Productie door middel van persen in plaats van gieten (zoals beton) heeft als voordeel dat de buitenstructuur ruwer is dan beton dat in gegoten toestand fijner afgewerkt is.
- Het huidige product een gunstigere milieupact heeft en het dus milieukundig aantrekkelijker is om natuurherstel te vervaardigen met baggerspecie.

De methoden die geselecteerd zijn om ecologie vast te stellen kijken naar zaken als bedekkingsgraad van fauna, bedekkingsgraad van flora, ruwheid en erosie en chemische samenstelling. Deze methodieken, in combinatie met een vergelijking met gewoon beton, bieden een integrale aanpak voor een eerste inschatting van de potentie van zetsteen van baggerspecie voor de ontwikkeling van ecologie.

De eerste indicaties van het ecologisch onderzoek geven een beeld van de ontwikkeling van pioniervegetatie (<1 jaar). Over het algemeen is te zien dat de oppervlakken die grover zijn (minder sterke recepten, grof beton) betere vestiging hebben van wieren dan fijner oppervlakken (fijn beton en sterke geopolymeren). In het proefvak is zelfs al te zien dat pioniervegetatie in de eerste maanden een erg duidelijke voorkeur heeft voor de zetsteen ten opzichte van beton. Echter, de resultaten zijn nu nog niet eenduidig genoeg om uitsluitsel te geven van de potentie van de zetsteenblokken. Zeker omdat de belangrijkste ecologische meerwaarde, vaak ook uitgedrukt in biodiversiteit, sterk gerelateerd is aan het ontwikkelen van hoogwaardige florasoorten en diverse fauna. Het is dus, hoewel de eerste ecologische resultaten een positief beeld schetsen, belangrijk om af te wachten wat er na een aantal jaren gebeurt.

Naast ecologie, is er tijdens het onderzoek een belangrijke focus gelegd op de milieupact van de nieuw ontwikkelde zetsteen. Als doel is gesteld om een significante milieuwinst te boeken ten opzichte van de traditionele betonnen zetsteen zoals Basalton. Middels een onafhankelijk onderzoek, is de milieupact (MKI) van alle recepten vastgesteld. Hier is te zien dat de impact van cement enorm is, waardoor het gebruik van duurzamer cement (hoogovencement) een must is, in combinatie met een reductie van het cementaandeel. Om tegelijkertijd ook de sterkte-eisen te halen, was het benodigd ook fysische stabilisatie toe te passen.

De resultaten van de LCA's geven aan dat de te boeken milieuwinst significant is met ten minste 6-7% (9 euro/ton) winst op traditioneel Basalton. Hierbij moet gezegd worden dat er nog erg veel winst te behalen is in meerdere facetten van het productieproces, waaronder het aandeel duurzame binders, het gebruik van reststromen, geschiktheid baggerspecie, uithardingsproces, productiesnelheid en de emissieloze bouwplaats. Deze punten zijn hieronder uitgewerkt.

1. Het toepassen van alternatieve natuurlijke binders zoals cellulose, kalk en andere puzzolanen als vervanging van cement. De nieuwste receptuurontwikkelingen hebben al uitgewezen dat hoogovencement voor nog 50% vervangen kan worden door hoogovenslak (BFS)
2. Het verduurzamen van bestaande binders door middel van carbonisatie. De laatste wetenschappelijke ontwikkelingen laten zien dat binders als cement bewerkt kunnen voor lagere MKI

3. Het verwerken van additionele reststromen (zoals betonpuin, glasafval) als vervanging voor de gebruikelijke toeslagstoffen (klei, zand, grind). In het onderzoek is een eerste indicatie gegeven van de mogelijkheden van reststromen als vervanging van toeslagstoffen. Zo is er bij het gebruik van een willekeurig menggranulaat minimale reductie in sterkte.
4. Het doorberekenen van de opslag van CO₂ uit baggerspecie
5. Het optimaliseren van de uitvoeringsmethodiek waardoor de prestaties van het materiaal met dezelfde samenstelling verbeteren en zo het bindergehalte omlaag kan (uitharding)
6. Evaluatie van de uitvoeringsmethodiek ten behoeve van de milieupact (stroomtype, materieelgebruik, emissieloze bouwplaats, opslag e.t.c.)
7. Toepassen meerdere stromen baggerspecie parallel waardoor aandeel toeslagstoffen verlaagd

6.3 Kosten-baten analyse

Gedurende de huidige ontwikkeling van de zetsteenpers zijn de productiekosten van één zetsteen om en nabij 135 euro. Terwijl de conventionele Basalton-elementen slechts 60-80 euro per vergelijkbaar element te bedragen. Ten eerste is deze kloof tussen realiteit en het uiteindelijke streven, geen verrassing. De huidige fase van zetsteen van baggerspecie faciliteert nog geen renderende business case. Dit wordt met name veroorzaakt door de lage productiesnelheid en het innovatieve karakter van de zetsteen. Het is op dit moment belangrijker om te kijken naar mogelijkheden om uiteindelijk de business case sluitend te maken. Zodoende is er ingezoomd op de verschillende aspecten die bijdragen aan de prijs van de zetsteen van baggerspecie.

Het belangrijkste is om de optimalisatieslag in te gaan voor het verhogen van de productie per jaar. Het gaat hier dan over de productiesnelheid per uur en de werkbare uren per jaar. Ondanks dat dit een meer dan logische stap lijkt, is de winst die hier te behalen valt niet lineair. Er is te zien dat de eerste stappen vanaf het punt waar we nu zijn: het verhogen van de productiesnelheid van 4 blokken naar 6 blokken en het verhogen van de werkbare uren van 840 naar 1300, een enorme verbetering van de kosten teweegbrengt. Vergeleken met latere stappen die voorkomen bij 10 blokken per uur en 2820 uren per jaar, is deze verbetering in kosten onevenredig groot. Een dergelijke verbetering kan naar verwachting al een prijs voor zetsteen van baggerspecie teweegbrengen die vergelijkbaar is met de duurste klasse Basalton (80 euro). Een volledige opschaling naar 100 blokken per uur met een volledig automatische pers, heeft potentie om zelfs goedkoper te worden dan Basalton.

Om een grotere productie per jaar te kunnen realiseren, kunnen een aantal stappen gezet worden. Er kan bijvoorbeeld gekeken worden naar een verbetering van de huidige HPU (Hydraulic Power Unit) en gewerkt worden met een systeem van meerdere mallen.

Los van de optimalisatie van het productieproces zou er goed gekeken moeten worden naar de levensduur van zetsteenpers. Een grote levensduur kan de relatieve investeringskosten enorm reduceren. De investeringskosten en 'verloren' uren kunnen ook gereduceerd worden door te zorgen dat de pers verhuurd wordt aan externe partijen. Tot slot is een groot gedeelte van de productiekosten het huren van een productielocatie. Er zijn situaties waarbij het denkbaar is dat de kosten voor de productielocatie te verwaarlozen zijn, aangezien deze bijvoorbeeld in beheer is bij de opdrachtgever. Daarbij is het goed om kritisch te heroverwegen hoeveel ruimte er nodig is voor de productie en opslag van blokken.

6.4 Uitvoerbaarheid

In de zomer van 2022 zijn zo'n 350 zetstenen van baggerspecie geproduceerd met de GEOWALL®-techniek. Tijdens de uitvoering is geëvalueerd wat de mogelijkheden zijn voor het maken van verschillende vormen en maten, die passen bij een bestaand type zetsteen. Bij de ontwikkeling van een zetsteenpers is altijd rekening gehouden dat de boven- en onderkant van het malsysteem een verschillende vorm kunnen hebben, waardoor er patronen en reliëf aangebracht kunnen worden. Dit is tevens aangetoond met het inbrengen van logo's gedurende het productieproces. Binnen het huidige veld van producenten van zetsteen, zijn tal van complexe vormen aanwezig die zowel verticaal als horizontale patronen hebben. Dusdanige complexe zetsteen-producten waren voor deze pilot nog niet haalbaar, maar er zijn een aantal aanknopingspunten bij de simpele vormen zoals Basalton, die eventueel in pilotvorm door het aanpassen van de mal geproduceerd zouden kunnen worden. Om dit in een pilotvorm toe te passen is nog nader onderzoek nodig naar het combineren van een aangepaste boven en onder mal, die in het volledige verticale vlak doorlopen en dus uiteindelijk tegen elkaar aan komen te staan. Ook is er een uitdaging bij het produceren van meerdere kleinere elementen tegelijk.

Los van complexe vormen zijn er op korte termijn tal van mogelijkheden om simpele vierkante zetstenen, zoals nu geproduceerd in het proefvak, op grotere schaal te ontwikkelen. Gedurende de monitoring is, onder voorbehoud, aangetoond dat er een zetsteen van baggerspecie met genoeg druksterkte geproduceerd kan worden. Dit is op een schaal gedaan van ongeveer 250 blokken per 2 weken. Dit betekent dat uitvoeringstechnisch de productie van zetsteen van baggerspecie op korte termijn al haalbaar is.

Om massaproductie op gang te zetten moeten er een aantal optimalisaties en aanpassingen gedaan worden aan het huidige productieproces. Ten eerste is het aan te raden om de optimalisaties voor de businesscase (HPU, mallen, werkbare uren, productie) door te voeren. Een betere business case maakt het mogelijk om sneller op te schalen. Daarnaast zijn voor massaproductie **1)** meerdere persen nodig **2)** een automatisch proces waar blokken uit de pers getransporteerd worden met een transportband en automatisch op de opslaglocatie terechtkomen **3)** een methodiek benodigd voor het grootschalig opslaan en afdekken van de blokken zodat het uithardingsproces op grote schaal goed verloopt **4)** een mengsysteem benodigd dat automatisch op grote schaal de goede hoeveelheden kan toevoegen en distribueren in de mallen. Aangezien er na het onderzoek nauwelijks twijfels zijn aan de ecologische en levensduur-eigenschappen van het product, zijn er, na de voorgestelde optimalisaties op het gebied van de business case en opschaling van de uitvoering, enorm veel mogelijkheden voor massaproductie van zetsteen van baggerspecie.

7 Conclusies en aanbevelingen

Het Hansweert-baggerspecie is gemiddeld tot goed geschikt om te stabiliseren maar er kan een groter (>35%) gehalte aan materiaal hergebruikt worden wanneer het klei en grind gehalte groter zou zijn en het organische stof gehalte lager.

- ➔ Aanbeveling: meerdere slibben mengen zodat er minder toevoegingen van klei en grind nodig zijn er een optimale samenstelling bereikt kan worden.
 - In het laboratorium is middels een groot aantal proeven bepaald wat de ontwerpeigenschappen van het zetsteen diende te zijn. Het was op laboratoriumschaal mogelijk om de eigenschappen te onderzoeken en een relatief beeld te schetsen van de beste recepten en productietechnieken. Uiteindelijk is in de praktijk aangetoond dat er een aantal essentiële factoren zijn die de resultaten in het lab en de praktijk laten verschillen, in positief opzicht
- ➔ Aanbeveling: de redenen voor de verbeterde sterkte begrijpen waardoor het praktijkproces geoptimaliseerd kan worden, maar ook het labproces beter uitgelijnd kan worden met de praktijk.
 - Niet al het baggerspecie is één op één te verwerken tot zetsteen vanwege eventuele verontreinigingen (bijv. niet toepasbaar-slib). Echter, de meeste baggerspecie in Nederland is dusdanig schoon dat het verwerkt kan worden in een vormgegeven bouwstof. Eventuele verontreinigingen in het baggerspecie worden theoretisch geïmmobiliseerd in het stabilisatieproces van de GEOWALL, ook met het huidige recept.
- ➔ In de toekomst dit aan te tonen middels uitgebreid uitloogonderzoek en uiteindelijk certificering van het product.
 - De zetsteen van baggerspecie is een technisch haalbaar product waarvan de langdurige prestaties nog aangetoond dienen te worden middels het proefvak. De initiële eigenschappen zoals druksterkte, buigsterkte en dichtheid zijn vergelijkbaar of evenaren de referentie van beton. De vormeigenschappen zijn op langere termijn haalbaar.
- ➔ Aanbeveling: de druksterkte meten door middel van nauwkeurige veldapparatuur
 - Op basis van een combinatie van de ontwerpeigenschappen van het zetsteen in het lab en de eerste monitoringsresultaten is de verwachting dat de blokken een levensduur hebben van tenminste 50 jaar. De langdurige resultaten op het gebied van erosiebestendigheid, sterkteverloop en effect van weersinvloeden moeten uitwijzen wat de levensduur precies is.
- ➔ Aanbeveling: de monitoring laten lopen over langere tijd waarbij de eigenschappen van het zetsteen vergeleken kunnen worden met de nulsituatie. Daarnaast zullen ook de huidige stenen versneld in het lab gemonitord worden en zodoende de levensduur vergeleken worden met de ontwerpeigenschappen in het lab.
 - Er is een eerste framework neergezet voor de massaproductie van zetsteen van baggerspecie. De lessons-learned vanuit de productie van de blokken voor het proefvak, zijn een eerste opzet naar de ontwikkeling van een robuust, efficiënt en kosteneffectief systeem voor het grootschalig vervangen van betonnen bekledingselementen.
 - Gedurende de huidige ontwikkeling van de zetsteenpers zijn de productiekosten van één zetsteen om en nabij 135 euro. Terwijl de conventionele Basalton-elementen slechts 60-80 euro per vergelijkbaar element te bedragen.

- ➔ Aanbeveling: het productieproces versnellen door middel van aanpassingen aan het perssysteem, bouwplaats, materieel en planning
 - Voor het produceren van bestaande type zetsteen van baggerspecie dient nog meer onderzoek en testen gedaan worden naar de praktische mogelijkheden voor het produceren van complexe vorm en maten in massaproductie. Op dit moment is dit alleen nog theoretisch uitgewerkt

- ➔ Aanbeveling: een eerste pilot draaien met het produceren van Basalton, als meest simpele en effectieve bestaande zetsteenelement.
 - Op basis van de theoretische kennis, kleinschalig onderzoek en de eerste metingen van het proefvak, is er grote potentie voor de vestiging van ecologisch leven op het proefvak. Echter, moet langdurige monitoring afwachten of er ook andere soorten dan pioniervegetatie zal hechten aan de blokken

- ➔ Aanbeveling: het onderzoeken van de mogelijkheden voor andere vormen en reliëf voor het stimuleren van ecologisch leven
 - De resultaten van de LCA's geven aan dat de te boeken milieuwinst significant is met ten minste 6-7% (9 euro/ton) winst op traditioneel Basalton

- ➔ Aanbeveling: Er is nog erg veel winst te behalen is in meerdere facetten van het productieproces, waaronder het aandeel duurzame binders, het gebruik van reststromen, geschiktheid baggerspecie, uithardingsproces, productiesnelheid en de emissieloze bouwplaats.

8 Literatuur en referenties

1. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Leidraad Zee- en Meerdijken, Delft, 1999
2. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Technisch Rapport Steenzettingen, Delft, 2003
3. Centrum Uitvoering Research Regelgeving, leidraad betonnen dijkbekleding, rapport 119, CUR, 1984
4. Pilarczyk, K., Coastal protection. Balkema, Rotterdam, 1990
5. Pilarczyk, K., Dikes and Revetments. A.A. Balkema (publisher), 1998
6. Handreiking Dijkbekledingen. Deel 1: Algemeen. Deltares, 2015
7. Handreiking Dijkbekledingen. Deel 2: Steenzettingen. Deltares, 2015
8. Nederlands Normalisatie Instituut, NEN 7024-1,2,3, Zetsteen Deel 1 – 3, Delft, 2015
9. Deltares, Steentoets 2020, www.helpdeskwater.nl.
10. Handleiding Steentoets 11203721-002-GEO-0013, 2020
11. Deltares Schematiseringshandleiding voor toetsing steenzettingen 1220086-013-HYE-0008, 2015
12. Schiereck G.J., Introduction to bed, bank and shore protection. 2004
13. Meininger P. L., Ecologische monitoring van zetstenen uit bagger bij Hansweert, 2022
14. Meijer A.J.M. & van Beek A.C.. De levensgemeenschappen op harde substraten in de getijdenzone van de Oosterschelde, typologie, kartering, relaties met substraat, oppervlakteberekeningen, gevolgen van dijk aanpassingen, 1988
15. Meijer A.J.M., van Grunsven R.H.A, Meininger P.L. & Persijn A. Planten en wiergemeenschappen op de Westerscheldedijken, 2011