



Bouwen met slib- deelrapport ecologie

Eindrapportage

Stichting Ecoshape en Projectorganisatie Marker Wadden

18 maart 2022

Project Bouwen met slib-deelrapport ecologie
Opdrachtgever Stichting Ecoshape en Projectorganisatie Marker Wadden

Document Eindrapportage
Status Definitief 01
Datum 18 maart 2022
Referentie 126879/22-004.178

Projectcode 126879
Projectleider K.C.G.J. Princen MSc
Projectdirecteur drs. M. Klinge

Auteur(s) K.C.G.J. Princen MSc en V.L. Kalle MSc
Gecontroleerd door drs. M. Klinge
Goedgekeurd door drs. M. Klinge

Paraaf

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.
Leeuwenbrug 8
Postbus 233
7400 AE Deventer
+31 (0)570 69 79 11
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	AANLEIDING, DOEL EN ONDERZOEKSVRAGEN	5
1.1	Aanleiding en doel	5
1.2	Onderzoeksvragen	5
1.3	Leeswijzer	6
2	AANPAK VAN HET ONDERZOEK	7
3	LITERATUURONDERZOEK	8
3.1	Aanpak	8
3.2	Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?	8
3.3	Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van slib?	16
3.4	Conclusie en discussie	20
4	KIEMEXPERIMENT	22
4.1	Inleiding	22
4.2	Aanpak	23
4.3	Resultaten	25
	4.3.1 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?	25
	4.3.2 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie van slib?	29
4.4	Conclusie en discussie	30
5	ONDERZOEK IN DE DUN SLIB COMPARTIMENTEN	31
5.1	Inleiding	31
5.2	Aanpak	31
	5.2.1 Onderzoekopstelling	31
	5.2.2 Gemeten parameters	33
5.3	Resultaten	35
	5.3.1 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?	35
	5.3.2 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie	43
5.4	Conclusie en discussie	45

6	EMPIRISCH ONDERZOEK OP DE EILANDEN	47
6.1	Inleiding	47
6.2	Aanpak	47
6.3	Resultaten	48
	6.3.1 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?	48
	6.3.2 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van slib?	50
6.4	Conclusie en discussie	53
7	CONCLUSIE	54
8	AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK	55
	LITERATUUR	56
	Laatste pagina	56
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Karakterisering dun slib-analyses	3
II	Waterstandsverloop dun slib compartimenten	1

1

AANLEIDING, DOEL EN ONDERZOEKSVRAGEN

1.1 Aanleiding en doel

De water- en ecologische kwaliteit van het Markermeer is al jaren ondermaats vanwege de aanwezigheid van grote hoeveelheden slib. Daarom hebben Natuurmonumenten en Rijkswaterstaat gezamenlijk het plan Markerwadden ontwikkeld om met het slib een eilandengroep aan te leggen. De ontwikkeling van de Marker Wadden wordt nauwkeurig gevolgd om kennis te ontwikkelen over bouwen met slib als vorm van Building with Nature.

In het kader van kennisontwikkeling rond de ontwikkeling van de Markerwadden is het Kennis- en Innovatieprogramma Marker Wadden (KIMA) opgezet. Onderdeel van dit programma is het uitvoeren van zowel fundamenteel als toegepast onderzoek om kennis te ontwikkelen en deze te kunnen toepassen in toekomstige projecten. Het programma is in 2018 gestart en heeft een doorlooptijd van drie jaar. Het onderzoek wordt uitgevoerd door onderzoeksinstituten, universiteiten en ingenieursbureaus (Ecoshape, 2018).

Het programma van KIMA beslaat drie thema's:

- 1 bouwen met slib en zand;
- 2 ecosysteem van waarde;
- 3 adaptive governance.

Aan het einde van de onderzoeksperiode (2021) levert elk thema een technische eindrapportage op. Voorliggend rapport maakt onderdeel uit van de technische eindrapportage van thema 1 'Bouwen met slib en zand' (zie verder paragraaf 1.2). Naast de technische themarapportages wordt ook een overkoepelend syntheserapport opgesteld, dat meer ingaat op de samenhang tussen de thema's en implicaties voor beheer.

1.2 Onderzoeksvragen

Voor thema 1 zijn onderzoeksvragen vastgesteld (Ecoshape, 2018). Vanwege de grootte van het onderzoek zijn deze onderzoeksvragen opgedeeld in deelvragen en subdeelvragen. Deze worden hieronder nader toegelicht.

Hoofd- en deelvragen

De hoofdvraag betreft:

'Hoe maak je een zo bruikbaar mogelijke bouwstof van het slib? Voor specifiek Marker Wadden is daarmee de vraag: hoe kun je zo effectief mogelijk met slib en zand nieuwe habitats met natuurwaarden creëren?'

In thema 1 gaat de aandacht hierbij primair uit naar de volgende habitats (zie EcoShape, 2018):

- de plas-dras delen van de slibcompartimenten met voldoende draagkracht voor moerasvogels en begroeid met helofyten;
- de zandige randen rond de slibcompartimenten die de natuurwaarden op de eilanden optimaal bijeen houden en zelf ook maximale dynamische natuurwaarden realiseren.

We geven invulling aan de hoofdvraag door middel van vier deelvragen:

- 1 wat is de vulsnelheid en consolidatie van de sediment invang in de slibgeul en hoe kan het sediment het beste worden getransporteerd?
- 2 wat is invloed van de vul- of opbouwmethode, dichtheid en samenstelling op de consolidatie en draagkrachtontwikkeling en vegetatieontwikkeling van slib?
- 3 hoe ontwikkelen we op de toplaag een vegetatiemat met voldoende draagkracht, die niet wegzakt met voortschrijdende consolidatie en zetting (dus meegroeit om aan het wateroppervlak te blijven)?
- 4 wat kunnen we leren van de ontwikkeling van de zachte randen ten behoeve van opschaling/efficiënte aanleg van nieuwe MW-compartimenten en zandige versterkingen in algemene zin?

Deze onderzoeksvragen worden beantwoord in drie technische deelrapportages:

- 1 'zand' onder leiding van Arcadis;
- 2 'slib-fysica' onder leiding van Deltares. Dit deelrapport bevat de resultaten van het onderzoek;
 - 1 in de dun slib compartimenten;
 - 2 naar de slibdynamiek in het Markermeer;
- 3 'slib-ecologie' onder leiding van Witteveen+Bos.

Subvragen 'Slib-ecologie'

Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek 'Slib-ecologie'. Het beantwoordt de volgende onderzoeksvragen:

- 1 is het slib geschikt voor de kieming en groei van helofyten?
- 2 wat is de invloed van vegetatie op de consolidatie en sterkteontwikkeling van het slib?

Afbeelding 1.1 Overzichtskaart Marker Wadden



1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de aanpak van het onderzoek. De hoofdstukken 3 tot en met 6 presenteren de resultaten van het onderzoek. Hoofdstuk 7 beschrijft de conclusie en tot slot worden er in hoofdstuk 8 aanbevelingen gedaan voor het vervolg.

2

AANPAK VAN HET ONDERZOEK

In 2018 is het plan van aanpak van het onderzoek vastgesteld (EcoShape, 2018). De onderzoeksvragen voor thema 1 zouden beantwoord worden door middel van een literatuuronderzoek en een praktijkonderzoek op de daarvoor bestemde dun slib compartimenten (zie EcoShape, 2018). Deze aanpak moest echter gedurende de onderzoeksperiode bijgestuurd worden. Onderstaand beschrijven we de belangrijkste aanpassingen:

- 1 geen dun slib maar materiaal uit de holocene deklaag. Het onderzoek zou uitgevoerd worden met dun slib dat zich verzamelt in de slibvanggeul van de Marker Wadden (zie afbeelding 1.1). Het 'bouwen met slib onderzoek' zou zich richten op hoe dit materiaal gebruikt kon worden voor de bouw (of onderhoud) van de eilanden. In de praktijk bleek echter dat de slibvanggeul zich minder snel vulde dan was voorzien. Er was onvoldoende slib beschikbaar om de dun slib compartimenten te vullen. Doordat de lege slibcompartimenten snel erodeerden heeft RWS/NM in 2019 besloten om de compartimenten te vullen met holocene deklaagmateriaal in plaats van met dun slib. Deze vullingen hebben in 2019 en 2020 plaatsgevonden;
- 2 problemen met de afwatering. Door problemen met de afwatering kon zowel in 2020 als in 2021 niet de maximale droogval bereikt worden hetgeen het onderzoek naar de invloed van vegetatie op de hoogteontwikkeling negatief heeft beïnvloed. In 2021 is daarom besloten om ook empirische data te gebruiken over vegetatieontwikkeling en hoogteontwikkeling op de eilanden zelf.

Deze wijziging resulteerde in vier onderzoeksporen, namelijk:

- 1 literatuuronderzoek;
- 2 kiemexperiment met dun slib uit winput 1;
- 3 praktijkexperiment vegetatie ontwikkeling in de dun slib compartimenten;
- 4 empirisch onderzoek invloed vegetatie op hoogteontwikkeling op enkele eilanden (A3 en B6).

De volgende vier hoofdstukken beschrijven deze onderzoeksporen. De specifieke aanpak van ieder spoor wordt daar nader toegelicht.

3

LITERATUURONDERZOEK

3.1 Aanpak

Het literatuuronderzoek heeft tot doel om beschikbare kennis in beeld te brengen. Het geeft een overzicht van de belangrijkste bevindingen uit de onderzoeken in aanloop op de bouw van Marker Wadden en de eerste ervaringen op Marker Wadden. Het vormt hiermee de basis voor de vergelijking met het KIMA onderzoek (hoofdstukken 4 tot en met 6) maar vormt ook de basis voor verder onderzoek in de toekomst.

3.2 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Uit het literatuuronderzoek komen vier studies naar voren die geschiktheid van het bodemmateriaal van het Markermeer voor kieming en groei van helofyten beschrijven. Deze onderzoeken zijn uitgevoerd ter voorbereiding of tijdens de aanlegfase van Marker Wadden. De bevindingen uit deze onderzoeken in relatie tot de onderzoeksvragen worden hieronder per studie beschreven.

Deze studies betreffen:

- veldexperiment MarkerMeerMoeras (Van den Berg et. al., 2014);
- pilot moeras ('proefeiland Ierst') (Dankers et. al., 2015);
- Wetland Eco-Engineering with Fine Sediment (Saaltink, 2018);
- Herbivore exclusion and active planting stimulate reed marsh development on a newly constructed archipelago (Temminck et. al., 2022).

Veldexperiment MarkerMeerMoeras: nieuwe kansen voor Natura 2000 (Van den Berg et. al., 2014)

Doel

In 2012 startte het project 'MarkerMeerMoeras: Nieuwe Kansen voor Natura 2000'. Dit onderzoek had tot doel om inzichtelijk te maken welke investeringen in natuurontwikkeling het meest kansrijk zijn voor het realiseren van een robuust ecologisch systeem en klimaatbestendig watersysteem in het Markermeer en IJmeer.

Door middel van een experiment zijn onder andere de voorwaarden en haalbaarheid voor succesvolle ontwikkeling van een moeras met karakteristieke helofyten in beeld gebracht. Hierbij was het doel het identificeren van mogelijke biogeochemische risicofactoren die samenhangen met het gebruikte substraat, die de succesvolle ontwikkeling van een grootschalig moeras in de weg kunnen staan.

Hieronder vatten we de belangrijkste bevindingen en aanbevelingen uit dit rapport samen. De biogeochemische data uit dit rapport is opgenomen in een samenvattende tabel aan het einde van dit hoofdstuk.

Onderzoeksopzet

De onderzoeksopstelling bestond uit vier bassins van 1,2 m hoogte die werden gevuld met holoceen materiaal dat mechanisch (met een kraan) was gewonnen uit het Markermeer. Het materiaal betrof de bovenste 50 cm slib of klei-zandige klei daaronder (50-200 cm van de bodem van het Markermeer). De

bassins werden doorstroomd met water uit het Markermeer met een verblijftijd van 30 dagen. Binnen de bassins werden 12 proefvlakken van 2x2 m aangelegd waarbij zes werden aangeplant met riet (rietstekken) en zes niet (controle). Er werden twee waterregimes gevoerd, te weten plas-dras en ondiep water. De ontwikkeling werd gedurende twee jaar gemonitord.

Naast het veldexperiment zijn er additionele experimenten uitgevoerd waarmee beter inzicht werd verkregen in het verloop van nutriënten in het bodemcomplex. Daarnaast zijn naleveringsexperimenten uitgevoerd en zijn er onder gecontroleerde omstandigheden groei- en kiemingsexperimenten uitgevoerd met de soorten grote lisdodde en riet op de sedimenten die ook in de bassins gebruikt zijn.

Resultaten en conclusies

De rietontwikkeling kwam in beide behandelingen goed op gang. In 2014 bleken de rietplanten echter minder vitaal dan in 2013. De gemiddelde stengeldiameter in met name de bakken met slib sediment en die van het klei in plas-dras sediment bleek gering (<5 mm) en daarmee niet voldoende om nesten van typische rietgebruikende vogels te ondersteunen. In de behandeling met klei op ondiep water werd wel stevig riet (stengels vaak >7 mm) waargenomen. Het riet in de plas-dras situaties werd in een additioneel experiment nader onderzocht. Uit het onderzoek bleek dat de totale wortelbiomassa van het riet in het slib sediment (0-50 cm Markermeerbodem) veel lager was dan die in het klei sediment (50-200 cm Markermeerbodem). Tijdens het kiemexperiment bleek ook dat de ontwikkeling van riet op het klei substraat sneller was dan op het slib.

Gedurende het experiment werden er geen sporen van vraat (herbivorie) gevonden op de vegetatie in de bassins. De beperkte omvang van het experiment en de aanwezigheid van voedsel in de directe omgeving is hiervoor als mogelijke oorzaak aangeduid. Begrazing heeft daarmee geen invloed gehad op de resultaten van het experiment.

Geconcludeerd wordt dat er duidelijke verschillen zijn gemeten in de chemische en fysische parameters van de bodem. Het onderzoek concludeert dat de ontwikkeling van een moeras op klei substraat (50-200 cm Markermeerbodem) relatief succesvol verloopt in een plas-dras situatie. De ontwikkeling op slibs substraat (0-50 cm Markermeerbodem) verloopt echter minder succesvol. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de hoge ammoniumconcentraties en ongunstige kiemomstandigheden in het slibs substraat. Het onderzoek concludeert dat ondanks de relatief ongestoorde ontwikkeling op beide substraten (geen vraat) de ontwikkeling in termen van biodiversiteit en biomassa relatief laag is. Dit wordt toegeschreven aan de lage nutriëntbeschikbaarheid van het slib. In het veld werd waargenomen dat na twee jaar de vegetatie te maken had met nutriëntgebrek en teruglopende nutriëntgehalten in de bodem. Geconcludeerd wordt dat met name het riet op het slib niet vitaal is. Door de geringe wortels en slappe stengels van dit riet kan het niet dienen als broedplek voor typische rietvogels zoals kleine karekiet en rietzanger en kan het ook beperkend kan zijn voor de functie als stabilisator van slib.

Het onderzoek concludeert dat de duurzaamheid van een hoog productief moeras op een dergelijke bodem in het geding komt. Natuurlijke processen zoals biologische afbraak van biologisch materiaal en guanotrofiëring moeten bijdragen aan het toenemen van de voedselrijkdom op de lange termijn. Het onderzoek verwacht dat de huidige substraten geschikt zullen zijn voor laagproductieve moerasvegetaties.

Er wordt geconcludeerd dat voor een succesvolle ontwikkeling van het helofytenmoeras een plas-drassituatie met tijdelijke droogval noodzakelijk is. Dit peil heeft fysieke voordelen voor de helofyten (kiemcondities) en biogeochemische voordelen waaronder de oxidatie van de potentieel toxische stoffen ammonium en sulfide.

Het onderzoek stelt de vraag of de moerasvegetatie in een jonge ontwikkelingsfase zoals getest in dit experiment op een arme bodem verstoring als gevolg van peilfluctuatie of begrazing aan kan gezien het gegeven dat de relatief nutriëntarme vegetaties moeilijker tegen verstoring kunnen doordat hergroei en hervestiging belemmerd wordt door voedselgebrek.

Aanbevelingen

In het onderzoek wordt aanbevolen om een moeras met voldoende schaal aan te leggen om de robuustheid en daarmee duurzaamheid van de ontwikkeling te verhogen. Aanbevolen wordt om habitats sterk af te wisselen en hiermee te voorkomen dat stochastische catastrofes (beschadiging door vraat) grote schade veroorzaken. Een gefaseerde aanleg, beginnend bij een plas-drassituatie op kleisubstraat, verdient hierbij de voorkeur. Hierbij wordt aangemerkt dat het materiaal zoals getest machinaal (met een kraan) is ingebracht en dus de sedimentatie en inklinkfase heeft overgeslagen.

Na de ontwikkelingsfase onder plas-drascondities zou een mogelijke verhoging van het waterpeil mogelijk zijn omdat het onderzoek aantoonde dat helofyten langdurige ondiepe inundatie voor lange tijd goed verdragen. In deze laatste fase kan de bodem door het invangen van slib ook gaan 'groeien'. Hierbij wordt opgemerkt dat een te magere ontwikkeling van helofyten of een ontwikkeling van ongewenste soorten niet gevolgd kan worden door het onder water zetten van vegetatie.

Pilot moeras (Dankers et. al., 2015)

Doel

Royal HaskoningDHV voerde in combinatie met Deltares in de periode 2010-2015 een onderzoeksprogramma Natuurlijk(er) Markermeer-IJmeer (NMIJ) uit. Als onderdeel van dit onderzoek is er een tien hectare groot proefeiland aangelegd in het Markermeer. Dit proefeiland staat ook wel bekend als 'proefeiland Ierst'. Dit proefeiland is in feite de stap tussen het hiervoor beschreven experiment en de bouw van Marker Wadden. De belangrijkste bevindingen van deze proef zijn in het onderzoeksrapport NMIJ (Royal HaskoningDHV, 2015) beschreven. Hieronder vatten we de belangrijkste conclusies uit dit experiment in relatie tot onze onderzoeksvraag samen.

Onderzoeksopzet

In de moeras pilot is gebruik gemaakt van holoceen materiaal uit het Markermeer dat met baggerschepen is verplaatst. Het materiaal is zowel mechanisch als hydraulisch aangebracht. Een deel van het eiland was 'open' en stond in directe verbinding met het Markermeer. Een ander deel van het eiland was gesloten. Er is geen vegetatie ingebracht.

Resultaten en conclusies

Uit het onderzoek blijkt dat het eiland snel begroeid raakte. Met name de hogere delen herbergden de meeste soorten en een hoger aandeel riet en wilgen. Vraat door watervogels werd maar in beperkte mate waargenomen en werkte niet limiterend voor de vegetatieontwikkeling op de droge delen. Na twee groeiseizoenen bestond de vegetatie in het gesloten compartiment echter nog voornamelijk uit pioniersoorten als blaartrekkende boterbloem, klein kruiskruid en goudzuring. In het open compartiment was vooral moerasandijvie aspectbepalend. Helofyten als riet en lisdodde waren nog schaars. Verschillende soorten wilgen waren al wel aanwezig.

Aanbevelingen

Aanbevolen is om een waterpeil in te stellen dat zo dicht als mogelijk bij een natuurlijk verloop met een amplitude van ongeveer een meter blijft.

Wetland Eco-Engineering with Fine Sediment (Saaltink, 2018)

Doel

Als voorloper op de uitvoering van het Marker Wadden project voerde Rémon Saaltink een promotieonderzoek uit waarin hij onderzoek deed naar de mogelijkheden voor het bouwen met het slib en holocene klei uit het Markermeer (EcoShape, 2018). Hierbij stonden vier onderwerpen centraal:

- plant-bodem interacties in de terrestrische zone;
- ecologische processen die de nutriëntenbeschikbaarheid beïnvloeden in de land waterzone;
- de effecten van planten op de consolidatie van kleirijk sediment in de terrestrische zone;
- de effecten van bioturbatie op de nutriëntenbeschikbaarheid in de aquatische zone. Tot slot bestuurd Saaltink de onderzoeksresultaten van het pilot project Marker Wadden (ook wel bekend als Proefeiland Ierst, zie de vorige paragraaf) (Dankers et. al., 2015).

Onderzoeksopzet

Saaltink maakte gebruik van twee typen sediment, te weten 'zachte klei' (0-10 cm diepte) en 'Zuiderzeeafzetting' (10-50 cm diepte). Hij 'won' dit materiaal in zowel het zuidelijk als noordelijk deel van het Markermeer. Met dit sediment voerde hij diverse experimenten uit. De belangrijkste conclusies uit deze experimenten staan hieronder beschreven.

Resultaten en conclusies

Saaltink concludeert in relatie tot de terrestrische zone (permanent droog) dat riet in de loop van het experiment achterbleef in zijn groei en vergeling en verschrompeling van bladeren werd waargenomen. Nutriëntlimitatie werd uitgesloten en ijzertoxiciteit werd als mogelijke oorzaak geïdentificeerd. In een vervolg experiment werden drie plantensoorten geselecteerd die voorkomen in het Markermeergebied en die verschillen in hun tolerantie voor ijzer (goudzuring, riet en koninginnekruid). Er werd een duidelijk effect waargenomen van het ijzerrijke sediment op de biomassa-productie van alle drie de planten. Riet bleek de enige soort te zijn die substantiële ijzerplak aan de wortels produceerde wat mogelijk het interne transport van P naar de bladeren remde. Goudzuring, die wordt beschouwd als ijzertolerante soort, was in Fe-P-rijk sediment in staat om meer fosfor te transporteren naar de bladeren dan riet. In alle planten werd echter een significant verhoogde ijzerconcentratie in de bladeren waargenomen. Saaltink concludeert dat niet kan worden uitgesloten dat deze directe ijzertoxiciteit een mogelijke verklaring kan zijn voor de geremde bovengrondse biomassa.

Met betrekking tot de land-water zone heeft Saaltink onderzocht hoe het hydrologische regime ingrijpt op de ecosystemontwikkeling, met name met betrekking tot de nutriëntbeschikbaarheid. Uit het onderzoek bleek dat periodieke inundatie stikstoflimitatie bij goudzuring tot gevolg had maar dat dit bij riet niet werd gevonden. Periodieke inundatie leidde zelfs tot een verhoogde fosforopname bij riet. Saaltink concludeert dat tijdelijke inundatie tot een concurrentievoordeel voor riet ten opzichte van goudzuring leidt. Dit concurrentievoordeel verklaart Saaltink aan de hand van twee mechanismes:

- een verlaagd zuurstofgehalte in de bodem in ijzerrijke sedimenten leidt tot reductieprocessen waardoor aan ijzer gebonden fosfor wordt gemobiliseerd;
- ook kunnen deze zuurstofloze condities bij inundatie de vorming van ijzerplak op riet verminderen wat de translocatie van P in de rietplant zelf bevordert.

Saaltink merkt op dat het verschil in totaal fosforgehalte groot is tussen de gebruikte zachte kleilaag (0-10 cm diepte, 361 mg kg⁻¹ ds) en de onderliggende Zuiderzeeafzetting (10-50 cm diepte, 213 mg kg⁻¹), maar dat het geen invloed heeft gehad op het totaal fosforgehalte in het plantenweefsel van goudzuring en riet. Samenvattend concludeert Saaltink dat de beschikbaarheid van fosfor wordt bepaald door het hydrologisch regime, terwijl de beschikbaarheid van stikstof wordt bepaald door zowel het hydrologisch regime als het sedimenttype.

In de aquatische zone onderzocht Saaltink het potentiële effect van bioturbierende Tubificidae op de nutriëntbeschikbaarheid in het kleirijke sediment. Ook bestudeerde hij op welke (bio)chemische processen bioturbierende wormen invloed hebben. Uit het onderzoek bleek dat de bioturbatie de bodem effectief beluchtte. Hierbij werd een optimum gevonden bij 12.000 wormen per m². Uit het onderzoek bleek dat de bioturbatie invloed had op de (bio)geochemische processen in de bovenste laag van het sediment. De ammonium- en nitraatconcentraties namen toe in het poriewater als gevolg van verhoogde snelheden van ammonificatie en nitrificatie. Ook werd er een vermindering waargenomen in de concentraties fosfaat als gevolg van fosforimmobilisatie.

Tot slot heeft Saaltink de resultaten van het proefeiland Ierst (Dankers et. al., 2015) bestudeerd het eiland bezocht en plantmateriaal verzameld. Saaltink merkte direct op dat het gebruikte materiaal voor proefeiland Ierst afwijkt van zijn materiaal en dat van de latere Marker Wadden. Het proefeiland Ierst is gebouwd met materiaal uit de vaargeul Amsterdam-Lemmer en, in tegenstelling tot Marker Wadden, niet opgespoten maar vooral mechanisch gevuld. Het materiaal op proefeiland Ierst is daarom sterker geconsolideerd dan het materiaal in het onderzoek van Saaltink of de latere Marker Wadden. In 2014 en 2015 is de vegetatieontwikkeling op Ierst gemonitord. In 2014 werd de vegetatie gedomineerd door goudzuring, riet en moerasandijvie. In 2015 nam de aanwezigheid van riet sterk af en bleef het aandeel van Goudzuring redelijk op peil. In 2016 bezocht Saaltink het eiland opnieuw en trof toen geen riet meer aan. In 2016 domineerden

goudzuring, valse kamille en wilgenroosje. In het onderzoeksrapport over het proefeiland (Dankers et. al., 2015) wordt deze verschuiving toegeschreven aan een hoger waterpeil dat optrad als gevolg van consolidatie. Saaltink stelt dat dit zijn conclusies met betrekking tot het waterpeil in relatie tot de nutriëntbeschikbaarheid onderschrijft: de wijziging in het waterpeil leidt tot een wijziging in de nutriëntbeschikbaarheid en daarmee de soortensamenstelling. Ook nam Saaltink plantmateriaal (goudzuring en riet) mee van het proefeiland en vergeleek deze met zijn experiment. Hij concludeerde dat de biomassa van de planten op de eilanden hoger was dan in zijn eigen experiment. Hij schreef dit toe aan de langere groeitijd van de planten op het eiland. Verder vond hij dat de N en P concentraties in de bladeren van het verzamelde materiaal (tot twee maal) hoger waren dan dat van zijn experiment. Net als in zijn eigen experiment bleek dat er geen sprake was van nutriëntlimitatie. Hij onderschrijft hiermee het belang van de biochemische samenstelling van de bodem.

Aanbevelingen

Op basis van zijn onderzoek doet Saaltink een aantal praktische aanbevelingen voor het Marker Wadden project. Deze betreffen:

- bestudeer de geochemische eigenschappen - met name Fe(III) en ijzergebonden fosforgehaltes - van het sediment en de feedbackmechanismes tussen planten en sediment, voorafgaand aan het finale besluit over het ontwerp van toekomstige eilanden;
- gebruik het zachte, kleirijke sediment als bouw materiaal, in plaats van sediment dat op grote dieptes moet worden gewonnen;
- pas periodieke inundatie toe zolang de ringdijken gesloten zijn, om ecosystemontwikkeling op de eilanden te bespoedigen;
- beplant de eilanden van de Marker Wadden met riet, in combinatie met effectief beheer van het hydrologische regime, om kolonisatie van riet te bevorderen;
- koloniseer het sediment in de oeverzone met bioturbierende macrofauna tot een optimale dichtheid van 12.000 individuen m⁻²;
- geef hiernaast ruimte aan natuurlijke processen.

Herbivore exclusion and active planting stimulate reed marsh development on a newly constructed archipelago (Temmink et. al., 2022)

Doel

Als onderdeel van het wetenschappelijk spoor van het KIMA-programma voerde het Natuur In Productie (NiP) team een veldexperiment uit op Marker Wadden. Als onderdeel van dit programma is er onderzoek gedaan naar de invloed van begrazing door grauwe gans en het gebruik van rietwortelstokken op de vegetatieontwikkeling. De relevante informatie uit het artikel in relatie tot de geschiktheid van de bodem voor de ontwikkeling van helofyten is hieronder samengevat.

Onderzoeksopzet

Voor het onderzoek werden in totaal 6 onderzoekslocaties (in duplo) ingericht op de eilanden A3 en B6-zuid (drie per eiland, zie afbeelding 1.1). Hierin werden vier behandelingen toegepast: 'geen vraat en rietaanplant', 'vraat en rietaanplant', 'geen vraat en geen rietaanplant' en 'vraat en geen rietaanplant'.

De plots zijn in 2017 ingericht. In mei 2018 is een deel van de plots ingeplant met rietkluiten die vrijkwamen uit A1 (zie afbeelding 1.1). Aan het einde van het groeiseizoen in 2018 is er een vegetatieopname gemaakt en zijn de belangrijkste biochemische parameters gemonitord.

Resultaten en conclusies

Temmink et. al concludeert dat de plant beschikbare hoeveelheid stikstof en fosfor hoog is in de bovenste 10 cm van de bodem en een hoge biomassa productie faciliteert. Uit het onderzoek blijkt dat het uitsluiten van vraat en de introductie van rietplanten een significant positieve invloed heeft op de vegetatiebedekking, riethoogte en rietstengeldichtheid (de belangrijkste resultaten zijn samengevat in tabel 3.1). Waar riet was geplant en vraat werd uitgesloten domineerde riet binnen één groeiseizoen. Waar geen riet werd aangeplant maar wel vraat werd uitsloten domineerde grote lisdodde. Riet groeide alleen in de aangeplante plots, er was geen sprake van spontane vestiging. Naast riet en lisdodde was er spontane vestiging (in lage

dichtheden) van onder andere spiesmelde, harig wilgenroosje, leeuwentand sp., Engels raaigras, moerasandijvie, katwilg en klein hoefblad.

De rietproductie werd onderzocht door het meten van stengelhoogte en stengeldichtheid. Temmink et. al. vond dat de stengeldichtheid in de aangeplante plots zonder vraat significant hoger was (gem. 94 stengels/m² sd. 15) dan met vraat (gem. 31 stengels/m² sd. 9). Ook de maximale riethoogte werd duidelijk beïnvloed door begrazing. Daar waar begrazing werd uitgesloten bereikte het riet een maximale hoogte van 116 cm (sd. 6 cm) en waar begrazing niet werd uitsloten een hoogte van 20 cm (sd. 10 cm).

Temmink et. al. vindt geen aanwijzing dat de bodemsamentelling in potentie een knelpunt kan vormen voor de ontwikkeling van een vitale rietvegetatie. Temmink et. al. concludeert dat begrazing door watervogels de primaire stuurfactor is voor de ontwikkeling van het moeras (de invloed van waterpeil en voedselbeschikbaarheid in relatie tot begrazing werd niet onderzocht in dit experiment).

Temmink et. al. concludeert dat een rietvegetatie zich alleen ontwikkelt wanneer riet wordt aangeplant en beschermd wordt voor begrazing. Temmink et. al. concludeert dat wanneer dit niet gebeurt andere soorten dominant zullen worden die zich makkelijker verspreiden en minder graag begraasd worden door watervogels. Onder hoge begrazingdruk zullen wilgen en lisdodde gaan domineren.

Aanbevelingen

Temmink et. al. beveelt aan om vooraf duidelijke vegetatiedoelen te stellen, ecologische knelpunten in beeld te brengen en vooraf een ontwikkelingsbeheerstrategie te kiezen (intensief versus extensief, gehele spontane ontwikkeling et cetera). Verdere studie moet zich richten op de lange termijn ontwikkeling om beter inzicht te krijgen waar de ontwikkeling heen gaat. Ook in het geval van het gebruik van vraatbescherming en een succesvolle ontwikkeling als gevolg daarvan, zal vraatbescherming ooit verwijderd moeten worden om een functie voor watervogels te vervullen. In dat geval zal de begrazing weer toenemen en de waarde van het systeem achteruit gaan. Er is daarom nader onderzoek nodig naar de mate van vraatbescherming, de optimale timing voor het verwijderen van de exclusures en de omvang van de rietkernen.

Samenvatting biochemische parameters bodem uit literatuurstudie

Tabel 3.1 vat de belangrijkste biochemische parameters uit bovenstaande literatuur samen. Deze tabel omvat alle bekende totaalwaarden. In de diverse onderzoeken zijn ook 'groeivaarden' van rietproductie opgenomen (waaronder drooggewicht, stengeldikte, stengeldichtheid etc.). In onderstaande tabel is er voor gekozen om alleen gegevens over rietontwikkeling op te nemen wanneer ze minimaal drie maanden groeiseizoen hebben gehad. Bij kortere groeiseizoenen heeft het riet zich nog onvoldoende kunnen ontwikkelen om een vergelijking met andere studies mogelijk te maken. Significante verschillen tussen de verschillende metingen zijn gemarkeerd. Hierbij duidt een gele kleur een significant lagere waarde aan een oranje een significant hogere waarde. In de 'conclusie en discussie' wordt ingegaan op mogelijke oorzaken van deze verschillen en implicaties voor de geschiktheid van het materiaal voor de kieming en groei van helofyten.

Tabel 3.1 Samenvatting van gemiddelde nutriëntconcentraties uit beschikbare literatuur

	Eenheid	Markermeer* 0-50 cm n=2	Markermeer* 50-200cm n=2	Marker Wadden** n = 18	Markermeer Noord 0-10 cm** n = 5	Markermeer Noord 10-50 cm** n = 5	Markermeer Zuid 0-10 cm** n = 15	Markermeer zuid 10-50 cm** n = 15	NMIJ pilot ' lerst** n=1 n _p =3
Al	$g\ kg^{-1}$	2,14	3,49	36,37	10,40	4,67	16,59	21,99	10,48
Ca	$g\ kg^{-1}$	38,24	29,02	35,12	48,06	25,87	45,63	48,03	44,63
Fe	$g\ kg^{-1}$	8,00	10,39	34,37	14,77	6,54	20,75	27,77	15,42
K	$mg\ kg^{-1}$	875	1243	5491	2619	1251	4102	5371	2647
Mg	$mg\ kg^{-1}$	3830	4692	8683	5106	2674	6636	8041	5526
Mn	$mg\ kg^{-1}$	115	140	882	360	161	577	710	392
N	$mg\ kg^{-1}$			3270	1611	617	2833	2663	-
Na	$mg\ kg^{-1}$	284		1763	97	49	526	992	470
P	$mg\ kg^{-1}$	311	545	660	361	213	649	1186	411
S	$g\ kg^{-1}$	2,67	0,33	21,74	4,54	1,19	5,59	5,73	5,94
Sr	$mg\ kg^{-1}$			99	113	70	135	148	121
Ti	$mg\ kg^{-1}$			519	396	380	312	312	300
Zn	$mg\ kg^{-1}$	91	34	76	130	88	110	159	31
Uitwisselbaar P	$mg\ kg^{-1}$			5	5	3	12	14	12
Fe-P	$mg\ kg^{-1}$			291	40	14	279	772	221

	Eenheid	Markermeer* 0-50 cm n=2	Markermeer* 50-200cm n=2	Marker Wadden** n = 18	Markermeer Noord 0-10 cm** n = 5	Markermeer Noord 10-50 cm** n = 5	Markermeer Zuid 0-10 cm** n = 15	Markermeer zuid 10-50 cm** n = 15	NMIJ pilot ' lerst** n=1 n _p =3
Ca-P	mg kg ⁻¹			88	89	42	121	146	83
Detritus P	mg kg ⁻¹			111	158	148	169	147	127
Organisch P	mg kg ⁻¹			65	47	16	117	100	67
Organisch stof	%	2,8	2,4	8,9	4,0	2,6	7,2	6,7	
Stengeldichtheid	n/m ²								
Stengelhoogte	n/m ²								
Stengeldikte	mm	<5	<5 plas-dras >7 ondiep water						

* Van den Berg et. al., 2014.

** Saaltink, 2018.

3.3 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van slib?

Uit het literatuuronderzoek komen vier studies naar voren die ingaan op de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van het slib. De belangrijkste bevindingen uit deze onderzoeken worden hieronder beschreven.

Wetland Eco-Engineering with Fine Sediment (Saaltink, 2018)

Saaltink deed onderzoek naar de invloed van riet op de consolidatie van zacht, kleirijk sediment (0-10 cm bodem). Hij deed dit door te onderzoeken hoe vegetatie de poriedruk beïnvloedt. Voor het experiment hanteerde hij een vast waterpeil waardoor de effecten van evapo-transpiratie in beeld werden gebracht maar waardoor de waargenomen verschillen in poriedruk niet rechtstreeks te koppelen waren aan de consolidatie van het sediment.

Uit het onderzoek bleek dat eigengewichtsconsolidatie in de initiële fase bepalend was voor de consolidatie. Na deze initiële fase werd er een effect van de aanwezigheid van riet waargenomen. Riet verhoogde de hydraulische geleidbaarheid van het sediment met 40 % ten opzichte van de condities zonder plant. De gemiddelde evapo-transpiratiewaarde bedroeg 3,95 mm per dag. Riet zou hiermee in potentie de consolidatie van kleirijk sediment kunnen versnellen.

Consolidation and drying of slurries - A Building with Nature study for the Marker Wadden (Barciela Rial, 2019)

Doel

Barciela Rial deed een promotieonderzoek naar de sturende processen in het consolidatieproces van fijn cohesief sediment dat voor Marker Wadden is gebruikt. Ze onderzocht hoe processen zoals segregatie en oxidatie die optreden als gevolg van de aanlegmethode de mechanische eigenschappen van het sediment beïnvloeden en welke gevolgen dit heeft voor de hoogte- en sterkteontwikkeling van het eiland. Ook onderzocht ze wat de invloed van vegetatie op het consolidatie proces kon zijn.

Onderzoeksopzet

Barciela Rial bracht allereerst de fysische eigenschappen van het materiaal in beeld. Er zijn verschillende experimenten uitgevoerd waarbij de fysische eigenschappen van het slib in beeld zijn gebracht. Daarnaast voerde ze diverse experimenten uit, in combinatie met Saaltink (Saaltink, 2018), waarbij de invloed van riet op het consolidatieproces en droging werd onderzocht. In de beschrijving van de resultaten richten we ons op de uitkomsten van dit onderzoek. Het fysisch deel van het onderzoek, en haar implicaties, wordt behandeld in de rapportage van Deltares (Deltares, 2022 in prep.).

Het effect van riet op consolidatie en droging is onderzocht door middel van een kolomexperiment. De kolommen (10 cm in diameter en 120 cm hoog) werden gevuld met baggerspecie. Op een deel van de kolommen werd riet aangebracht. De waterdruk in de poriën en de hoogteontwikkeling is gemeten bij een constante waterstand van 77 cm ten opzichte van de bodem van de kolom. Het water bestond uit Markermeerwater. In totaal zijn er zes kolommen gebruikt in twee experimentele series. In de eerste serie werden vijf van de zes kolommen ingeplant met riet. In de tweede serie werden twee kolommen gebruikt waarbij er één werd ingeplant met riet. De eerste serie had een doorlooptijd van 118 dagen, de tweede een doorlooptijd van 129 dagen. De kolommen zijn gevuld met Markermeer sediment dat werd gemengd voordat het in de kolommen werd ingebracht. De dichtheid (bulk density) van het mengsel bedroeg 1.260 kg/m^3 , het watergehalte van 66,7 % (massa water/totale massa). Het drooggewicht bedroeg 2.580 kg/m^3 . Bij de start van het experiment was de volledige kolom gevuld (118 cm). Er is 14 dagen gewacht met het inzetten van het experiment om initiële consolidatie mogelijk te maken. Na 14 dagen bedroeg de dichtheid 1.332 kg/m^3 en was de bodemhoogte gedaald tot respectievelijk 92,5 en 92,3 cm. Het water dat op deze bodem lag is verwijderd. Dat markeerde de start van het experiment ($t=0$). Op $t=0$ zijn drie rietwortels (2 cm) ingeplant.

Resultaten en conclusies

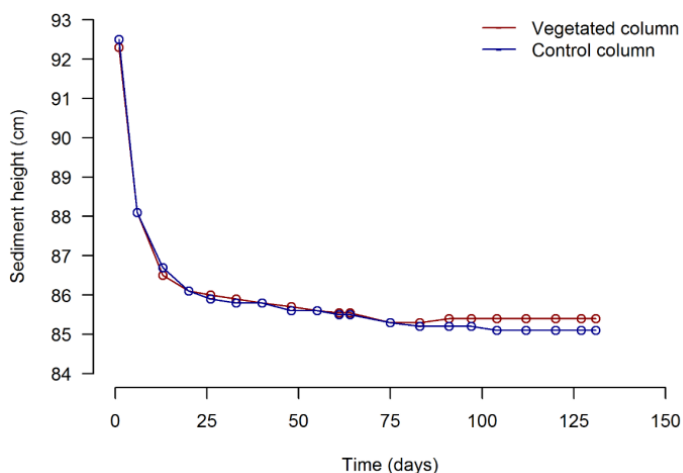
Uit de proefopstelling met riet blijkt dat riet de poriewaterdruk beïnvloedt door wateropname. Deze wateropname, en daarmee evapotranspiratie, is 6,5 maal groter in de behandeling met vegetatie (3,9 versus 0,6 mm/d). Barciela Rial concludeert dat de gevonden evapotranspiratie in het experiment in lijn is met gemeten waarden in praktijksituaties.

Uit het onderzoek blijkt verder dat hydraulische geleidbaarheid van het sediment onder invloed van vegetatie sterk toeneemt (met circa 40 %). Barciela Rial beschrijft dat de hydraulische geleidbaarheid wordt bepaald door:

- materiaaleigenschappen van de bodem zelf wat een resultante is van de bodemsamenstelling en de consolidatietoestand;
- drainage door wortels, water het poriewatertransport bevordert;
- door 'drainage kanalen' die ontstaan langs wortels of door wortels veroorzaakte scheuren.

Afbeelding 3.1 geeft de hoogteontwikkeling weer voor de kolom met en zonder vegetatie. De afbeelding laat zien dat de hoogteontwikkeling van de kolom met vegetatie een vergelijkbaar verloop heeft als de kolom zonder vegetatie maar dat er op het einde van het experiment een klein verschil optreedt. Barciela Rial vermoedt dat dit veroorzaakt wordt doordat het volume dat eerst door water ingenomen werd, nu door een iets groter volume aan rietwortels wordt ingenomen. Barciela Real concludeert verder dat ontwatering door de wortels geen rol van betekenis heeft gespeeld omdat het waterniveau constant op 77 cm werd gehouden.

Afbeelding 3.1 Ontwikkeling van sedimenthoogte gedurende het experiment (cm) voor een kolom met riet (rood) en zonder riet (blauw) (Bariela Rial, 2019)



Barciela Rial concludeert dat er sprake lijkt te zijn van twee tegenovergestelde effecten:

- 1 wortels bevorderen de drainage en hydraulische geleidbaarheid van de bodem. De hydraulische geleidbaarheid wordt vergroot door wortels veroorzaakte scheuren, die macroporiën en drainage gangen vormen. Daar tegenover staat dat wortelvorming de bodemstructuur beïnvloedt wat tot verdichting van de bodem kan leiden. Ook is er aanleiding om te veronderstellen dat wortels zelf de hydraulische geleidbaarheid vergroten door het bevorderen van watertransport langs hun wanden;
- 2 ondanks dat vegetatie de drainage bevordert, betekent dit niet dat de consolidatiesnelheid ook automatisch groter wordt. De wortels versterken de bodem ook, net als de wapening in beton. Als het effect van de wapening 'wint' kan het de evapotranspiratie juist remmen waardoor het netto effect op de consolidatie verwaarloosbaar klein wordt.

Barciela Rial concludeert dat dit tweede effect waarschijnlijk belangrijker is. Het is echter onzeker hoe generiek deze conclusie is en vraagt om nader onderzoek. Ook beveelt ze aan om naast het effect van riet ook naar het effect van andere soorten te kijken.

Aanbevelingen

In relatie tot de aanleg van het eilanden beveelt ze aan om in de ontwerpfase te beslissen of het vormen van een verzadigde korst gewenst is. Haar onderzoek toont aan dat dit een effect heeft op de uiteindelijke sterkte en dikte van de bodem. Ook de oxidatie van organisch materiaal heeft invloed op het fysische gedrag van het sediment.

Nature development in degraded landscapes: How pioneer bioturbators and water level control soil subsidence, nutrient chemistry and greenhouse gas emission (Temmink et. al., 2021)

Doel

Als onderzoek van het Natuur in Productie programma (onderdeel van het wetenschappelijk onderzoeksspoor van KIMA) voerde Temmink et. al. onderzoek uit naar de invloed van waterpeil en bioturbatie op het bodemvormingsproces.

Onderzoeksopzet

De invloed van waterpeil, bioturbatie en soort specifieke effecten op bodemvorming zijn onderzocht door middel van drie laboratorium onderzoeken.

Het effect van waterpeil op bodemdaling is onderzocht door 12 kolommen (15 cm diameter en 50 cm hoog). met Marker Wadden sediment te vullen. Het sediment werd aangebracht op een laag grind (afgedekt met doek) van 15 cm om drainage mogelijk te maken. Aan iedere kolom werd 35 cm slib toegevoegd. De behandelingen werden blootgesteld aan drie waterregimes (-30 cm, -10 cm en + 5 cm). Het peil werd gedurende het experiment stabiel gehouden. De kolommen stonden in het donker en werden twee maal per week gevoed met 150 ml regenwater om te compenseren voor verdamping. De proef had een doorlooptijd van 10 weken.

De invloed van bioturbatie is onderzocht door in een serie van acht kolommen regenwormen (*Lubricus rubellus*) en *tubifex* spp. toe te voegen aan vier kolommen. Het peil in deze kolommen werd om -10 cm gehouden. Het aantal regenwormen dat werd aangebracht was afgestemd op de dichtheid onder natuurlijke condities (226 g/m²). Voor *tubifex* werd de aanbevolen dichtheid uit het onderzoek van Saaltink (Saaltink, 2019) aangehouden (12.000 individuen/m²).

Het effect van bioturbatie in combinatie met waterpeil is onderzocht door regenwormen en *tubifex* toe te dienen aan kolommen met het zelfde peilregime als het eerste experiment. Dichtheid van de toegebrachte bioturbatoren was hetzelfde als in het tweede experiment.

Voor alle experimenten werd de bodemdaling, dichtheid (bulk density of 'stortgewicht'), organisch stof gehalte, scheurvorming nutriëntconcentraties in het porievocht en broeikasgasemmissies gemeten in de laatste week van het experiment.

Resultaten en conclusies

Temmink et. al. laat zien dat hoge waterpeilen de bodemdaling afremmen of zelf helemaal voorkomen, scheurvorming voorkomt maar de ammoniumconcentratie verhoogt. Het onderzoek toont aan dat het peil invloed heeft op scheurvorming maar niet op de dichtheid. Temmink et. al. vond hogere ammoniumconcentraties in de behandeling +5 cm en -10 cm dan in -30 cm.

Het onderzoek laat zien dat regenwormen scheurvorming remmen. Daarnaast werd gangvorming waargenomen waarvan bekend is dat het effect heeft op de nutriëntkringloop en bodemvorming. De gangen die de wormen vormen kunnen de oxidatie van de bodem bevorderen en de afbraak van organisch materiaal (van circa 10 %) bevorderen. Er is, op basis van het onderzoek, geen aanleiding dat dit proces ook een grote invloed heeft op de bodemdaling. Er werd, binnen het 10 weken durende onderzoek, namelijk geen effect van de regenwormen op bodemdaling waargenomen. In tegenstelling tot de regenwormen werd er geen effect gevonden van *tubifex*. Temmink et. al. geeft aan dat uit andere studies wel blijkt dat ze effect hebben op bodemeigenschappen door hun uitgebreide tunnelstelsels. De gebruikte dichtheid sluit aan bij natuurlijke dichtheiden, die aangetroffen zijn in het Markermeer en in het onderzoek van Saaltink (Saaltink 2019). In andere studies is er met hogere dichtheiden geëxperimenteerd. Daar werden wel duidelijkere

effecten waargenomen. Ook vond Temmink et. al. een effect van tubifex op de nitraatconcentraties in één van de behandelingen (-10 cm). Temmink et. al. sluit daarom niet uit dat er bij hogere dichtheden wel effecten kunnen zijn van tubifex.

Temmink et. al., concludeert tot slot dat hoge waterpeilen de bodemdaling afremmen en dat regenwormen de bodemdaling versnellen en scheurvorming tegengaan. Temmink et. al. concludeert dat bodemprocessen te beïnvloeden zijn met het waterpeil en de introductie van bioturbators.

Aanbevelingen

Temmink et. al. beveelt aan om een veldexperiment te starten om vast te stellen of de introductie van bodemfauna een meerwaarde kan bieden voor de ecologische ontwikkeling van jonge bodems. Temmink et. al. beveelt daarnaast aan dat beheersmaatregelen zorgvuldig gekozen moeten worden zodat ze niet de natuurherstel doelen frustreren en negatieve bijeffecten voorkomen. Saaltink et. al. beveelt aan om dit type experimenten uit te voeren voordat het werk start zodat het de aannemer kan sturen waar ze hun sediment het beste kunnen winnen.

Memo Hoogteontwikkeling 'plas dras' eilanden A t/m D: Verificatie eisen, analyse processen, lessons learned en uitvoeringsaspecten (Boskalis, 2021-concept)

Doel

Als onderdeel van de opleveringsvereisten heeft Boskalis een memo geschreven over de hoogteontwikkeling. Relevante passages over de invloed van vegetatie worden hieronder samengevat. Het 'fysische' deel van de hoogteontwikkeling wordt behandeld in het deelrapport 'fysica' (Deltares 2022, in prep.).

Onderzoeksopzet

Boskalis voerde voorafgaand aan de bouw van het eiland een aantal containerproeven uit. Daarnaast is er in de eerste aanlegfase van het eiland onderzoek gedaan naar de belangrijkste processen. Tot slot is gedurende de gehele looptijd van het project de bodemhoogte gevolgd.

Boskalis beschrijft dat de 'achtergrond' van eigen gewichtsconsolidatie complex is omdat verschillende processen tegelijkertijd optreden. Boskalis geeft aan dat het moeilijk is om de processen in een gecontroleerde omgeving na te bootsen en op te schalen omdat daarbij ook de aanbrengmethode, ruimtelijke variabiliteit en weersomstandigheden een belangrijke rol spelen (onder andere de invloed van uitzonderlijk warme zomers gedurende de aanlegperiode). Om grip te krijgen op deze processen heeft Boskalis concreet:

- 1 containerproeven uitgevoerd;
- 2 SIC testen (Deltares) in combinatie met modelberekeningen (Delcon) uitgevoerd;
- 3 Mud-bug metingen uitgevoerd direct na de stort;
- 4 korstdikte metingen uitgevoerd;
- 5 periodieke hoogtemetingen uitgevoerd (met een Drone).

Boskalis geeft aan dat in de praktijk alleen met de periodieke hoogtemetingen een praktische bron van informatie wordt verkregen over de hoogteontwikkeling van de eilanden.

Het volgen van de hoogte ontwikkeling werd in praktische zin beperkt door de aanwezigheid van vegetatie of water. Een belangrijk deel van de analyse berust daarom op punten waar geen vegetatie aanwezig is of veilig te betreden waren. Boskalis concludeert dat het aantal beschikbare punten laag is in verhouding tot het gemeten oppervlak.

De memo geeft geen inzicht in de invloed van vegetatie op het proces. Met name omdat er tussen de vegetatie geen hoogtemetingen zijn uitgevoerd. Wel is er onderzoek gedaan naar korstvorming. Aangezien een deel van de onderzoeksvragen binnen het subthema 'ecologie' hier betrekking op heeft worden hieronder de belangrijkste bevindingen gepresenteerd.

Resultaten en conclusies

Boskalis concludeert op basis van een beperkt aantal metingen in 2019 dat de korst geleidelijk overgaat in het onderliggende materiaal en dat er geen harde laagscheiding is van vast naar vloeibaar. Boskalis concludeert dat wanneer het 'wad' beloopbaar is de korst een minimale laagdikte heeft die varieert van 10 tot 20 cm. Boskalis benadrukt dat wat de 'korst' precies is in de toekomst beter gedefinieerd moet worden.

Aanbevelingen

In relatie tot vegetatie geeft Boskalis aan dat rietgroei ook een effect kan hebben op de hoogteontwikkeling van het hoger gelegen materiaal. Door toename in gewicht en het onttrekken van vocht aan de bovenzijde van de laag concludeert Boskalis dat het te beargumenteren is dat het de hoogte zal reduceren. Boskalis beschrijft dat er door de aanwezigheid van riet ook materiaal zou kunnen sedimenteren. Boskalis kan op basis van hun metingen geen uitsluitel geven over het effect.

3.4 Conclusie en discussie

Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van het helofyten?

De literatuur geeft geen eenduidig beeld over de geschiktheid van het materiaal voor de kieming en groei van helofyten. Wel lijkt er een duidelijk verschil te zijn tussen het bodemmateriaal op Marker Wadden en ander onderzoek.

De ex-situ experimenten met Markermeermateriaal (van den Berg et. al., 2014 en Saaltink 2018) concluderen dat het materiaal niet geschikt is voor het faciliteren van een hoogproductief helofytenmoeras. In beide studies werd groeivertraging of vergeling van het blad waargenomen. Nutriëntlimitatie en/of ijzertoxiciteit zouden hieraan ten grondslag liggen.

Uit de praktijkexperimenten komt een ander beeld naar voren. Temmink et. al (2022) concludeert dat de bodem op Marker Wadden (A3 en B6, zie afbeelding 1.1) geschikt is voor een vitale rietontwikkeling. Ook op proefeiland Ierst (Royal HaskoningDHV, 2015) kwam de rietontwikkeling op gang en zijn geen waarnemingen van groeivertraging of vergeling van de bladeren gerapporteerd.

De samenvatting van bodemgegevens (tabel 3.1) laat zien dat de bodem van Marker Wadden significant verschilt van de ex-situ experimenten. Met name de hoeveelheid organisch stof, zwavel en ijzer verschilt significant van de andere metingen. Ook zijn er verschillen tussen Marker Wadden en proefeiland Ierst.

Er zijn een aantal denkbare verklaringen voor deze verschillen. Ten eerste is het materiaal op Marker Wadden tot op veel grotere dieptes (tot 22 meter diepte) gewonnen dan het materiaal dat gebruikt is voor de ex-situ experimenten (tot twee meter diepte). Daarnaast kan de winning van het materiaal een rol spelen. In de ex-situ experimenten en op grote delen van proefeiland Ierst is gebruik gemaakt van mechanisch baggeren. Hierbij wordt de bodem weinig 'geroerd'. De Marker Wadden zijn echter gebouwd door materiaal te verpompen. Hierbij wordt het bodemmateriaal gemengd met water, opgespoten in bassins waarna het kan bezinken. Mogelijk treedt hier segregatie van materiaal op waarbij het lichtere materiaal (waaronder het organisch stof) de toplaag vormt en daar voor gunstige groei- en kiemcondities zorgt.

Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van slib?

Uit de literatuur komt naar voren dat de invloed van vegetatie op de consolidatie gering is. De onderzoeken van Saaltink (2018) en Barciela Rial (2019) laten zien dat riet invloed heeft op de ontwatering van de bodem. Een effect op de bodemdaling zou daarom verwacht mogen worden, maar Barciela Rial vond in haar onderzoek geen verschillen in de behandelingen met en zonder riet. Barciela Rial stelt de hypothese dat er twee tegenovergestelde processen kunnen spelen die elkaar opheffen. Enerzijds verhoogt de aanwezigheid van (riet)vegetatie de hydraulische geleidbaarheid en daarmee de ontwatering van het slib maar mogelijk remt de doorworteling van de bodem de scheurvorming waardoor verdamping vanuit diepere lagen, en daarmee de consolidatie, geremd wordt.

Temmink et. al. (2021) deed geen onderzoek naar de invloed van vegetatie maar toonde aan dat ook bioturbators zoals regenwormen de consolidatie kunnen versnellen.

In relatie tot de sterkte ontwikkeling beschrijft Barciela Rial dat riet de erosiegevoeligheid van de bodem verlaagt. De andere onderzoeken geven geen informatie over de invloed van vegetatie op de sterkte ontwikkeling.

4

KIEMEXPERIMENT

4.1 Inleiding

Het dun slib onderzoek startte in 2018 en had tot doel om inzicht te krijgen in de mogelijkheden van het bouwen met dun slib. Marker Wadden zou gebouwd (en beheerd) worden met slib dat ingevangen werd door het eiland en een speciaal daarvoor ingerichte slibvanggeul (zie afbeelding 4.1). Dit was de reden waarom de dun slib compartimenten gevuld zouden worden met dun slib uit deze geul.

Bij de start van het onderzoek in 2018 was er nog onvoldoende slib in de slibvanggeul aanwezig om de compartimenten te vullen. Er is daarom besloten om alvast een kleinschalig kiemexperiment te doen met het dunne slib.

Dit kiemexperiment had tot doel om:

- 1 inzicht te krijgen in de geschiktheid voor de kieming en ontwikkeling van helofyten (riet en lisdodde);
- 2 inzicht krijgen in de biochemische eigenschappen;
- 3 praktische kennis op te doen over het volumeverlies.

De winning van het slib stond gepland voor het voorjaar van 2018. Bij het opstellen van het winningsplan bleek echter dat de sliblaag in de slibvanggeul te dun was (circa 15 cm) om slib te winnen. Het risico was te groot dat er bij winning op die diepte (12 m) mengmonsters van dun slib en holocene klei zouden ontstaan. In een aangrenzende zandwinput bleek wel voldoende dun slib aanwezig te zijn (circa 2 m) om de winning effectief te maken. Voor het kiemexperiment is daarom gebruik gemaakt van slib uit de zandwinput.

Afbeelding 4.1 Ontwerp van de Marker Wadden en ligging van de zandwinput en slibvanggeul



4.2 Aanpak

Verzamelen materiaal en biochemische analyse

Het slib in de zandwinput is op 23 mei verzameld met behulp van een kraan met een dichte bak (afbeelding 4.2). De bodem van deze put ligt op NAP -24 m en er was circa twee meter dun slib aanwezig. De monsternamen zijn als volgt uitgevoerd:

- 1 de twee meter slib is opgedeeld in drie dieptes. Per diepte werd een waterbodemmonster genomen. De laag die onttrokken werd was circa 80 cm dik. Dit leidt tot de volgende verdeling:
 - 1 NAP -23,75 - 22,95 m: holocene klei (onderzijde winput);
 - 2 NAP -23,25 - 22,45 m: dun slib;
 - 3 NAP -22,75 - 21,95 m: bovenkant dun slib;
- 2 per diepte is 750 liter materiaal verzameld en in drie tanks gestort (afbeelding 4.2). Het materiaal is in een kraan met dichte bak verzameld. De dichtheid van het materiaal zal de dichtheid in de put benaderen;
- 3 per tank (en dus per diepte) is op de dag van winning 40 liter materiaal onttrokken ten behoeve van de bodem chemische karakterisering. Het materiaal in de tanks is voorafgaand aan de onttrekking doorgemengd (geroerd);
- 4 aan de bakken is op de dag van bemonstering porievocht onttrokken en gekoeld bewaard.

Afbeelding 4.2 Verzamelen van dun slib in dichte bak (links) en opslag in watertanks (rechts)



Het slib is gekarakteriseerd aan de hand van de volgende parameters:

- standaard sedimentsamenstelling: dichtheid, korrelgrootte, droge stof gehalte, organisch stof gehalte, gloeirest;
- chemisch-ecologische parameters vaste bodem: Ca, Fe, K, Mg, Na, P-totaal, P-plant beschikbaar, P-Al, S-totaal en N-totaal;
- chemisch-ecologische parameters porievocht: Ca, Fe Mg, P-totaal, Ortho-P, S-totaal, pH, Kjeldahl-N, NH₄, NO₃, Cl.

In totaal zijn er zes monsters geanalyseerd die op drie verschillende diepten zijn genomen (tabel 4.1). In de onderstaande tabellen/figuren wordt (eventueel) verwezen naar de volgende benaming van deze monsters. In dit rapport presenteert de belangrijkste resultaten. Een volledig analyse overzicht is te vinden in Witteveen+Bos (2018).

Tabel 4.1 Monster diepte en referentiernaam gebruikt voor de analyse

Monster nummer	1	2	3	4	5	6
Monster diepte (NAP)	-22,75 m	-22,75 m	-23,25 m	-23,25 m	-23,75 m	-23,75 m

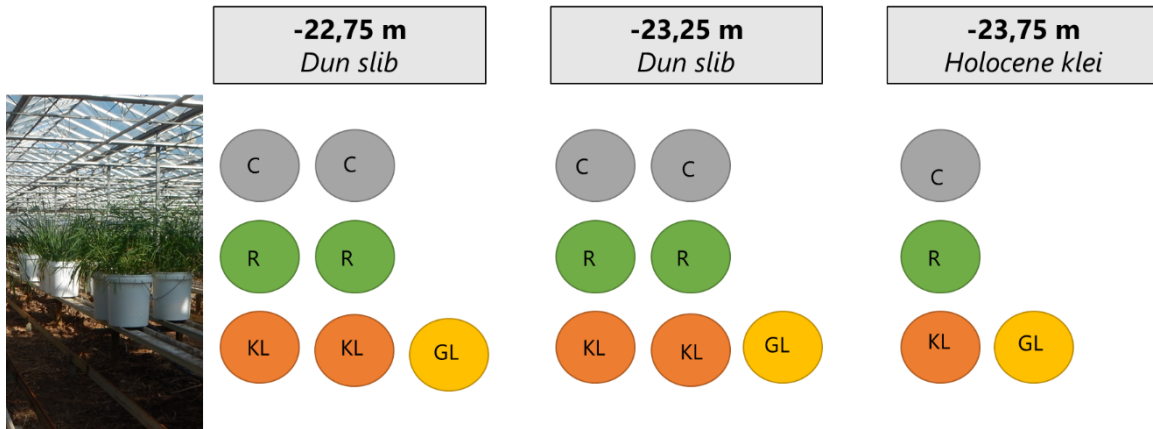
Kiemexperiment

Vanuit de tanks zijn er per monsterdiepte (-22.75, -23.25 en 23.75) zeven emmers (20 L) gevuld met slib. Het verzamelde materiaal is op 30 mei in de onderzoekopstelling geplaatst (kas). Op 1 juni is het water wat zich in diverse monsters boven op het slib verzameld had verwijderd en is op vijf van de zeven emmers zaad van helofyten aangebracht (zie afbeelding 4.3). Er is gebruik gemaakt van drie helofyten, te weten:

- 1 riet (30 zaden) afkomstig uit Sint-Jansklooster (veenbodem);
- 2 kleine lisdodde (1 cm³, ca. 150 zaden) afkomstig uit het Voorsterbos;
- 3 grote lisdodde (1 cm³, ca. 150 zaden) afkomstig uit de Hoge Boezems van Kinderdijk.

Het kiemexperiment is uitgezet in een kwekerij. De temperatuur en licht zijn niet actief gestuurd. Er is niet berekend. Vochttekorten die optraden na volledige consolidatie zijn gecompenseerd met water uit het Markermeer (Lelystad).

Afbeelding 4.3 Proefopzet van het kiemexperiment. C: controle, R: riet, KL: kleine lisdodde, GL: grote lisdodde



4.3 Resultaten

4.3.1 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Kiempercentage en groei

Tabel 4.2 geeft de resultaten van het kiemexperiment weer. De tabel laat zien dat de aangebracht helofyten op alle bodems tot ontwikkeling zijn gekomen. Wel zijn er verschillen tussen de behandelingen.

Het riet kiemt op alle bodems. Het kiempercentage is op de dun slib bodem '-22.75' wel aanzienlijk lager dan op de andere twee bodems. In alle behandelingen groeide het riet binnen 100 dagen uit tot een vitale plant van circa 85 cm hoog (zie afbeelding 4.4).

De lisdodden kiemen slechter op de holocene klei dan op het dunne slib. Met name het kiempercentage van kleine lisdodde was laag. In alle behandelingen kwam uiteindelijk lisdodde tot ontwikkeling en bleken de planten vitaal te zijn (zie afbeelding 4.4).

Tabel 4.2 Resultaten van het kiemexperiment

Bodemmonsters	Meting	Kiemingspercentage*	Stengeldichtheid	Stengeldikte	Hoogte
		29/06/2018	14/09/2018	14/09/2018	14/09/2018
		%	n/m ²	mm (gem. per 5)	cm (gem. per 5)
-22,75 m dun slib	riet	6,7	1418	3,0	86
	kleine lisdodde	33	538	13,5	62,5
	grote lisdodde	33	530	16	60
-23,25 m dun slib	riet	23	1811	2,5	90
	kleine lisdodde	20	504	19,5	73
	grote lisdodde	20	376	16	95
-23,75 m holocene klei	riet	27	2529	2	80
	kleine lisdodde	0	325	14	40
	grote lisdodde	6,7	325	18	75

* Lisdodde is ingezaaid met 150 zaden, riet met 30 zaden.

Afbeelding 4.4 Vegetatieontwikkeling kiemexperiment (links riet, rechts lisdodde)



Biochemie

Tabel 4.3 geeft een overzicht van biochemische parameters. De dichtheid varieert tussen de 1,02 en 1,13 g/cm³ en het droge stofgehalte tussen de 13 en 28 % met iets hogere waarden voor de diepere bodemonsters (holocene klei). Het organische stofgehalte is circa 10 % bij alle bodemonsters.

De totale fosfor concentraties (P-totaal) laten vergelijkbare waarden voor alle monster zien behalve 2A. Met een totaal fosforconcentratie tussen de 0,66 en 0,75 g P/kg ds⁻¹ kan worden gesproken van een voedselrijke (eutrofe) bodem.

Naast de totale fosfor metingen (P-totaal) zijn metingen uitgevoerd om de fosfor huishouding qua planten te analyseren. Voor fosfor dat direct voor planten beschikbaar is (P-Plant beschikbaar) wordt de CCL3 (PAE®) methode gebruikt, welke fosfor met calciumchloride mobiliseert. Verder is een analyse met ammonium lactaat (P-AI) uitgevoerd, die meer fosfor uit de bodem mobiliseert en een indicatie geeft hoeveel fosfor voor de lange termijn voor planten beschikbaar is. De hoeveelheid direct plantbeschikbaar P is voor alle monsters ongeveer hetzelfde, terwijl de lange termijn P-beschikbaarheid voor planten (P-AI) in de ondiepte monsters wat hoger is. De plant beschikbare hoeveelheid fosfor duidt op relatief lage beschikbaarheid. De porievochtconcentraties bevestigen dit. Het verschil tussen de relatief hoge totaal P concentraties in relatie tot de beschikbare fracties is mogelijk te verklaren doordat het P gebonden als organisch stof aanwezig is of stabiel gebonden is aan de bodem (bijvoorbeeld via aluminiumcomplexen). De planten lijken, ondanks de lage beschikbaarheid, goed te groeien. Mogelijk dat een deel van het organisch fosfor gedurende het experiment gemineraliseerd is en beschikbaar gekomen voor de groei. Immers is het porievocht voor aanvang van het experiment gemeten en benadert de ongestoorde (in-situ) situatie.

In relatie tot stikstof laten de bemonsteringsresultaten zien dat er sprake van voedselrijke omstandigheden. De stikstof waarden volgens Kjeldahl laten een sterke toename in de diepere locaties zien. Dit is ook het geval voor de ammoniumconcentraties. De nitraatconcentraties zijn behoorlijk lager dan de ammonium waarden en met betrekking tot de N-Kjeldahl waarden is het duidelijk dat de totale stikstof waarden hoofdzakelijk uit ammonium bestaan. Verder liggen de NO₃-N-waarden voor vrijwel alle monsters onder de detectielimiet.

Tot slot liggen de pH-waarden van alle monsters dicht bij elkaar (7,9-8,2), en ook de chlorideconcentraties zijn vergelijkbaar.

Tabel 4.3 Biochemische parameters gemeten in de bodem en het porievocht

Bodem																
diepte	bulkdichtheid	organische stof	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	P-plant beschikbaar	P-Al	N-Kjeldahl	NO3-N	Fe:P	(Fe-S)/P	
	<i>g/cm³</i>	<i>% (m/m) ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>g/kg ds</i>	<i>mg P/kg</i>	<i>mg P₂O₅/100g</i>	<i>g N/kg ds</i>	<i>mg/kg ds</i>	<i>mol/mol</i>	<i>mol/mol</i>	
-22.75A	1,05	10,80	48	27	4,50	8,00	0,67	0,75	7,20	0,50	12	7,00	<2,00	19,97	10,69	
-22.75B	1,09	8,90	45	25	3,80	7,60	0,64	0,73	6,70	0,60	17	5,50	<2,00	18,99	10,13	
-23.25A	1,02	11,20	15	10	1,70	2,70	0,78	0,27	2,50	0,50	9	3,10	<2,00	20,54	11,60	
-23.25B	1,02	11,00	41	26	4,20	7,20	0,71	0,68	6,20	0,50	11	5,40	<2,00	21,21	12,40	
-23.75A	1,09	10,50	46	27	4,50	7,70	0,49	0,71	5,80	0,40	8	5,80	<2,00	21,09	13,20	
-23.75B	1,13	10,60	49	27	4,30	7,60	0,54	0,66	5,60	0,50	8	6,50	<2,00	22,69	14,49	
Porievocht																
diepte	pH	Ca	Fe	Mg	P	PO4	S	SO4	N-Kjeldahl	NH4-N	NH4	Cl	NO3-N	NO3	Fe:P	(Fe-S)/P
		<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg PO₄/L</i>	<i>mg S/L</i>	<i>mg SO₄/L</i>	<i>mg N/L</i>	<i>mg N/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg N/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mol/mol</i>
-22.75A	8,10	190	29	43	0,18	0,56	1,80	5,50	12	9,50	12	140	1,30	5,70	89	8,84
-22.75B	8,20	150	26	38	0,29	0,89	1,80	5,30	12	9,20	12	130	<0,40	<0,90	49	7,91
-23.25A	8,00	140	17	31	0,08	0,25	2,30	6,80	12	9,30	12	130	<0,40	<0,90	117	4,02
-23.25B	7,90	140	20	31	0,12	0,37	2,30	7,00	11	9,30	12	130	<0,40	<0,90	92	4,75
-23.75A	8,00	170	37	46	<0,05	<0,15	3,10	9,20	37	35,00	45	130	<0,40	<0,90	410	6,56
-23.75B	7,90	180	36	52	<0,05	<0,15	2,80	8,50	34	31,00	40	130	<0,40	<0,90	399	7,07

4.3.2 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie van slib?

Afbeelding 4.5 geeft de hoogteontwikkeling van het sediment gedurende de onderzoeksperiode weer.

Afbeelding 4.6 geeft het volumeverlies over deze periode weer.

Uit het figuur blijkt dat de hoogteontwikkeling van het holocene materiaal (23,75) anders verloopt dan dat van het dunne slib. Ook is het volumeverlies beduidend lager.

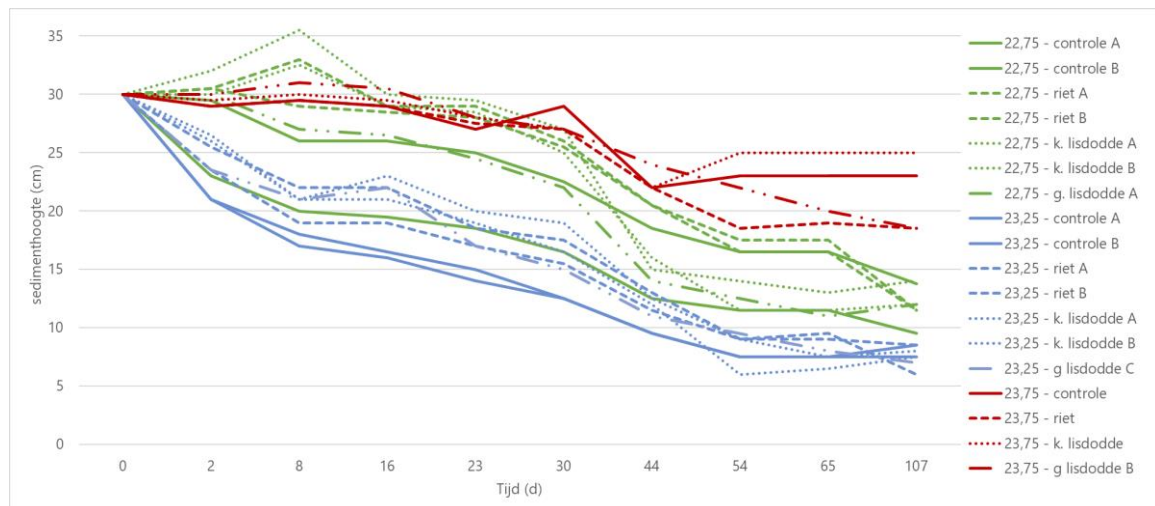
Met betrekking tot het dun slib verschilt de hoogteontwikkeling in de startfase van het onderzoek. Wat opvalt is dat de bodemhoogte van een deel van de behandeling van -22,75 gedurende de eerste 10 dagen van het experiment toenam, waarschijnlijk als gevolg van gasvorming. Halverwege het experiment ging het hoogteverloop weer in de pas lopen met het andere dunne slib. Het uiteindelijke volumeverlies van de behandeling van 22,75 (59,9 %) was uiteindelijk wat lager dan die van de behandeling van 23,25 (75,4 %).

Het verschil in volume verlies lijkt een duidelijke relatie te hebben met de dichtheid (en daarmee droge stof gehalte) van het materiaal. De verschillen in initiële dichtheid (zie tabel 4.3) komen duidelijk terug in de uiteindelijke hoogte. Het laagste volumeverlies werd waargenomen in de behandelingen met holocene klei (29,2 %).

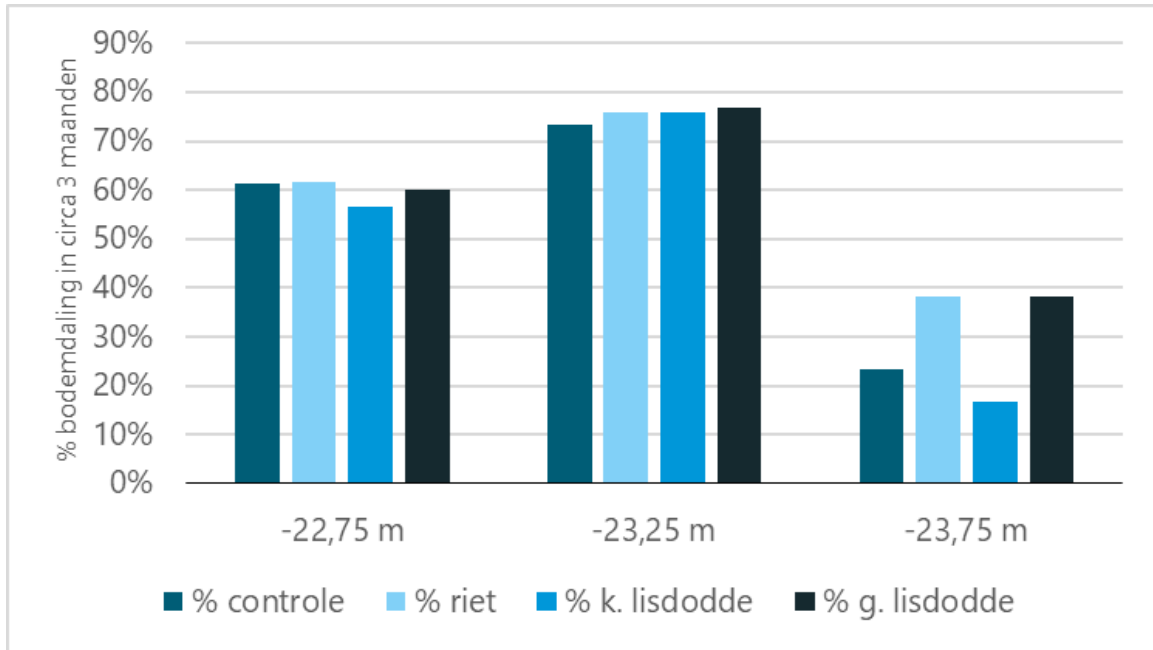
De invloed van vegetatie op de hoogteontwikkeling lijkt gedurende de onderzoeksperiode gering. De bodemdaling lijkt in de eerste 45 dagen van het experiment in de dun slib behandelingen met vegetatie trager te verlopen dan de controle maar na die periode wordt dit verschil verwaarloosbaar.

NB. Het is, in theorie, mogelijk om op basis van het volumeverlies en initiële dichtheid een einddichtheid te berekenen. De initiële dichtheid is hiervoor echter, als gevolg van de onderzoeksopzet, onvoldoende nauwkeurig in beeld gebracht. In het dun slib - fysica rapport (Deltares 2022, in prep.) wordt nader ingegaan op de invloed van de initiële dichtheid op de einddichtheid.

Afbeelding 4.5 Sedimenthoogte over tijd per dun slib bodem.



Afbeelding 4.6 Volumeverlies in circa 3 maanden (juni-september) per dun slib bodem en behandeling



4.4 Conclusie en discussie

Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Het kiemexperiment laat zien dat zowel riet als lisdodde goed groeit op het verzamelde dun slib materiaal uit verschillende dieptelagen (-22,75, -23,25 en -23,75 m).

Uit de biochemische analyse blijkt dat nutriëntconcentraties voor totaal en beschikbaar N en totaal P hoog zijn en duiden op voedselrijke condities. De plantbeschikbare hoeveelheid fosfor was echter bij aanvang van het experiment laag. De exacte fractieverdeling van fosfor is niet onderzocht. Ook is geen opname aan het einde van het experiment gemaakt. Mogelijk dat het beschikbare organisch stof snel mineraliseert waardoor er alsnog tot een vitale ontwikkeling wordt gekomen. Het is echter ook mogelijk dat het experiment te kort was om nutriëntlimitatie aan het licht te brengen.

Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie van slib?

Op basis van de gegevens uit het kiemexperiment kan geconcludeerd worden dat het volumeverlies sterk samenhangt met het type bronmateriaal. Het dun slib had een gemiddeld volumeverlies van circa 68 % terwijl dit voor het holocene materiaal rond 29 % lag. Vegetatie leek geen significante invloed te hebben op het hoogtereverloop en het uiteindelijke volumeverlies, overeen komend met eerdere onderzoeken.

5

ONDERZOEK IN DE DUN SLIB COMPARTIMENTEN

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het onderzoek in de dun slib compartimenten. Dit onderzoek is samen met Deltares uitgevoerd. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten met betrekking tot het ecologische deel. Het 'fysische' deel is toegelicht in (Deltares, 2022 in prep.).

5.2 Aanpak

5.2.1 Onderzoeksopstelling

Het 'dun slib onderzoek' is uitgevoerd in de 'dun slib compartimenten' (afbeelding 5.1). In 2019 heeft RWS/NM een ontwerp gemaakt voor de inrichting en afwerking van de dun slib compartimenten. Afbeelding 5.1 geeft dit ontwerp weer. Het ontwerp voorzag in drie compartimenten met ieder een eigen hoogteligging. Het eerste compartiment zou jaarrond droog liggen, het tweede compartiment plas-dras en het derde compartiment zou uit water bestaan. Het peil kon beheerd worden met een pomp. Deze pomp zou ook gebruikt worden voor het peilbeheer op de aangrenzende compartimenten 'A1 en A2'.

De dun slib compartimenten zijn in 2019 en in 2020 gevuld met holocene klei. De laatste vulslag heeft in februari van 2020 plaatsgevonden. De compartimenten hebben voor zo ver als dat mogelijk was tot en met juni 2020 onder water gestaan om grootschalige kieming van wilgen te voorkomen. Daarna is het peil losgelaten en is riet aangebracht.

In 2020 is er rietmateriaal aangebracht. Hierbij zijn drie 'behandelingen' toegepast (afbeelding 5.2):

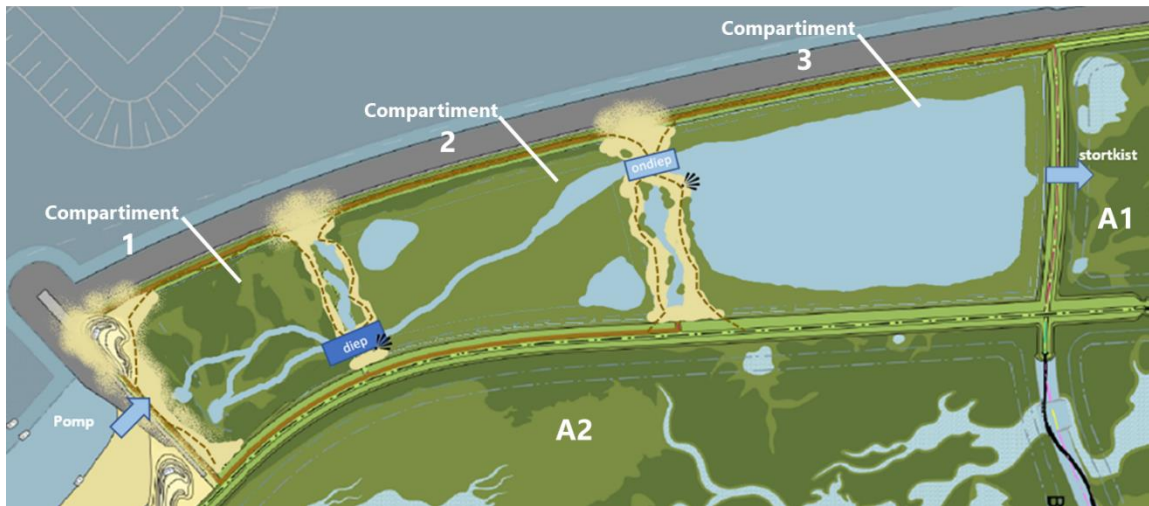
- rietzaad;
 - datum: 30 juli 2020;
 - dichtheid: 1 kg/ha;
 - oorsprong: Sint Jans klooster;
- rietwortelstokken (vrijkomend materiaal NM/RWS);
 - datum: 29 mei 2020;
 - aantal: 4 /m²;
- geen materiaal (controle).

In de praktijk bleek dat met name het tweede compartiment niet ver genoeg droogviel. Er ligt naar alle waarschijnlijkheid te weinig materiaal om een plasdrassituatie te verkrijgen maar er waren gedurende de onderzoeksperiode ook diverse problemen met de afwatering. In de praktijk is daarom alleen compartiment 1 (dichtste bij de pomp) ver genoeg droog gevallen om het onderzoek te kunnen uitvoeren. Het peilverloop vanaf juni 2020 (kort voor aflat) is weergegeven in afbeelding 5.3.

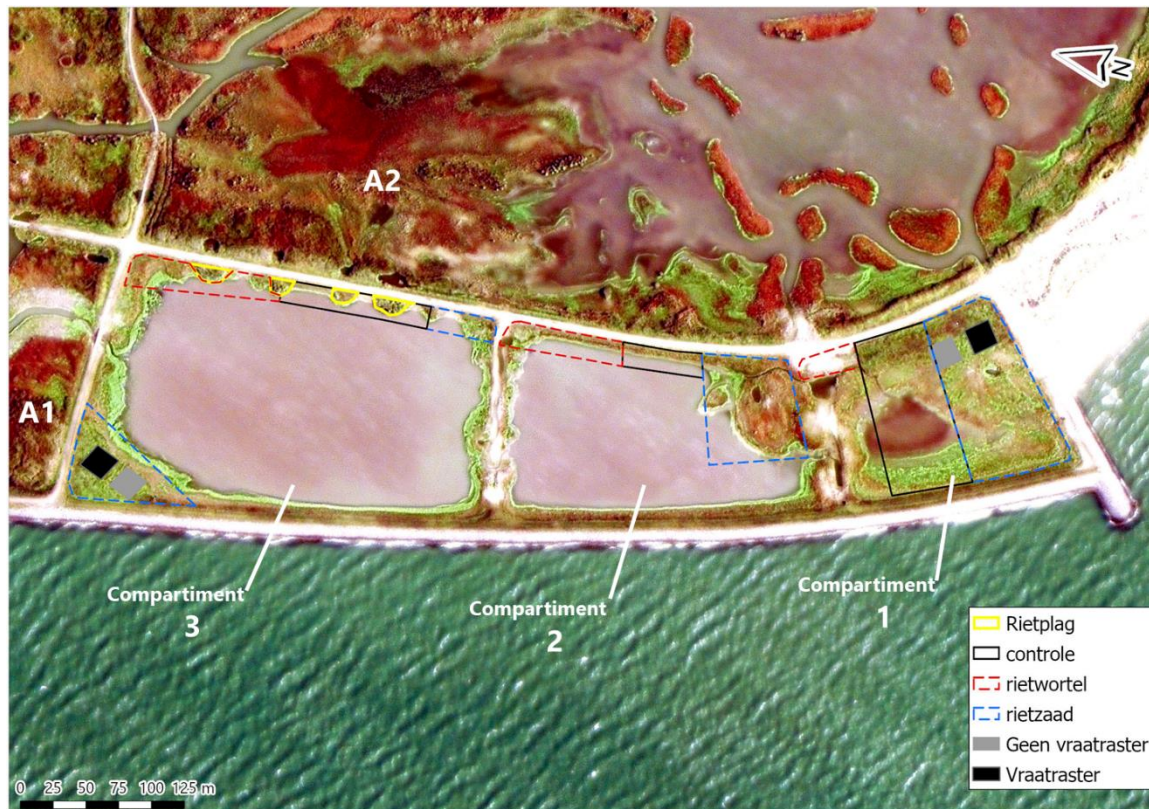
In het najaar van 2020 zijn in het derde compartiment door Natuurmonumenten rietplaggen aangebracht (geen onderdeel van het onderzoek). Deze plaggen waren afkomstig uit volwassen rietkragen die in compartiment A2 gewonnen zijn.

In april 2021 zijn er op twee locaties in de behandeling met rietzaad vraatrasters geplaatst (20*20m). Deze vraatbescherming diende twee doelen. Allereerst kon hiermee de invloed van begrazing op de rietontwikkeling worden onderzocht. Daarnaast werd inzicht verkregen in het effect van vegetatieontwikkeling op de hoogteontwikkeling op basis van het idee dat het wortelstelsel van riet een sterk ontwaterend effect heeft op de bodem (Barciela Rial, 2019) en de biomassa van een volgroeide rietkraag zowel boven- als ondergronds hoger is dan een begroeiing met pioniersoorten zoals moerasandijvie (Clevering & van der Toorn, 2000).

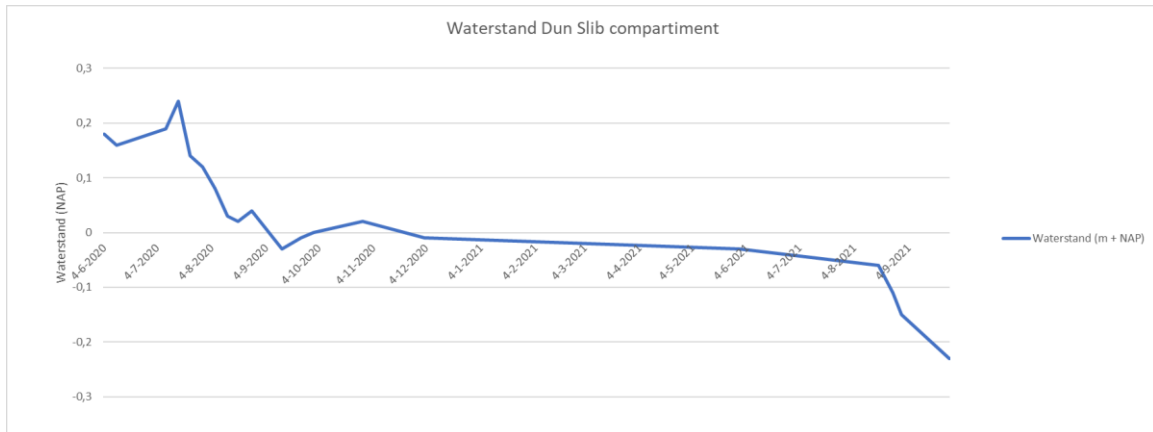
Afbeelding 5.1 Voorgenomen afwerking Dun slib compartimenten (bron: Natuurmonumenten, juni 2019)



Afbeelding 5.2 'Rietbehandelingen' op Dun Slib compartimenten Marker Wadden. Luchtfoto is van oktober 2021 (Bron: satellietdataportaal 2021)



Afbeelding 5.3 Waterstandsverloop dun slib compartiment (gemeten in 2^e compartiment). Zie bijlage II voor satellietfoto's van het waterstandsverloop



Gevoerd beheer

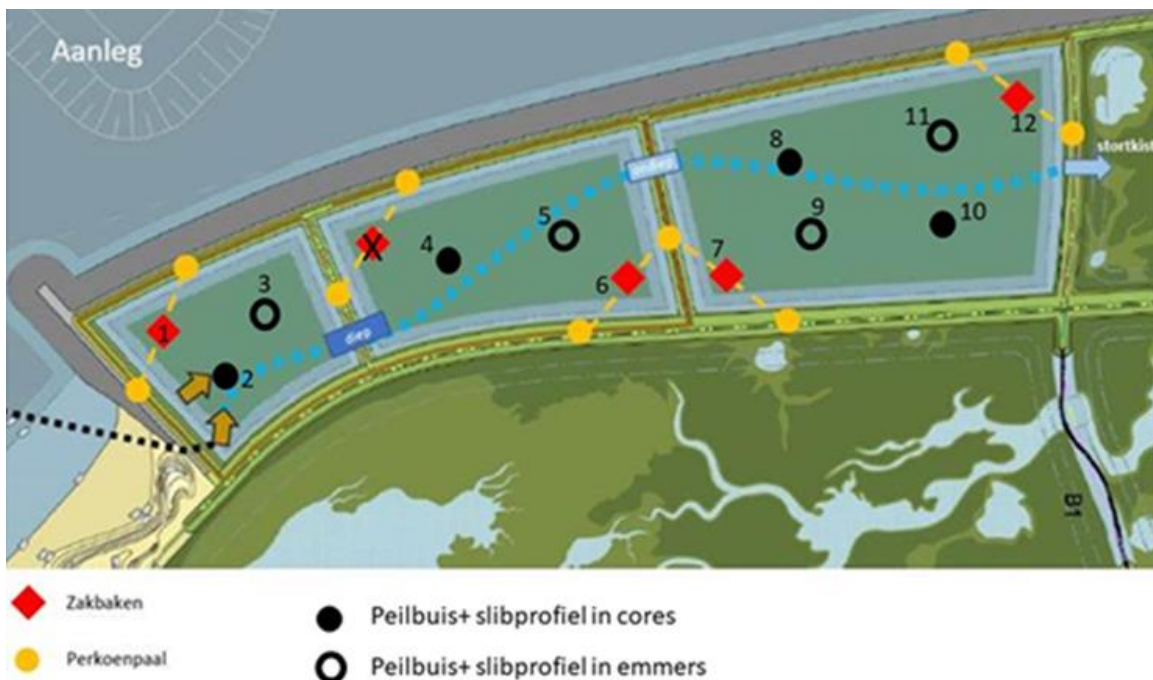
In de zomer van 2020 bleek dat er in het eerste compartiment veel opslag was van geoorde wilg, schietwilg en katwilg. Omdat grootschalige bosvorming op het eiland ongewenst is en opslag van met name geoorde wilg in het tweede groeijaar moeilijk te verwijderen is, is een groot deel van deze opslag verwijderd (door vrijwilligers van Natuurmonumenten).

5.2.2 Gemeten parameters

Meetopstelling

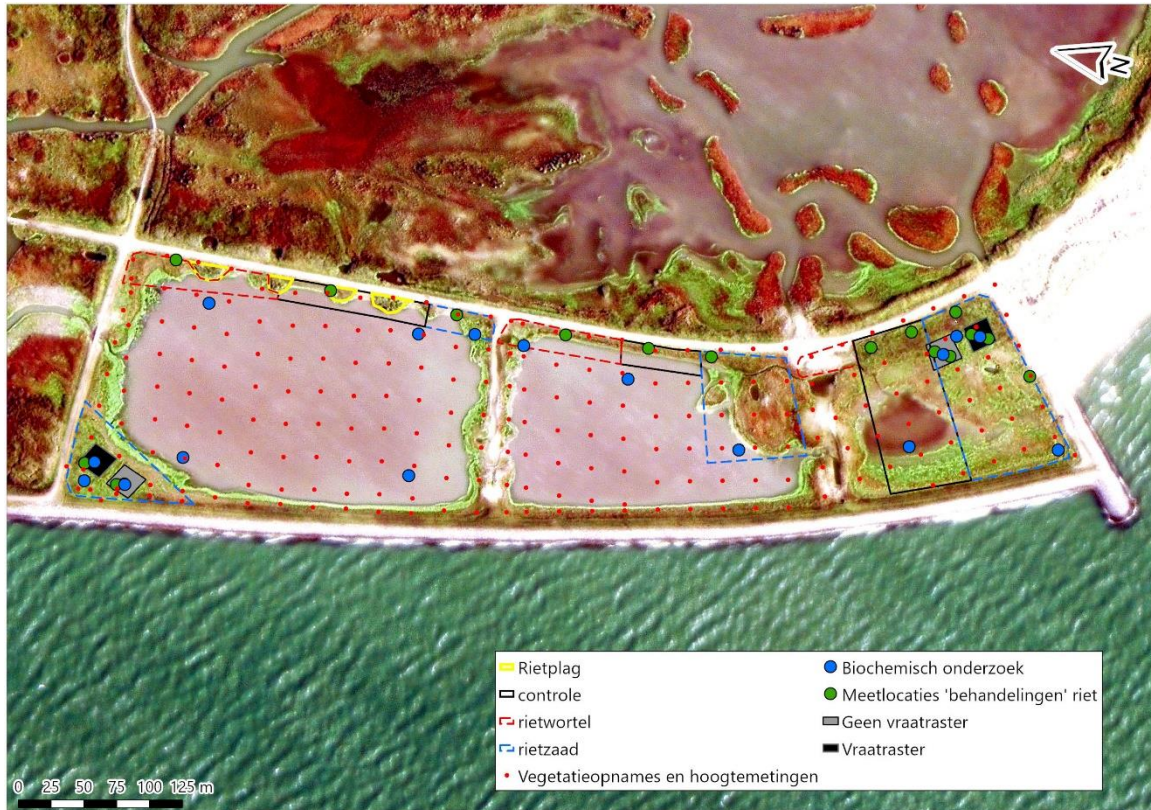
Afbeelding 5.4 geeft de meetopstelling voor het 'fysische' deel van het onderzoek weer (Deltares, 2022 in prep.). Deze meetopstelling vormt ook de basis voor het de ecologische meetopstelling.

Afbeelding 5.4 Meetopstelling 'Fysica'



In aanvulling op het fysische deel zijn er ecologische parameters gemeten. Deze parameters bestonden uit vegetatieopnames, biochemisch onderzoek, hoogte- en sterktemetingen. Afbeelding 5.5 geeft de proefopstelling weer. Hieronder lichten we de gemeten parameters nader toe.

Afbeelding 5.5 Overzichtkaart meetpunten vegetatieopnames, biochemisch onderzoek, hoogte- en sterktemetingen. Luchtfoto is van oktober 2021 (Bron: satellietdataportaal 2021)



Vegetatie

Aan het einde van het tweede groeiseizoen (oktober 2021) is er een vegetatieopname uitgevoerd. Hierbij is onderscheid gemaakt in vlakdekkende opname en een gedetailleerde opname. De vlakdekkende opname geeft inzicht in de spontane vestiging, ontwikkeling en onderlinge competitie tussen pioniersoorten. De gedetailleerde opname geeft inzicht in de ontwikkeling van riet.

Voor de vlakdekkende opname is gebruik gemaakt van transectlijnen met een meetpunt (permanent kwadrant 'PQ' van 1 m²) op iedere 25 meter. De vegetatie is volgens Tansley gekarteerd. Op enkele locaties zijn er gedetailleerde opnames gemaakt (zie 'meetlocaties 'behandelingen' riet' in afbeelding 5.5). Op deze locaties is de riethoogte, stengeldichtheid en stengeldikte in beeld gebracht (op basis van het gemiddelde van vijf planten).

Biochemisch onderzoek

Op 16 locaties zijn bodemonsters genomen en geanalyseerd. Deze bemonstering is in combinatie met het onderdeel 'fysica' uitgevoerd. Op de 12 'fysica' meetlocaties heeft Deltares bodemonsters verzameld. Witteveen+Bos heeft deze monsters middels een totaaldestructie geanalyseerd. Deltares heeft porievochtmetingen uitgevoerd (de resultaten hiervan zijn tijdens het schrijven van dit rapport nog niet bekend).

In aanvulling op de 'fysica' meetpunten heeft Witteveen+Bos op de vier 'vraatrasterlocaties' (zie afbeelding 5.5) aanvullende bodemonsters genomen. Op deze meetlocaties is telkens van twee locaties een mengmonster gemaakt van de bovenste 15 cm. Op deze mengmonsters is een totaaldestructie

uitgevoerd waarbij de volgende parameters in beeld zijn gebracht: droge stof, organische stof, gloeirest, calcium (Ca), ijzer (Fe), kalium (K), magnesium (Mg), natrium (Na), fosfor totaal (P), zwavel (S), stikstof volgens Kjeldahl (N), en nitraat (NO₃-N). Op vier locaties is tevens porievocht onttrokken en geanalyseerd op pH, calcium (Ca), ijzer (Fe), kalium (K), magnesium (Mg), natrium (Na), fosfor totaal (P), fosfaat (PO₄), zwavel (S), stikstof volgens Kjeldahl (N), ammonium (NH₄-N) en nitraat (NO₃-N).

Hoogteontwikkeling

De hoogteontwikkeling is in beeld gebracht door middel van:

- beschikbare hoogtemetingen van fysica onderzoek (2019-2021);
- dronemeting van Boskalis (juli 2020);
- hoogtemeting 'vraatrasteronderzoek' in mei (start) en november (einde) 2021;
- hoogtemeting op PQ's (rode stippen in afbeelding 5.5).

De hoogte is ingemeten met een dGPS (Trimble Catalyst DA1) met een verticale nauwkeurigheid van circa twee centimeter. Een groot aantal meetpunten langs de transectlijnen waren niet bereikbaar (onbegaanbare bodem), daar ontbreken de hoogtegegevens.

Sterktemetingen

Er zijn sterktemetingen uitgevoerd om de invloed van vegetatie op de sterkteontwikkeling in beeld te brengen. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in het deelrapport 'fysica' (Deltares, 2022 in prep.).

5.3 Resultaten

5.3.1 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Algemene vegetatieontwikkeling

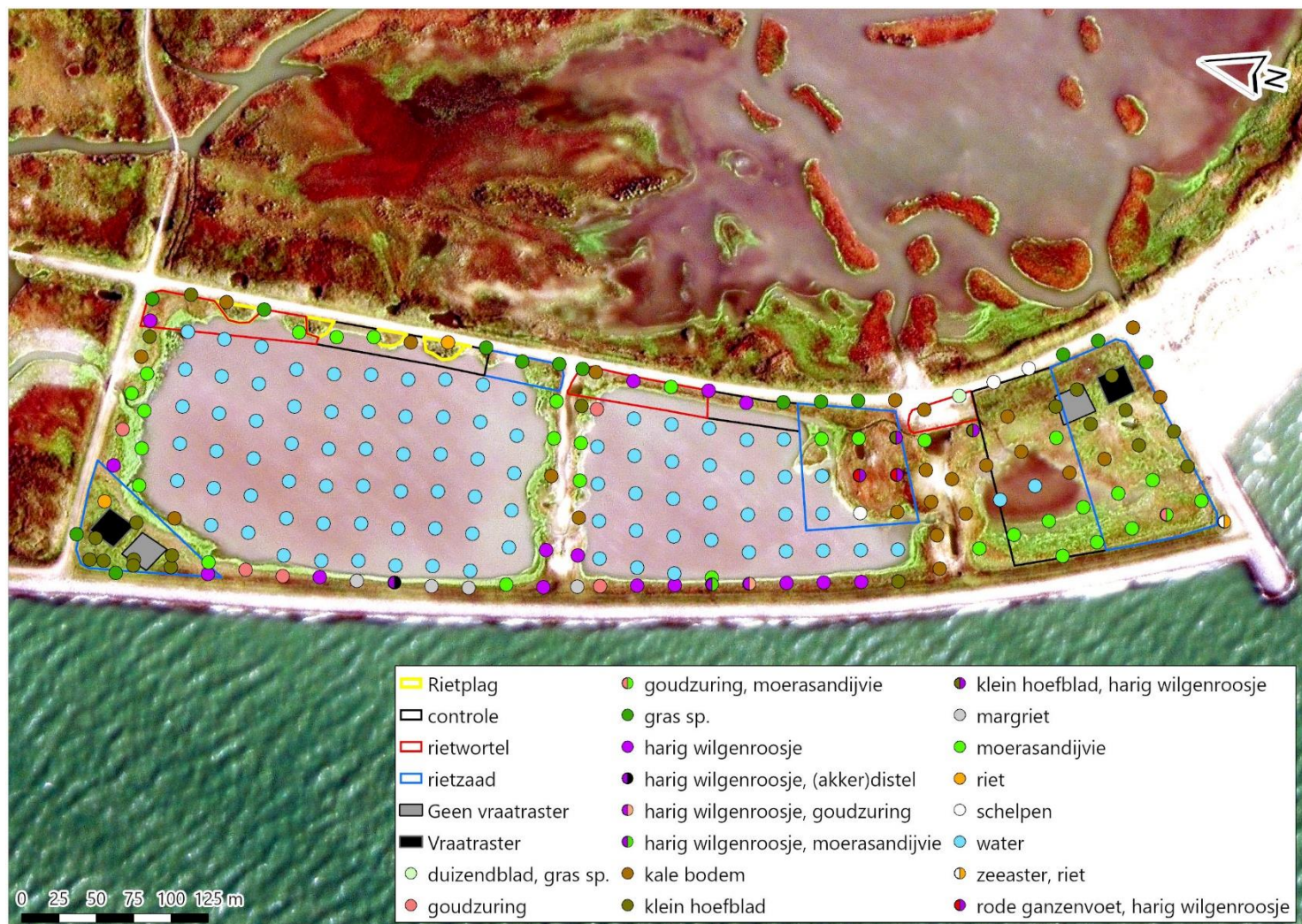
Afbeelding 5.6 geeft de vegetatie in oktober van 2021 op het dun slib compartiment weer. Per PQ is de dominante soort gepresenteerd. Het figuur laat zien dat het overgrote deel van de dun slib compartimenten uit water bestaat.

Op de droge delen is er sprake van een pioniervegetatie die gedomineerd wordt door klein hoefblad, harig wilgenroosje of moerasandijvie. Hierbij is een duidelijke zonering zichtbaar. Op de spuitmonden domineert klein hoefblad. Op hogere delen van de oever (inspoelzone) domineert harig wilgenroosje en rond de waterlijn, of op net drooggevalle bodems, domineert moerasandijvie.

Hoewel enkele vegetatiesoorten dominant zijn blijkt de samentelling van kiemplanten divers. Afbeelding 5.7 geeft een indicatieve foto weer.

Op diverse locaties, met name rondom de spuitmonden, is opslag van wilg waargenomen. Deze wilgen zijn gekiemd op de delen die jaarrond droog hebben gelegen. Op delen die later in het seizoen droogvielen zijn geen wilgen waargenomen. De daadwerkelijke opslag was aanzienlijk groter (>25/25m²) maar in de zomer van 2020 al verwijderd.

Afbeelding 5.6 Meest dominante plantensoorten per PQ (opname oktober 2021, luchtfoto is ook van oktober 2021) (Bron: satellietdataportaal 2021)



Afbeelding 5.7 Indicatieve foto's van vegetatieopnames



Rietontwikkeling

Tabel 5.1 geeft de rietontwikkeling voor de verschillende behandelingen weer. Tabel 5.1 laat zien dat ontwikkeling van riet vanuit rietzaad op deze bodem mogelijk is. Ook laten de resultaten zien dat de riethoogte duidelijk wordt beïnvloed door begrazing. Maar ook zonder vraatbescherming is rietontwikkeling mogelijk. De planten blijven echter kleiner. Wat verder opvalt is dat de riethoogte tussen de twee behandelingen met vraatbescherming verschilt. Dit terwijl het zaad, de dichtheid, periode van zaaien, drooglegging en type vraatbescherming niet verschilde. Dit komt overeen met bevindingen uit eerder onderzoek (zie hoofdstuk 2).

In geen van de opnames in de controle vakken werden rietplanten waargenomen, behalve in compartiment 1. Het actief aanbrengen van riet door middel van zaad lijkt hiermee een positieve invloed op de ontwikkeling te hebben (afbeelding 5.8).

Ook de toepassing met wortelstokken bleek succesvol. Ondanks dat er geen vraatbescherming werd toegepast ontwikkelde er zich in 1,5 jaar tijd een rietkraag van tussen de 71 en 137 cm. In het eerste compartiment breidt deze rietkraag daarnaast stevig in de breedte uit en bestrijkt bijna de helft van het eerste compartiment. In alle gevallen was de stengeldikte van de rietplanten gering (<2mm) (afbeelding 5.8).

Tabel 5.1 Rieteigenschappen (n per m², hoogte in cm, stengeldikte in mm) op de dun slib compartimenten 1, 2 en 3. Het getal van de behandelingen vraatraster en geen vraatraster is het gemiddelde van een duplo (n=2) meting

Compartiment	Behandeling	Dominante plantensoort	Rietplanten per m ²	Riethoogte in cm	Stengeldikte riet in mm
	geen vraatraster	klein hoefblad	0	0	0
	vraatraster	klein hoefblad	10	30	1

Compartiment	Behandeling	Dominante plantensoort	Rietplanten per m ²	Riethoogte in cm	Stengeldikte riet in mm
1	controle	riet	7	71	2
	rietzaad	kale bodem, klein hoefblad	0	0	0
	wortelstokken	riet	35	137	3
2	controle	(akker) distel	0	0	0
	wortelstokken	harig wilgenroosje	4	129	2
	rietzaad	harig wilgenroosje, klein hoefblad	0	0	0
3	geen vraastraster	kale bodem, klein hoefblad	0,5	18	1
	vraastraster	klein hoefblad	27	131	2
	controle	kale bodem, harig wilgenroosje	0	0	0
	rietzaad	kale bodem, moerasandijvie	0	0	0
	wortelstokken	riet	17	71	1

Afbeelding 5.8 Voorbeelden van rietgroei op de compartimenten 1 en 3 bij de verschillende rietbehandelingen (wortelstokken, wel of geen vraastraster)

Compartiment 1 - wortelstokken



Compartiment 1 - geen vs. wel vraastraster



Compartiment 3 - geen vs. wel vraastraster



Afbeelding 5.9 geeft de waarnemingen van helofyten (riet & lisdodde) en bosopslag op de PQ's (afbeelding 5.9) weer. Ook is aangegeven waar vraatsporen zijn waargenomen. Afbeelding 5.9 laat zien dat

zowel riet als lisdodde zich vestigen op de compartimenten. Op plekken waar riet gezaaid komt riet vaker voor dan op plekken waar het riet niet gezaaid is. Desondanks komt riet ook voor op plekken waar niet gezaaid is. Lisdodde (niet gezaaid) komt verspreid over alle compartimenten voor. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de vegetatieopnames waar riet, lisdodde of bosopslag aangetroffen zijn, en geeft de belangrijkste eigenschappen van deze planten aan.

Afbeelding 5.9 Vegetatieopnames met riet, lisdodde of bosopslag. Luchtfoto is van oktober 2021 (Bron: satellietdataportaal 2021). Zie tabel 5.2 voor extra toelichting (code correspondeert met nummer)



Tabel 5.2 Vegetatieopnames waar riet, lisdodde of bosopslag is aangetroffen. Zie afbeelding 5.9 voor locatie vegetatieopnames (PQ code)

Compartiment	PQ- code	riet aantal	riethoogte	lisdodde aantal	lisdodde hoogte	bosopslag	Dominante soort
		<i>n per m²</i>	<i>cm</i>	<i>n per m²</i>	<i>cm</i>	<i>n</i>	
1	1	3 planten	12	1	5	0	klein hoefblad
	2	12 stengels	160	0	0	0	zeeaster, riet
	3	0	n.v.t.	2	n.v.t.	0	moerasandjvie
	4	1 plant	19	60	2	0	kale bodem
	5	0	n.v.t.	1	23	0	kale bodem
	6	6 stengels	37,8	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	7	0	n.v.t.	1	17	0	kale bodem
	8	1 plant	6	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	9	3 planten	16,6	0	n.v.t.	0	kale bodem
	10	2 planten	126,5	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	11	0	n.v.t.	70	10	2 geoorde wilg	kale bodem
	12	2 planten	2	6	16,3	0	kale bodem
	13	0	n.v.t.	15	2	2 geoorde wilg	klein hoefblad
2	14	2 stengels	101	0	n.v.t.	0	harig wilgenroosje
	15	3 planten	26,7	0	n.v.t.	0	harig wilgenroosje
	16	0	n.v.t.	2	17	0	moerasandjvie
	17	0	n.v.t.	60	18,6	0	rode ganzenvoet, harig wilgenroosje
	18	1 plant	50	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	19	0	n.v.t.	2	17	0	harig wilgenroosje

Compartiment	PQ- code	riet aantal	rielhoogte	lisdodde aantal	lisdodde hoogte	bosopslag	Dominante soort
		<i>n per m²</i>	<i>cm</i>	<i>n per m²</i>	<i>cm</i>	<i>n</i>	
	20	0	n.v.t.	3	9	0	harig wilgenroosje
	21	0	n.v.t.	2	19	0	harig wilgenroosje
	22	0	n.v.t.	1	35	0	goudzuring
3	23	0	n.v.t.	0	n.v.t.	1 geoorde wilg	klein hoefblad
	24	1 plant	85	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	25	5 planten	35,4	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	26	150 stengels	126,3	0	n.v.t.	0	riet
	27	6 planten	13,2	1	6	0	harig wilgenroosje
	28	22 planten	25	1	50	0	kale bodem
	29	8 planten	25,2	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	30	3 stengels	10,5	0	n.v.t.	0	kale bodem
	31	1 plant	n.v.t.	0	n.v.t.	0	klein hoefblad
	32	1 plant	42	0	n.v.t.	2 schietwilg	margriet
	33	2 planten	50	0	n.v.t.	0	harig wilgenroosje
	34	0	n.v.t.	0	n.v.t.	2 schietwilg	margriet
	35	14 planten	42,5	0	n.v.t.	0	gras sp.
	36	160 stengels	200	0	n.v.t.	0	riet
	37	2 planten	27,5	0	n.v.t.	0	gras sp.
	38	13 planten	50	0	n.v.t.	1 geoorde wilg	klein hoefblad

Biochemie

Totaaldestructie

Tabel 5.3 geeft de totaalwaarden voor de monsterpunten op de dun slib compartimenten weer. In de tabel is onderscheid gemaakt in locatie door de behandelingen en de ligging ten opzichte van de spuitmond apart te benoemen.

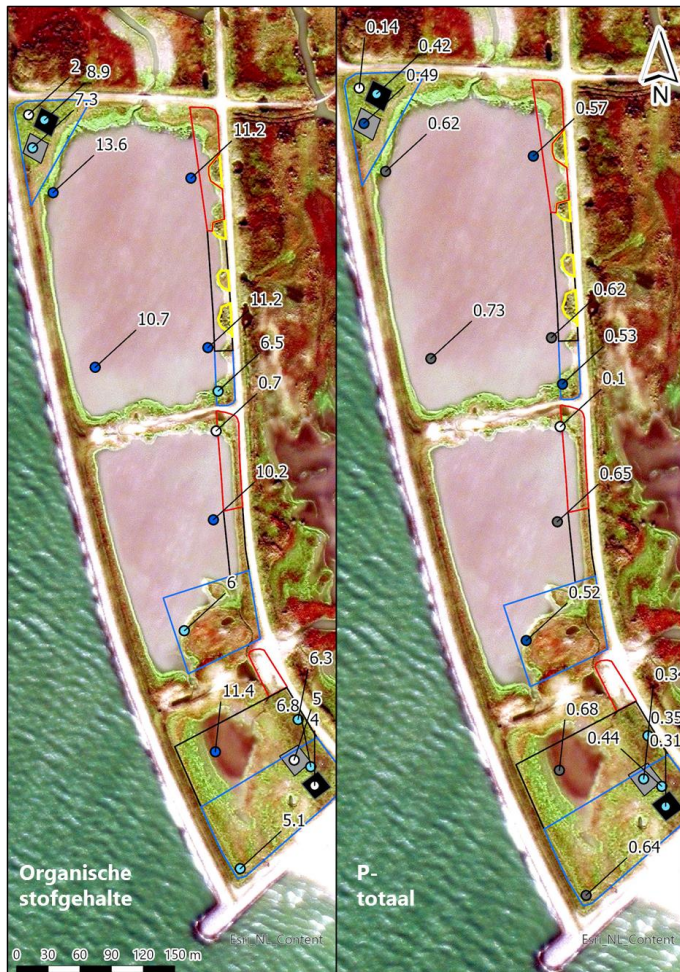
Wat allereerst opvalt is dat de spreiding in het organisch stof gehalte relatief groot is (afbeelding 5.10). Het gemeten organisch stof gehalte varieert tussen 0,7 en 11,7 %. Allereerst valt op dat de waarde in het zandmonster veel lager is dan die van het holocene klei. Maar ook binnen de organisch stof gehalten van de holocene klei is de spreiding groot. Wat opvalt is dat de organisch stof gehalten van de monsters die in de buurt van spuitmonden genomen zijn veel lager zijn dan monsters die ver van de spuitmonden afgenomen zijn (gemiddeld 4,9 % verschil). Ook het totaal fosfor en stikstof gehalte zijn orde van grootte 50 % lager dan de locaties die verder van de spuitmond af liggen. Met een gemiddelde totaal fosfor concentratie van 360 mg kg ds⁻¹ mag er op de spuitmonden gesproken worden van voedselarme condities terwijl de locaties verder van de spuitmond als voedselrijk bestempeld mogen worden. Dit alles bevestigt de indruk dat het hydraulisch verpompen segregatie veroorzaakt en dat het lichtere organisch materiaal, met daarin relatief veel P en N, ver van de spuitmonden terecht komt.

Ook de biochemische eigenschappen tussen de meetlocaties met vraatbescherming verschillen. De condities in het 3^e compartiment lijken gunstiger te zijn dan het eerste compartiment. Mogelijk verklaart dit het verschil in de groeihoogte van het riet met vraatbescherming tussen de locaties.

Porievocht

Tabel 5.4 geeft een overzicht van de biochemische waarden gemeten in het porievocht. Wat opvalt is dat er een grote spreiding is in de porievochtconcentraties. Ook hier komt een duidelijke relatie naar voren met de locatie van de meting. Op de spuitmonden zijn de chloride- en sulfaatconcentraties significant hoger dan op de locaties verder van de spuitmond af. De fosfaat-, nitraat- en ammoniumconcentraties zijn significant lager op de spuitmonden dan de locaties verder van de spuitmond af. De porievochtmetingen bevestigen hiermee het beeld dat uit de analyse van de totaaldestructie naar voren komt.

Afbeelding 5.10 Overzicht van het organische stofgehalte (links) en P-totaal (rechts) gemeten in de dun slib compartimenten. Luchtfoto is van oktober 2021 (Bron: satellietdataportal 2021)



organische stofgehalte	P-totaal in g/kg ds	■ Rietplag
○ < 5%	○ < 0,25	□ controle
● 5 t/m 9,3%	● 0,25 t/m 0,45	■ rietwortel
● > 9,3%	● 0,45 t/m 0,60	■ rietzaad
	● > 0,60	■ Geen vraatraster
		■ Vraatraster

Tabel 5.3 biochemische analyse in de bodem van de dun slib compartimenten

	Deltares locatie	Behandeling	Sedimenttype	Organische stofgehalte	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	N-Kjeldahl
				%	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$	$g\ kg^{-1}\ ds$
compartiment 1 (C1)		geen vraatraster	sputmond	5,0	33,5	20,5	2,4	9,0	1,23	0,35	17,50	1,6
		controle	sputmond	6,3	31,0	13,0	1,1	4,6	0,20	0,34	4,70	1,0
		vraatraster	sputmond	4,0	26,5	14,0	1,4	4,3	0,51	0,31	12,30	1,4
	Locatie 1	rietzaad	dunslib	5,1	30,5	39,5	4,5	7,9	0,77	0,64	8,20	5,0
	Locatie 3	controle	dunslib	11,4	33,0	34,0	4,2	8,3	0,72	0,68	14,00	4,7
	Locatie 2	rietzaad	sputmond	6,8	32,0	21,0	2,5	6,3	0,48	0,44	11,00	2,5
gemiddelde C1 (n= 6)				6,4 (sd:2,6)	31,1 (sd: 2,5)	23,7 (sd: 10,8)	2,7 (sd: 1,4)	6,7 (sd: 2,0)	0,65 (sd: 0,35)	0,46 (sd: 0,16)	11,28 (sd: 4,47)	2,7 (sd: 1,7)
compartiment 2 (C2)	Locatie 5	geen behandeling	dunslib	10,2	36,0	30,0	3,6	8,7	0,87	0,65	14,00	4,0
	Locatie 4	geen behandeling	dunslib	6,0	34,0	21,0	2,6	7	0,53	0,52	7,30	2,4
	Locatie 6	wortelstokken	zand	<0,7	13,5	4,0	0,3	1,5	<0,10	0,1	0,55	<0,2
gemiddelde C2 (n= 3)				5,6 (sd: 4,8)	27,8 (sd: 12,5)	18,3 (sd: 13,2)	2,2 (sd: 1,7)	5,7 (sd: 3,8)	0,50 (sd: 0,39)	0,42 (sd: 0,29)	7,28 (sd: 6,73)	2,2 (sd: 1,9)
compartiment 3 (C3)	Locatie 11	geen behandeling	dunslib	13,6	36,0	31,0	0,3	8,3	0,79	0,62	17,00	3,3
		geen vraatraster	sputmond	7,3	28,0	22,5	2,8	6,3	0,81	0,49	17,00	<2
		vraatraster	sputmond	8,9	10,3	12,5	2,6	3	0,35	0,42	5,28	3,9
	Locatie 10	wortelstokken	dunslib	11,2	35,0	33,0	3,8	8,7	0,95	0,57	18,00	4,0
	Locatie 7	rietzaad	dunslib	6,5	30,0	29,0	3,4	7,1	0,45	0,53	16,00	2,7
	Locatie 8	geen behandeling	dunslib	10,7	37,0	38,0	4,6	9,3	1,00	0,73	18,00	4,4
	Locatie 9	geen behandeling	dunslib	11,2	36,0	37,0	4,8	9,7	1,10	0,62	19,00	4,5
	Locatie 12	rietzaad	sputmond	2,0	12,0	6,4	0,9	1,7	0,23	0,14	2,40	1,5
gemiddelde C3 (n= 8)				8,9 (sd: 2,5)	28,0 (sd: 10,1)	26,2 (sd: 11,5)	2,9 (sd: 1,6)	6,8 (sd: 3,0)	0,71 (sd: 0,33)	0,51 (sd: 0,18)	14,08 (sd: 6,43)	3,2 (sd: 1,2)
gemiddelde spuitmond (n= 6)				5,6 (sd: 2,2)	23,7 (sd: 9,0)	16,2 (sd: 6,3)	2,1 (sd: 0,8)	5,1 (sd: 2,6)	0,60 (sd: 0,37)	0,36 (sd: 0,12)	10,91 (sd: 6,11)	2,1 (sd: 1,0)
gemiddelde dun slib (n= 9)				9,5 (sd: 2,9)	34,2 (sd: 2,5)	32,5 (sd: 5,6)	3,5 (sd: 1,4)	8,3 (sd: 0,9)	0,80 (sd: 0,21)	0,62 (sd: 0,07)	14,61 (sd: 4,26)	3,9 (sd: 0,9)

Tabel 5.4 Biochemische analyse van het porievocht analyse van de dun slib compartimenten

Delta-res code	locatie	Behandeling	Sediment-type	n*	pH	Ca	Mg	Cl	K	Fe	S04	P04	N-kjeldahl	NH4	N03
eenheid					mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	c1	vraat-raster	spuitmond	2*	7,6	680	420	2070		0,06	3900	<0,06	<1,3	0,15	<0,90
	c3	geen vraat-raster	spuitmond	2*	7,5	565	175,	540		0,05	2050	<0,06	<1,0	<0,07	<0,90
	c3	vraat-raster	spuitmond	2*	7,1	595	130	325		1,28	2200	0,07	<3,5	0,41	<0,90
1	c1	rietzaad	dun-slib	2*	7,1	615	115	260		0,08	2100	<0,06	2,0	0,81	<0,9
11	c3	geen behandeling	dun-slib	4*		71	61	311	18,1		90	12,6		6,45	0,32
8	c3	geen behandeling	dun-slib	4*		82	48	253	15,24		157	6,88		2,45	0,31
9	c3	geen behandeling	dun-slib	4*		73	47	270	15,7		143	9,18		3,34	0,32
10	c3	wortelstokken	dun-slib	4*		58	50	310	17,8		58	10,9		6,62	0,36
3	c3	controle	dun-slib	4*		134	104	358	11,8		461	8,32		2,26	0,36
4	c2	geen behandeling	dun-slib	4*		86	41	228	14,7		105	5,68		2,5	0,33
5	c2	geen behandeling	dun-slib	4*		63	39	246	16,0		119	7,12		3,63	0,31
gemiddeld dun slib				3,1*	7,1**	148 (sd=22)	63 (sd=11)	280 (sd=25)	15,6 (sd=1,0)	0,08**	404 (sd=126)	7,59 (sd=3,90)	2,0**	3,51 (sd=2,16)	0,40 (sd=0,31)
gemiddeld spuitmond				8	7,4 (sd=0,8)	613 (sd=4)	242 (sd=13)	978 (sd=100)	-	0,46 (sd=0,51)	2718 (sd=426)	0,06 (sd=0,03)	2,0 (sd=1,3)	0,21 (sd=0,08)	0,9 (sd=0)

* De porievochtmetingen zijn in duplo uitgevoerd.

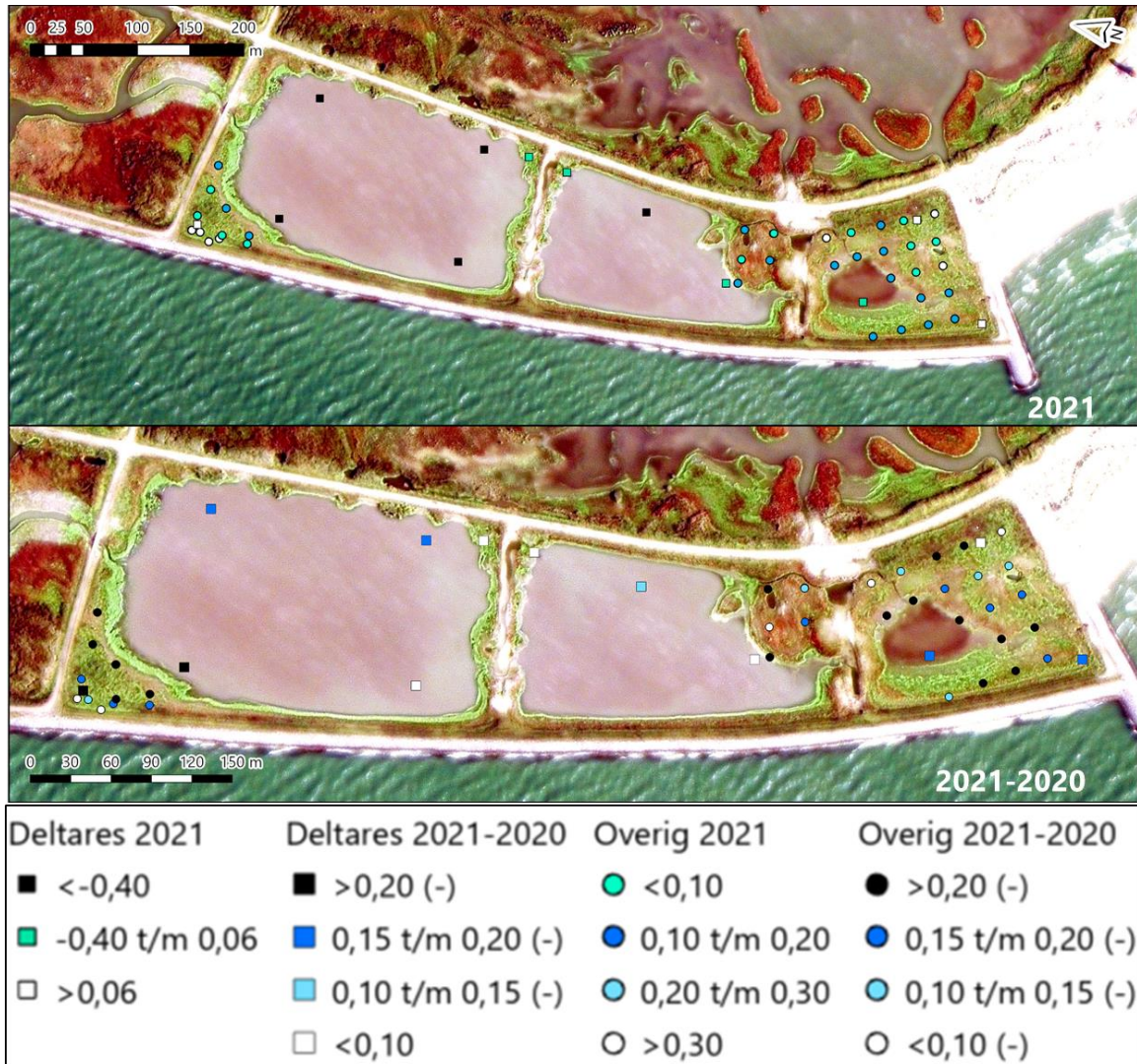
** Per locatie zijn er door Deltares op vier bodemdieptes bodemonsters verzameld: 2, 5, 10 en 20 cm. Deze tabel geeft het gemiddelde van deze vier bodemonsters weer.

5.3.2 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie

Afbeelding 5.11 geeft de hoogteontwikkeling tussen het voorjaar van 2020 (na laatste vulslag) en het najaar van 2021 (vegetatieopname) weer.

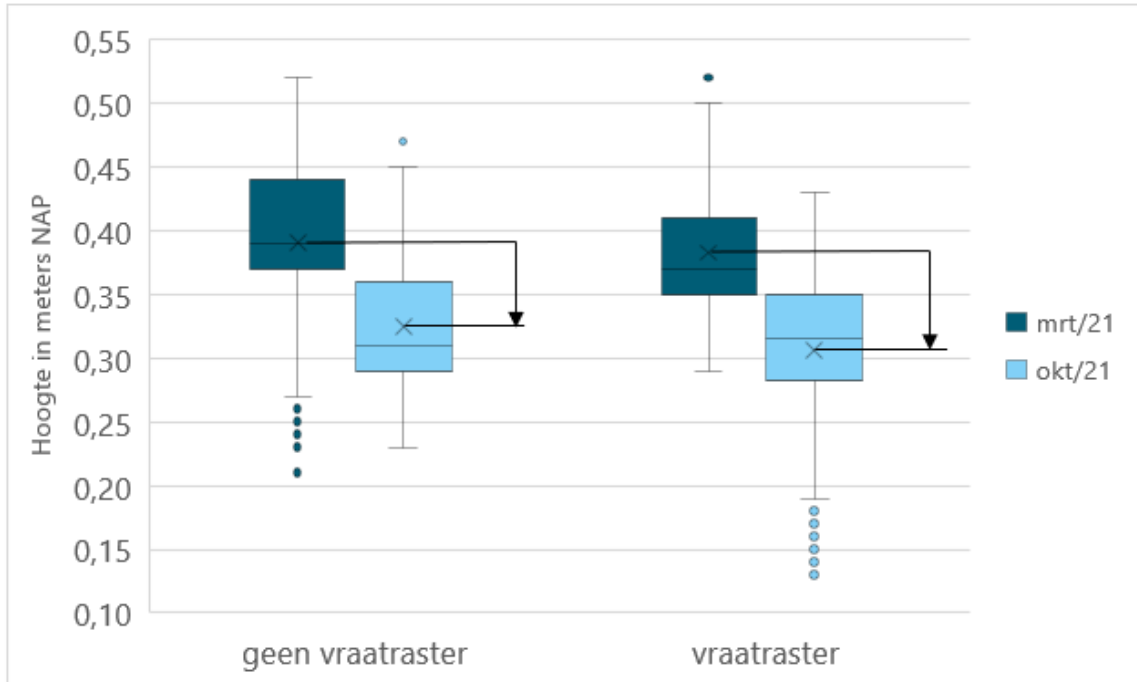
Het gemiddelde hoogteverschil tussen voorjaar 2020 en najaar 2021 bedraagt -22 cm (sd: -54 cm, n: 38). De ruimtelijke variatie is beperkt maar het lijkt er wel op dat de spuitmonden wat minder hard dalen dan de delen die verder van de spuitmonden af liggen.

Afbeelding 5.11 Links: hoogte gemeten in het najaar 2021. Rechts: hoogteverschil tussen najaar 2021 en voorjaar 2020 (juli). Deltares heeft op hun vaste meetreeks de hoogte gemeten (vierkanten). Luchtfoto is van oktober 2021 (Bron: satellietdataportaal 2021)

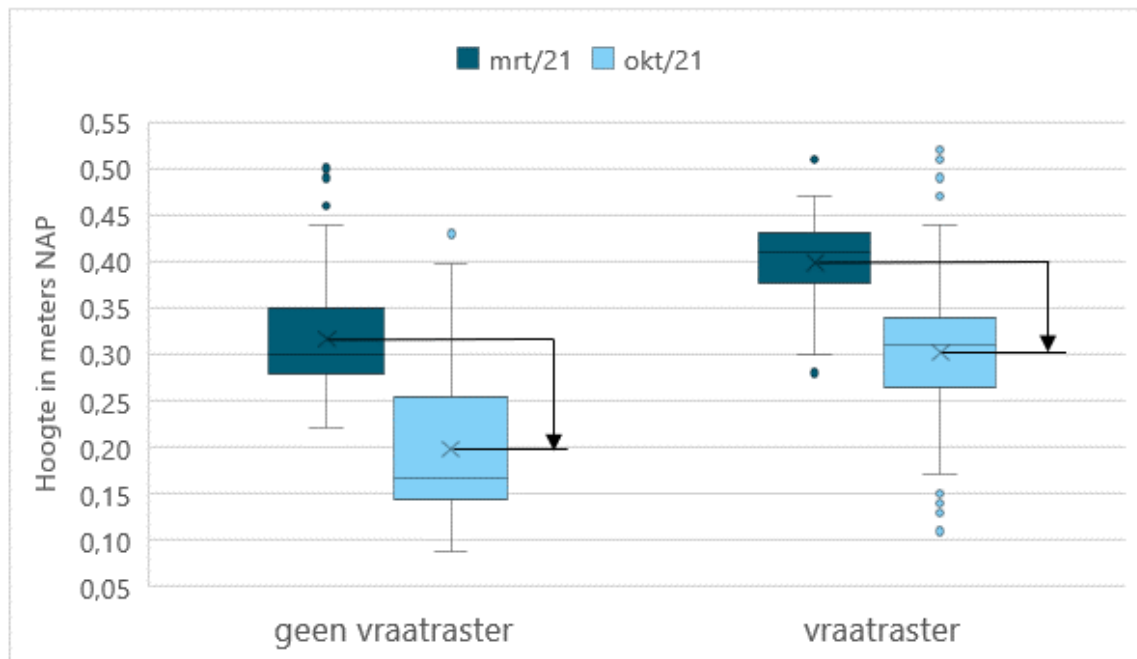


Afbeelding 5.12 geeft de hoogteontwikkeling in op de locaties met vraatbescherming en hun controle weer (zie afbeelding 5.5) in de periode mei tot en met oktober 2021. Het gemiddelde hoogteverschil is 8 cm zonder vraatraster en 6 cm met vraatraster. In compartiment 3 is de bodemdaling gemiddeld groter in de plot zonder dan met vraatraster (-12 t.o.v. -10 cm) (afbeelding 5.13). Het hoogteverschil tussen met of zonder vraatraster is zeer klein. Daarbij is het riet in de plots met vraatraster in de onderzoeksperiode niet ontwikkeld tot een stevige rietkraag en zijn de onderzoeksplots zonder vraatrasters bedekt met andere plantensoorten (vooral klein hoefblad). Hoewel de groeiperiode en het aantal meetpunten relatief klein is lijkt het er niet op dat het riet een significant effect heeft op de bodem.

Afbeelding 5.12 Hoogteontwikkeling tussen maart en oktober 2021 in de controle en experimentele plots in compartiment 1



Afbeelding 5.13 Hoogteontwikkeling tussen maart en oktober 2021 in de controle en experimentele plots in compartiment 3



5.4 Conclusie en discussie

Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Het materiaal op de onderzochte locaties is geschikt voor de kieming en groei van helofyten. De dunslib compartimenten zijn bedekt met moerasandjvie, klein hoefblad, harig wilgenroosje en zeeaster. Riet is in staat om op het materiaal te kiemen of uit te groeien vanuit wortelstokken. Begrazing heeft een significant negatieve invloed op de ontwikkelingsnelheid van het riet. Maar ook zonder vraatbescherming overleeft het

riet, bij voldoende droogval, de vraat door ganzen. Naast riet kiemt ook lisdodde veelvuldig. Deze ontwikkelen zich echter, net zoals riet, niet tot een grote plant. Naar alle waarschijnlijkheid als het gevolg van begrazing door watervogels.

Hoewel het materiaal op alle locaties geschikt lijkt, is er een duidelijk verschil in de bodemsamenstelling waar te nemen. Hierbij lijken de locaties die het verste van de spuitmonden afliegen het meest geschikt te zijn voor rietontwikkeling. Het opspuitproces heeft dus mogelijk invloed op de bodemsamenstelling waarbij de locaties het verst van de spuitmond de hoogste concentraties organisch stof bevatten.

De voedselrijkdom van de bodem zal invloed hebben op de ontwikkelingssnelheid van riet. Echter is ook bekend dat dominantie van riet vanuit rietzaad vele jaren in beslag kan nemen (Clevering & van den Toorn, 2000). Het verdient daarom aanbeveling om de ontwikkeling in de dun slib compartimenten te blijven volgen.

Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie van slib?

De hoogtegegevens op de dunslib compartimenten laten een duidelijke bodemdaling zien (gemiddeld 22 cm) over de periode maart tot en met oktober 2021. Het hoogteverschil tussen de proefopzet met en zonder vraastraster is minimaal. Op basis van deze metingen lijkt de invloed van vegetatie op het consolidatieproces gering te zijn. Fysische processen domineren. Deze bevinding komt overeen met de bevindingen van andere onderzoeken (zie hoofdstuk 3).

6

EMPIRISCH ONDERZOEK OP DE EILANDEN

6.1 Inleiding

Omdat in de dun slib compartimenten onvoldoende bodem droogviel voor het gewenste aantal onderzoeksplots is ervoor gekozen om een deel van het onderzoek te laten vervallen en hiervoor in de plaats een kort empirisch onderzoek uit te voeren op de eilanden A3 en B6.

6.2 Aanpak

Het onderzoek is uitgevoerd op de eilanden A3 en B6 (afbeelding 6.1). Deze locaties zijn geschikt voor een onderzoek omdat:

- 1 er gedetailleerde hoogte informatie beschikbaar is van een periode waarin het nog niet begroeid was (september 2018);
- 2 hier al 3 jaar geen vulslagen meer hebben plaatsgevonden;
- 3 een deel van het gebied in 2019 is aangeplant met rietwortelstokken en beschermd tegen begrazing;
- 4 er weinig verschil was in aanleghoogte tussen de gebieden die wel en niet zijn aangeplant;
- 5 de ontwikkelde rietkragen enige omgang hebben (>2.000 m²).

Tot slot voert het Natuur in Productie team (NiP) ook onderzoek uit naar riet- en hoogteontwikkeling op A3 en B6 (Temminck et. al., 2022). De keuze voor A3 en B6 maakt deze onderzoeken complementair.

De metingen sluiten wat methode betreft aan bij de metingen die zijn uitgevoerd in de dun slib compartimenten.

Binnen het onderzoeksgebied op A3 en B6 is een vlakdekkende vegetatieopname uitgevoerd. Op meerdere locaties zijn op eilanden A3 (n=9) en B6 (n=3) aanvullende metingen uitgevoerd aan de rietvegetatie (stengeldichtheid, stengelhoogte en stengeldikte).

Per eilanddeel (A3 en A6) zijn op twee locaties bodemonsters (bovenste 15 cm) verzameld. Per locatie is een mengmonster samengesteld op basis van twee locaties. Op deze mengmonsters (circa 780 ml) is een totaaldestructie uitgevoerd waarbij de volgende parameters in beeld zijn gebracht: droge stof, organische stof, gloeirest, calcium (Ca), ijzer (Fe), kalium (K), magnesium (Mg), natrium (Na), fosfor totaal (P), zwavel (S), stikstof volgens Kjeldahl (N), en nitraat (NO₃-N)

De hoogteontwikkeling is in beeld gebracht door gebruik te maken van de vlakdekkende hoogtemeting van Boskalis (d.d. 25 september 2018) en handmetingen die in het kader van dit onderzoek zijn uitgevoerd in oktober en november van 2021. In november 2021 is langs het traject, zoals weergegeven in (afbeelding 6.1), om de circa 5 meter een hoogtemeting uitgevoerd met een dGPS (Trimble Catalyst DA1) met een verticale nauwkeurigheid van circa twee centimeter. Daarbij zijn telkens de dominante vegetatietypen (bv. riet, lisdodde of moerasandijvie) genoteerd. De trajecten zijn grofweg in drie vegetatieklassen ingedeeld op basis van de dominante vegetatietypen en eventueel aangevuld met remote sensing data (Satellietdataportaal, 2021).

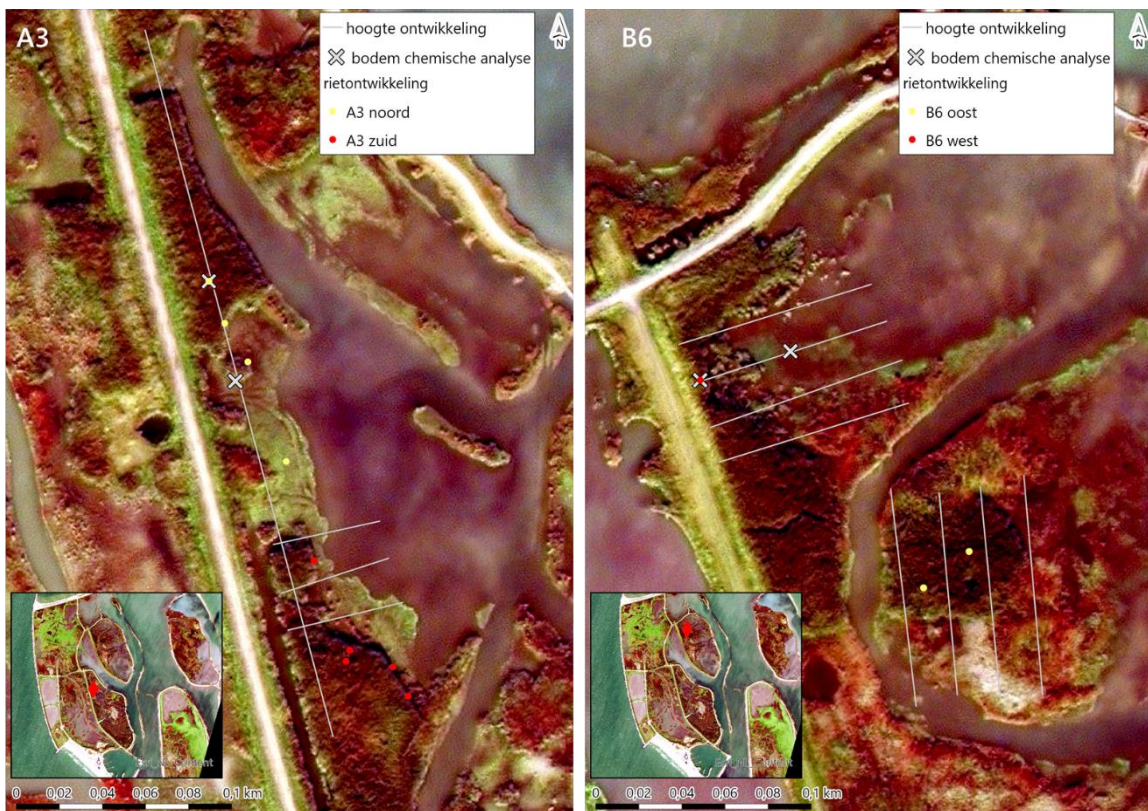
De categorieën zijn als volgt:

- kale bodem of water;
- riet;
- overige pionier vegetatie, met soorten als moerasandijvie, zeeaster, harig wilgenroosje en lisdodde.

De invloed van vegetatie op hoogteontwikkeling door onderscheid te maken in ontwikkelde rietkragen en overige pioniervegetatie is te verdedigen door het verschil in biomassa van zowel de bovengrondse als ondergrondse delen. Deze liggen voor ontwikkelde rietkragen vele malen hoger dan voor pioniervegetaties (Clevering & van der Toorn, 2000). Daarnaast wordt inzicht verkregen in de specifieke invloed van rietvegetatie.

Deze locaties uit 2021 zijn vergeleken met satellietbeelden uit 2018 om de hoogteontwikkeling over tijd (2018 tot en met 2021) te bepalen.

Afbeelding 6.1 Overzichtkaart van de trajecten voor de hoogte ontwikkeling, bemonsteringslocaties voor de biochemische analyse en locaties waar metingen aan het riet zijn uitgevoerd. A3 is links en B6 is rechts. Een plot van 20x20 cm is gebruikt voor het inschatten van de gemiddelde riet hoogte, aantal per m² en gemiddelde stengeldikte van vijf rietstengels



6.3 Resultaten

6.3.1 Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Afbeelding 6.2 geeft de eigenschappen van de ontwikkelde rietkragen op de eilanden weer. Afbeelding 6.3 geeft een representatief beeld van deze rietkragen. Op zowel A3 als B6 zijn de rietkragen goed ontwikkeld.

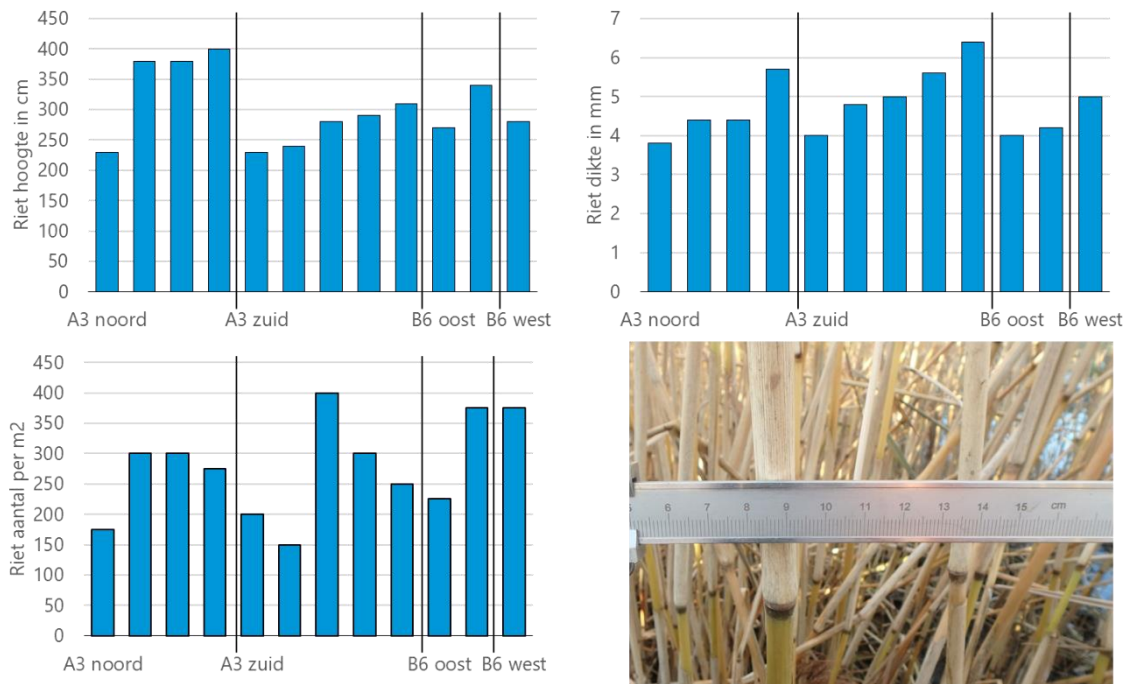
De hoogte, stengeldikte en dichtheid van de rietvegetatie is vergelijkbaar op eiland A3 en B6. De stengelhoogte is gemiddeld 300 cm (230 - 400), de stengeldikte is gemiddeld 4,8 mm (3,8 - 6,4 mm) stengeldikte en de stengeldichtheid bedraagt gemiddeld 280 (150 - 400) stengels per m². De verschillen

tussen de meetlocaties is relatief klein. Ook verkeert de rietvegetatie in een goede staat. Er zijn geen aanwijzingen voor stress (vergeling of verschrompeling van de bladeren).

Het riet verkeert in een goede conditie en komt zelfs in de buurt van de randvoorwaarden voor habitat kritische vogels zoals de grote karekiet die lang en stevig riet nodig hebben om te broeden (Verstijnen et. al., 2019 en de Fouw et. al., 2021).

Buiten de zones die afgezet zijn met vraastrasters groeit pioniersvegetatie zoals moerasandijvie en zeeaster. Langs het traject zijn lokaal, beperkte zones met lisdodde aangetroffen (afbeelding 6.2 & afbeelding 6.3). Tabel 6.1 geeft een overzicht van gemeten biochemische parameters op deze locaties.

Afbeelding 6.2 Meetgegevens van riet: hoogte (linksboven), stengeldikte (rechtsboven), aantal per m² (linksonder), voorbeeldfoto van rietstengeldikte in A3 zuid (rechtsonder)



Afbeelding 6.3 Representatieve foto van rietkragen op eiland A3 en B6



Tabel 6.1 Overzicht bodem chemische analyses in A3 en B6

Biochemische parameter	Eenheid	A3		B6	
		gemiddelde (n=2)	sd	gemiddelde (n=2)	sd
organische stof (% m/m ds)	% m/m ds	11,7	1,6	5,8	0,6
Ca (mg/kg ds)	g/kg ds	21,5	2,120	36,0	0,57
Fe (mg/kg ds)	g/kg ds	35,0	1,41	22,5	2,12
K (mg/kg ds)	g/kg ds	4,55	0,92	2,4	0,14
Mg (mg/kg ds)	g/kg ds	8,15	0,21	6,55	0,07
Na (mg/kg ds)	g/kg ds	0,84	0,15	0,380	0,07
P (mg/kg ds)	g/kg ds	0,61	0,11	0,59	0,16
S (g/kg ds)	g/kg ds	10,75	1,77	6,50	3,11
N-kjeldahl (mg/kg ds)	g/kg ds	4,0	0,9	2,2	0,2

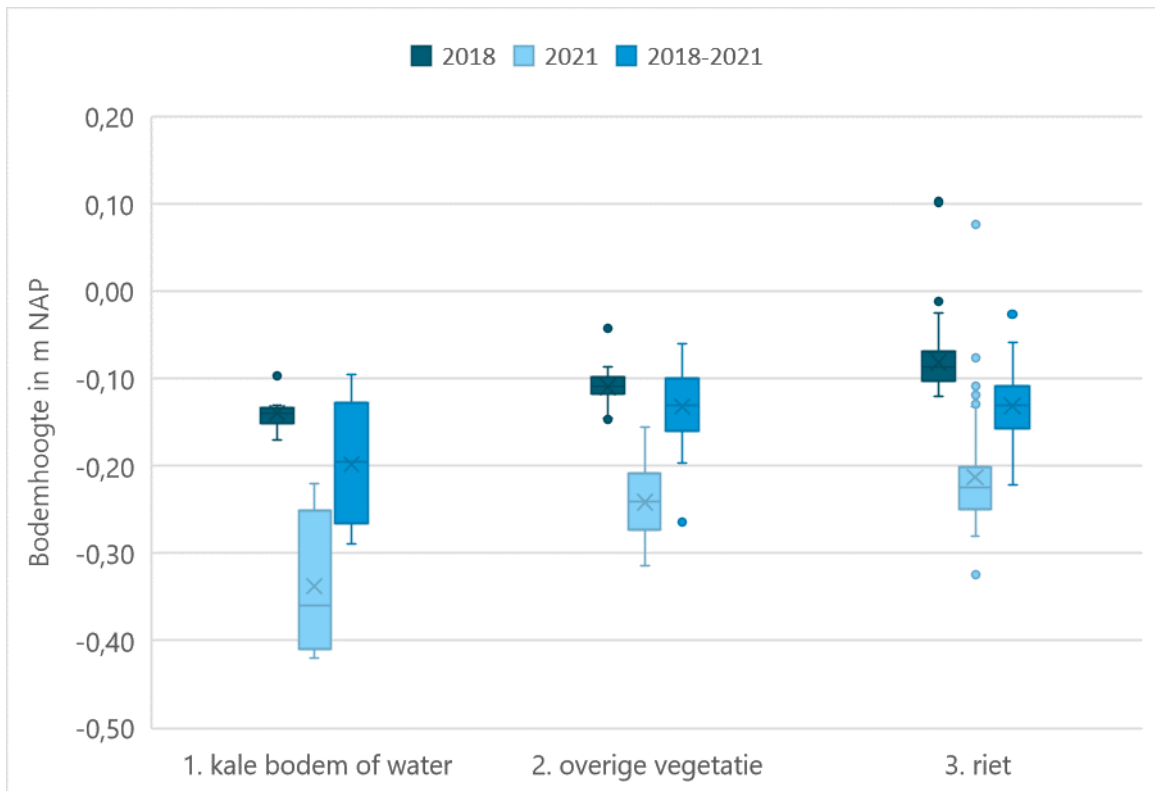
6.3.2 Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van slib?

Deelgebied A3

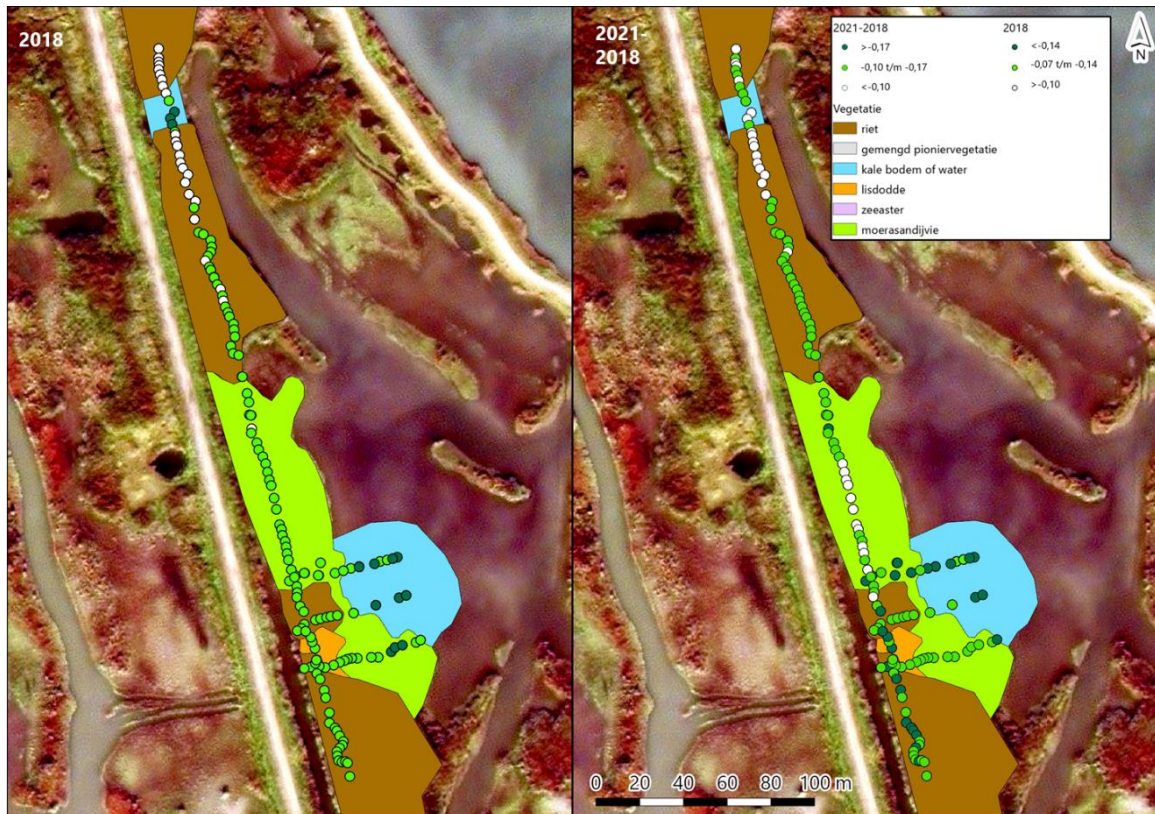
Afbeelding 6.2 geeft hoogteontwikkeling op A3 weer over de periode 2018-2021. Hierbij is onderscheid gemaakt in niet begroeide delen (kale bodem of water), ontwikkelde rietkragen (riet) en overige pioniervegetatie (overige vegetatie).

Aan het begin van de meting in september 2018 lag de gemiddelde hoogte langs het traject in deelgebied A3 op -0,097 m NAP (sd: 0,03). In drie jaar tijd is hier de bodem met gemiddeld 0,14 m (sd: 0,05) gedaald tot een hoogte van -0,24 m NAP (sd: 0,07). De bodemdaling is het grootst in de categorie 'kale bodem of water', namelijk gemiddeld -0,20 m ten opzichte van -0,13 m voor zowel riet als overige vegetatie (afbeelding 6.4). Opvallend is dat de beginhoogte in 2018 gemiddeld ook lager lag voor deze categorie in vergelijking met de rest (-0,14 m kale bodem of water, -0,11 m overige vegetatie en -0,08 riet). Op de overzichtskaart (afbeelding 6.5) is geen duidelijk verband te vinden tussen de beginhoogte in 2018 en bodemdaling over de periode 2018 t/m 2021.

Afbeelding 6.4 Gemiddelde gemeten bodemhoogte (m NAP) in 2018 en 2021 voor eilanddeel A3 (n= 164) per vegetatiecategorie (kale bodem of water, overige vegetatie en riet). Inclusief hoogteverschil tussen 2018 en 2021



Afbeelding 6.5 Overzichtskaart van het gemeten hoogteverschil op A3 inclusief dominante vegetatietype

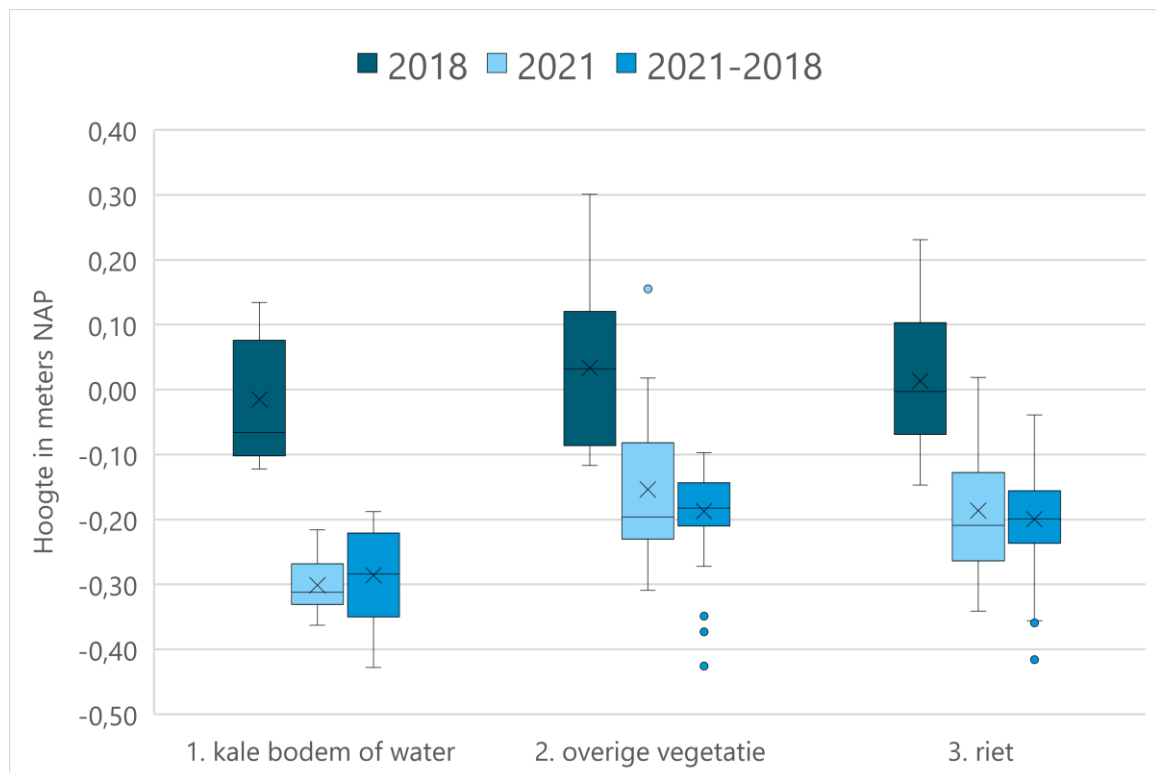


Deelgebied B6

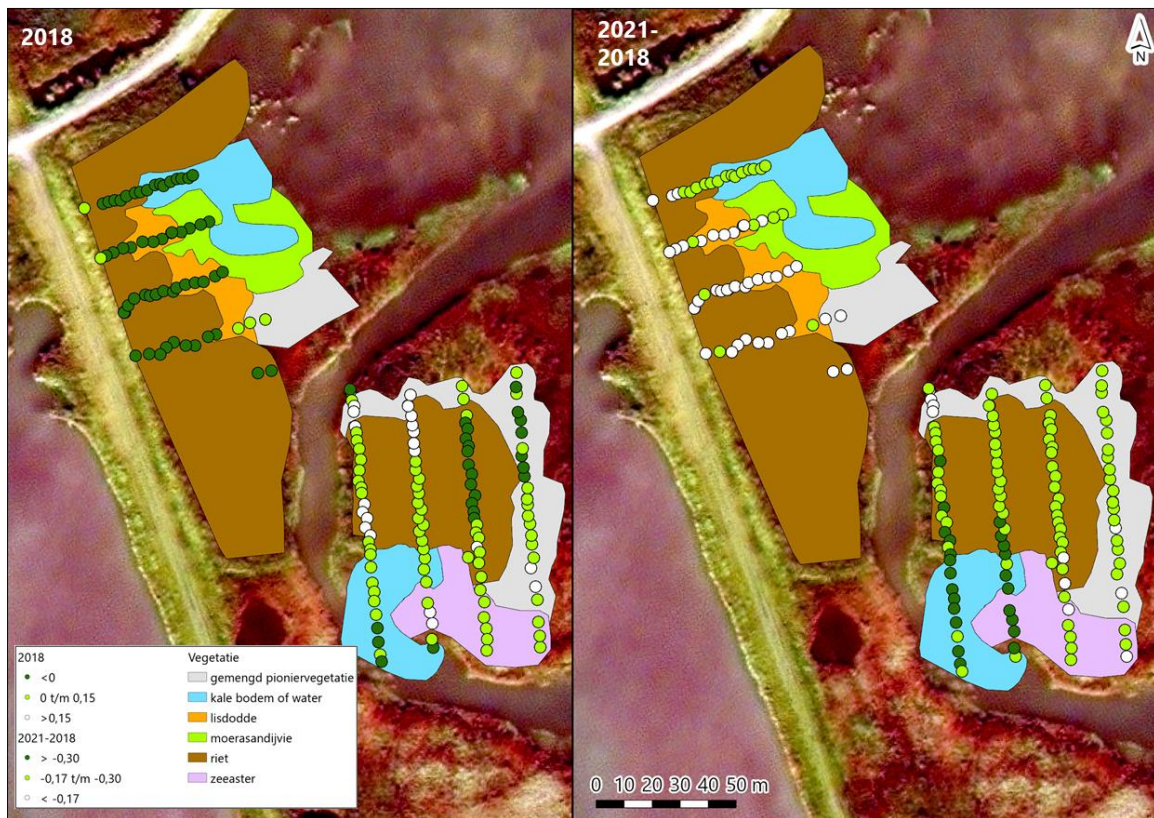
Afbeelding 6.6 geeft hoogteontwikkeling op B6 weer over de periode 2018-2021. Gemiddeld lag de hoogte op de onderzochte locaties bij de start van de metingen rond de 0,02 m NAP (sd: 0,10). Vervolgens is de bodem in drie jaar gedaald met gemiddeld 0,21 m (sd: 0,08), gemiddeld tot NAP -0,19 m.

Afbeelding 6.7 laat zien dat de bodemdaling van de klasse 'kale bodem of water' afwijkt van de andere klassen maar dat de verschillen met een ontwikkelde rietkraag of overige vegetatie verwaarloosbaar klein is in relatie tot de totale bodemdaling. De bodemdaling is het grootst in de categorie 'kale bodem of water' (-0,29 m). Deze categorie heeft een lagere beginhoogte in 2018 ten opzichte van de andere categorieën overige vegetatie en riet. Grofweg ligt de bodem in 2018 na het vullen in het noordwestelijke deel van B6 al lager dan in het zuidoostelijke deel. De sterkste bodemdaling (hoogteverschil 2021-2018) is juist te zien in de zone 'kale bodem' in het zuidoosten van B6.

Afbeelding 6.6 Gemiddelde gemeten bodemhoogte (m NAP) in 2018 en 2021 voor eilanddeel B6 (n= 182) per vegetatiecategorie (kale bodem of water, overige vegetatie en riet). Inclusief hoogteverschil tussen 2018 en 2021



Afbeelding 6.7 Overzichtskaart van het gemeten hoogteverschil op B6 inclusief dominante vegetatiesoort. Links geeft de hoogte in 2018 aan en rechts het hoogteverschil tussen 2021 en 2018



6.4 Conclusie en discussie

Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Het materiaal op de onderzochte locaties is geschikt voor de kieming en groei van helofyten. Riet is in staat om, vanuit wortelstokken en met vraatbescherming, zich binnen drie jaar te ontwikkelen tot een hoge en stevige rietkraag. Ook andere helofyten zoals lisdodde en pionierplanten als moerasandjvie en zeeaster groeien goed op het materiaal.

Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie van slib?

Op basis van de gegevens voor de eilanden A3 en B6 kan geconcludeerd worden dat vegetatie geen invloed heeft op de consolidatie van de bodem. Fysische eigenschappen van de bodem zijn veel belangrijkere stuurfactoren in het consolidatieproces.

7

CONCLUSIE

In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste bevindingen uit de in de voorgaande hoofdstukken beschreven onderzoeken nog eens bij elkaar gebracht.

Is het materiaal geschikt voor de kieming en groei van helofyten?

Het materiaal is geschikt voor de kieming en groei van helofyten. Zowel de praktijkexperimenten als het kiemexperiment laten zien dat kieming en groei van helofyten zoals riet en lisdodde goed mogelijk is.

Het lijkt erop dat de vulmethode van invloed is op de geschiktheid van het materiaal voor de kieming en groei van helofyten. Ten eerste blijkt uit het onderzoek dat de bodem op de eilanden wat biochemische eigenschappen betreft verschilt van de onderzoeken die in aanloop op de bouw van Marker Wadden zijn uitgevoerd. Met name het organisch stofgehalte verschilt. De waargenomen risico's op nutriëntlimitatie en problemen met ijzertoxiciteit die in de onderzoeken op aanloop op Marker Wadden waren geïdentificeerd worden in de praktijk niet waargenomen.

Uit het onderzoek op de dun slib compartimenten blijkt dat de bodem, in relatie tot haar geschiktheid, heterogeen is. Dicht bij de spuitmonden is het organisch stof gehalte (maar ook het totaal fosforgehalte) relatief laag en neemt toe met de afstand vanaf de spuitmond tot relatief hoge waarden. Mogelijk leidt het proces van menging (opzuigen) en ontmenging (opsputten) tot een verhoogd organisch stof gehalte in de toplaag. Dit zou het verschil met de onderzoeken voor de aanleg van Marker Wadden (waar gebruik is gemaakt van ongestoorde monsters, of 'in-situ') verklaren. Als dit proces verantwoordelijk is voor de verhoogde nutriëntbeschikbaarheid van de bodem, dan betekent dit ook dat het opsputten zelf het materiaal geschikter maakt voor de kieming en groei van helofyten. In ieder geval op korte termijn. Wat de totale nutriëntvoorraad van de bodem is, en hoe duurzaam deze situatie in stand te houden is, is in dit onderzoek niet onderzocht.

Hierbij moet wel de kanttekening gemaakt worden dat de in-situ holocene klei dat gebruikt is voor het kiemexperiment ook een significant hoger organisch stof gehalte bevatte dan het materiaal dat is gebruikt voor de onderzoeken voorafgaand aan de bouw van Marker Wadden. Dit duidt erop dat ook de heterogeniteit van de bodem een rol speelt.

Wat is de invloed van vegetatie op consolidatie en sterkteontwikkeling van slib?

Er is geen netto effect van vegetatie op het consolidatieproces waargenomen. De labexperimenten laten zien dat riet bodemprocessen wel beïnvloedt maar dat er geen netto effect optreedt op de bodemdaling (Saaltink 2018 & Barciela 2019). Ook in het kiemexperiment (hoofdstuk 4) en in het veld werd geen significante invloed van vegetatie op de hoogteontwikkeling waargenomen. Fysische processen (eigen gewichtsconsolidatie, zetting en korstvorming) lijken in de doorlooptijden van de onderzoeken sturend te zijn.

Het is echter niet uit te sluiten dat vegetatie op langere termijn wel een invloed gaat hebben op de hoogteontwikkeling. Dit kan door middel van een aantal processen. Ten eerste zullen helofyten het bodemmateriaal vasthouden en mogelijk slib in gaan vangen (CUR 1999, Barciela Rial 2019, Boskalis 2021 concept). Daarnaast kan het wortelsysteem in de bodem tot volumevergroting gaan leiden (Barciela Rial, 2019).

8

AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK

We bevelen aan om de onderzoeksopstelling in de dun slib compartimenten te handhaven en de metingen voort te zetten.

Daarnaast bevelen we aan om het onderzoek op te schalen naar de hoofdeilanden. We denken hierbij aan:

- een vast meetnet (1 meetpunt per hectare) waarbij jaarlijks de vegetatie-, sterkte- en hoogteontwikkeling gemeten wordt;
- nader onderzoek naar de biochemische samenstelling en ontwikkeling van de bodem door één maal per 3 jaar de biochemische eigenschappen van het 'vaste meetnet' in beeld te brengen;
- een onderzoeksopstelling te plaatsen op de nieuwe E-eilanden die vergelijkbaar is met de opstelling in de dun slib compartimenten.

We meten nu vooral in de pionierfase (zowel qua vegetatie- als hoogteontwikkeling). Hoe de toekomst gaat verlopen is onzeker. Voorzetting van het onderzoek leidt tot het benodigde inzicht in de sturende processen van hoogte- en vegetatieontwikkeling.

LITERATUUR

- 1 Barciela Rial M. (2019). Consolidation and drying of slurries. A building with nature study for the Marker Wadden. Proefschrift. ISBN 978-94-6384-073-6.
- 2 Boskalis (2021 concept). Memo - Hoogteontwikkeling 'plas dras' eilanden A t/m D: Verificatie eisen, analyse processen, lessons learned en uitvoeringsaspecten. Datum 03-06-2021. Kenmerk: DT13084-SGCR-05-GEO-M-2.
- 3 Clevering O.A. & van der Toorn J. (2000). Observations on the colonization of a young polder area in the Netherlands in reference to the clonal expansion of *Phragmites Australis*.
- 4 CUR (1999). Natuurvriendelijke oevers: belasting en sterkte. Civieltechnisch centrum en Uitvoering Research en Regelgeving (CUR). CUR-rapport 201.
- 5 de Fouw, J., R.M.G. van der Hut, E.S. Bakker, A.J.P. Smolders, J. van der Winden en P.J. Westendorp (2021). Inrichting, ontwikkeling en beheer van moerassen op voormalige landbouwgrond: Een eerste verkenning van de ontwikkeling van eutrofe moerassen. Rapport nummer 2021/OBN249-LZ, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
- 6 Deltares (2022 in prep.). Bouwen met slib - deelrapport fysica.
- 7 Dankers P, Wichman B & Van Kerkvoorde (2015). Eindrapportage Pilot Markermeer Moeras. Royal HaskoningDHV, project no.: 9V6741.A0, 173 pp.
- 8 Ecoshape (2018). Stichting EcoShape - Building with Nature. Samenwerkingsovereenkomst inzake uitvoering van het project 'Toegepast Onderzoek Kennis en Innovatie programma Marker Wadden'.
- 9 KIMA (2021, in prep.). Synthese rapport KIMA versie 1.0. Rapportage over de vijf jaar onderzoek op Marker Wadden.
- 10 Royal HaskoningDHV (2015). Beantwoording NMIJ onderzoeksvragen. Referentie RDC9V6742.A2/R0215/50124/BW/Nijm.
- 11 Satellietdataportaal (2021), <https://www.satellietdataportaal.nl/>, geraadpleegd op 01/12/2021.
- 12 Saaltink R.M. (2018). Wetland eco-engineering with fine sediment. Bouwen-met-Natuur in waterrijke gebieden. Proefschrift. Universiteit Utrecht.
- 13 Temmink Ralph J.M., van den Akker M., Robroek J.M., Peter M.J., Crujisen M., Veraart A.J., Kosten S., Peters R.C.J.H., Verheggen-Kleinheerenbrink G.M., Roelofs A.W., van Eek Z., Bakker E.S. & Lamers L.P.M. (2021). Nature development development in degraded landscapes: How pioneer bioturbators and water level control coil subsidence, nutrient chemistry and greenhouse gas emission. *Pedobiologia - Journal of Soil Ecology* 87-88.
- 14 Temmink J.M., van den Akker M., van Leeuwen C.H.A, Thöle Y., Olff H., Reijers V.C., Weideveld S.T.J., Robroek B.J.M., Lamers L.P.M. & Bakker E.S. (2022). Herbivore exclusion and active planting stimulate reed marsh development on a newly constructed archipelago.
- 15 Van den Berg L.J.L., van Riel M. & Bakker L (2014). Markermeermoeras: Nieuwe Kansen voor Natura 2000.
- 16 Verstijnen Y., Smolders F. & de Fouw J. (2019). Het belang van bodemtypen en nutriënten voor riet in de Loosdrechtse Plassen. Verkenning van abiotische knelpunten voor het broedhabitat van de grote karekiet.
- 17 Witteveen+Bos (2018). Dun slib karakterisering. Rapportnummer 106206/19-005.569.

Bijlage(n)

BIJLAGE: KARAKTERISERING DUN SLIB-ANALYSES

Tabel I.1 Sedimentsamenstelling

Sedimentsamenstelling	Eenheid	1A	1B	2A	2B	3A	3B
dichtheid	g/cm ³	1.05	1.09	1.02	1.02	1.09	1.13
droge stof gehalte	% (m/m)	16.0	20.2	13.0	15.9	28.0	25.2
organisch stof gehalte	% (m/m) ds	10.8	8.9	11.2	11.0	10.5	10.6
gloeirest	% (m/m) ds	89	90	88.4	88.4	88.4	87.8

Tabel I.2 Korrelgrootte verdeling in % (m/m) droge stof

Korrelgrootte %(m/m) ds	1A	1B	2A	2B	3A	3B
< 2.000 µm	87.4	82.3	88.7	80.1	81.2	79.3
< 1.000 µm	76.5	68	79.5	68.9	66.9	65.2
< 500 µm	71.2	61.2	70.8	61.8	60.2	59.1
< 250 µm	68.1	57.5	64.3	57.1	57.1	55.5
< 125 µm	65.1	54.1	59.3	53.3	54.3	52.6
< 63 µm	58.6	48.9	53.7	48.1	46.8	45.8
< 45 µm	54.9	43.6	49.3	43.6	41.9	42.4
< 16 µm	43.9	30.8	38.8	31.6	30	23.2
< 2 µm	3.5	16.1	5.2	8.4	15.7	21.9

Tabel I.3 Korrelgrootte verdeling in % (m/m) droge stof per korrelgrootte klasse

Korrelgrootte %	1A	1B	2A	2B	3A	3B
< 2 µm	3.5	16.1	5.2	8.4	15.7	21.9
2 < 16 µm	40.4	14.7	33.6	23.2	14.3	1.3
16 < 45 µm	11	12.8	10.5	12	11.9	19.2
45 < 63 µm	3.7	5.3	4.4	4.5	4.9	3.4
63 < 125 µm	6.5	5.2	5.6	5.2	7.5	6.8
125 < 250 µm	3	3.4	5	3.8	2.8	2.9
250 < 500 µm	3.1	3.7	6.5	4.7	3.1	3.6

Korrelgrootte %	1A	1B	2A	2B	3A	3B
500 < 1.000 µm	5.3	6.8	8.7	7.1	6.7	6.1
1.000 < 2.000 µm	10.9	14.3	9.2	11.2	14.3	14.1
> 2.000 µm	12.6	17.7	11.3	19.9	18.8	20.7
totaal	100	100	100	100	100	100

Tabel I.4 Chemisch-ecologische parameters van het droge stof gehalte

Parameter	Eenheid	1A	1B	2A	2B	3A	3B
calcium	Ca	g/kg ds	48	45	15	41	49
ijzer	Fe	g/kg ds	27	25	10	26	27
kalium	K	g/kg ds	4.5	3.8	1.7	4.2	4.3
magnesium	Mg	g/kg ds	8	7.6	2.7	7.2	7.6
natrium	Na	g/kg ds	0.67	0.64	0.78	0.71	0.54
fosfor totaal	P	g/kg ds	0.75	0.73	0.27	0.68	0.66
fosfor totaal	PO4	g/kg ds	2.3	2.2	0.82	2.1	2
fosfor totaal	P2O5	g/kg ds	1.7	1.7	0.61	1.6	1.5
zwavel	S	g/kg ds	7.2	6.7	2.5	6.2	5.6
zwavel als sulfaat	SO4	g/kg ds	22	20	7.4	19	17
P-plant beschikbaar	P	mg P/kg	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
P-bodemvoorraad	P-Al	mg P2O5/100 g	12	17	9	11	8
N-Kjeldahl	N	g/kg ds	7	5.5	3.1	5.4	6.5
N totaal	N	g/kg ds	7	5.5	3.1	5.4	6.5
nitraat	NO3-N	mg/kg ds	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
nitraat	NO3	mg/kg ds	< 9	< 9	< 9	< 9	< 9

Tabel I.5 Chemisch-ecologische parameter van het porievocht

Parameter	Eenheid	1A	1B	2A	2B	3A	3B
calcium	Ca	mg/L	190	150	140	140	180
ijzer	Fe	mg/L	29	26	17	20	36
magnesium	Mg	mg/L	43	38	31	31	52
fosfor totaal	P	mg/L	0.18	0.29	0.08	0.12	< 0.05
fosfor totaal	PO4	mg PO4/L	0.56	0.89	0.25	0.37	< 0.15
fosfor totaal	P2O5	mg P2O5/L	0.42	0.67	0.18	0.27	< 0.12
zwavel	S	mg S/L	1.8	1.8	2.3	2.3	3.1
zwavel als sulfaat	SO4	mg SO4/L	5.5	5.3	6.8	7	9.2
pH	pH	-	8.1	8.2	8	7.9	8

Parameter		Eenheid	1A	1B	2A	2B	3A	3B
stikstof volgens Kjeldahl	N-Kjeldahl	mg/L	12	12	12	11	37	34
ammonium	NH4-N	mg N/L	9.5	9.2	9.3	9.3	35	31
ammonium	NH4	mg/L	12	12	12	12	45	40
chloride	Cl	mg/L	140	130	130	130	130	130
nitraat	NO3-N	mg N/L	1.3	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
nitraat	NO3	mg/L	5.7	< 0.9	< 0.9	< 0.9	< 0.9	< 0.9



BIJLAGE: WATERSTANDSVERLOOP DUN SLIB COMPARTIMENTEN

Afbeelding II.1 Overzicht luchtfoto's (0,5 m Superview) van 13/07/2020 t/m 04/10/2021. Geraadpleegd van Satellietdataportaal 2021



