

Blue Carbon in het Verdronken Land van Zuid-Beveland.

J. van Belzen, T.J. Bouma & T. Ysebaert

NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research



Blue Carbon in het Verdronken Land van Zuid-Beveland.

J. van Belzen, T.J. Bouma & T. Ysebaert

Keywords: Natuurherstel, Blue Carbon, Koolstofvastlegging, Oosterschelde, Sediment, Zandhonger, Intergetijdengebieden, Schorren, Kwelders

In opdracht van:



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Natuurmonumenten
t.a.v.: Angela Duijndam
Oostdijkseweg 81A
3252LM Goedereede

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Beleidsondersteunende onderzoeksthema 'Klimaatenvoloppe Klimaatslim Bos, Natuur en Hout'

Graag als volgt citeren:

van Belzen, J.; Bouma, T.J. & Ysebaert, T. (2020). Blue Carbon in het Verdronken Land van Zuid-Beveland. NIOZ Report 2020-03. NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research: Yerseke. 63 pp.

<https://doi.org/10.25850/nioz/7b.b.z>

Dankwoord

In het voorliggende rapport vindt u onderzoek naar Blue Carbon in het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. *Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema ‘Klimaatvelop Klimaatslim Bos, Natuur en Hout’.*

Hierbij willen we onze speciale dank uitspreken aan de constructieve en inhoudelijke terugkoppelingen die we hebben mogen ontvangen vanuit de begeleidingscommissie. Vanuit Natuurmonumenten werd de opdracht begeleid door Angela Duijndam, ondersteund door Paul Vertegaal en Frans Vlieg. Ze hebben het onderzoek kritisch gevolgd. Verder ontvingen we daarbij aanvullende feedback van Frans van Zijderveld, Gert de Groot en Roef Mulder. Ook bedanken we Helga van der Jagt en Gerlof Hoefsloot van Bureau Waardenburg (BuWa) waar veelvuldig op plezierige wijze mee van gedachte is gewisseld en afgestemd om op één lijn te komen met de twee uitkomsten van de andere blue carbon-projecten binnen Klimaat Envelop 2019 (KE2019) die ze uitvoerden. Als laatste willen we Twiga van der Werf bedanken voor het organiseren van de Blue Carbon workshop in Lelystad, het verder faciliteren van de uitwisseling van kennis tussen het NIOZ en BuWa en de feedback op de tussentijdse concepten van deze rapportage.

Inhoud

Samenvatting.....	7
Begrippenlijst & afkortingen	9
1. Inleiding	15
1.1. Koolstofvastlegging - Blue Carbon.....	16
1.2. Andere ecosysteemdiensten	17
1.3. Achtergrond.....	17
1.4. Doel van deze studie	17
1.5. Onderzoeksvragen.....	19
1.6. Leeswijzer	19
2. Dynamiek van schorren en Blue Carbon	21
2.1. Introductie	21
2.2. Conceptueel model dynamiek van schorren en slikken	23
2.3. Koolstofvastlegging (Blue Carbon) in schorren.....	25
3. Ontwikkelingen van het Verdrongen land van Zuid-Beveland	31
3.1. Beschrijving en grootschalige ontwikkelingen Oosterschelde.....	31
3.2. Ontwikkelingen in schorareaal en -hoogte.....	33
3.3. Inschatting Blue Carbon bijdrage.....	34
4. Verkenning mogelijkheden voor stimuleren koolstofvastlegging en andere ecosysteemdiensten.....	39
4.1. Buitendijkse maatregelen	39
4.1.1. Steenbestorting	40
4.1.2. Rijshouten dammen	41
4.1.3. Aanplant.....	41
4.1.4. Geotextiel.....	43
4.1.5. BESE-structuren	45
4.1.6. Suppleties & slibmotor	46

4.1.7. Begrazingsbeheer.....	48
4.2. Binnendijkse maatregelen	49
5. Modelling van Blue Carbon in schorren en slikken	53
5.1. Doel van de modellering	53
5.2. Model beschrijving.....	53
5.3. Model analyse	54
5.4. Model resultaten en discussie.....	55
6. Conclusies en aanbevelingen	59
6.1. Conclusies	59
6.2. Aanbevelingen.....	62
7. Literatuur.....	65

Samenvatting

Binnen het kader van de zogenaamde Klimaat Envelop 2019 (KE2019) voor natte natuur wordt onderzocht of het vastleggen van koolstof door onder andere schorren (en kwelders) en andere mariene ecosystemen - ook wel 'Blue Carbon' genoemd - kansen biedt om natuurontwikkeling en klimaat mitigatie te combineren. In het geval er emissiereductie kan worden behaald, is het eventueel mogelijk om hier koolstofcertificaten aan te verbinden en op deze wijze natuurprojecten te initiëren die anders niet van de grond zouden komen. Om deze mogelijkheden verder te verkennen is gekeken naar een gebied waar in een eerdere studie een groot Blue Carbon potentieel werd ingeschat: het Verdrunken Land van Zuid-Beveland. Dit schorregebied in de Kom van de Oosterschelde, kampt al vele decennia met afkalving als gevolg van de zandhonger. In het verleden is een deel van de schorrand vastgelegd met stenen dammen om deze afkalving te verminderen. Maar een groot deel van de schorrand is nog steeds onbeschermd en erodeert. Hier liggen mogelijk kansen voor behoud van natuur en de bijbehorende ecosystemendiensten zoals de rol van schorren in waterveiligheid. Mogelijk kan een goede Blue Carbon potentie bijdragen om tot natuurontwikkelingsmaatregelen te komen waarbij de schorranderosie wordt gereduceerd en schorontwikkeling wordt gestimuleerd.

Om tot een goede inschatting te kunnen komen of Blue Carbon een bijdrage kan leveren aan natuurontwikkeling van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland is het relevant om te weten wat de huidige staat van het gebied is en wat de oorzaken van de ontwikkeling in de afgelopen decennia zijn. Verder is het nodig om de hoeveelheid koolstof die in het gebied ligt opgeslagen te weten en welke bijdrage het gebied in de toekomst zou kunnen leveren aan de koolstofvastlegging onder huidig en aangepast beheer, daarbij rekening houdend met zeespiegelstijging. Daarvoor worden mogelijke maatregelen voor het reduceren van schorranderosie en het stimuleren van schorontwikkeling in dit gebied in kaart gebracht. Daarbij worden zowel naar buitendijkse als binnendijkse maatregelen gekeken.

De schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland bestaan uit Rattekaai (131 ha) en Roelshoek (23 ha). De huidige staat van deze schorren en de ontwikkelingen in de afgelopen decennia, alsmede de huidige koolstofvastlegging, zijn op basis van recente literatuur en gegevens ingeschat. Mogelijkheden voor maatregelen voor het reduceren van schorranderosie en stimuleren van schorontwikkeling zijn op basis van literatuur en ervaring opgedaan binnen het NIOZ in kaart gebracht. Vervolgens zijn met behulp van een simpel biogeomorfologisch model inschattingen gemaakt van de koolstofvastlegging voor de komende 50 jaar. Daarbij zijn inschattingen gemaakt van de ontwikkelingen in koolstofvastlegging voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's en bij verschillende maatregelen tot reductie van de schorranderosie.

Momenteel eroderen de schorranden nog met 0,45 – 0,6 m/jaar. De verwachting is dat de schorranderosie in de toekomst gaat toenemen door de afname van de hoogte van het slik met 2,5-3 mm/jaar als gevolg van de zandhonger, waardoor grotere golven de schorrand kunnen bereiken. Opmerkelijk is wel dat de schorren nog steeds ophogen met 6 – 7,7 mm/jaar ondanks de lage gemiddelde sediment beschikbaarheid in de waterkolom. Er wordt echter nog voldoende sediment in suspensie gebracht door golven tijdens stormachtige condities waardoor sediment op de schorren blijft sedimenteren. Door deze bodemophoging in het schor is de netto koolstofvastlegging momenteel positief (627 ton CO₂-eq/jaar), ondanks dat er ook veel koolstof in de schorrenbodem verloren gaat door schorranderosie (-168 ton CO₂-eq/jaar). De koolstofvastlegging zou dus zo'n 27% hoger kunnen zijn als schorranderosie wordt tegen gegaan.

Het is aan te bevelen om maatregelen te nemen tot erosiereductie van de schorrand en het stimuleren van schorontwikkeling. Op dit moment verliezen de schorren oppervlakte door schorranderosie en is er weinig tot geen herstel door vestiging en aangroei. Hierdoor verliezen de schorren op termijn ook andere belangrijke ecosysteemdiensten, zoals die voor de waterveiligheid. Maatregelen om verdere erosie van de schorrand te reduceren leveren ook direct een positieve en additieve bijdrage tot de netto koolstofvastlegging van de schorren. Vanuit de modelering is duidelijk dat op termijn (rond 2035) de balans van netto vastlegging naar netto emissie kan omslaan. Afhankelijk van het succes en de mate van implementatie van de maatregelen wordt dit omslagpunt tientallen jaren uitgesteld of helemaal tegengegaan. Maatregelen zoals het aanleggen van rijshouten dammen, en/of het aanplanten van slijkgras met behulp van geotextiel of biologische afbreekbare structuren worden als meest geschikte opties gezien om schorranderosie te reduceren en schorontwikkeling op gang te brengen. Het is daarom aan te bevelen in te zetten op het ontwikkelen van een pilot waarbij deze verschillende methoden worden getest op effectiviteit.

Op langere-termijn is het de verwachting dat door de zandhonger maatregelen om schorontwikkeling te stimuleren en schorranderosie te reduceren niet meer afdoende zullen zijn om de schorren te behouden. Er is onderzocht wat de mogelijkheden zijn om de schorren binnendijks te laten ontwikkelen. Binnendijks is er een grote potentie om schorren te ontwikkelen en daarmee veel sediment vast te leggen. Een kanttekening daarbij is de sedimentbeschikbaarheid in de Oosterschelde. Het feit dat de schorren in dit deel van de Oosterschelde nog steeds ophogen door resuspensie van het sediment door golven op de voorliggende slikken biedt mogelijk wel kansen tot binnendijkse ontwikkelingen, eventueel aangevuld met suppleties.

Er is een grote onzekerheid over de hoeveelheid vastgelegde koolstof die meegerekend mag worden als vermeden uitstoot. Dat komt doordat de samenstelling van de koolstof die opgeslagen ligt in het Verdronken Land van Zuid-Beveland niet goed bekend is. Om hier verbetering in te brengen is meer kennis nodig over de herkomst en dynamiek van de koolstof in deze schorren. Dit kan door de bodemopbouw te onderzoeken en de verschillende fracties en ouderdom van de koolstof hierin nader te bepalen. Hand in hand hiermee is het aan te bevelen om de modellering rond schordynamiek en koolstofvastlegging te verbeteren. Daarbij zal moeten worden gekeken hoe verschillende aspecten zoals de herkomst, ouderdom en stabiliteit van de koolstof meer expliciet geïntegreerd kunnen worden. Hierdoor wordt het mogelijk om gericht te werken aan kennisontwikkeling naar de herkomst en dynamiek van koolstofvastlegging in schorren. Kennis die nodig is om beter in te kunnen schatten wat het additioneel effect is van beheer- en ontwikkelingsmaatregelen van schorren op de koolstofvastlegging, alsmede effecten van klimaatverandering zoals zeespiegelstijging.

Begrippenlijst & afkortingen

Begrippen*

Algen

Eencellige organismen die op de bodem of in de waterkolom CO₂ uit het water opnemen en omzetten in levend organisch materiaal met behulp van licht.

Algenproductie

Zie 'primaire productie'.

Allochtoon koolstof

Organische koolstof geproduceerd buiten het ecosysteem van aandacht. In het geval van schorren is allochtoon koolstof dus van terrestrische (ecosystemen op het land) of mariene afkomst (bv. primaire productie in de waterkolom). Het gaat hier dus om de oorsprong van de geproduceerde koolstof.

Anoxia

Zuurstofloosheid. De bodem of waterkolom is anoxisch als er (bijna) geen zuurstof meer aanwezig is. Deze condities kunnen ontstaan als gevolg van oxidatiereacties, bv. wanneer organische koolstofverbindingen worden omgezet tot CO₂ en daarbij alle beschikbare zuurstof (O₂) verbruikt is.

Autochtoon koolstof

Organische koolstofverbindingen geproduceerd in het ecosysteem. In het geval van schorren gaat het dan om de biomassa van planten of bodemalgen. Het gaat hier dus om de oorsprong van de geproduceerde koolstof.

Binnendijks

Het gebied aan de landzijde van de dijk.

Biodiversiteit

In dit rapport bedoelen we hiermee de verscheidenheid (variatie) van alle soorten in het ecosysteem. De biodiversiteit is groter als er meer verschillende soorten organismen aanwezig zijn.

Biomassa

De massa van plantaardig en/of dierlijk materiaal die op een plaats wordt aangetroffen. Dit kan op individueel niveau, per organisme b.v., bepaald worden of als collectief of op schaal van een populatie of ecosysteem. De biomassa is groter als er een grotere massa aanwezig is. Biomassa wordt uitgedrukt als een massa 'vers gewicht' of 'drooggewicht'. Ook kan biomassa uitgedrukt worden in (kilo)grammen koolstof.

Bodemalgen

Algen die op de bodem leven van slikken, platen en tussen de vegetatie op schorren. Bodemalgen worden ook wel aangeduid als benthische algen of microfythobenthos.

Climaxstadium

Het stabiele eindstadium van de successie van vegetatietypen in een gebied. Zie ook 'successie'.

Climaxvegetatie

De begroeiing in het climaxstadium.

Decompositie

Het proces waarbij door oxidatie van organisch materiaal zuurstof (O_2) verbruikt wordt en koolstofdioxide (CO_2) vrijkomt.

Estuariene natuur

In een estuarium ontstaan door de variaties in de afvoer van zoet rivierwater en het getij met zout zeewater wisselingen in abiotische omstandigheden: gradiënten tussen zoet en zout, nat en droog, wild en rustig stromend water en gradiënten tussen zandige en slibrijke bodems. Door deze grote variatie in abiotische omstandigheden ontstaat voor een estuarium kenmerkende natuur met verschillende habitats of ecotopen en een typische biodiversiteit.

Estuarium

Een verbreed, veelal trechtervormige overgangsgebied van rivier naar zee waar het getijverschil waarneembaar is. In een estuarium worden het zoete rivierwater en het zoute zeewater gemengd, zodat een geleidelijke overgang van zoet naar brak en zout water ontstaat.

Fotosynthese

Het proces waarbij licht wordt ingevangen en koolstof vastgelegd in organische moleculen. Dit proces staat aan de basis van primaire productie en de ontwikkeling van biomassa.

Getijslag

Het verschil tussen hoog- en laagwater.

Geul

De geulen zijn de diepere delen (sublitoraal) waar in het estuarium het zeewater door wordt aan- en afgevoerd.

Hoogwater

De maximale waterstand welke aan het eind van een vloedperiode bereikt wordt.

Intergetijdengebied

Het gebied dat droogvalt bij laagwater en overstroomt bij hoogwater. De lagere delen zijn zandig en slibrijk en vaak onbegroeid en overstroomd vrijwel ieder getij. Ze staan bekend als de zandplaten en de slikken of wadden. De hogere delen kunnen begroeid zijn en overstroomd alleen bij hogere waterstanden. Deze begroeide delen worden ook schorren of kwelders genoemd.

Kwelder

Zie 'Schor'.

Laagwater

De lage waterstand die aan het einde van de eb-periode bereikt wordt.

Labiël koolstof

Organische koolstofverbindingen die snel worden afgebroken, zoals algen en eiwitten. Het gaat hier dus om de stabiliteit van de geproduceerde organische koolstofverbindingen.

Litoraal

De zone tussen laag- en hoogwater. Zie ook 'intergetijdengebied'.

Pionierschor/pionierzone

Het jonge schor waar de eerste planten zich op de anders kale plaat of het kale slik vestigen. Dit is een overgangsfase die met de tijd overgaat van onbegroeide plaat of slik naar een volledig begroeid schor.

Pionierbegroeiing/pioniervegetatie

De vegetatie in de pionierzone.

Plaat

Onbegroeid of spaarzaam begroeid gebied dat bij laag water droogvalt en bij hoog water overstroomt, omringd door geulen.

Primaire productie (algenbloei, algengroei of algenproductie)

Primaire productie is het proces waarbij planten groeien, met behulp van licht en nutriënten. In het estuarium gaat het vooral om de groei van algen. Dit proces brengt organisch materiaal en zuurstof in het water.

Recalcitrant koolstof

Organische koolstofverbindingen die moeilijk worden afgebroken, zoals houtstof (lignine) en meer complexe koolstofverbindingen. Het gaat hier dus om de stabiliteit van de geproduceerde organische koolstofverbindingen. Omzetting naar het broeikasgas koolstofdioxide (CO₂) verloopt langzaam.

Redoxpotentiaal

De redoxpotentiaal, ook wel reductie-oxidatie-potentiaal, is een maat voor de tendens van een chemische stof om elektronen te verliezen of juist te ontvangen. Zo bepaalt dit potentiaal bv. dus of een organische koolstofverbinding gemakkelijk kan oxideren, de chemische reactie van belang voor de decompositie van organisch materiaal.

Saliniteit

Het zoutgehalte van het water.

Schor

Hoger gelegen delen die alleen bij hogere hoogwaters helemaal onder water lopen. Schorren zijn volledig begroeid, in tegenstelling tot slikken en platen. Schorren worden in het noorden van Nederland veelal 'kwelders' genoemd.

Slik

Meestal slibrijke, onbegroeide delen van de oevers die bij vloed tweemaal daags overspoeld worden. Bij laag water vallen de slikken droog.

Sublitoraal

De zone die permanent onder water staat. Ook wel 'subtidaal' genoemd.

Troebelheid

De mate waarin licht in het water kan doordringen. De troebelheid is in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid zwevend stof in het water: hoe meer zwevende stof, hoe troebeler het water. Ook de aard van het zwevend stof (fijn of grof, organisch of niet-organisch), de vorming van grotere vlokken en opgeloste stoffen beïnvloeden de troebelheid

Veek

Op zee of rivier drijvend afval. Meestal gaat het om dood organisch afval zoals takken, stengels en algen. Veek kan aanspoelen als vloedmerk op dijken of de schorren.

Verstarring

De vorm en ligging van geulen, platen slikken en schorren verandert steeds minder in de loop van de tijd.

Versteiling

Versteiling ontstaat doordat de diepe delen (de geulen) dieper worden en/of de hoge delen (het intergetijdengebied) hoger.

Vertroebeling

Toename van de troebelheid.

Wad

Zie 'Slik'

Zeespiegelstijging

De stijging van de gemiddelde waterstand op zee (gemiddeld zeeniveau). Momenteel is de zeespiegelstijging op de Noordzee bijna 2 mm per jaar.

*) Begrippen beschrijving op basis van VNSC-rapport systeemanalyse Schelde estuarium (2019): <https://www.vnsc.eu/uploads/2019/05/rapport-systeemanalyse-schelde-estuarium-lr.pdf>

Afkortingen

C

Koolstof. We gebruiken het chemische symbool voor koolstof (Carbon).

CO₂

Koolstofdioxide. Het product van verbranding en respiratie (ademhaling). CO₂ komt o.a. vrij wanneer organisch materiaal afbreekt door decompositie.

SSC

Gesuspenseerd sediment in de waterkolom (Suspended Sediment Concentration). Wordt ook wel als zwevende stof in de waterkolom aangeduid. Dit wordt bepaald als het totale drooggewicht van het aanwezige sediment per volume-eenheid (g/L).

GDNK

Green Deal Nationale Koolstofmarkt

GHW

Gemiddeld hoog water.

GHWD

Gemiddeld hoog water tijdens doottij.

GHWS

Gemiddeld hoog water tijdens springtij.

GZN

Gemiddeld Zeeniveau.

KE2019

Klimaat Envelop 2019.

NDVI

Normalized Difference Vegetation Index. Dit is een index die gebruikt wordt om een indicatie te geven van de bovengrondse biomassa op basis van lichtreflectie in het rode en nabij-infrarood licht. Vaak wordt deze data ingewonnen vanuit lucht- of satellietfoto's.

O₂

Zuurstof. O₂ is nodig om organisch materiaal af te breken (decompositie) en CO₂ te vormen.

1. Inleiding

Door menselijke activiteiten is de concentratie koolstofdioxide (CO₂) in de atmosfeer significant toegenomen. Momenteel zitten we op een gemiddelde van 414 ppm (maart 2020 op <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>), wat een toename van 48% is ten opzichte van de pre-industriële concentratie van 280 ppm (Raupach & Canadell, 2008). Als gevolg van deze toename van CO₂ in de atmosfeer neemt de gemiddelde temperatuur op aarde toe wat allerlei negatieve gevolgen heeft voor ecosystemen en leidt tot een verhoging van de zeespiegel (IPCC, 2018). Om de uitstoot van CO₂ naar de atmosfeer te beperken is in 2015 in het akkoord van Parijs afgesproken om de emissies terug te brengen met als doel de mondiale temperatuurstijging onder de 2°C te houden. In het kader van dit akkoord zijn er verschillende initiatieven om tot emissiereductie te komen in Nederland. In 2019 zijn hierover afspraken gemaakt tussen de overheden en allerlei maatschappelijke doelgroepen, in het Klimaatakkoord.

In 2017 hebben een aantal organisaties zich verenigd in de Green Deal Nationale Koolstofmarkt (GDNK). Het doel is om een monetaire waarde toe te kennen aan interessante projecten die binnen het huidige klimaatbeleid in Nederland nog niet uit zichzelf tot stand komen. Zulke projecten krijgen daartoe koolstofcertificaten die verkocht kunnen worden aan kopers die ook iets extra's willen doen door hun resterende emissies te compenseren. Inmiddels is hiervoor de Stichting Nationale Koolstofmarkt opgericht die na goedkeuring van projecten zulke koolstofcertificaten kan verstrekken. Het systeem is een kleinschalig, nationaal en vrijwillig. Men hoopt dat met het toekennen van een monetaire waarde aan emissiereducties duurzame en milieuvriendelijke projecten op vrijwillige basis mogelijk kunnen worden gemaakt die zonder deze toegevoegde waarde niet geïnitieerd zouden kunnen worden. Het uitgeven van koolstofcertificaten zal hiervoor een mogelijkheid zijn. Naast energieprojecten vallen ook groene en natuurprojecten onder het systeem ingeval er sprake is van emissiereducties en/of koolstofvastlegging. Natuurorganisaties zoals Natuurmonumenten willen zich daarom hiervoor aansluiten bij de certificeringsmethodiek van de Green Deal Nationale Koolstofmarkt (www.nationaleco2markt.nl).

Binnen de zogenaamde Klimaat Envelop 2019 (KE2019) voor natte natuur wordt er gekeken wat de mogelijkheden zijn om extra toegevoegde waarde toe te kennen aan verschillende klimaat mitigerende eigenschappen van ecosystemen. Het vastleggen van koolstof door mariene ecosystemen, ook wel 'Blue Carbon' genoemd, en daarmee mitigeren van koolstofemissies heeft hierin grote potentie. De Blue Carbon projecten uit de KE2019 hebben vooral tot doel om te onderzoeken hoe deze projecten het (beter/meer) vasthouden van koolstof kunnen combineren met natuurdoelen. Dergelijke Blue Carbon projecten sluiten mogelijk goed aan bij de hierboven genoemde Green Deal Nationale Koolstofmarkt. Nader onderzoek is nodig hoe Blue Carbon hierin kan bijdragen. Ook is nader onderzoek nodig om te ontdekken hoe groot de mogelijkheden zijn om extra koolstof vast te leggen in schorren en kwelders t.o.v. de huidige situatie. Naast algemeen onderzoek (Hoefsloot et al., 2020) zoeken o.a. Natuurmonumenten in het kader van de KE2019 uit in concrete gebiedspilots wat de mogelijkheden zijn voor het uitgeven van koolstofcertificaten door het nemen van erosie verminderende maatregelen die de bestaande schorren beter moeten beschermen tegen afkalving en het stimuleren van schorvorming. Het Verdronken Land van Zuid-Beveland,

gelegen in de Oosterschelde nabij de Oesterdam, is er daar één van. De andere gebiedspilot is het project Peazemmerlannen, aan de Friese Waddenkust (Van der Jagt et al., 2020).

1.1. Koolstofvastlegging - Blue Carbon

De term “Blue Carbon” verwijst naar koolstof die vastgelegd wordt in mariene (blauwe) ecosystemen. Vooral kustecosystemen begroeid met vegetatie worden aangewezen als potentieel belangrijke Blue Carbon ecosystemen (McLeod et al., 2011). Denk hierbij aan mangroven in de tropen, en aan zeegrasvelden of zoutwatermoerassen in zowel tropische als meer gematigde gebieden. In Nederland zijn deze laatste gebieden, die in het noorden van Nederland veelal kwelders en in het zuiden schorren genoemd worden, een potentieel interessante bron voor het vastleggen van CO₂ uit de atmosfeer. Zo blijkt uit een recente studie dat Nederlandse kwelders en schorren per jaar ongeveer 60.000 ton CO₂ vastleggen en dus potentieel kunnen dienen als locaties om CO₂-uitstoot te compenseren (Tamis & Foekema, 2015, Teunis & Didderen, 2018).

De potentie van Blue Carbon ecosystemen om koolstof vast te leggen zit met name in de hoge biomassa-productie aan de ene kant en de natte zoute omgeving aan de andere kant. Door de groei van planten komt dood organisch materiaal in de bodem. Enerzijds doordat wortels deels afsterven en anderzijds omdat de bovengrondse vegetatie zorgt voor het invangen van organisch materiaal en sediment (Kirwan & Mudd, 2012, van de Broek et al., 2018). Vervolgens ontstaat door beperkte drainage een zuurstofarme omgeving waardoor afbraak van het organisch materiaal zeer traag verloopt. De zilte omgeving werkt verder remmend op de anaerobe afbraak, die in zoete systemen tot emissies kan leiden van het sterke broeikasgas methaan (McLeod et al., 2011, Spivak et al., 2019). Dit zijn dus ideale condities om koolstof uit de atmosfeer af te vangen en te conserveren, al zijn er recent vragen gerezen over de algemene geldigheid van deze aanname (Al-Haj & Fulweiler, 2020)

De aanwezigheid van vegetatie is de belangrijkste reden dat Blue Carbon ecosystemen disproportioneel veel koolstof kunnen vastleggen. In welk compartiment van het ecosysteem de koolstof wordt vastgelegd is verder ecosysteem-specifiek. In het geval van mangroven bijvoorbeeld wordt veel koolstof vastgelegd in de bovengrondse biomassa, in de stam en de boom. Meer nog dan in de bodem en dit is ook een relatief stabiel reservoir (McLeod et al., 2011). In het geval van zeegrassen en kustmoerassen wordt koolstof in meerderheid vastgelegd in de bodem waarin de planten wortelen (Duarte et al., 2013, McLeod et al., 2011). De bovengrondse biomassa kan hier niet als een stabiel reservoir gezien worden daar 40-80% van de bovengrondse biomassa elk jaar afsterft en verdwijnt (Bellis & Gaither, 1985). Door de bodemvormende processen ontstaat echter wel een stabiel reservoir in de bodem, waar zowel lokaal geproduceerd (ondergrondse biomassa, benthische algen en detritus o.a. afkomstig van afgestorven en afgebroken bovengrondse biomassa) als ook allochtoon koolstof afkomstig van buiten het ecosysteem voor langere tijd opgeslagen kan worden. Voor een nadere beschrijving en discussie over koolstofvastlegging verwijzen we naar sectie 2.3 van dit rapport.

Specifiek voor de Provincie Zeeland ligt 50% van alle koolstof opgeslagen in ongeveer 2% van het landoppervlak (Lof et al., 2017). Dit kleine aandeel landoppervlakte komt volledig voor rekening van de schorren in Zeeland, waar het Verdronken Land van Zuid-Beveland een aandeel in heeft. De schorren laten hiermee hun interessante potentieel voor koolstofvastlegging in deze provincie zien. Maatregelen die leiden tot het beter vasthouden van koolstof of het tegengaan van erosie van schorren en stimuleren van de

schorontwikkeling kunnen dus een relevante bijdrage leveren aan het koolstofreservoir van Zeeland.

1.2. Andere ecosysteemdiensten

Schorren vervullen naast het vastleggen van koolstof ook verschillende andere belangrijke functies of ecosysteemdiensten. Tot de verbeelding spreekt de rol van schorren in de waterveiligheid (Bouma et al. 2014; Temmerman et al. 2013). Doordat de schorvegetatie slib en zand invangt, neemt de waterdiepte af met demping van golven en de stormvloed tot gevolg. De bovengrondse plantenstructuren zorgen verder nog voor aanvullende frictie die golven en waterstroming verder afremt (Bouma et al 2005, 2010). Door de golfdempende werking hoeven de achterliggende dijken minder hoog worden opgetrokken omdat er minder golfoverslag verwacht mag worden (Vuik et al. 2019). Dit heeft een aanzienlijke kostenbesparing tot gevolg. Daarnaast zorgt het pakket aan zand en slib voor extra stabiliteit van de dijk en vermindert de kans op kustlijnerosie (Temmerman et al. 2013).

Een andere belangrijke ecosysteemdienst is het zuiveren van water door het vastleggen en wegnemen van nutriënten (Boerema et al. 2016). Fosfor en stikstof in de waterkolom worden afgevangen, voor een deel wederom door de aanwezigheid van planten die nutriënten, gebonden aan slibdeeltjes, op de bodem neerslaan en vervolgens vastleggen. Denitrificatie zorgt voor een verder reductie van de nutriëntenbelasting (Boerema et al. 2016). Het neerslaan van slib en daarmee het opslaan van volumes sediment levert ook een positieve bijdrage aan de waterkwaliteit. Hierdoor blijft er minder zevend materiaal in de waterkolom, wat het doorzicht verbeterd en vervolgens een positieve uitwerking op de primaire productie en de rest van het voedselweb heeft (Moens et al., 2001).

Hoe deze kustecosystemen en hun Blue Carbon eigenschappen reageren op zeespiegelstijging en klimaatverandering is intrinsiek lastig in te schatten omdat landschapsvormende processen en biologische processen op vergelijkbare tijdschalen werken en nauw met elkaar verweven zijn.

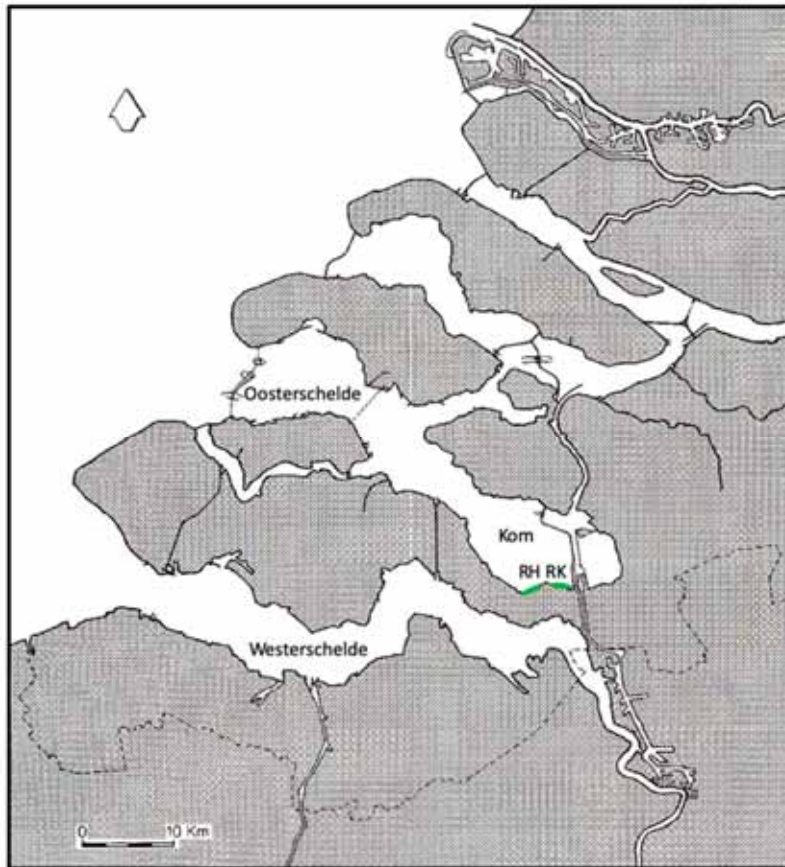
1.3. Achtergrond

Natuurmonumenten heeft het NIOZ gevraagd om onderzoek te doen naar de schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland (Rattekaai en Strooidorpepolder/Roelshoek, Fig.1.1) in het kader van de “Klimaat Envelop 2019 Bomen, bos, natuur”. In deze envelop wordt o.a. gekeken wat de mogelijkheden zijn van natte natuur voor klimaatadaptatie en -mitigatie, zogenaamde klimaatbuffers (<https://www.klimaatbuffers.nl/>, Vertegaal et al., 2019). Natte natuur kan namelijk naast het bieden van leefgebied voor verschillende plant- en diersoorten een rol vervullen in het bufferen en reguleren van het klimaat. Denk aan het langer vasthouden van water in natuurgebieden (natuurlijke spons), het bieden van verkoeling tijdens hitte (groene airco), waterveiligheid (dynamische kust) of koolstofopslag (koolstof-sink). Bij dit verkennend onderzoek zal de focus liggen op het in kaart brengen van de mogelijkheden van koolstofvastlegging in Zuid-Beveland.

1.4. Doel van deze studie

Het project heeft als doel een redelijke inschatting te geven van de hoeveelheid koolstof die momenteel opgeslagen ligt in de schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland.

Daarnaast werd als doel gesteld te onderzoeken hoeveel CO₂ er potentieel vastgehouden kan worden in dit gebied en hoe deze opslag mogelijk vergroot kan worden door maatregelen om schor te beschermen tegen afslag of ontwikkeling van nieuw schor te stimuleren. Hierbij focussen we op het effect van de maatregel zelf en niet op de mogelijke emissies als gevolg van de activiteiten nodig voor het implementeren van de onderzochte maatregelen.



Figuur 1.1. Ligging van de Schorren van het Verdronken Land van Zuid-Beveland (groen) in de Oosterschelde. Het schor bij Strooidorperpolder (ook wel Roelshoek, RH) ligt westelijk. Rattekaai (RK) is het oostelijke deel van het schor.

1.5. Onderzoeksvragen

Het onderzoek zal zich in deze eerste fase beperken tot een verkennende studie op basis van beschikbare gegevens in combinatie met het nader ontwikkelen van een conceptuele biogeomorfologische modellering. Er zullen dus in dit stadium géén extra koolstof bepalingen of andere metingen worden uitgevoerd om de koolstofdynamiek te karakteriseren of het model te valideren. Hiermee is gefocust op de volgende vragen:

- Hoe ontwikkelden de schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland in de Oosterschelde zich in de afgelopen decennia en wat is de huidige status?
 - Wat zijn de oorzaken van deze ontwikkeling?
- Hoeveel koolstof ligt er opgeslagen en hoeveel kan er in de toekomst worden vastgelegd door aangroei of verdwijnt er door erosie?
 - Wat is de potentie voor koolstofvastlegging bij voortzetten van het huidige beheer ('business as usual' of 'baseline') rekening houdend met het effect van zeespiegelstijging.
- Wat zijn de mogelijkheden om door middel van maatregelen schorerosie te verminderen en schorontwikkeling te stimuleren en hierdoor koolstof duurzaam (lange termijn) vast te leggen?
 - Waar liggen mogelijkheden buitendijks en binnendijks?

1.6. Leeswijzer

In het voorliggende rapport vindt u de resultaten van ons verkennende onderzoek naar de mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de schorren van het Verdrunken land van Zuid-Beveland en het certificeren hiervan. Alhoewel de analyses zich focussen op dit gebied in de Oosterschelde, zijn de concepten ontwikkeld met het oog op bredere toepassing naar andere schorren en kwelders.

Om die reden bespreken we allereerst (hfst. 2) de sleutelfactoren die de dynamiek van schorren en slikken bepalen. Om een conceptueel model te ontwikkelen welke de lange-termijn ruimtelijke ontwikkeling van schorren reël beschrijft, is een integrale aanpak van de laag- tot hoogwaterlijn nodig. We laten in dit hoofdstuk zien dat de laterale ontwikkeling van schorren, zowel de afkalving door erosie als de kolonisatie van (pionier)vegetatie, voor een belangrijk deel afhankelijk is van de ontwikkeling van de voorliggende slikken. Deze twee factoren bepalen welk deel van het schor variabel is in de tijd (i.e. onderhevig aan afbraak en opbouw) en welk deel als stabiel en geschikt voor Blue Carbon kan worden beschouwd.

Vervolgens (hfst.3) wordt gebied specifiek de ruimtelijke dynamiek van de schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland geanalyseerd en beschreven. In dit hoofdstuk wordt gekeken of veranderingen in de sleutelfactoren zoals sediment beschikbaarheid en blootstelling aan golven de ontwikkelingen in vegetatie en de hoogte van schor en slik kunnen verklaren. Vervolgens worden de gevolgen voor die deze dynamiek heeft op de koolstofvastlegging in het gebied ingeschat.

De mogelijkheden voor beheermaatregelen tot behoud of verdere ontwikkeling van de schorren met het oog op behoud en ontwikkeling van verschillende ecosysteemdiensten die de schorren leveren en de extra koolstofvastlegging worden in hoofdstuk 4 besproken. Allereerst wordt specifiek gekeken naar de mogelijkheden voor buitendijkse maatregelen. Deze inventarisatie zal als uitgangspunt dienen voor verdere uitwerking van een pilot die met

betrokken partijen begin 2020 verder kan worden uitgewerkt. Daarnaast wordt ook gekeken naar de mogelijkheden voor schorontwikkeling binnendijks.

In het kader van deze studie is met behulp van een simpel geomorfologisch model inzicht verkregen in hoe zeespiegelstijging en schorrerosie invloed hebben op de grootschalige dynamiek en de vastlegging van koolstof in de schorren van het projectgebied. Dit model en de uitgevoerde analyse is beschreven in hoofdstuk 5. Met het model is gekeken naar hoe enkele scenario's voor zeespiegelstijging de stabiliteit van schorren en daarmee de koolstofvastlegging beïnvloeden. Tevens zijn enkele scenario's bekeken waarbij maatregelen zijn genomen om erosie van schorren te verminderen.

Tot slot sommen we onze conclusies op aan de hand van het beantwoorden van de onderzoeksvragen en geven we een aantal aanbevelingen hoe koolstofcertificering vorm kan worden gegeven en geven we aan waar er nog vervolgvragen liggen voor onderzoek (hoofdstuk 6).

2. Dynamiek van schorren en Blue Carbon

2.1. Introductie

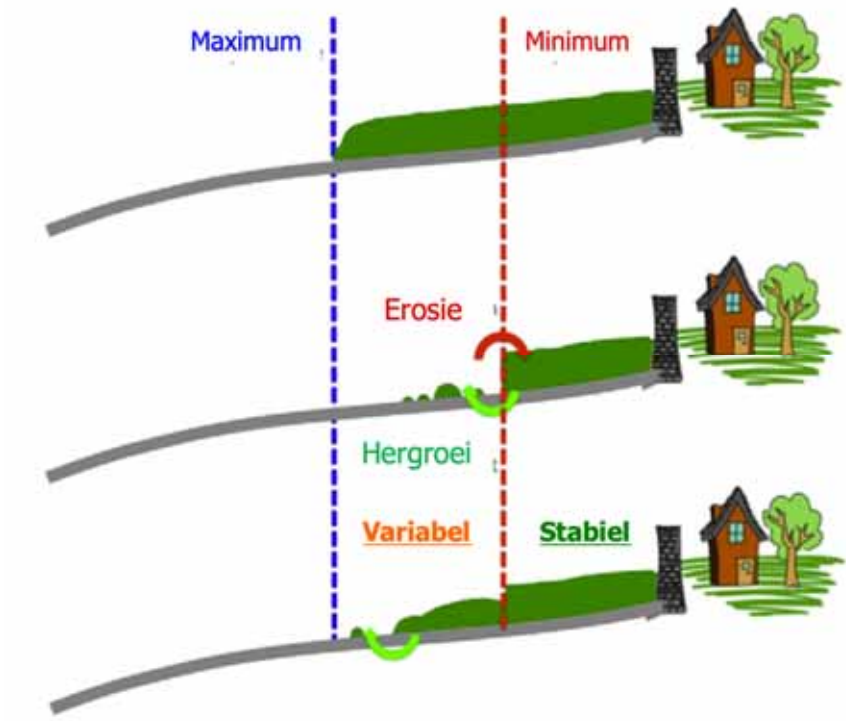
Schorren zijn zoutwatermoerassen, komen voor op de hogere delen van het intergetijdengebied en overstromen voor het grootste deel twee keer per etmaal door het getij (Allen, 2000). In het noorden van Nederland worden deze ecosystemen ook kwelders genoemd. Typisch vinden we de eerste pioniervegetatie boven de 70% droogvalduur en ligt het schorplateau rond de gemiddelde hoogwaterlijn. Maar de pionierzone kan in sommige gebieden zelfs al op een hoogte van bijna 50% droogvalduur gevonden worden (van Belzen et al. 2017). De hoogte waarop de eerste vegetatie zich kan vestigen is voor een groot deel afhankelijk van de blootstelling aan golfslag en de getijdenamplitude (Hu et al., 2015, Balke et al. 2017).

Schorren zijn biogeomorfologische systemen. Dat wil zeggen dat ze ontstaan door de interactie tussen waterstroming, bodemvorming (sedimentatie en erosie) en de planten (Allen, 2000, Schwarz et al., 2018). Planten remmen de hydrodynamische energie waardoor gesuspendeerd sediment uit de waterkolom neerslaat op de bodem (sedimentatie). Daarnaast kunnen planten de stroming van het water ook afbuigen en daarmee versnellen. Die waterversnelling kan de bodem juist eroderen waardoor geulen ontstaan. De planten zorgen dus voor een gevarieerd landschap waarbij bodemophoging in de begroeiing ontstaat en uitslijting naast de begroeiing kan plaatsvinden. Dit heeft ook positieve effecten op de plantengroei zelf. Als planten de bodem ophogen staan ze minder lang in het water wat de groei bevordert en zorgt voor een zichzelf versterkend proces (zogen. positieve terugkoppeling, van de Koppel et al., 2005, van Belzen et al., 2017). Daarnaast zorgt het geulnetwerk voor een goede drainage enerzijds en noodzakelijke aanvoer van voedingsstoffen en sediment anderzijds. Uiteindelijk vormt zo het typische schorrenlandschap van kreken en geulen afgewisseld met veelal een dichte begroeiing van schorrenplanten.

Schorren zijn bijzonder kwetsbaar voor verliezen als gevolg van menselijke activiteiten, klimaatverandering en zeespiegelstijging (Kirwan et al., 2010). In het verleden zijn in veel gebieden in Europa grote oppervlaktes schorren ingepolderd en getransformeerd naar landbouwgrond, omdat het zeer vruchtbare bodem is (Allen, 2000). Ook in Zeeland is in de afgelopen eeuwen het inpolderen van schorren een belangrijke manier van landaanwinning geweest ten koste van het areaal schorren. Er is vaak actief slijkgras aangeplant om landaanwinning te faciliteren, waarna inpoldering volgde. Tussen de aangeplante begroeiing neemt de waterbeweging af waardoor sediment bezinkt en de bodem toeneemt in hoogte. Naast inpoldering t.b.v. de landbouw zijn schorren ook verdwenen voor industriële ontwikkeling en ten gevolge van infrastructuurwerken zoals de Deltawerken. Echter, momenteel komen op sommige plaatsen weer schorren bij door uitpolderingen voor het herstel van estuariene natuur, maar dit gebeurt nog maar op zeer beperkte schaal. Het Rammegors in de Oosterschelde en de projecten Perkpolder, Waterdunen en de Hedwige-Prosperpolder in de Westerschelde zijn hiervan voorbeelden.

Tegenwoordig verandert het nog aanwezige areaal schorren grotendeels door andere processen dan landaanwinning. Zo neemt in de Westerschelde het areaal schorren toe terwijl het areaal in de Oosterschelde daarentegen afneemt (Cozzoli et al., 2017). De huidige veranderingen in schorareaal worden voornamelijk veroorzaakt door grootschalige ingrepen

in de twee estuaria (Cozzoli et al., 2017). In de Westerschelde neemt de waterbeweging toe door de verdieping en verruiming van de watergeul voor de scheepvaart; daardoor kan meer sediment naar hogere delen getransporteerd worden waardoor schorren kunnen ontstaan. In de Oosterschelde daarentegen is door de aanleg van de Oosterscheldekering de waterbeweging afgenomen, waardoor het getij sediment minder goed naar de hogere delen van slikken en zandplaten kan brengen en kalven getijdenplaten af onder de werking van golven. Dit resulteert in een netto transport van sediment naar de geulen. Dit wordt zandhonger genoemd. Ook de schorren in de Oosterschelde ondervinden de effecten van de zandhonger omdat de slikken voor de schorren in hoogte afnemen. Die afname kan voor hogere golfbelasting op de schorrand zorgen en daarmee voor meer erosie van de schorren (Wang et al., 2017). Op sommige plaatsen in de Oosterschelde zijn daarom schorranden vastgelegd met stenen dammen.



Figuur 2.1. Schorren zijn inherent dynamisch door opbouw en afbraakprocessen. Afhankelijk van de lokale sleutelfactoren is een deel van het schor variabel in de tijd en ruimte. Verschillende sleutelfactoren bepalen de locatie van de minimale en maximale schorlengte. Alleen de minimale schorlengte is dat deel waar op de lange termijn vanuit gegaan kan worden voor het leveren van ecosystemendiensten zoals koolstofvastlegging (gemodificeerd naar Bouma et al. 2014).

Ook wanneer de grootschalige condities van een estuarium min of meer gelijk blijven, zijn schorren inherent variabel over de tijd en in de ruimte (Figuur 2.1). Daarom is het van belang een beter begrip van de sleutelfactoren die de dynamiek van schorren bepalen te ontwikkelen. Hoe ver een schor kan uitgroeien (maximale breedte) of erodeert (minimale breedte) is afhankelijk van de lokale condities van de sleutelfactoren. Kennis hierover is dus nodig om in te schatten welk deel van het schor onderhevig is aan (cyclische) variatie en welk deel als stabiel kan worden beschouwd en relevant blijft voor het leveren van de verschillende ecosystemendiensten zoals voor waterveiligheid of koolstofvastlegging (Bouma et al. 2014).

De sleutelfactoren die voor een belangrijk deel schordynamiek bepalen en waar we hieronder dieper op ingaan zijn: (1) sediment beschikbaarheid, (2) blootstelling aan golven en (3) aanwezigheid van vegetatie.

2.2. Conceptueel model dynamiek van schorren en slikken

Voor de interpretatie van de huidige ontwikkeling van de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (hfst.3) en de modellering (hfst.5) gaan we uit van het conceptuele model zoals deze in figuur 2.2 is weergegeven. Hier onderscheiden we in het intergetijdengebied (het gebied dat bij laagwater droogvalt en bij hoogwater onder water staat) schorren en slikken. Schorren (in het noorden van Nederland ook kwelders genoemd) zijn de begroeide delen en liggen hoog in het intergetijdengebied (overstromen relatief kort). De lager liggende (langere overstromingsduur) onbegroeide delen van het intergetijdengebied zijn de slikken (in het noorden ook wadden genoemd).

De belangrijkste hydrodynamische processen die schorren en slikken opbouwen en afbreken zijn de waterbeweging onder invloed van de getijdenwerking en golfslag. Door het getij kan sediment in suspensie gebracht worden en blijven en vervolgens getransporteerd worden van de lagere naar de hogere delen (van de geulen in het sublitoraal naar het litoraal). Mits voldoende sediment beschikbaar is kan dit sediment worden afgezet op het slik of schor waardoor deze in hoogte toenemen. Wanneer er onvoldoende sediment beschikbaar is, stabiliseert de hoogte of neemt deze af en erodeert. Ook als de getijdenenergie afneemt, zoals bijvoorbeeld door de aanleg van de Oosterscheldekering is gebeurd, kan transport van sediment via de waterkolom verminderen.

Doordat de bodemopbouw voor een groot deel afhankelijk is van de aanvoer van sediment door middel van het getij, wordt de maximale hoogte bepaald door de maximale waterhoogte. Veelal wordt gemiddeld hoog water aangehouden als het plafond waar schorren naartoe ophogen. In de praktijk kunnen schorren hoger worden tot het niveau van hoogwater tijdens springtij en stormtij. Er wordt verondersteld dat wanneer er meer dan voldoende sediment beschikbaar is, schorren mee kunnen blijven ontwikkelen met de huidige en verwachte versnelde zeespiegelstijging (Kirwan et al. 2010, 2016). Het schorplateau groeit dus mee met het toenemende hoogwater doordat de begroeiing sediment uit de waterkolom effectief laat neerslaan mits er voldoende sediment beschikbaar is. Sediment beschikbaarheid is potentieel een probleem voor de schorren in de Oosterschelde omdat deze door de aanleg van de Deltawerken drastisch beperkt is (par.3.1, Ma et al., 2014).

Golven daarentegen zorgen meestal voor de afbraak van het opgebouwde sediment. Maar omdat golven diepte-gelimiteerd zijn door frictie met de bodem, zullen golven in grootte afnemen naarmate ze dichterbij de kust komen. Effecten van golven nemen dus af bij afnemende waterdiepte. Wanneer de golven begroeiing tegenkomen worden ze verder gedempt door de verhoogde frictie van de vegetatie op de waterstroming (Bouma et al. 2005, 2010).

Blootstelling aan golven kan juist ook voor resuspensie van sediment en daarmee voor beschikbaarheid van sediment zorgen. Recent onderzoek aan de schorren in de Oosterschelde laat zien dat juist dit proces van groot belang kan zijn voor de schorren waardoor ze potentieel met de zeespiegel mee kunnen blijven stijgen (Ma et al. 2014, 2018). Met name de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland profiteren van dit proces waarbij sediment van de slikken in de Kom uiteindelijk op de schorren terecht komt (Ma et al. 2014).

Ook een andere recente studie naar de lange termijn ontwikkeling van schorren in Groot-Brittannië tussen 1967 en 2016 laat zien dat voornamelijk de combinatie van de beschikbaarheid van sediment en golf-gedreven transport van belang is (Ladd et al., 2019). Door gebruik te maken van veranderingen in historische kaarten en luchtfoto's in 25 estuaria en ca. 100 schorren werd de snelheid van veranderingen in de schorren gerelateerd aan bestaande gegevens over hydrologie, de aanwezigheid van vegetatie, klimaat, sedimentaanbod en een aantal andere variabelen. De onderzoekers vonden een verschuiving van langdurige schorerrosie in het zuidoosten tot langdurige schoruitbreiding in het noordwesten van Groot-Brittannië. Dit patroon werd verklaard door een zuid-naar-noord gradiënt van toenemende sediment toevoer in de schorren en de strijklengte waarover golven kunnen opbouwen die helpt om sediment naar de schorren te transporteren. Het is dus van belang om de interactie van golven op de resuspensie van het sediment mee te nemen voor een reële inschatting van de lange termijn ontwikkeling van schorren in de Oosterschelde.

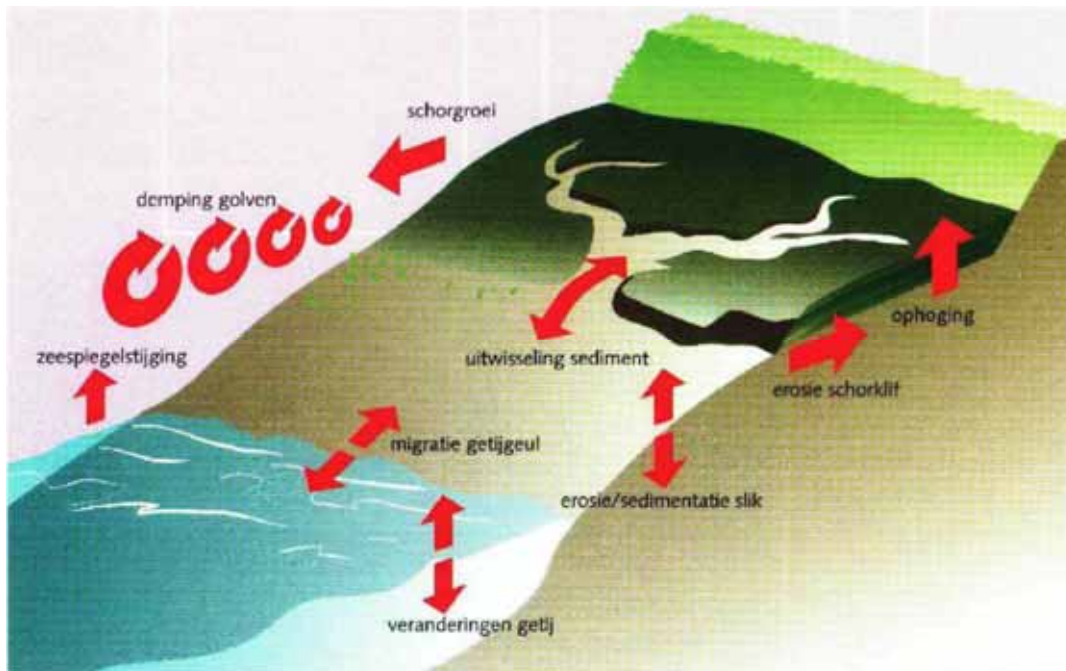
De erosie van de schorklif wordt bepaald door de golfenergie die de klifrand kan bereiken (Mariotti & Fagherazzi, 2010 & 2013). Dus hoe lager het slik is dat direct voor de schorklif ligt des te groter de golven die toekomen op de schorklif, wat zorgt voor meer erosie (Wang et al., 2017). Als de golfenergie die de schorrand bereikt afneemt omdat het schor terugtrekt naar de hoger delen van het intergetijdengebied (en als gevolg een korte blootstellingsduur aan golven en stroming), dan neemt de snelheid van erosie af en kan uiteindelijk helemaal stoppen (van de Koppel et al., 2005, van der Wal et al., 2008, zie ook Fig.5.1 voor een conceptueel model)

Nieuw schor kan zich ontwikkelen als pioniervegetatie, zoals Engels slijkgras of zeekraal, zich weet te vestigen op het slik. Juist de vestiging van pioniervegetatie is de achilleshiel van schordynamiek (Zhu et al., 2019). Er kunnen verschillende redenen zijn waarom planten moeite hebben om zich te vestigen op het kale slik waar voorheen wel een schor aanwezig was. Zo wordt vegetatievestiging in het Verdronken Land van Zuid-Beveland onder andere gehinderd door de aanwezigheid van grote hoeveelheden zeesla en andere macroalgen die planten bedekken en verstikken (van Hulzen et al., 2006). De blootstelling aan golfslag is hierin een andere belangrijke factor (Hu et al., 2015). Juist een toevallige, relatief lange periode van afwezigheid van golven kan in het groeiseizoen zorgen voor een kans tot vestiging (zogenoemde 'window of opportunity'), zoals voor het Zuidgors is aangetoond (Hu et al., 2015). Deze plotselinge episodes van kolonisatie die in veel schorren waargenomen zijn, ondersteunen dat vestiging voor een belangrijk deel afhankelijk is van de golf gedreven sedimentdynamiek op het slik (Bouma et al., 2016).

De dynamiek van schorren en slikken kunnen dus niet los van elkaar worden gezien zoals hiervoor aangegeven (Bouma et al. 2016). Verder is het de vraag of schorren inderdaad kunnen blijven meebewegen met zeespiegelstijging (zoals verwacht in Kirwan et al. 2010, 2016), als ook de dynamiek van de schorrand door erosie en de vestiging van planten mee worden genomen in de modellering. Daarom moeten we het gehele getijdensysteem van laag- naar hoogwaterlijn beschouwen om tot een reële inschatting te komen van de lange termijn ontwikkeling van de schorren van het Verdronken Land van Zuid-Beveland en andere schorren in de regio. Daarbij kijken we dus naar de sleutelfactoren welke de schorontwikkeling bepalen:

- Beschikbaarheid van sediment in de waterkolom
- Golfblootstelling
- Vegetatieontwikkeling

- Zeespiegelstijging



Figuur 2.2. Conceptueel model dynamiek van schorren en slikken (Bron: Zeeweringenwiki).

Voor het inschatten van de koolstofvastlegging (Blue Carbon potentieel) richten we ons op het begroeide deel van pionierzone tot en met het hoge schor. Alleen daar wordt een substantieel deel van het nieuw geproduceerde organische materiaal en aangevoerde koolstof vastgelegd in de schorrenbodem. Ook voor andere ecosystemendiensten zoals waterveiligheid (demping golven en stormvloed) of het opnemen van fosfor en stikstof, en de denitrificatie daarvan, wordt voor een groot deel door het stabiele, begroeide deel voor haar rekening genomen. Echter, het variabele deel van het schor, daar waar door erosie en hergroei schorverjonging kan plaatsvinden, heeft een belangrijke functie. Voor de biodiversiteit is het juist van belang dat er verschillende successiestadia en de daarbij behorende verschillende vegetatietypes blijven bestaan. Het proces van erosie en hergroei vormt een intrinsiek onderdeel van een natuurlijk schorren- en slikkengebied. Dus een schor waar een stabiel én een variabel areaal naast elkaar bestaan heeft de voorkeur wanneer een brede set aan ecosysteem functies en diensten worden beschouwd.

2.3. Koolstofvastlegging (Blue Carbon) in schorren

De netto vastlegging van koolstof in een ecosysteem is in algemene zin afhankelijk van de balans tussen:

1. De productie van nieuw organisch materiaal
2. Netto aanvoer van organisch materiaal
3. Afbraaksnelheid van organisch materiaal

De eerste twee punten hebben te maken met de aanwas door productie dan wel het netto importeren van organisch materiaal. Voor schorren ligt de focus daarbij op het organische materiaal dat in de bodem terecht komt omdat het koolstofreservoir bovengronds niet stabiel

is. Door seizoensdynamiek wordt 40-80% van de bovengrondse biomassa op schorren elk jaar vervangen (Bellis & Gaither, 1985). Een groot deel van dit 'veek' (drijvend dood organisch materiaal) wordt met het water mee getransporteerd naar andere delen van het estuarium waar het aldaar in de bodem van schorren (of andere kustecosystemen) terecht kan komen. Organisch materiaal dat in de bodem komt blijft hier doorgaans voor langere tijd (decennia tot eeuwen) opgeslagen. Koolstofvastlegging vindt plaats als het organisch materiaal dat in de bodem komt minder snel afbreekt dan dat het erbij komt. In principe maakt het daarvoor niet uit waar of wanneer het organisch materiaal gevormd is, zolang vastlegging in de bodem ervoor zorgt dat er geen koolstof terug in de atmosfeer komt.

Er wordt onderscheid gemaakt in de herkomst van het organische materiaal tussen autochtoon en allochtoon organisch materiaal. Autochtoon organisch materiaal is geproduceerd door schorrenplanten of benthische algen (algen levend op de bodem) in dit Blue Carbon schorecosysteem. Allochtoon koolstof is afkomstig van buiten het systeem, bijvoorbeeld pelagische algen (plankton levend in de waterkolom) of terrestrisch organische materiaal door uitspoeling vanaf het land naar estuarium en zee. Hoewel dit organisch materiaal dus zijn oorsprong buiten de schorren vindt kan in principe ook het vastleggen van allochtoon organisch materiaal een bijdrage leveren aan het vastleggen van koolstof. Maar alleen als dit materiaal anders uiteindelijk zou worden afgebroken tot CO₂ als het niet in de schorrenbodem onder anoxische (zuurstofloze) condities opgeslagen wordt.

Belangrijker nog dan de herkomst van de koolstof in het organische materiaal, is de stabiliteit van de organische koolstofverbindingen. Deze bepaalt hoe gemakkelijk de koolstofverbinding weer terug omgezet wordt naar, en uitgestoten wordt als, broeikasgassen CO₂ en CH₄. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen zogenaamde labiele en recalcitrante koolstof (Keuskamp et al., 2013). De labiele fractie bestaat uit organische verbindingen die makkelijk en snel afgebroken worden in het ecosysteem. De recalcitrante fractie is het deel van de koolstof die slechter of niet wordt afgebroken. Zo breken suikers en eiwitten (veel voorkomend in algen en zachte delen van bladeren) in organisch materiaal doorgaans snel af, maar is houtachtig organisch materiaal (houtstof of lignine) lastiger afbreekbaar (Boschker et al., 1999, Keuskamp et al., 2013). Afhankelijk van de omgeving waarin het organische materiaal terecht komt breekt het labiele organische materiaal sneller of langzamer af, en blijft voornamelijk de recalcitrante koolstof achter (Keuskamp et al., 2013). Met name de recalcitrante fractie is daarom relevant voor de langere-termijn koolstofvastlegging in schorren omdat de het grootste deel van de labiele koolstof fractie uiteindelijk toch afbreekt en dan niet langer bijdraagt (Meuller et al., 2018, Kirwan & Mudd, 2012, van de Broek et al., 2018). Juist in schorren, in vergelijking tot bijvoorbeeld slikken, is de productie van recalcitrante koolstofverbinding hoog door de aanwezigheid van vaatplanten die houtstof (lignine) bevatten en daarmee de potentie voor lange-termijn koolstofvastlegging (Kirwan & Mudd, 2012). We zien dit terug in de typische verschillen in organische koolstof gehalte tussen slikken en schorren, welke in de Westerschelde gemiddeld respectievelijk 2,4% (0,3-4,4%) en 10,4% (5,7-15,1%) bedraagt (ongepubliceerde data NIOZ).

De grootte van de verschillende fracties koolstof is mede afhankelijk van verschillende omgevingsparameters, zoals temperatuur, saliniteit, en redoxpotentiaal en anoxia van de bodem (Keuskamp et al., 2013, Meuller et al., 2018). Zo kan afhankelijk van de overstromingsduur, en daarmee samenhangend de anoxia van de bodem en de redoxpotentiaal, meer of minder koolstof vastgelegd worden in schorren (Janousek et al., 2017). In andere studies is juist de invloed van de overstromingsduur niet aangetoond en komt temperatuur als een meer belangrijke factor naar voren (Meuller et al., 2018). Tot nu toe

is geen duidelijk verband gevonden tussen het koolstofgehalte en verschillende schortypen. In koolstofmetingen van de pionierzone naar laag en midden hoog schor, uitgevoerd met het oog op ontwikkelen van kennis rond Blue Carbon in Nederland, is geen eenduidig verband te vinden (Teunis & Didderen, 2018, Hoefsloot et al., 2020) tussen deze verschillende zones. Er zijn daarom nog veel vragen en onzekerheden over welke factoren in een specifiek schor de koolstofvastlegging bepalen om voorspelling te kunnen doen over hoeveel er wordt vastgelegd.

Daarnaast blijkt dat in de schorren in het algemeen, maar in het speciaal langs de Westerschelde en Zeeschelde, een aanzienlijk deel (30-75%) van de koolstof een ouderdom heeft van vele honderden tot duizenden jaren (van de Broek et al., 2018). Deze koolstof is lang geleden geassimileerd, zeer waarschijnlijk in de kustveen ecosystemen van weleer. Het is onwaarschijnlijk dat dit allochtoon koolstof nog omgezet kan worden naar CO₂ (van de Broek et al. 2018) en draagt daarom bij vastlegging in schorren in de huidige tijd waarschijnlijk niet bij aan emissiereductie. Hoe deze verhouding van allochtoon koolstof is ten opzichte van meer recent geproduceerd autochtoon koolstof in de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland is niet bekend. Om hier een goed idee van te krijgen is het nodig om een meer diepgravend onderzoek te doen naar de herkomst (autochtoon of allochtoon) en ouderdom van de verschillende koolstof fracties voor deze schorren, als ook de mate waarin deze koolstof fracties nog omgezet kunnen worden en tot emissie kunnen leiden. Waarschijnlijk is de samenstelling van de schorren in de Oosterschelde vergelijkbaar met die in de Westerschelde, omdat ze een vergelijkbare ontstaansgeschiedenis hebben. Aan de andere kant, hebben de schorren in de Oosterschelde de laatste vier decennia verschillende veranderingen ondergaan doordat o.a., saliniteit, overstromingsduur en sedimentbeschikbaarheid sterk zijn veranderd door de aanleg van de verschillende Deltawerken. Op basis van de afstand tot de monding en het zoutgehalte schatten we voor de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland in dat 50% oud allochtoon recalcitrante koolstof is (uit een range van 30-75%, van de Broek et al. (2018), zie voor een verdere discussie hfst.3). Dit is de meest reële inschatting die op basis van de huidige gegevens kan worden gemaakt, maar gebied-specifieke metingen zijn dus wenselijk om dit percentage meer correct in te kunnen schatten.

Zoals reeds besproken zijn de sleutelfactoren die voor koolstofvastlegging zorgen de aanwezigheid van vegetatie, bodemeigenschappen zoals de afwezigheid van zuurstof (anoxia) en de temperatuur (Janousek et al. 2017, Meuller et al. 2018). De eerste twee punten bespreken we in iets meer detail en we lopen hiermee al enigszins vooruit op de discussie over de heterogeniteit van de vegetatiebedekking (hfst.3) en bespreking van mogelijke maatregelen (hfst.4). Omdat we aannemen dat de temperatuur tussen de schorren hier niet wezenlijk zal verschillen laten we deze factor voor nu buiten beschouwing en bespreken deze voor de inschatting van de langere termijn (hfst.5). Veranderingen in de tijd van de gemiddelde temperatuur en het voorkomen van extreme temperaturen als gevolg van klimaatverandering kunnen wel een effect hebben op de plantengemeenschap van schorren (Strain et al., 2017) en decompositie (Kirwan & Mudd, 2012, Meuller et al., 2018), maar laten we in dit rapport buiten beschouwing.

De aanwezigheid van vegetatie voor het vastleggen van CO₂ uit de atmosfeer is essentieel (Duarte et al., 2013, McLeod et al., 2011) en zorgt voor de aanwas door biomassa productie en het netto importeren van organisch materiaal. Planten zijn met name belangrijk door de productie (assimilatie) van moeilijk afbreekbare biomassa (recalcitrante koolstof). De meeste directe manier waardoor koolstof in de bodem wordt vastgelegd is doordat wortels afsterven

en in de bodem achter blijven (Duarte et al., 2013, Kirwan & Mudd, 2012). Hier maakt het verschil welke type vegetatie -eenjarig of meerjarig en welke soorten- in de bodem geworteld zijn (Strain et al., 2017). Meerjarige planten zijn waarschijnlijk een belangrijkere bron van koolstof dan éénjarige planten, zoals veel pioniersoorten als zeekraal (*Salicornia procumbens*) en zeeaster (*Aster tripolium*). Ook kan biomassa in de vorm van dood organisch materiaal (detritus) afkomstig van de bovengrondse biomassa, die elk jaar door seizoensdynamiek verdwijnt, in de bodem begraven worden (Kirwan & Mudd, 2012). Wanneer dit organisch materiaal, van zowel autochtone als allochtone afkomst, onder een laagje sediment bedekt wordt, is het onderdeel van de bodem. De aanwezigheid van bovengrondse biomassa en voldoende sediment in de waterkolom is dus van belang om slib en klei neer te laten slaan om het organische materiaal te begraven. Ook hier spelen de soorteigen kenmerken van de verschillende schorrenplanten een rol in hoe de balans tussen sedimentatie (en erosie) processen uitspeelt (Strain et al., 2017, Bouma et al., 2014).

Hoewel de aanwezigheid van vegetatie een belangrijke voorwaarde is voor het vastleggen van grotere hoeveelheden koolstof in de bodem is de vestiging van pioniervegetatie niet vanzelfsprekend (Zhu et al., 2019). Stimulerende maatregelen kunnen daarom nodig zijn om de vestiging van vegetatie te krijgen. Aan de andere kant zorgen de schorrenplanten ook voor meer zuurstof in de bodem. Dit biedt de planten meer weerstand tegen stressoren als giftige sulfiden in de bodem (Alldred et al., 2020), maar zou tegelijkertijd potentieel koolstofvastlegging zouden kunnen tegenwerken omdat door de toevoer van zuurstof decompositie juist versnelt (Janousek et al. 2017).

Decompositie zorgt ervoor dat koolstof dat opgeslagen ligt in organisch materiaal, zowel van autochtone als allochtone afkomst, weer vrijkomt als CO₂ in de atmosfeer. Bodemcondities die ervoor zorgen dat de decompositie vermindert, kunnen voor een betere koolstofvastlegging zorgen. Zuurstofloze condities (anoxia) zijn zeer geschikt om decompositie processen sterk te reduceren. Zeker in natte ecosystemen komt zuurstofloosheid veel voor (Nellemann et al., 2009). Daarbij zijn de eigenschappen van de bodem bepalend, zoals de sedimentsamenstelling, of de bodem relatief snel ontwatert en of zuurstof makkelijk aangevuld kan worden. Ook kleinschalige variaties in bodemtopografie kunnen zorgen voor meer zuurstof in de bodem door de pompende werking van het getij (Fivash et al., 2020). En zoals reeds aangegeven is de temperatuur belangrijk en ook een bodemconditie die afbraakprocessen kan versnellen (Meuller et al. 2018).

Samenvattend hebben we in dit hoofdstuk laten zien dat de ontwikkeling van het schorrenareaal op landschap schaal voor een belangrijk deel afhankelijk is van de aanwezigheid en ontwikkeling van de aanpalende slikken (par.2.2). Zowel de processen die afkalving door erosie als de kolonisatie van vegetatie bepalen worden voor een belangrijk deel zeewaarts van het schor bepaald. Met name de sediment beschikbaarheid en de blootstelling aan golfslag bepalen welk deel van het schor variabel is in de tijd (i.e. onderhevig aan afbraak en aangroei) en welk deel als stabiel en geschikt voor Blue Carbon kan worden beschouwd. Om een conceptueel model te ontwikkelen welke de lange-termijn ruimtelijke ontwikkeling van schorren reëel beschrijft is daarom een integrale aanpak van de laag tot hoogwaterlijn nodig.

Lokaal wordt de kwaliteit en kwantiteit van koolstofvastlegging voor een groot deel bepaald door de aanwezigheid van schorrenplanten. Meer specifiek wordt de balans tussen aanwas en afvoer -door productie en import aan de ene kant en decompositie en afvoer aan de andere kant- van organische materiaal bepaald door een samenspel van meerdere processen en factoren. Deze processen zijn zeer sterk afhankelijk van gebiedseigen kenmerken gaande van

soortensamenstelling van de vegetatie, tot bodemgesteldheid en de hydrodynamische en hydrologische condities. Om een goede inschatting te kunnen maken van de verschillende bijdrages zijn daarom gebiedsspecifieke metingen en experimenten nodig. In het volgende hoofdstuk kijken we naar de gebiedseigen kenmerken van de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland.

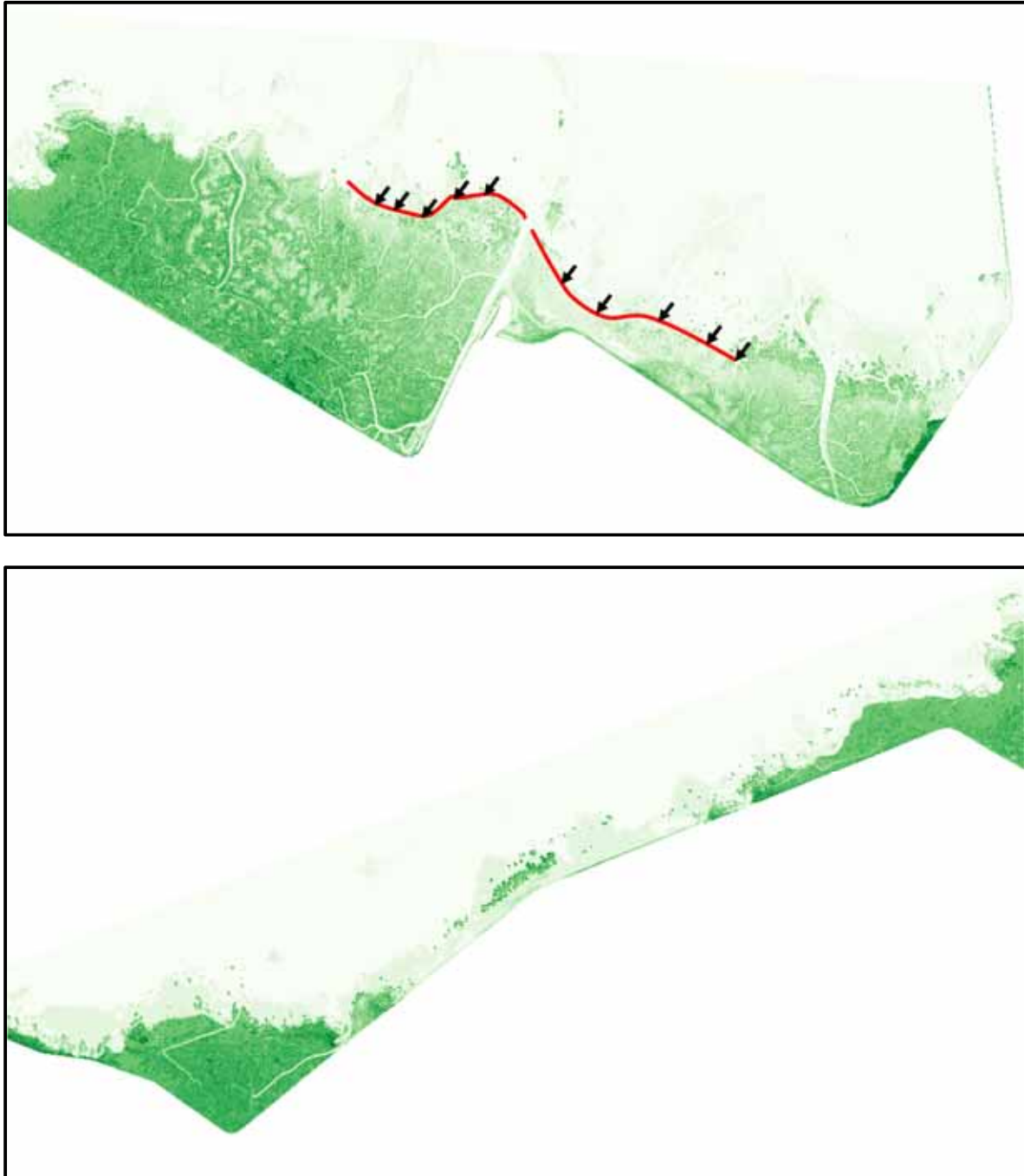
3. Ontwikkelingen van het Verdrongen land van Zuid-Beveland

3.1. Beschrijving en grootschalige ontwikkelingen Oosterschelde

De schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland liggen in het zuidoostelijk deel van de Oosterschelde, in de Kom aan de zuidelijke oever grenzend in het oosten aan de Oesterdam (Fig.1.1). Aan de landzijde worden de schorren begrensd door een zeedijk. Dit schorrengebied is het grootste nog aanwezige schor in de Oosterschelde. We kunnen hier twee schorren onderscheiden: het Rattekaai schor (131 ha) welke het meest oostelijk deel is van het schorrengebied; en het schor van Strooidorpepolder (23 ha). Dit laatste wordt ook wel het schor bij Roelshoek genoemd. In de rest van dit rapport gebruiken we “Rattekaai” en “Roelshoek” om deze twee deelgebieden aan te duiden.

Vóór de aanleg van de Oosterscheldekering was het schor van Roelshoek al relatief hoog met een eroderende klif aan de zeezijde. De begroeiing bestond voornamelijk uit planten typerend voor de midden en hoge schorren (de Leeuw et al., 1994). Het Rattekaai schor was nog relatief laag ten tijde van de bouw van de kering en had een meer gradueel verloop, zonder klif, van het onbegroeide slik, naar de begroeide pionierzone en het lage schor (de Leeuw et al. 1994). Pas ná de voltooiing van de Oosterscheldekering is in het daaropvolgende decennium de transitie van schor naar slik scherper geworden en heeft deze zich vervolgens tot een eroderende klif ontwikkeld. In 2008 is daarom over een lengte van 1400 m een stenen dam aangelegd om verdere erosie te voorkomen (Teunis & Didderen, 2018).

De schorren in de Oosterschelde hebben zich in de afgelopen decennia een aantal keren drastisch moeten aanpassen aan enkele grootschalige veranderingen in de hydrologische eigenschappen van het gebied als gevolg van de aanleg van de Deltawerken (de Leeuw et al., 1994). Allereerst is de Oosterschelde een getijdebaai geworden met een bijna constante, hoge saliniteit sinds de afsluiting van de invloed van de rivieren (de Rijn en Maas) door de aanleg van de Volkerakdam in 1969 (de Leeuw et al., 1991). Als een gevolg van de aanleg van de Oosterscheldekering in 1986 nam ook de wateruitwisseling van de baai met de Noordzee af en daarmee ook de getijslag. De gemiddelde getijslag in de Kom was in de periode 1971-1980 3,95 m. Tegenwoordig is de getijdeslag nog 3,52 m (gemiddelde over 2000-2019, data Rijkswaterstaat), met een gemiddeld hoog water (GHW) van 1,88 m NAP (gemiddeld hoog water dood- en springtij: GHWD 1,45 m NAP, GHWS 2,24 m NAP). Als gevolg van deze veranderingen is de soortensamenstelling van de vegetatie op de schorren veranderd (de Leeuw et al., 1994).



Figuur 3.1. NDVI kaart van het Verdronken Land van Zuid-Beveland. (Top paneel) Het Rattekaai schor. (Bodem paneel) Schor bij Roelshoek. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is een maat voor de hoeveelheid biomassa. Donkergroen is hoge biomassa, lichtgroen lage biomassa, wit is geen biomassa. De rode lijn geeft de locatie van de stenen dam aan en de pijlen waar de dam open is.

Naast veranderingen in de getijden zijn er door de grootschalige aanpassingen van de Oosterschelde ook veranderingen opgetreden in de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal in

de waterkolom (Suspended Sediment Concentration, SSC), welke een belangrijk bron is voor sedimentatie en daarmee de ontwikkeling van bodemhoogte op de schorren (Kirwan et al., 2010, Temmerman et al., 2010). Sinds de aanleg van de Oosterscheldekering is de gemiddelde SSC in de Kom met 70% gedaald van gemiddeld 22 mg/L naar 6 mg/L (Ma et al., 2014, Nienhuis & Smaal, 1994). Ter vergelijking, in het westen bij Roggeplaat, nabij de kering, is dit een afname van 64% van 27 mg/L naar 10 mg/L (Ma et al., 2014, Nienhuis & Smaal, 1994). Deze daling van de gemiddelde SSC is grotendeels toe te schrijven aan de reductie van de getijdenwerking in de Oosterschelde (de Leeuw et al., 1994) en heeft een belangrijke invloed op de sedimentbalans van de schorren en slikken in de Oosterschelde (Ma et al., 2014).

3.2. Ontwikkelingen in schorareaal en -hoogte

De ontwikkelingen van de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland laten zien dat de afgelopen vier decennia sinds de aanleg van de Oosterschelde, het gebied erosief is als gevolg van de zandhonger. Beschouwen we de laatste 20 jaar (vanaf 2000), dan vinden we dat de schorrand bij Roelshoek naar de zeedijk toe erodeert met een gemiddelde snelheid van 0,6 m/jaar. Dit komt neer op een gemiddeld verlies van 0,084 ha/jaar (langs 1800 m schorrand). Bij Rattekaai verdwijnt het niet beschermde deel (zonder stenen dam) van de schorrand met een snelheid van 0,45 m/jaar. Hierdoor verdwijnt 0,135 ha/jaar door schorerosie (langs 2990 m onbeschermde schorrand). Echter, daar waar in 2008 ingegrepen is met het aanleggen van stenen dammen is het schor over een lengte van ongeveer 1400 m gestabiliseerd en komt geen waarneembare schorerosie meer voor. Op de plaatsen waar deze maatregelen niet genomen zijn neemt het areaal dus nog steeds af.

Deze lange termijn trends van de afgelopen vier decennia zijn zeer waarschijnlijk door de lage sediment beschikbaarheid te verklaren. Na het plaatsen van de Oosterscheldekering is de sediment concentratie in de waterkolom (hierna afgekort als SSC, afkomstig van ‘Suspended Solids Concentration’) significant afgenomen (de Leeuw et al., 1994, Ma et al., 2014). Hierdoor is de balans van sedimentatie en erosie die de opbouw van slikken en schorren bepalen veranderd. We zien dit terug in de daling van het slik vóór de schorren. Boven gemiddeld hoog water daalt het slik bij Roelshoek met gemiddeld 3 mm/jaar. Voor Rattekaai daalt het slik gemiddeld met 2,5 mm/jaar. De verwachting is dat deze trend de komende jaren doorzet.

Voor de schorren zien we deze trend in afname van de hoogte niet, maar zien we juist nog wel een toename in hoogte. Gemiddeld neemt de hoogte van het schor bij Rattekaai met 7.7 mm/jaar toe. Dit varieert in de ruimte, waarbij langs de schorranden de hoogte zelfs toeneemt met gemiddeld 13 mm/jaar. Maar naar het midden van het schor neemt deze ophoogsnelheid af tot 6 mm/jaar. Deze gegevens zijn specifiek voor de Rattekaai want de schorren “Slaak” en “Sint Annaland” die noordelijker liggen in de Oosterschelde laten geen ophoging zien (Ma et al., 2014). Dit verschil zit hem waarschijnlijk in de ligging van de schorren. Roelshoek en Rattekaai liggen aan een vrij open deel van de Oosterschelde (de Kom), waar gedurende stormachtige condities golven voldoende kunnen ontwikkelen en vervolgens sediment in suspensie kunnen brengen. Metingen tijdens stormachtige periodes laten zien dat de SSC in Rattekaai incidenteel kan oplopen tot rond de 600 mg/L (gemeten nabij de schorrand), terwijl het SSC bij Sint Annaland in dezelfde periode rond de 35 mg/L blijft steken (Ma et al., 2014). Dit verschil zorgt er zeer waarschijnlijk voor dat de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland nog voldoende sediment ontvangen om in hoogte toe te nemen, dat dus lokaal afkomstig is van de nabijgelegen slikken en deels sediment dat vrijkomt als gevolg van de

erosie van de schorrand. De huidige hoogte aan de schorrand is $1,96 \pm 0.09$ m NAP, wat al boven gemiddeld hoog water ligt. Maar in principe is er een potentie voor het schor om door te ontwikkelen tot gemiddeld hoog water gedurende springtij van 2,24 m NAP. Deze gegevens suggereren dat deze schorren de huidige zeespiegelstijging van ongeveer 2 mm/jaar goed kunnen volgen als gevolg van de resuspensie van het sediment op het aanpalende slik.

Om de stabiliteit van de schorren te bepalen is echter niet alleen de hoogte ontwikkeling van het schor van belang. Juist de tegengestelde veranderingen op de overgang van slik naar schor (de schorrand) kan bepalend zijn voor de langere-termijn stabiliteit van schorren (Mariotti & Fagherazzi, 2010, van de Koppel et al., 2005, van der Wal et al., 2008). Doordat het kale slik in hoogte afneemt maar het begroeide schor niet of zelfs toeneemt in hoogte, ontstaat er een toename in het hoogteverschil tussen de twee zijden van de schorrand. Deze toename in de hoogtetradiënt zorgt ervoor dat de overgang tussen slik en schor gevoelig wordt voor het ontstaan van een eroderende schorrand (Mariotti & Fagherazzi, 2010, van de Koppel et al., 2005, van der Wal et al., 2008). In het geval er al een schorrand gevormd is zal een verdere toename van het hoogteverschil leiden tot een toename van de erosiesnelheid. Dit komt omdat de waterdiepte vóór het schor toeneemt en daarmee de golfenergie die de schorrand kan bereiken en eroderen (Mariotti & Fagherazzi, 2010, Wang et al., 2017). Daarom is één van de mogelijke manieren om de schorerrosie te verminderen is om door middel van suppleties het slik vóór het schor te verhogen (zoals bv. bij het Zuidgors bij Ellewoutsdijk). (Alternatieve manieren ter voorkoming van schorranderosie worden besproken in hfst.4). Dit kan tevens tot nieuwe vestiging van pioniervegetatie zorgen (Hu et al., 2015).

Een laatste observatie die hier genoemd moet worden is de heterogene verdeling van biomassa in de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (Fig.3.1). Bij het inschatten van de Blue Carbon potentie wordt gerekend met een gemiddelde waarde voor het gehele projectgebied. Echter de biomassa is sterk heterogeen verdeeld wat o.a. invloed kan hebben op de autochtone bijdrage aan de koolstofvastlegging. Het westelijke deel, waaronder Roelshoek en het westelijke deel van Rattekaai laten gemiddeld een hogere NDVI-waarde zien (zie Fig.3.1. NDVI staat voor NDVI Normalized Difference Vegetation Index, wat een goed indicatie is de aanwezige biomassa vegetatie), wat duidt op een hogere biomassa. Veel van de plekken achter de stenen dammen hebben juist een veel lagere biomassa (Fig.3.1). Er zijn indicaties dat door relatief slechte drainage als gevolg van de aanleg van de stenen dammen de begroeiing minder goed tot ontwikkeling komt (zie ook hfst.4). Dit is een belangrijk punt om mee te nemen in de zekerheden die we hebben met betrekking tot het inschatten van de Blue Carbon potentie (par.3.3) en het nemen van maatregel voor het verder inperken van schorranderosie (hfst.4).

3.3. Inschatting Blue Carbon bijdrage

In deze paragraaf geven we een inschatting van de bijdrage voor Blue Carbon voor de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland en hoe schorranderosie hierop van invloed is. Zoals reeds vermeld gaan we ervan uit dat de bijdrage voor Blue Carbon goed samengaat met andere relevante ecosysteem diensten, zoals waterveiligheid en de effecten op de waterkwaliteit. De stabiele delen van de schorren kunnen deze functies over langere tijd vervullen en de lange-termijn ontwikkeling van deze delen zijn dus met name interessant (Fig.2.1). We volgen hierin de aanpak van Teunis & Didderen (2018) welke aangeven dat om tot een Blue Carbon bijdrage te komen er vier maatregelen genomen kunnen worden:

1. Beschermen van huidige schorren tegen afslag (schorranderosie)
2. Uitbreiding van de bestaande schorren
3. Creëren van nieuw schorren
4. Optimaliseren van beheer en onderhoud van de schorren

De focus van deze paragraaf is om de huidige bijdrage en de effecten van schorranderosie (punt 1) op de koolstofvastlegging verder in te schatten. Maatregelen voor de uitbreiding van schorren (punt 2) komen aan de orde in het volgende hoofdstuk (hfst.4.1), net als het creëren van nieuwe schorren (punt 3, hfst.4.2). Met betrekking tot het laatste punt hebben we momenteel te weinig aanknopingspunten om hier in dit rapport nader op in te gaan.

We vatten allereerst de huidige koolstof studies in Nederland tot nu toe samen. Vervolgens rekenen we de trends, zoals beschreven in paragraaf 3.2, om naar een eerste inschatting van de gevolgen hiervan voor de koolstofvastlegging en wat vermindering van erosie door afslag kan bijdragen. Een verdere verfijning van deze inschattingen worden in hoofdstuk 5 gegeven op basis van een biogeomorfologische modellering.

Aannames en uitgangspunten

We gaan allereerst uit van de volgende uitgangspunten uit:

- 1 ton koolstof (C) komt overeen met 3,67 ton koolstofdioxide-equivalenten (CO₂-eq)
- 1 hectare (ha) = 10,000 m²
- De koolstofvoorraad in schorren is uitgedrukt in ton C of CO₂-eq/ha, berekend over een laag tot 1 m diepte onder het schoroppervlak
- We drukken hoeveelheden koolstof zoveel mogelijk uit in CO₂-equivalenten. Daar waar dit de duidelijkheid ten goede komt geven we beide.
- Ter referentie: een gemiddeld gezin stoot gemiddeld ongeveer 20 ton CO₂-eq/jaar uit.

Om in te kunnen schatten wat de netto koolstofvastlegging is moeten we verder weten (1) hoeveel koolstof er in de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland ligt opgeslagen per hectare, (2) welk deel daarvan mag worden toegerekend als effectieve koolstofvastlegging, en (3) hoe we omgaan met koolstof dat vrijkomt als gevolg van schorerosie.

De koolstofbepalingen die door Bureau Waardenburg (hierna BuWa) zijn gedaan voor verschillende schorren en kwelders in de zuidwestelijke delta en het waddengebied laten een grote variatie in koolstofvoorraad zien. Voor het Verdrongen Land van Zuid-Beveland vinden Teunis & Didderen (2018) een gemiddelde waarde van 378 ton C/ha, wat overeenkomt met 1387 ton CO₂/ha. Dit ligt boven de gemiddelde waarden welke aangehouden wordt door de IPCC (2013) voor schorren van 255 ton C/ha (936 ton CO₂/ha). Ter vergelijking, dit is 6,4 maal de gemiddelde koolstofvoorraad in biomassa van Nederlandse bossen, welke 59 ton C/ha is (Nabuurs & Verkaik, 1999).

De koolstofbemonstering van Teunis & Didderen (2018) heeft slechts in een klein deel van het projectgebied plaatsgevonden, namelijk het oostelijke deel van Rattekaai (Fig.3.2). De NDVI-waarden (als indicatie van de bovengrondse biomassa) in dit deelgebied is gemiddeld (vergelijk Fig. 3.1 met Fig.3.2). Daarom mag verwacht worden dat de autochtone koolstofbijdrage in sommige andere delen (met hogere NDVI-waarden) van het schor mogelijk een stuk hoger of juist lager is. Er is momenteel geen duidelijke verklaring voor de gevonden variatie in waarden als gevolg van b.v. de schorzone (pionier, laag, midden en hoog

schor) of hoogteligging. Daarnaast is de bemonstering in het oostelijke deel van het gebied niet representatief voor het gehele gebied en wijkt de werkelijke gemiddelde koolstofvoorraad af. Maar omdat meer betrouwbare gegevens ontbreken, rekenen we verder met de gemiddelde waarden van de door BuWa gerapporteerde getallen, namelijk 378 ton C/ha.



Figuur 3.2. Meetpunten voor koolstofbepalingen in het oostelijke deel van het Rattekaai schor.

Zoals reeds in paragraaf 2.3 aangegeven, kan zeer waarschijnlijk niet alle aanwezige koolstof worden toegeschreven aan directe productie en vastlegging in de schorren. Van het zeer oude recalcitrante koolstof kan niet worden verwacht dat het weer terug omgezet wordt naar CO₂ als het vrijkomt door erosie (of andere verstoringen) van de schorren (van de Broek et al., 2018). Deze fractie is tevens allochtoon en kan daarom niet worden meegerekend. Een studie aan schorren langs de Westerschelde en Zeeschelde schat deze fractie in op 30 tot 75% van de aanwezige koolstof (van de Broek et al., 2018). Omdat het ons ontbreekt aan een goede studie waarbij de herkomst en ouderdom van de koolstof in de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland in beeld is gebracht, gaan wij in deze studie uit van de gemiddelde waarde van 50% (par.2.3, van de Broek et al., 2018). Dit wil zeggen dat we 50% van de aanwezige koolstof beschouwen als vermeden CO₂-emissie. Omdat we voor de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland rekenen met een gemiddelde waarde van 378 ton C/ha, komt dit neer op 694 ton CO₂-eq/ha bij 50% omzetting, waar we in de berekeningen die in de rest van het rapport volgen verder mee werken.

Wanneer door erosie van de schorren organische koolstof vrijkomt zal dit voor een deel in de waterkolom en vervolgens deels op de slikken of in de geulen terecht komen. Hier zijn de

condities gunstig voor decompositie van de koolstofverbindingen waardoor de verwachting is dat een groot deel in korte tijd zal worden omgezet naar CO₂.

Tabel 3.1. Emissie en vastlegging van koolstof in de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Zie voor de aannames voor afbraak en recente vastlegging de tekst.

Locatie	Oppervlak (ha)	Emissie door erosie		Vastlegging door ophoging		Netto	
		ton C/jaar	ton CO ₂ /jaar	ton C/jaar	ton CO ₂ /jaar	ton C/jaar	ton CO ₂ /jaar
<i>Roelshoek</i>	23	-41	-75	52	96	11	21
<i>Rattekaai</i>	131	-51	-93	381	700	330	606
totaal	154	-92	-168	434	795	342	627

Blue Carbon in de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland

Op basis van de bovenstaande aannames komen we dan tot de inschatting dat er in totaal 58.212 ton C ligt opgeslagen in de bovenste meter van de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Bij volledig verlies van dit gebied kan dit leiden tot een emissie 106.819 ton CO₂ uitgaande van de 50% omzetting van de aanwezige koolstof naar CO₂. Dit is een onderschatting omdat bekend is dat de afgezette sedimentlaag in Rattekaai tot 2 meter dik is (van Leeuw et al., 1994). Potentieel ligt er dus nog meer koolstof opgeslagen als we zouden rekenen met deze 2 meter dikte, maar we hebben niet voldoende gegevens over de ruimtelijke verdeling van de laagdikte over het gehele schorrengebied om hier een goede inschatting van te kunnen geven.

In de huidige situatie verliezen de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland door erosie van de schorrand in totaal een oppervlakte van 0,243 ha/jaar (Roelshoek: -0,11 ha/jaar; Rattekaai: -0,14 ha/jaar). Dit komt neer op een emissie van in totaal 168 ton CO₂-eq/jaar (Roelshoek: 75 ton CO₂-eq/jaar; Rattekaai: 93 ton CO₂-eq/jaar). Zie tabel 3.1 voor meer details. Door maatregelen om erosie van de schorrand te voorkomen, kunnen deze emissies dus worden voorkomen.

Tegelijkertijd leggen de schorren ook koolstof vast door de ophoging van het gebied. In totaal leggen de schorren 795 ton CO₂-eq/jaar vast (Roelshoek: 96 ton CO₂-eq/jaar; Rattekaai: 700 ton CO₂-eq/jaar, zie tabel 3.1). Netto komt de vastlegging dus neer op 627 ton CO₂-eq/jaar. Maar dit zou in de praktijk 27% meer kunnen zijn als de emissie door schorranderosie wordt voorkomen. Daar komt bij dat de balans door emissie en vastlegging in de toekomst negatief kan worden, als de ophoging van de schorren minder snel gaat of schorranderosie versnelt door verandering van de hoogte van de slikken (door grotere golfbelasting). Hier zal in hoofdstuk 5 verder naar gekeken worden.

4. Verkenning mogelijkheden voor stimuleren koolstofvastlegging en andere ecosysteemdiensten

Wanneer naast beheer en ontwikkeling van robuuste natuur een aanvullende doelstelling is om aan een Blue Carbon project koolstofcertificering te verbinden, dan zal er op enigerlei wijze netto koolstof moeten worden vastgelegd. De extra vast te leggen koolstof moet ten opzichte van een huidig management ('business as usual', ook wel 'baseline') scenario worden bepaald. Bij schorren kan hierbij gedacht worden aan het creëren van extra schorareaal of het voorkomen van schorafslag en erosie. In het geval van de schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland verstaan we onder 'business as usual' dat er geen actief beheer is. De schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland worden niet begraaasd en slechts af en toe gemaaid. Daarnaast zijn er eenmalig stenen dammen aangelegd in een deel van het gebied om schorranderosie tegen te gaan. We hebben verder gezien dat de onbeschermde schorranden nog steeds onderhevig zijn aan afslag en erosie (hfst.3). Hier valt dus mogelijk natuurwinst te halen door bescherming en mogelijk herstel van de schorren. Wanneer buitendijkse maatregelen worden genomen is er een aantal mogelijkheden. Ook is het eventueel een optie om schorren binnendijks te laten ontstaan. De verschillende opties worden hieronder verder uitgewerkt.

We focussen in onze behandeling van de verschillende maatregelen op de mogelijkheden voor het afremmen of volledig voorkómen van erosie van de schorrand of op de ontwikkeling van nieuw schor en de winst die daarmee te behalen is op het vastleggen van koolstof en andere functies en ecosysteemdiensten van de schorren. We gaan hier niet in op de mogelijke CO₂ die vrijkomt als gevolg van het nemen van de maatregel (de zogenoemde klimaatvoetafdruk), zoals door het vervoer of productie van de materialen. Dat ligt buiten de scope van dit onderzoek. Maar het is goed zijn om in een vervolgtraject bij de specifiekere uitwerking van de herstel- en beschermingsmaatregelen wel een betere inschatting te maken van deze klimaatvoetafdruk om een wel afgewogen beslissing te kunnen nemen.

4.1. Buitendijkse maatregelen

De hieronder beschreven inventarisatie van buitendijkse maatregelen kan als uitgangspunt dienen voor verdere uitwerking van een pilot voor het voorkómen van erosie en faciliteren van schoraangroei. Deze mogelijkheden zullen verder besproken dienen te worden met betrokken partijen begin 2020 als een pilot in het voorjaar of vroege zomer van start dient te gaan. Er zijn een aantal verschillende mogelijkheden om maatregelen te nemen om enerzijds schorranderosie te verminderen of helemaal te stoppen en anderzijds om nieuw schor tot ontwikkeling te laten komen of in een combinatie van die twee. Een overzicht en evaluatie van de maatregelen die we hieronder in meer detail bespreken is gegeven in tabel 4.1 aan het eind van deze paragraaf.



Figuur 4.1. Stenen dam bij Rattekaai. Landwaarts van de steenbestorting zijn pollen Engels slijkgras te zien, maar ook nog grote delen onbegroeid. Zeewaarts van de dam ligt een laag zeesla.

4.1.1. Steenbestorting

Een van de mogelijkheden is het plaatsen van een steenbestorting (stenen dammen) voor de schorrand (Fig.4.1). Momenteel kent een deel van het Rattekaai schor een dergelijke oever beschermingsmaatregel over een lengte van ongeveer 1400 m. Uit de analyse (hfst.3.2) blijkt dat deze methode verdere afslag heeft voorkomen. Op een beperkt aantal plaatsen komt de begroeiing landwaarts van de dam terug. Echter, er zijn ook enkele plaatsen langs de schorrand waar de drainage beperkt is en er plassen water blijven staan. Zeker hier, maar algemeen langs de gehele stenen dam, lijkt vestiging en de algemene groei van schorrenplanten minder goed tot stand te komen. De slechte afwatering zorgt waarschijnlijk voor een beperkte kolonisatie van pionierplanten. Omdat er plaatsen zijn waar de vegetatie slecht wil terugkomen, zijn die gebieden waarschijnlijk ook minder effectief in het vastleggen van koolstof (zie hfst.2 en 3 voor nadere toelichting). Het is echter onduidelijk of de aangelegde steenbestorting effecten heeft op de koolstofvastlegging omdat er geen metingen beschikbaar zijn waarmee dit onderzocht kan worden. Daarnaast is er mogelijk een hoge CO₂-uitstoot door winning, aanvoer van het steenmateriaal van buiten Nederland en het gebruiken van een boot tijdens de aanleg.

De stenen dam heeft waarschijnlijk ook een positief effect. De vele zeesla en andere wieren in de Kom blijven voornamelijk zeewaarts van de stenen dam (zie Fig.4.2). Hierdoor blijven negatieve effecten van wiermatten die hier van nature voorkomen op de vegetatieontwikkeling beperkt tot het zeewaartse deel (ongepubliceerde data J. Van Belzen, van Hulzen et al. 2006, maar zie paragraaf 4.1.3 hieronder). Daarnaast is onderhoud van de stenen dam minimaal. Dus het gebruik van stenen dammen heeft voordelen en nadelen met

betrekking tot de ontwikkeling van het schor areaal en de kwaliteit van de aanwezige schorrenvegetatie (tabel 4.1). Mogelijk kunnen met het gebruik van een ander type dam of materiaal de negatieve effecten verminderd worden en de positieve effecten (stoppen schorranderosie) behouden.

4.1.2. Rijshouten dammen

Van oudsher werden rijshouten dammen gebruikt in de landaanwinningswerken (kwelderwerken) in Friesland en Groningen. Door tussen rijen houten palen wilgentakken te plaatsen wordt de energie uit het stromende water gehaald waardoor er meer klei en slib bezinkt. Nadat vegetatie zich op de nieuwe sedimentlaag vestigde hoogde de bodem nog weer sneller op door de verder afzwakking van de waterstroming (Teunis & Didderen, 2018). In Zeeland is er geen recente ervaring met het gebruik van deze structuren voor het beheren van schorren, maar ze zijn indertijd wel ingezet voor landaanwinning (o.a. in het Sloegebied. Zie b.v. de restanten bij het schor van Ritthem).

Het is zeer waarschijnlijk dat toepassing van de rijshouten dammen net als de stenen dammen de erosie stopt (tabel 4.1). De grote hoeveelheden macro-algen die mogelijk een negatief effect hebben op schorontwikkeling, zullen landwaarts van de dam worden beperkt waardoor plantengroei minder wordt verstikt (zie par.4.1.3). Het voordeel van het gebruik van deze structuren is dat ze poreuzer zijn dan stortstenen. Hierdoor is het makkelijker om een goed ontwikkelde afwatering (drainage) te creëren. Mogelijk lost dat de lagere biomassa achter de stenen dam op, met zeer waarschijnlijk een positieve bijdrage aan de verschillende ecosysteem diensten die de schorren kunnen bieden, waaronder de opslag van koolstof. Daarnaast is de verwachting dat door het gebruik van regionaal verkregen materialen zoals hout en takken de klimaatvoetafdruk lager is dan bij stenen dammen. Hier zal verder naar gekeken moeten worden om hier een goed beeld van te krijgen.

Een mogelijk nadeel van het aanleggen van de rijshouten dammen zijn de kosten. Deze zijn relatief hoog omdat het aanleggen arbeidsintensief is en daarnaast hebben de dammen regelmatig onderhoud nodig. Een aandachtspunt is dat de structuur (geometrie) waarin de dammen worden geplaatst, het uiterlijk en de ecologie van de schorren sterk bepalen. In de context van de internationale Wadden-bescherming wordt dit als een cultuurhistorische aanpak gezien (de Leeuw et al., 2018), die strijdig kan zijn met een het tot ontwikkeling laten komen van natuurlijke processen. In principe kunnen rijshouten dammen worden toegepast in minder rechttoe-rechtaan geometrische configuraties. Ze volgen dan bijvoorbeeld de natuurlijke gradiënten. Het voordeel is dat wanneer besloten wordt om de dammen niet meer te onderhouden, bijvoorbeeld als ze een positief effect hebben gehad op de schorontwikkeling, het niet nodig is om de dammen te verwijderen. Uiteindelijk zal het hout verteren wat de kosten bij een verandering in management beperkt houdt. Een deel van het houtmateriaal zal als organisch materiaal onderdeel gaan uitmaken van de schorrenbodem of wordt getransporteerd met het getij naar andere delen in het estuarium waar het afbreekt of vastgelegd wordt.

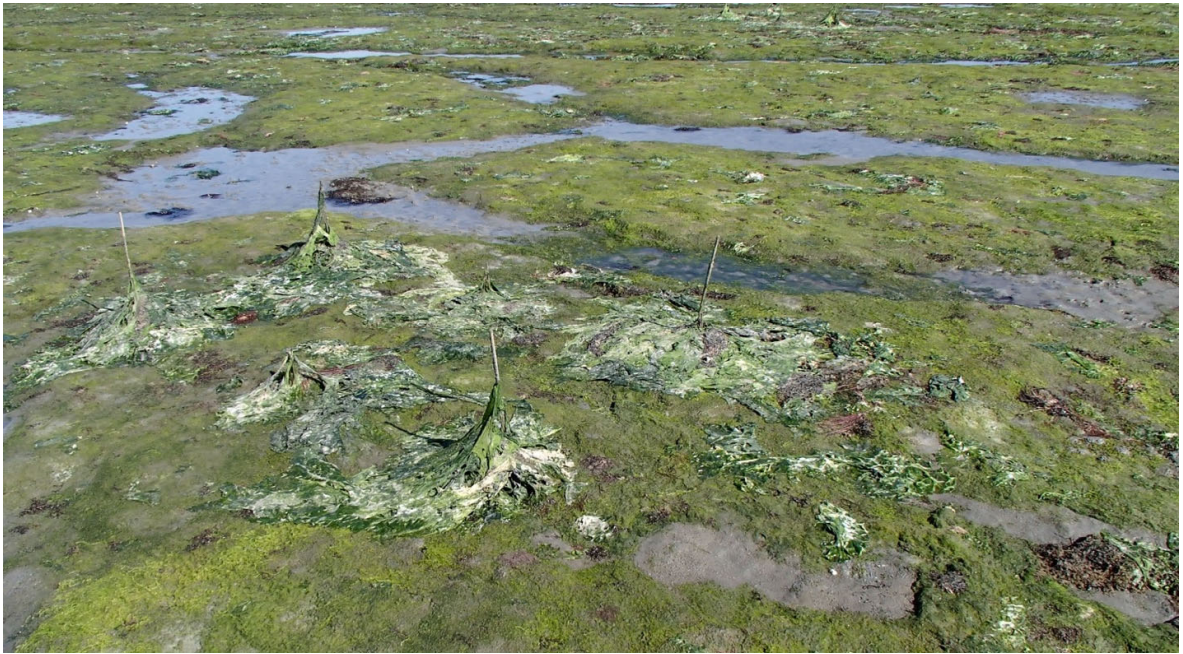
4.1.3. Aanplant

Het op grote schaal aanplanten van vegetatie is een mogelijkheid om schorherstel te faciliteren. Dit wordt bijvoorbeeld bij duinontwikkeling wordt gedaan met helm, en in het geval van schorren met bijvoorbeeld Engels slijkgras (Silliman et al., 2015). Dit is een directe manier voor het terugkrijgen van vegetatie, in tegenstelling tot het aanbrengen van dammen

waarbij het doel is om de omgevingscondities voor vegetatievestiging te verbeteren. Daarnaast kan voldoende aanplant van vegetatie de erosie van de schorrand verminderen doordat de vegetatie de golven dempt (Wang et al., 2017). Daarvoor is het wel van belang dat de vegetatie enkele tientallen meters breed voor de schorrand aangeplant wordt.

Het is logistiek te lastig en kostbaar om planten direct in de benodigde hoeveelheid en dichtheid uit te planten, daarom is van belang dat de planten uitgroeien tot de benodigde omvang en dichtheid. Daarvoor moeten de omgevingscondities voor de aanplant gunstig zijn zodat uitgroei kan plaatsvinden. Echter, wanneer aanplant voor de schorrand plaatsvindt dan worden planten in een licht erosieve omgeving geplaatst welke niet gunstig is voor overleving. Mogelijk kunnen de omgevingscondities door ondersteunende structuren (b.v. geotextiel en BESE, zie par.4.1.4 & 4.1.5) worden verbeterd.

Experimenten die vegetatiegroei zouden kunnen bevorderen zijn tot nu toe niet heel succesvol geweest. In 2015 en 2016 zijn verschillende experimenten gedaan met het transplanteren van slijkgras zaailingen en pollen. Deze experimenten laten zien dat gemiddeld 3% per dag van de getransplanteerde zaailingen verloren gaat (ongepubliceerde data, van Belzen et al.). Dit wil zeggen dat binnen een jaar (~150 dagen) alle getransplanteerde zaailingen weer verdwenen zijn zodat er dus geen langdurige vestiging plaatsvindt. De experimentele plots waren vaak volledig bedekt met zeesla (Fig.4.2). Waarschijnlijk is de bedekking door zeesla de oorzaak van de lage overlevingskansen van de zaailingen (van Hulzen et al., 2006), met name zeewaarts van de stenen dam. Getransplanteerd pollen slijkgras vanuit nabijgelegen vegetatie overleven langer, maar gaan uiteindelijk ook verloren, waardoor geen langere stabiele vegetatie gehandhaafd blijft. Momenteel loopt er een experiment met BESE-structuren (zie verder toelichting 4.1.5) waar de overleving van de aanplant duidelijk beter is. Deze lijkt ook eerste uitgroei te tonen (niet waargenomen in de uitplant zonder faciliterende structuren in 2015 en 2016). Maar deze resultaten zijn nog te voorbarig om goed te kunnen interpreteren. Komend voorjaar 2020 kan beter ingeschat worden wat deze experimenten hebben opgeleverd.



Figuur 4.2. Experimenteel werk door NIOZ bij Rattekaai (zomer 2015). (paneel boven) Zeesla bedekt experimentele plot waar getransplanteerd zaailingen snel verloren gaan. (paneel onder) Uitgeplante slijkgraspollen overleven langer en hebben minder last van de zeesla.

4.1.4. Geotextiel

Geotextiel is een techniek waarbij matten geweven van o.a. jutte of kokos worden gebruikt om sediment te stabiliseren en vestiging van planten te faciliteren. Het textiel dient uitsluitend om tijdens de eerste vestiging van planten limiterende factoren te overkomen, waarna het afbreek als het deze functie heeft vervuld. Geotextiel is meestal gemaakt van biologisch afbreekbaar materiaal waardoor er geen schadelijke effecten ontstaan wanneer het materiaal uiteenvalt. Maar geotextiel is breder inzetbaar, we denken dat het zowel gebruikt kan worden als bekleding van de schorrand om daarmee schorerosie tegen te gaan, maar ook dat het gebruikt kan worden om de ontwikkeling van schorrenvegetatie te faciliteren door de stabiliserende werking (tabel 4.1).

Door het NIOZ zijn er in de afgelopen jaren succesvol experimenten uitgevoerd met deze laatste techniek (Fig.4.3). Tijdens deze experimenten zijn er zaailingen opgekweekt direct in de matrix van de geweven textielstructuur, waarna het textiel is geplaatst op het kale slik voor de schorrand. Er zijn nog geen ervaringen opgedaan met het gebruik van geotextiel om de schorrand te bekleden en daarmee schorranderosie te verminderen of volledig te stoppen. Een groot voordeel van dit materiaal is de flexibiliteit om het in verschillende configuraties te plaatsen waardoor een meer natuurlijk ogende restauratie van de schorrenvegetatie mogelijk is.

Ook hier zal alleen in geval van een relatief grootschalige aanplant vóór de schorrand de erosie succesvol kunnen remmen. Maar zoals aangegeven kan het plaatsen van geotextiel op de schorrand zelf ook de schorranderosie tegen gaan. Echter, in tegenstelling tot de stenen en rijshouten dammen, zal het afdekken van de schorrand met geotextiel geen bescherming bieden tegen de aanwezige macro-algen zoals zeesla.

Toepassen van geotextiel is wel een bewerkelijke en daardoor een relatief dure methode, omdat het vooraf kiemen en opgroeien van planten in geotextiel en vervolgens het uitplaatsen ervan bewerkelijk en arbeidsintensief is. De kosten voor materiaal worden iets goedkoper ingeschat t.o.v. van rijshouten dammen, maar die voor arbeid in dezelfde orde van grote als de rijshouten dammen, maar normaal gesproken eenmalig.

Tot zover is er weinig bekend over hoe geotextiel de invang van koolstof in de bodem of andere processen die de kwaliteit van de schorrenvegetatie (b.v. biodiversiteit) bepalen beïnvloedt. Verwacht mag worden dat de geotextiel eenzelfde orde van grootte aan koolstofvastlegging genereert wanneer planten zich tussen de structuren gaan ontwikkelen als vegetatie zonder geotextiel als ondergrond. Visuele inspecties van het sediment onder de matten laten zien dat er anoxische (zuurstofloze) condities ontstaan wat lokaal positief is voor de vastlegging van koolstof. Door de open structuur van het textiel is het te verwachten dat het de afwatering en daarmee de drainage van het gebied niet negatief beïnvloed. Dit is positief voor de mate waarin de biomassa zich kan ontwikkelen.



Figuur 4.3. Engels slijkgras groeit goed in geotextiel van kokosvezel bij het schor van Sint Annaland (Oosterschelde, noordelijk t.o.v. het Verdrongen Land van Zuid-Beveland).

4.1.5. BESE-structuren

BESE-structuren zijn biologisch afbreekbare ecosysteem engineering elementen (Fig.4.4). Deze 3D-structuren zijn gemaakt van aardappelzetmeel en kunnen worden gebruikt voor het verbeteren van habitats en dienen als uitgangspunt voor het herstel van ecosystemen. Qua werking zijn ze vergelijkbaar met het gebruik van een geotextiel en dienen uitsluitend om de vestiging van planten te faciliteren, waarna een stabiele vegetatie overblijft ná afbreken van de structuren. De BESE-structuren kunnen dus ook gemakkelijk in verschillende configuraties worden geplaatst. Het verschil zit in de harde weinig flexibele structuur waardoor deze bovengronds kan uitsteken. Deze structuur kan dan als surrogaat vegetatie functioneren en onder de juiste condities de waterbeweging dempen en daarmee sediment en zaden invangen. Deze structuren dienen dus voornamelijk ter ondersteuning van de vestiging van planten, maar helpen niet direct bij het tegengaan van erosie van de schorrand.



Figuur 4.4. Engels slijkgras groeit en overleeft goed in BESE-structuren bij de Dortsman (Oosterschelde).

Op verschillende plekken in Nederland is er door NIOZ en BuWa geëxperimenteerd met BESE-structuren, zoals in de Waddenzee bij Texel en Griend en de Dortsman in de Oosterschelde. Momenteel loopt er een nieuw experiment van NIOZ en BuWa in Rattekaai waar deze structuren worden getest op het faciliteren van de vestiging van pioniervegetatie. De eerste resultaten zijn veelbelovend. De structuren zorgen ervoor dat de pioniervegetatie meer zuurstof in de bodem krijgen, waardoor planten sneller groeien (Fivash et al. 2019). Door de snellere groei kunnen de planten verslechterde hydrodynamische condities, door bijvoorbeeld krachtige golfcondities en stormen, beter tolereren en overleven. De resultaten bij de Dortsman (in de Oosterschelde ten noorden van het projectgebied) laten zien dat de overleving in de BESE-structuren substantieel beter is dan op het kale slik zonder BESE.

Bij het toepassen van BESE-structuren om aanplant te ondersteunen zal alleen een succesvolle relatief grootschalige aanplant vóór de schorranderosie kunnen verminderen en zelfs stoppen. Een bijkomend voordeel van de BESE-structuren lijkt te zijn dat de algenmatten geen verstikkende werking hebben op de aanplant. De ervaringen van de pilots en experimenten op Texel en Rattekaai laten zien dat de structuren wel degelijk door algenmatten bedekt kunnen raken, maar dat de planten hier duidelijk minder last van ondervinden dan in eerdere experimenten zonder de BESE-structuren. Waarschijnlijk kan door de iets verhoogde structuur de aanplant nog voldoende uitwisseling van gassen met de atmosfeer hebben en raakt daardoor niet verstikt.

Tot zover is er weinig bekend of de BESE-structuren zelf de invang van koolstof in de bodem beïnvloeden. Verwacht mag worden dat de structuren dezelfde orde van grootte aan koolstofvastlegging generen wanneer planten zicht tussen de structuren gaan ontwikkelen. Echter omdat aangetoond is dat de structuur ook meer zuurstof in de bodem brengt, moet er verder gekeken worden naar de effecten op de koolstofvastlegging. Daarnaast verwachten we, net als bij het gebruik van geotextiel, geen negatieve effecten op drainage door de open en poreuze structuur van deze biologisch afbreekbare structuren.

De afbraak van de BESE-structuren is afhankelijk van de gekozen kwaliteit van het bioplastische en de omgevingscondities. Het materiaal wordt eerst broos waardoor het in stukken breekt, maar vervolgens ontstaat een zachte mulch-achtige substantie. Onder hydrodynamische geëxponeerde condities (golven, stroming en sediment dynamiek) kan het materiaal snel afbreken. Ook zullen onder die omstandigheden de structuren zichzelf ingraven omdat ze een hogere dichtheid hebben dan het omliggend sediment. Verder hebben de inundatie frequentie, licht intensiteit en saliniteit een belangrijk effect op de afbraaksnelheid. Deze zijn dus zeer afhankelijk van de gekozen locatie. De hoge saliniteit in de Oosterschelde is gunstig en zorgt voor minder snelle afbraak dan in meer brakke systemen. Ook zijn de hydrodynamische condities op de slikken vóór de schorren mild. Op basis van de huidige experimenten wordt ingeschat dat de BESE-structuren minstens 10 jaar moeten kunnen blijven functioneren zonder volledige te desintegreren (persoonlijke communicatie met Greg Fivash, NIOZ). Er zijn inmiddels BESE-structuren van verschillende kwaliteit die sneller of juist langzamer kunnen afbreken. Hierdoor is het mogelijk om naar wens een geschikte verwachte levensduur te kiezen. Ook kan een kleur (bijvoorbeeld grijs in plaats van wit) gekozen worden die beter past in de litorale omgeving.

4.1.6. Suppleties & slibmotor

De laatste twee onderzochte opties die we hier bespreken zijn maatregelen met sediment. Dit kunnen suppleties zijn of een 'slibmotor' (4.1.6). Momenteel wordt slib dat gebaggerd wordt in de Oosterschelde voor onderhoud van havens en vaargeulen in de geulen (dus sublitoraal) gedumpt. Eventueel zou dit sediment gebruikt kunnen worden om het op tactische plaatsen op de slikken (litoraal) of de randen (sublitoraal) daarvan te plaatsen met natuurontwikkeling voor ogen. Dit wordt momenteel onderzocht binnen het Natuur Impuls project (Ysebaert et al., 2020 in prep.).

Suppleties

Door het plaatsen van suppleties in het litoraal op de slikken kan het slik voor het schor worden verhoogd waardoor minder golfenergie de schorrand bereikt wat een stabiliserend effect kan hebben op de schorrand en de vestiging van vegetatie kan stimuleren (Hu et al., 2015). Daarnaast kan het in sommige gevallen ook positief effect hebben op de aanvoer van sediment in de richting van het schor waardoor dit makkelijker aangroeit. Momenteel is er redelijke ervaring met het uitvoeren van dergelijke suppleties op de Galgenplaat en meest recent op de Roggeplaat. Omdat in de Oosterschelde de balans van de sediment aanvoerende en afbrekende hydrodynamische krachten is verschoven naar erosie van de slikken (zandhonger), is de verwachting de suppleties zeer waarschijnlijk de snelheid waarmee de hoogte van het slik afneemt voor een langere periode temperen. Maar uiteindelijk zal ook het opgebrachte sediment weer grotendeels naar de sublitorale geulen getransporteerd worden. In het geval van de in het kader van de Natuur Impuls doorgerekende suppletiescenario's bijvoorbeeld (zie hieronder) wordt verwacht dat er een laagdikte van 3 tot 7 mm wordt aangebracht (Ysebaert et al., 2020 in prep.). Met de huidige erosiesnelheden is de verwachte levensduur van dergelijke suppleties ~4-15 jaar waarna deze afgevlakt c.q. uitgedoofd. De zandfractie blijft echter wel onderdeel uitmaken van het litoraal.

Slibmotor

Een slibmotor is een grotere ingreep waarbij een grote hoeveelheid gebaggerd slib op een tactische plaats aan de rand in het sublitoraal van de te ontwikkelen slikken en schorren wordt

gesuppleerd. Het doel van deze innovatieve toepassing is om het sedimentaanbod naar de slikken en schorren te vergroten en daarmee de ontwikkeling te stimuleren. Met het oog op de huidige ontwikkelingen van de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland is dit een potentieel interessante methode. Er is echter nog niet heel veel ervaring met vergelijkbare projecten. Binnen het EcoShape Building with Nature-programma is in de Waddenzee een experiment uitgevoerd. Met de verwijderde baggerspecie uit de haven van Harlingen is een meerjarige semi-continue modder suppletie uitgevoerd in de buurt van kwelders. De verwachting was dat dit de natuurlijke waarden en de veiligheid tegen overstromingen zou doen toenemen. Echter tot nu toe lijkt het effect op de kwelders niet duurzaam aanwezig (Baptist et al., 2019). Dat wil zeggen dat het slib tijdelijk op de gewenste plaats terecht komt, maar dat de vegetatie zich niet voldoende ontwikkelt om het slib vast te houden (Baptist et al., 2019). Mogelijk kan met vegetatiebevorderende maatregelen zoals rijshoutendammen, geotextiel en BESE-structuren geëxperimenteerd worden om voldoende begroeiing te ontwikkelen die het slib wel vasthouden.

In de Waddenzee is de sediment beschikbaarheid (het gesuspendeerd sediment gehalte in de waterkolom) vele malen hoger dan in de Oosterschelde. Over het algemeen is daarom de situatie in de Waddenzee anders dan die van de Oosterschelde, maar ook in de Waddenzee speelt lokaal zandhonger bv. als gevolg van de afsluitdijk. Zoals reeds benoemd (par.2.2 & 3.2) is de resuspensie van sediment op het slik van groot belang voor de schorren in dit deel van de Oosterschelde om verticaal in hoogte te kunnen blijven toenemen en zeespiegelstijging bij te houden (Ma et al., 2014 & 2018). Daar komt bij dat een verhoging van het slik vóór het schor ook een positieve bijdrage kan leveren aan vestiging van pioniervegetatie en vermindering van schorerosie. Het is daarom goed mogelijk dat een sediment of slibmotor meer succes heeft in de sediment arme Oosterschelde.

Voorlopige resultaten studie Natuur impuls Oosterschelde

In het kader van het project Natuur Impuls Oosterschelde zijn door Deltares in samenwerking met WMR en NIOZ verschillende scenario's gemodelleerd (Ysebaert et al., 2020 in prep.). Doel van de Natuur Impuls is te onderzoeken of gebaggerd slib voor onderhoudswerkzaamheden van havens en vaargeulen gebruikt kan worden voor natuurontwikkeling. Focus ligt hier op de ontwikkeling van de slikken en getijdenplaatsen en niet zo zeer de ontwikkeling van schorren. Maar schorren zouden eventueel kunnen profiteren in het geval de suppleties in de nabijheid van schorren plaatsvinden.

In de eerste fase van het modelonderzoek is een suppletie in het litoraal op het slik nabij Rattekaai (tussen de laagwaterlijn en gemiddeld zeeniveau) vergeleken met een slibmotor in het sublitoraal nabij de Oesterdam en Rattekaai. Uit deze eerste fase van het onderzoek bleek dat er een grotere natuurwinst door een langere droogvalduur te behalen is met een suppletie dan met een slibmotor (Ysebaert et al., 2020 in prep.). Zeker in het geval van een lage frequentie van herhalen van het suppleties. Daarnaast is het toepassen van de suppletie vernieuwender. Er is daarop besloten om in de tweede fase van het onderzoek verder te kijken naar verschillende varianten van suppleties.

In de tweede fase is middels modellering gekeken of de locatie geoptimaliseerd kan worden met het oog op een definitief suppletie-ontwerp (Ysebaert et al., 2020 in prep.). In deze modellering is zowel naar slibverspreiding als zandtransport gekeken. Er zijn drie suppletiescenario's doorgerekend met respectievelijk 50k, 75k en 100k m³ sediment, wat overeenkomt met 10, 15 en 20 ha. Dit sediment wordt op een hoogte tussen 0 en 0,5 m NAP op de slikken bij het westelijke deel van Rattekaai opgebracht. Uit deze scenario's komt dat

het opbrengen van het sediment voornamelijk een effect gaat hebben op de omringende slikken en weinig op de schorren. De gemiddelde SSC (gesuspendeerd sediment concentratie in de waterkolom) zal licht toenemen, en dat kan eventueel ten bate komen van de ophoging van de schorren. Maar de effecten worden laag ingeschat, dus aanvullende maatregelen om sediment vast te houden in de schorren zullen waarschijnlijk niet heel veel toevoegen. Mogelijk is er een kleine positieve bijdrage aan maatregelen die tot doel hebben om vegetatie voor de schorrand tot ontwikkeling te laten komen. Dus de suppleties zullen voornamelijk de kwaliteit van de slikken verbeteren en niet zozeer van de schorren (Ysebaert et al., 2020 in prep.).

CO₂ invang en emissie

Tot zover is er weinig bekend over hoe het de toepassen van suppleties de invang en emissies van koolstof beïnvloeden. Omdat de focus vaak op het begroeide deel van het litoraal ligt, zijn er weinig gegevens bekend van de hoeveelheid koolstof opgeslagen in het sediment in de geulen en slikken van de Oosterschelde. Het koolstof aanwezig in het slib kan door het baggeren zelf deels vrijkomen. Maar slib bevat over het algemeen minder koolstof en koolstof in de slikken wordt relatief sneller afgebroken door chemische en biologische processen in het slik in vergelijking tot schorren. Verder kan verwacht worden dat, omdat de suppletie alleen voor extra sedimentbeschikbaarheid zorgt, versnelde ophoging van de schorren juist voor een toename van koolstofvastlegging kan zorgen. Op dit moment is er niet genoeg informatie voor handen om een degelijk inschatting te maken hoeveel CO₂ er vrijkomt als gevolg van deze activiteiten.

4.1.7. Begrazingsbeheer

Omdat er momenteel geen begrazing van de schorren van het Verdronken Land van Zuid-Beveland plaats vindt is dit type beheer niet direct aan de orde. Teunis & Didderen (2018) suggereren dat begrazingsbeheer ervoor kan zorgen dat meer koolstof in de bodem wordt opgeslagen. Voor studies in de Waddenzee (eilandschorren) zijn de inschattingen op de koolstofvastlegging positief als gevolg van de verandering in vegetatie en de investering van de vegetatie in ondergrondse biomassa (Elschot et al., 2013). Echter, een recente studie in Wales laat zien dat er geen noemenswaardige effecten van begrazing konden worden aangetoond (Harvey et al., 2019). Omdat er op dit moment nog genoeg onzekerheden zijn over de factoren die koolstofvastlegging positief beïnvloeden, laten we begrazingsbeheer voor nu buiten beschouwing.

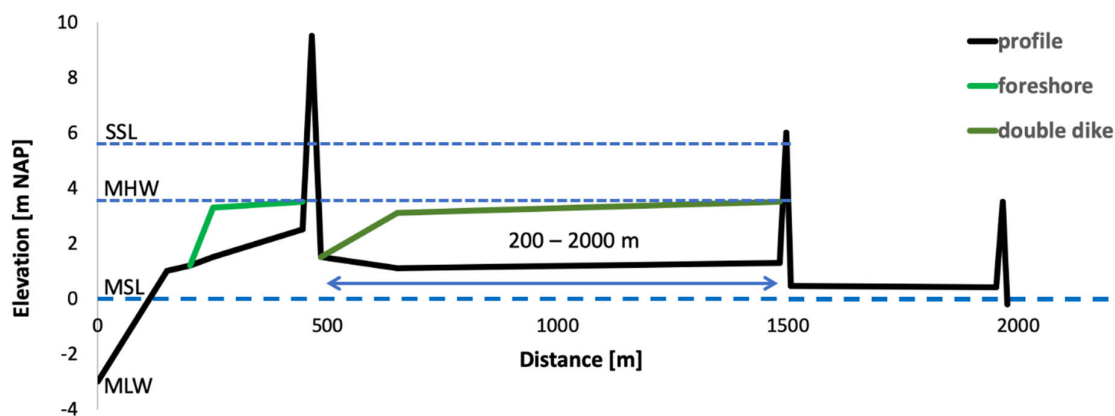
Tabel 4.1. Mogelijke maatregelen en hun potentiële effecten op het reduceren van erosie van de schorrand en de vestiging en ontwikkeling van schorrenbegroeiing. (+/++) positieve invloed, (~) onzeker, kan zowel positief als negatief uitpakken (0) geen invloed verwacht (-/-) negatieve invloed verwacht.

Maatregel	Voorkomen schorranderosie	Vestiging & ontwikkeling vegetatie
<i>Steenbestorting</i>	++	-
<i>Rijshouten dammen</i>	++	~
<i>Aanplant</i>	+	0
<i>Geotextiel</i>	+	++
<i>BESE-structuren</i>	+	++
<i>Suppleties</i>	~	+
<i>Slibmotor</i>	0	0

4.2. Binnendijkse maatregelen

De meest voor de hand liggende maatregel is dus te verhinderen dat via erosie het schoroppervlak afneemt en daarin opgeslagen koolstof alsnog als CO₂ in de atmosfeer terecht komt. Daarnaast lijkt het zinvol om maatregelen te nemen die schorontwikkeling bevorderen. Door de zandhonger in de Oosterschelde in combinatie met de stijgende zeespiegel is het zeer de vraag of de hiervoor genoemde buitendijkse maatregelen op de lange termijn standhouden. Als alternatief voor buitendijkse maatregelen voor schorontwikkeling kan ook gedacht worden aan binnendijkse ontwikkeling van schorren volgens bv. het dubbele dijken concept. Momenteel worden op verschillende locaties in Nederland studies gestart om de haalbaarheid van dit concept verder te onderzoeken. Het eerste pilotproject is inmiddels in Groningen van start (<https://www.provinciegroningen.nl/projecten/dubbele-dijk/>). Het dubbele dijken concept verenigt primair de waterveiligheidsopgave met natuurontwikkeling en secundair de potentiële voordelen voor koolstofvastlegging. Het water wordt naar binnen gelaten door een (evt. afsluitbare) getijdenduiker of een bres. Tussen de dijken ontstaat vervolgens een schor waar de bodem ophoogt. Hierdoor is het land achter de tweede dijk op een natuurlijk manier beter beschermd en hoeft deze niet veel hoger te zijn dan het niveau bij een stormvloed (SSL in Fig.4.5) om een waterkerende werking te hebben, wat veel kosten voor onderhoud en versterking van de dijken scheelt (Temmerman et al., 2013, Bouma et al., 2014). Daarnaast is

hier een grotere potentie om veel extra koolstof in de bodem op te slaan wanneer extra schorren worden gecreëerd waar nu polders zijn (van de Broek et al., 2019) in vergelijking tot beheer en (her)inrichting van bestaande schorren.



Figuur 4.5. Een typisch voorbeeldprofiel van hoe een dubbeldijksysteem er in Zeeland zou uitzien. De hoogte van de polder die het dichtst bij de primaire dijk ligt, is meestal het hoogst omdat de polder de jongste is (gemiddeld + 1 m NAP). Deze polder wordt getransformeerd naar een getijdenomgeving om onderdeel te worden van het dubbeldijksysteem, bv. door een getijdenduiker te plaatsen. Daardoor wordt de tweede dijk de primaire waterkering en zou het stormvloedniveau moeten kunnen stoppen (SSL, momenteel op +6 m NAP). Schorren zoals die aan de waterkant en het gebied tussen de dubbele dijken ontwikkelen typisch een hoogte tot gemiddeld hoog water (MHW) mits er voldoende tijd en sediment beschikbaar is. MSL = gemiddeld zeeniveau; MLW = gemiddeld laag water.

In potentie is inpassing van een dubbele dijk bij het Verdronken Land van Zuid-Beveland mogelijk in de vier aanliggende polders is indien daar de huidige economische activiteiten (voornamelijk land- en tuinbouw) verplaatst zouden worden. Deze polders hebben een verschillende omvang en diepteligging waardoor ze meer of minder sediment kunnen bergen (tabel 4.2). We gaan in deze berekening uit dat de schorren tussen de dubbele dijken zich ophogen tot gemiddeld hoog water (GHW), wat in dit geval 1,88 m NAP is. Het potentieel voor het vastleggen van CO₂ is op basis van de getallen gebruikt in hoofdstuk 3 berekend (dus uitgaande dat 50% van het ingevangen koolstof allochtoon is en niet bijdraagt). Met name in polders met een lage initiële hoogte kan een aanzienlijke hoeveelheid koolstof vastgelegd worden. Er is echter één belangrijke kanttekening te plaatsen. De polders grenzend aan de Westerschelde kunnen zeer waarschijnlijk voldoende sediment vasthouden omdat er voldoende in suspensie in de waterkolom is (60-80 mg/L (Kirwan et al., 2010)). Het water dat de dubbele dijk binnen gaat in de polders aangrenzend aan de Oosterschelde heeft niet zulke hoge sedimentconcentraties (gemiddelde SSC 6 mg/L (Nienhuis & Smaal, 1994)). Maar het feit dat de schorren in dit deel van de Oosterschelde als enige nog steeds ophogen door resuspensie van het sediment door golven op de voorliggende slikken (par.3.2) geeft aan dat binnendijkse schorrenontwikkelingen mogelijk zou kunnen zijn.

Mogelijk kan als oplossing voor het tekort aan gesuspendeerd materiaal sediment worden opgespoten in de polders of in de buurt van de opening (bres) of het doorlaatmiddel. Daarbij is het van belang dat de wateruitwisseling tussen polder en de Oosterschelde dan niet wordt belemmerd. Door het suppleren kunnen mogelijk geschikte condities voor schorrontwikkeling

en koolstofvastlegging gestimuleerd worden. Eventueel kan hiervoor eveneens sediment gebruikt worden dat vrijkomt bij onderhoudswerkzaamheden van de vaargeulen (zie par. 4.1.6 naar onderzoek in kader van Natuur Impuls Oosterschelde, Ysebaert et al. 2020 in prep.). Het gebruik van dergelijke technieken zou verder onderzocht moeten worden op effectiviteit, en haalbaarheid, als ook de CO₂-emissies die dit meebrengt. Te snelle opslibbing of afwezigheid van voldoende zaad en wortelstukken kan de vestiging en ontwikkeling van vegetatie belemmeren (Bouma et al., 2016) en daarmee mogelijk ook de koolstofvastlegging in deze nieuwe schorren. Dus nader onderzoek naar de koolstofvastlegging in recente ontpolderingsprojecten is wenselijk. Daarnaast is het belangrijk om te onderzoeken wat de kwaliteit is, en de eventuele aanwezigheid van verontreinigingen in het te verplaatsen sediment.

Tabel 4.2. Potentie voor koolstofvastlegging in binnendijks gebieden in de vorm van een dubbele dijk systeem.

Polder	Oppervlakte (ha)	Gemiddelde hoogte (m NAP)	Opslibhoogte (m)	ton C	ton CO₂
1	35	0,84	1,04	13.759	25.248
2	40	1,33	0,55	8.316	15.260
3	175	1,25	0,63	41.675	76.473
4	291	-0,37	2,25	247.496	454.154

5. Modelling van Blue Carbon in schorren en slikken

5.1. Doel van de modellering

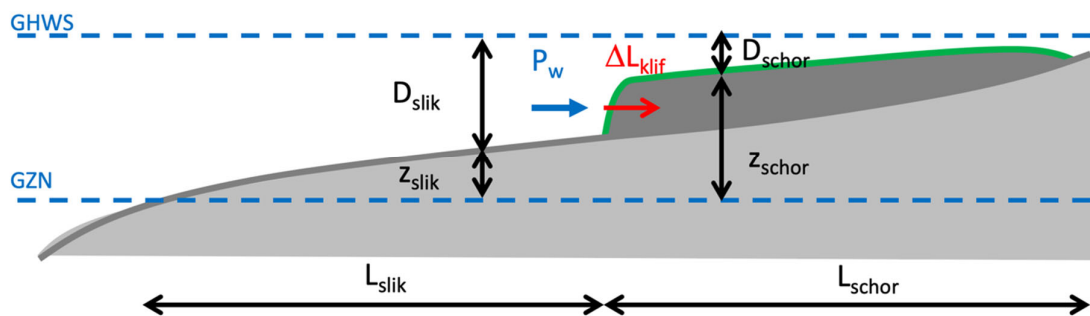
Het doel van de modellering is om een beter inzicht te geven over hoe de netto koolstofvastlegging verandert over de tijd als gevolg van de dynamische processen die het areaal en de hoogte van de schorren bepalen. De combinatie van wat er jaarlijks verloren gaat door schorranderosie en vastgelegd wordt door bodemophoging (sedimentatie) bepaalt de totale netto koolstofvastlegging van de schorren bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. In de toekomst kan de verhouding tussen die twee veranderen onder invloed van de zich verderzettende schorranderosie en zeespiegelstijging (hfst.3). Met een simpel biogeomorfologisch model is (1) voor een aantal zeespiegelstijging scenario's de toekomstige veranderingen in netto koolstofvastlegging in beeld gebracht, en (2) nader gekeken wat de additieve effecten in de tijd zijn wanneer maatregelen worden genomen tot het reduceren van schorranderosie.

5.2. Model beschrijving

Het simpele semi-empirische model dat gebruikt is voor de modellering van Blue Carbon in schorren en slikken vat in grote lijnen de essentie samen van de processen zoals deze beschreven zijn in paragraaf 2.2 (Conceptueel model schor dynamiek). Het model versimpelt de slikken en schorren tot twee aangrenzende compartimenten ('boxen') welke horizontaal ten opzichte van elkaar meer of minder ruimte kunnen innemen (Fig.5.1). Zo neemt door schorranderosie als gevolg van golven het areaal van de schorren af en van de slikken toe. Daarnaast kunnen de twee compartimenten in hoogte veranderen door erosie en sedimentatie. Als gevolg van resuspensie van het slik door golven en sedimenttransport herverdeelt het sediment zich tussen de twee compartimenten. Als parameters voor het model worden de empirische verkregen daling van het slik en de geobserveerde ophoging van de schorren gebruikt als uitgangspunt (hfst.3). Hieronder volgt een korte technische opsomming van dit simpele semi-empirische model.

Technische modelbeschrijving

De hoogte van de slikken daalt met de waargenomen (empirische) snelheid (gemiddeld 2 mm/jaar). Voor de schorren geldt dat de bodemhoogte stijgt met de huidige waargenomen snelheid (gemiddeld 6 mm/jaar). De snelheid van bodemophoging als gevolg van depositie van sediment neemt linear af met de waterdiepte t.o.v. gemiddeld hoog water tijdens springtij (GHWS); ofwel de waterdiepte (D_{schor}) is GHWS (in m NAP) minus de hoogte van het schor (z_{schor}). Om het effect van zeespiegelstijging mee te nemen wordt een extra daling van zowel het slik als het schor ten opzichte van gemiddeld hoogwater doorgerekend per tijdseenheid. Het model wordt doorgerekend in stappen van één jaar over een periode van 50 jaar.



Figuur 5.1. Schematische weergave van de modelopzet (dwarsaanzicht). GZN = gemiddeld zeeniveau, GHWS = gemiddeld hoog water tijdens springtij. Zie voor de andere symbolen de tekst.

Door erosie van de schorklif neemt de grootte (areaal) van het schorren-compartiment af en daarmee dus hoeveel sediment en koolstof die er vastgelegd kan worden. Erosie van de schorklif (ΔL_{cliff}) is een functie van de golfenergie (P_w) die op de schorklif komt (Wang et al., 2017). De golfenergie wordt berekend aan de hand van de maximale golfhoogte (H_{max}) die voor kan komen op het slik net voor de schorklif. Deze golfhoogte is in te schatten aan de hand van de waterdiepte boven het slik (D_{slik}). De maximale golfhoogte wordt bepaald door de strijklengte en de waterdiepte als $H_{max} = 0,15 * D_{slik}$ (Fagherazzi et al., 2012). De golfenergie (P_w) is evenredig aan het kwadraat van de maximale golfhoogte. De relatie tussen golfenergie en de erosiesnelheid van de schorklif is lineair (Wang et al. 2017). Daarom is de golfenergie die wordt geschat voor de huidige waterdiepte (start van simulatie) lineair door te berekenen wanneer de waterdiepte verandert. Dus wanneer de waterdiepte voor de schorklif toeneemt door erosie van het slik neemt de golfenergie op de schorklif toe. De golfenergie neemt zelfs kwadratisch toe met waterdiepte (Fagherazzi et al., 2012, Mariotti & Fagherazzi, 2010, 2012).

In dit simpele model nemen we geen effecten van vegetatie op schorranderosie of vegetatievestiging mee. We verwachten dat in de huidige situatie de vestiging van nieuwe vegetatie moeizaam is en veel onzekerheden met zich meebrengt door de effecten van de zandhonger (hfst.4) en focussen daarom op de temporele effecten van schorranderosie en bodemophoging in deze modellering.

5.3. Model analyse

Het model wordt specifiek voor het Verdrongen Land van Zuid-Beveland doorgerekend voor een periode van 50 jaar (2020 – 2070). Hier laten we de resultaten voor een doorrekening van het schor van Roelshoek zien. Omdat de aard van het model relatief simpel is, zijn de resultaten indicatief voor beide schorren. We onderzoeken met het model hoe de schorontwikkeling verloopt en de daaraan gerelateerde koolstof emissie en vastlegging en het nettoresultaat van die twee. Daarbij focussen we op het effect van zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging die voor de management scenario's worden doorgerekend zijn (Deltares, 2018):

- Baseline: 1,95 mm/jaar (huidig gemiddelde Nederland, Deltares zeespiegelmonitor)
- 3,16 mm/jaar (huidig globaal gemiddelde, IPCC)

- 6 mm/jaar (versnelde zeespiegelstijging)
- 12 mm/jaar (sterk versnelde zeespiegelstijging)

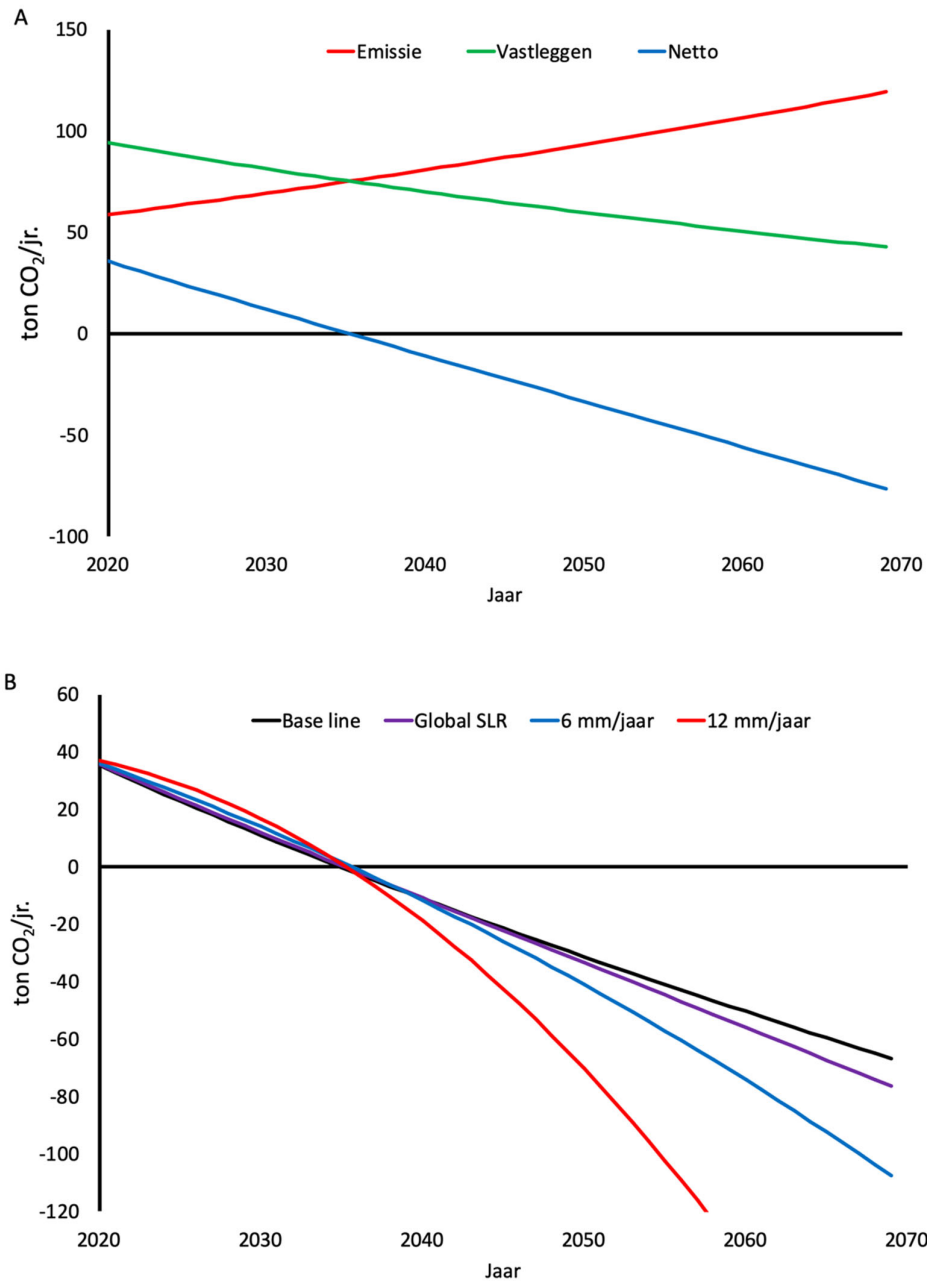
Verder vergelijken we het huidige Nederlandse scenario waarbij geen extra maatregelen zijn genomen voor schorerosie met een scenario waar dat wel is gedaan:

- Baseline: 0% reductie schorranderosie
- 50% reductie van schorranderosie
- 100% reductie schorranderosie

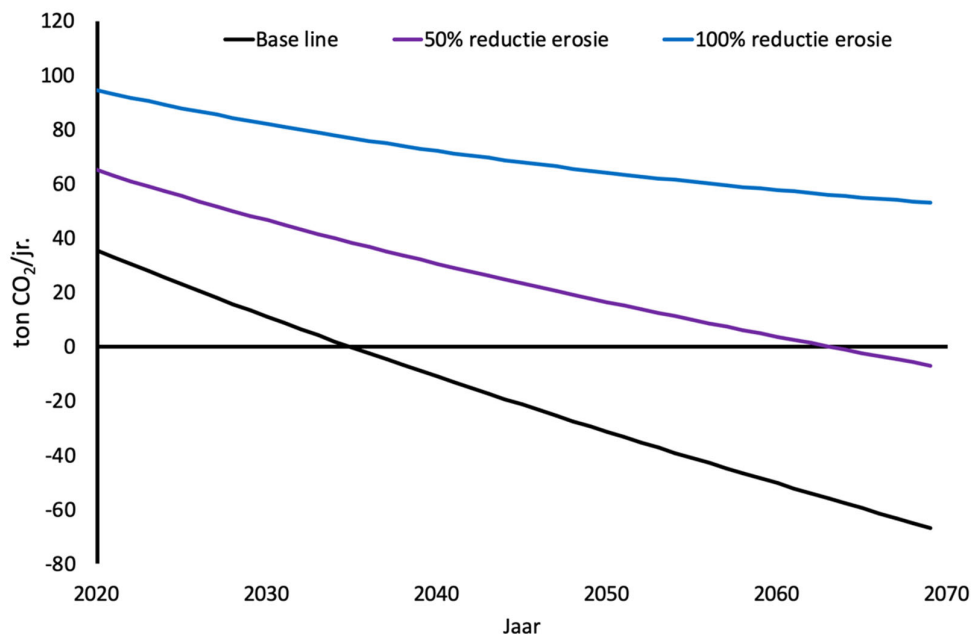
5.4. Model resultaten en discussie

Allereerst vergelijken we de koolstofvastlegging voor de verschillende zeespiegelstijging scenario's (Fig.5.2). De baseline simulatie ('business as usual') geeft aan dat de huidige netto koolstofvastlegging op termijn stopt (Fig.5.2.A). De verwachting is dat in 15 jaar tijd de netto vastlegging omslaat in netto emissie. Dit komt doordat aan de ene kant de schorranderosie over de tijd toeneemt als het gevolg van de grotere waterdiepte als gevolg van de erosie van het voorliggende slik. Grotere golven (meer golfenergie) kunnen dan de schorrand bereiken en daardoor neemt de CO₂-emissie over de tijd toe. Tegelijkertijd neemt de vastlegging door langzame bodemophoging in het schor af. Immers, omdat de waterdiepte van het schor afneemt, is er minder tijd voor depositie van sediment waardoor de snelheid van bodemophoging afneemt. Maar dat heeft tevens tot gevolg dat de vastlegging afneemt. De netto vastlegging verandert dus over de tijd van een positieve bijdrage naar een negatieve (er komt dan dus CO₂ terug in de atmosfeer). Het omslagpunt in de baseline simulatie ligt in 2035 (Fig.5.2.A&B).

Het omslagpunt van netto opslag naar netto bron van koolstof verschuift niet wezenlijk naarmate de snelheid van zeespiegelstijging hoger is (Fig.5.2.B). Dit komt omdat de zeespiegelstijging in de eerste 15 jaar zorgt voor zowel een versnelde ophoging door toegenomen depositie van sediment als versnelde schorranderosie door grotere golven. Het effect van de versnelde ophoging (sedimentatie) is bv. goed te zien in het sterk versnelde zeespiegelstijgingsscenario (12 mm/jaar). In dit simpele model wordt het effect van toenemende resuspensie van sediment door toenemende golfslag niet meegenomen. De toename in SSC door deze resuspensie zou ervoor kunnen zorgen dat de bodemophoging nog sneller verloopt omdat er meer sediment beschikbaar is waardoor de schorren beter kunnen meebewegen met de zeespiegel. Er ontbreekt dus een potentiële terugkoppeling die de lange-termijn dynamiek van de schorren en daarmee de koolstofvastlegging bepaald. De schattingen met behulp van de huidige modellering zijn dus enigszins conservatief en het voorspelde omslagpunt kan daarom verder in de tijd liggen. Feit blijft dat de verwachting is dat de schorren van een netto opslag naar een netto bron zullen omschakelen met de tijd. Dit is een inzicht dat niet uit de eerdere inventarisatie van de koolstofhuishouding (hfst.3) naar voren kwam. Daar leek er een positieve balans te zijn voor de koolstofvastlegging in de schorren van het Verdronken Land van Zuid-Beveland.



Figuur 5.2. Modeluitkomsten voor de zeespiegelstijging scenario 's. (A) De uitkomsten voor de baseline simulatie. Emissie als gevolg van schorranderosie, vastlegging als gevolg van bodemophoging (sedimentatie) en de netto koolstofvastlegging als het verschil tussen die twee. (B) Vergelijking van netto CO₂-vastlegging voor verschillende zeespiegelstijging scenario 's.



Figuur 5.3. Vergelijking van netto CO₂-vastlegging voor verschillende scenario's met schorranderosie reductie maatregelen.

De modellering laat vervolgens duidelijk zien dat er veel winst te behalen is wanneer ingezet wordt op reductie van de schorranderosie (Fig.5.3). Het verschil tussen de baseline (zwarte lijn in Fig.5.3) en de 50% of 100% erosie reductiemaatregelen is de bijdrage van de maatregel waar het bij de koolstofcertificering om gaat (Didderen & Teunis, 2018). In beide scenario's neemt het toegevoegde effect in de tijd zelfs toe. Met name de 100% reductie is aantrekkelijk omdat op termijn de schorren hun netto vastlegging blijven behouden. Maar ook in het geval van de 50% reductie, waar naar verloop van tijd (rond 2064) het schorrensysteem een netto bron van koolstof wordt, blijft dit een positieve bijdrage omdat er over deze periode geen koolstof wordt uitgestoten. Sterker nog, over de gesimuleerde periode van 50 jaar verdubbelt het toegevoegde effect op de koolstofvastlegging. In 2019 is de netto toegevoegde koolstofvastlegging 29 en 58 ton CO₂-eq/jaar voor de 50% en 100% reductie scenario's. Dit loopt op tot respectievelijk 60 en 120 ton CO₂-eq/jaar voor deze scenario's in 2070. Op basis van deze getallen worden de ontwikkeling ten opzichte van de baseline in de tijd inzichtelijker.

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1. Conclusies

Binnen deze verkennende studie zijn op basis van de beschikbare gegevens in combinatie met een conceptuele biogeomorfologische modellering de huidige en toekomstige mogelijkheden tot het vastleggen van koolstof in de schorren van het Verdrongen Land verkend.

Allereerst is gekeken naar de huidige ontwikkelingen in het gebied en is antwoord gezocht op de volgende vraag:

Hoe ontwikkelden de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland in de Oosterschelde zich in de afgelopen decennia en wat is de huidige status?

- *Wat zijn de oorzaken van deze ontwikkeling?*

De ontwikkelingen van de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (Roelshoek 23 ha en Rattekaai 131 ha) laten zien dat het gebied al enige decennia erosief is. De schorrand bij Roelshoek trekt terug naar de zeedijk met een gemiddelde snelheid van 0,6 m/jaar en bij Rattekaai verdwijnt het niet beschermde deel van de schorrand met een snelheid van 0,45 m/jaar. Daar waar in 2008 is ingegrepen met het aanleggen van stenen dammen vóór de schorren zijn de schorren over een lengte van ongeveer 1400 m gestabiliseerd. Hier zijn de schorren zelfs wat toegenomen in areaal, maar is wel afgenomen in kwaliteit (productie van biomassa is lager). Op de plaatsen waar deze maatregel niet genomen is - 4790 m van de schorrand is niet verdedigd - neemt het areaal nog steeds af.

De lange-termijntrends zijn zeer waarschijnlijk in hoofdzaak te verklaren door de lage sedimentbeschikbaarheid in de Oosterschelde. Na het plaatsen van de Oosterscheldekering en het bouwen van de compartimenteringsdammen is de getijdenstroming afgenomen, en daarmee is ook de gesuspendeerde sediment concentratie (SSC) in de waterkolom significant afgenomen. Hierdoor is de balans van sedimentatie en erosie die de opbouw van slikken en schorren bepalen veranderd. Sediment verplaatst zich netto van de slikken en schorren in het litorale gebied naar de geulen in het sublitoraal (we noemen dit zandhonger). We zien dit terug in de daling van de slikken. Boven gemiddeld hoog water daalt het slik bij Roelshoek met gemiddeld 3 mm/jaar. Voor Rattekaai daalt het slik gemiddeld met 2,5 mm/jaar. De verwachting is dat deze trend de komende jaren doorzet.

In de schorren kan sediment nog wel sedimenteren en vastgehouden worden op het moment dat er voldoende sediment in de waterkolom beschikbaar is. Deze condities kunnen zich voordoen wanneer in de Kom door golven het sediment in suspensie gebracht wordt. Gemiddeld hoogt Rattekaai met 7,7 mm per jaar op. De inschatting is dat de schorren met de huidige zeespiegelstijging kunnen blijven meegroeien. Deze toename in hoogte zal ook een positief effect hebben op de koolstofvastlegging. Echter, de hoogteontwikkeling zorgt er waarschijnlijk op langere termijn voor dat het hoogteverschil tussen de schorrand en het eroderende slik verder toeneemt (versteiling). Ook de golfenergie op de schorrand neemt toe door de toenemende waterdiepte (afnemende hoogte van het slik door erosie). Tezamen zorgen deze trends ervoor dat de schorranderosie toeneemt en de kansen op vestiging van vegetatie juist afnemen. Netto komt dit dus neer op een verwachte verdere afname in schorareaal.

Vervolgens is er antwoord gezocht op de vraag:

Hoeveel koolstof ligt er opgeslagen en hoeveel kan er in de toekomst worden vastgelegd door aangroei of verdwijnt er door erosie?

- *Hoe verschillen de potentie voor koolstofvastlegging tussen huidig management ('business as usual' of 'baseline') hierbij rekening houdend met effect van zeespiegelstijging*

In de huidige situatie ligt er in totaal 58.212 ton koolstof opgeslagen: In Rattekaai 49.518 ton C en in Roelshoek 8.694 ton C. Dit komt overeen met een totaal van 106.819 ton CO₂-equivalent, waarbij we uitgaan van een 50% allochtoon koolstof die niet meegerekend wordt.

Onder het huidige beheer ('business as usual' of 'baseline') gaat er in totaal 0,24 ha/jaar van de schorren verloren en de verwachting is dat deze trend doorzet. Wat neer komt op een huidige emissie van 168 ton CO₂-eq/jaar als gevolg van de schorranderosie.

Schorren leggen ook koolstof vast door bodemophoging. Het sediment dat nodig is voor deze ophoging is afkomstig van het voorliggende slik en de eroderende schorklif. Door resuspensie als gevolg van golfwerking komt dit sediment in de waterkolom en zal deels sedimenteren op het schor en zorgen voor de ophoging van de bodem. Door deze bodemophoging wordt bij de huidige sedimentatiesnelheid in totaal 795 ton CO₂-eq/jaar vastgelegd (Rattekaai en Roelshoek samen). Netto (vastlegging door bodemophoging – emissie door schorranderosie) komt dit dus neer op 627 ton CO₂-eq/jaar vastlegging. Dit komt overeen met de uitstoot van ruim 31 gezinnen (à 20 ton koolstof per jaar).

Toekomstige ontwikkelingen

De combinatie van wat er jaarlijks verloren gaat door schorranderosie en vastgelegd wordt door bodemophoging (sedimentatie) bepaalt de totale netto koolstofvastlegging van de schorren bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. In de toekomst kan de verhouding tussen die twee veranderen onder invloed van de zich verderzettende schorranderosie en zeespiegelstijging. Met een simpel biogeomorfologisch model is voor een aantal zeespiegelstijging scenario's getracht dit toekomstbeeld te schetsen.

De resultaten van de modellering laten zien dat onder alle vier de doorgerekende zeespiegelstijging scenario's (1,95 -12 mm/jaar) de huidige netto vastlegging binnen ongeveer 10 jaar omslaat naar een netto emissie. Door toenemende erosie van de schorrand verdwijnt er rond 2027 meer CO₂-eq dan dat er gecompenseerd kan worden en vastgelegd door bodemophoging (sedimentatie) in de schorren. Dit komt aan de ene kant doordat de snelheid waarmee de schorrenbodem ophoogt afneemt naarmate de waterdiepte in de schorren afneemt en daarmee de vastlegging afneemt. Aan de andere kant neemt de schorranderosie toe omdat de golfenergie op de schorrand toeneemt door de toenemende waterdiepte vóór de schorren door erosie van de slikken. Doordat de huidige snelheid van bodemophoging groter is dan de zeespiegelstijging in de verschillende scenario's is de inschatting dat de schorren kunnen mee blijven groeien met de zeespiegel. Ook bij het meest extreme zeespiegelstijging scenario (12 mm/jaar) lijkt dit te lukken in deze simulaties. Daarbij moet wel een kanttekening geplaatst worden dat het model te simpel is om een exacte inschatten van het omslagpunt waarbij de schorren niet meer mee kunnen bewegen (Kirwan et al., 2010). Er bestaat een reëel risico dat een groter deel van de opgeslagen koolstof uiteindelijk weer vrijkomt door erosie van de schorren dan nu ingeschat onder het meest

extreme scenario voor zeespiegelstijging (12 mm/jaar). Onverlet blijft de inschatting dat de schorren van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland onder het huidige beheer op relatief korte termijn al een koolstofbron worden in plaats van een opslag. Bij snellere zeespiegelstijging verandert het omslagpunt waarop de netto vastlegging negatief wordt niet noemenswaardig.

Als laatste komen we terug op de vraag:

Wat zijn de mogelijkheden om door middel van maatregelen schorerosie te verminderen en schorontwikkeling te stimuleren en hierdoor koolstof duurzaam (lange termijn) vast te leggen?

- *Waar liggen mogelijkheden buitendijks en binnendijks?*

Zoals in het hoofdstuk 4 “Verkenning mogelijkheden voor stimuleren koolstofvastlegging” is beschreven is het mogelijk om zowel buiten- als binnendijks maatregelen te nemen die zorgen voor een verbetering/uitbreiding van de schorrenatuur en als bijkomstig gevolg ook tot netto extra koolstofvastlegging leiden.

Buitendijkse maatregelen

Er zijn een beperkt aantal mogelijkheden om buitendijks schorranderosie te voorkomen of vegetatieontwikkeling te faciliteren. Meer concreet valt er te denken aan maatregelen als het plaatsen van verschillende type zachte (water- en sediment doorlatende) oeverbeschermingen, zoals rijshouten dammetjes en geotextiel. Ook kunnen BESE of andere biologische afbreekbare structuren geplaatst worden om die initiële vegetatie vestiging te stimuleren. In de aanbevelingen gaan we hier nader op in (par.6.2). De verwachting is echter wel dat onder de huidige lage sediment beschikbaarheid in de waterkolom (SSC) maatregelen die gericht zijn op vestiging van nieuwe schorvegetatie waarschijnlijk niet stabiel zijn op de lange termijn. Ook de stabiliteit van de schorrand op de langere termijn is niet gegarandeerd, wanneer er geen maatregelen genomen worden om de beschermingen in stand te houden. Die zouden eventueel gemitigeerd kunnen worden door nieuwe aanvullende maatregelen op termijn zoals suppleties van de slikken vlak voor de schorren.

Zoals in Hfst. 2 behandeld kun je schorontwikkeling en -dynamiek niet los zien van de voorliggende slikken. Samen met schorren vormen ze het voorland, en een goed stabiel en breed voorland is de basis voor een langdurig stabiel breed en potentieel uitgroeiend schor. Behoud van het slik is dus net zo belangrijk, niet alleen ter voorkoming van schorranderosie maar voor de volledige ontwikkeling en behoud van het voorland. Maatregelen dienen zich dus ook op het slik te richten, bijv. door suppleties, al dan niet aangevuld met cascades van erosie-remmende maatregelen langsheen de volledige gradiënt van de laagwaterlijn tot de schorrand.

Echter op de langere tijdschalen spelen onzekerheden over wat er met de Oosterscheldekering gaat gebeuren, en dringen andere maatregelen zich waarschijnlijk op.

Effecten van maatregelen ter voorkoming van schorranderosie op koolstofvastlegging

Op de korte termijn valt er in ieder geval direct winst te halen voor koolstofvastlegging door erosiereductie en mogelijk zelfs schorontwikkeling door bv. aanleg van stenen of rijshouten

dammen en het toepassen van geotextiel of BESE-structuren. Deze maatregel moet wel de kwaliteit van de schorvegetatie garanderen zoals een goede uitwisseling tussen het slik en schor van water, sediment en nutriënten. Aanvullende stenen dammen hebben daarom niet de voorkeur. Maatregelen op basis van suppletietechnieken geven mogelijk soelaas. Momenteel worden er ervaringen opgedaan met dergelijke maatregelen in de Oosterschelde (bv. Oesterdam en Roggenplaat). De mogelijkheden om dit toe te passen op de slikken bij Rattekaai worden momenteel verder onderzocht in een nadere hydrodynamische en morfologische studie om tot een gedegen advies hieromtrent te komen (in het kader van de Natuur Impuls Oosterschelde door Ysebaert et al. (2020 in prep.)).

Toekomstige ontwikkelingen van de schorren op basis van de modelering wijzen uit dat maatregelen om schorranderosie tegen te gaan in alle gevallen een additief effect hebben ten opzichte van de baseline (geen maatregelen nemen). Zelf als beperkte (bv. 50%) schorranderosie maatregelen worden genomen waarbij het omslagpunt van netto vastleggen naar emissie ~44 jaar wordt uitgesteld dan zijn de baten positief en nemen in de tijd zelfs met ruim 100% toe tot 60 ton CO₂-eq/jaar over de gehele periode van 50 jaar. Bij 100% reductie van schorrand erosie verdubbelt de koolstofvastlegging, wat neer komt op het compenseren van de uitstoot van 3 gezinnen aan de start tot 6 gezinnen aan het eind van de periode. Voorkomen van afslag heeft echter voornamelijk de voorkeur met het oog op behoud van het typische estuariene natuur en andere ecosysteemdiensten zoals kustverdediging.

Binnendijkse maatregelen

Behoud van het huidige areaal schorren kan met de voorgestelde maatregelen op korte tot middellange termijn gerealiseerd worden, voor behoud en versterking van dit natuurype op langere termijn, alsmede voor de bijbehorende CO₂-vastlegging, moet ook gekeken worden naar de mogelijkheid voor schorontwikkeling landwaarts (dus binnendijks). Hier hebben we gekeken naar de mogelijke potentie om waterveiligheid te combineren met natuurontwikkeling en koolstofvastlegging en daarmee samenhangende andere ecosysteemdiensten in een viertal polders aangrenzend aan de schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. In deze polders is potentie voor het vastleggen van ruim 571.135 ton CO₂-eq. Dit resulteert in, met de geschatte opslibnelheden, een vastlegging van gemiddeld over de eerste 30 jaar van 9.759 ton CO₂-eq/jaar. Een gezin stoot gemiddeld ongeveer 20 ton CO₂-eq/jaar uit. Dus een dergelijke natuurontwikkeling kan tegelijk zorgen voor een betere waterveiligheid (een dubbele dijk als onderdeel van een robuust waterkerend landschap) en compenseert de uitstoot van 488 gezinnen elke jaar voor 30 jaar (win-win). Wanneer een dergelijk gebied eenmaal is aangelegd, blijft het gemiddeld ook elk jaar een extra 2.251 ton CO₂-eq/jaar (113 gezinnen) vastleggen terwijl het gebied meebeweegt met de rijzende zeespiegel en duurzaam kan functioneren voor de waterveiligheid.

6.2. Aanbevelingen

Als laatste formuleren we een aantal aanbevelingen voor (1) het behoud van de huidige schorren van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, (2) het beter begrijpen van de herkomst en dynamiek van koolstof in schorren, en (3) de verdere ontwikkeling van biogeomorfologische modellering t.b.v. een beter inzicht in schordynamiek en koolstofvastlegging bij verschillende zeespiegel en beheersscenario's.

Pilot voor erosiereductie en stimuleren schorontwikkeling van Verdrongen Land van Zuid-Beveland

Momenteel is in totaal nog ruim 4790 m van de schorrand van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland onbeschermd. Meer specifiek gaat het om ongeveer 1800 m schorrand bij het schor van Roelshoek en 2990 m onbeschermd schorrand bij Rattekaai. Over de lengte van de met stenen dammen beschermde schorrand (1400 m) komt geen schorranderosie meer voor. Maar omdat de kwaliteit van de vegetatie (gemiddelde biomassa en vestiging van planten) landwaarts van de stenen dam minder is dan van het onbeschermd deel stellen we voor om een pilot in te richten op basis van alternatieve maatregelen. Het verschil in kwaliteit van de schorren met en zonder stenen dam heeft zeer waarschijnlijk te maken met verschillen in de ontwatering van de schorren en de daarbij horende processen die de bodemcondities en sedimenthuishouding bepalen. Verdere uitbreiding van de stenen dam zal zeer waarschijnlijk leiden tot vergelijkbare verminderde afwatering. Daarom stellen we maatregelen voor op basis van de meer waterdoorlatende alternatieve opties. Met name rijshouten dammen en geotextiel lijken hier geschikte alternatieven om een pilot mee uit te voeren. Speciale aandacht zal moeten worden gevestigd op de veranderingen die genomen maatregelen op de ontwatering en sedimenthuishouding van het gebied hebben en of de kwaliteit van de al aanwezige vegetatie verandert als gevolg van de maatregelen.

Eventueel kan er ook nog gekozen worden om delen waar de stenen dam niet goed lijkt te functioneren te vervangen door één van de alternatieven. Direct ten oosten van de oude haven van Rattekaai ligt een stuk stenen dam waar landwaarts minimale vegetatievestiging plaatsvindt (Fig.3.1). De afwatering van het gebied is hier minder goed, getuige de grote plassen water die bij de openingen in de stenen dam blijven staan. Waarschijnlijk blijven hierdoor grote delen van dit deel van het Rattekaai schor kaal ondanks dat de hoogte geschikt is voor vegetatievestiging. Hier zou een combinatie van een vervanging van de stenen dam en aanvullende maatregelen om vegetatievestiging te bevorderen een goede optie kunnen zijn. Met geotextiel of de BESE-structuren kunnen experimenten worden uitgevoerd om schorontwikkeling te bevorderen. Omdat de aanwezigheid van grote hoeveelheden algenmatten een probleem kunnen vormen voor de vestiging van schorrenplanten, kan verder gedacht worden aan rijshouten dammen die hoog genoeg zijn om een groot deel van de algenmatten af te vangen voor deze bij het te ontwikkelen gebied landwaarts van de dam kunnen komen.

Voor de korte termijn heeft dus de voorkeur om de hierboven voorgestelde buitendijkse maatregelen verder uit te werken tot een pilot. Voor maximale kennisontwikkeling zou het daarbij goed zijn om een aantal verschillende methoden tegelijk te testen met de bijbehorende monitoring van de ontwikkelingen van de ontwatering en daaraan gerelateerde sedimenthuishouding en bovengrondse en ondergrondse kwaliteit van schorrenvegetatie en -bodem. Verder is het raadzaam om hiervoor een projectteam samen te stellen van de betrokken stakeholders en experts. Een eventuele vervolgpilot zal bij voorkeur in het voorjaar worden ingezet om de effecten gedurende het groeiseizoen goed waar te kunnen nemen.

Begrijpen herkomst en dynamiek van koolstof in schorren

Lokaal wordt de kwaliteit en kwantiteit van koolstofvastlegging voor een groot deel bepaald door de aanwezigheid van schorrenplanten. Meer specifiek wordt de balans tussen aanwas door productie en import van organisch materiaal, en de afvoer door decompositie en export aan de andere kant, door een samenspel van processen en factoren bepaald. Deze processen zijn zeer sterk afhankelijk van gebiedseigen kenmerken zoals soortensamenstelling van de aanwezige vegetatie, bodemgesteldheid en de hydrodynamische en hydrologische condities. Om een goede inschatting te kunnen maken van de verschillende bijdrages zijn daarom gebiedsspecifieke metingen en experimenten nodig. Door middel van het in kaart brengen

van deze gebiedseigen samenstelling van de koolstof herkomst kan vervolgens een betere inschatting gemaakt worden van het aandeel vastgelegde koolstof die kan worden meegenomen in de berekeningen voor additionele koolstofvastlegging (certificeerbaar).

De rol van de verschillende sleutelfactoren voor koolstofdynamiek in schorren (en kwelders) moet dus verder worden onderzocht om beter in staat te zijn koolstofgehalte en vastlegging op basis van gebiedseigen kenmerken in te schatten. Veel van de kennis die we hebben op het gebied van koolstofvastlegging in schorren is gebaseerd op Amerikaans onderzoek. Het gaat daar veelal om veenrijke schorren, waar de bodemopbouw dus voornamelijk door organische materiaal plaatsvindt en veel minder door het afzetten van sediment, zoals het geval is in onze meer minerale schorren (Kirwan & Mudd 2012). Zo zijn eigenschappen van de bodemopbouw in minerale schorren heel anders door de aanwezigheid van relatief veel sediment. Afhankelijk van de korrelgrootte van het sediment kan het water beter of minder goed draineren met verschillende effecten op de zuurstofloosheid van de bodem. De gegevens die tot dusver door BuWa zijn verzameld laten zien dat er een grote potentie is voor het vastleggen van koolstof in de Nederlandse schorren (Teunis & Didderen, 2018, Hoefsloot et al., 2020). Tegelijkertijd blijkt een grote variatie in de waargenomen koolstofconcentraties in de bodem en zijn er geen duidelijk relaties gevonden m.b.t. de verschillende schorzones van pionierzone tot middel en hoog schor (Teunis & Didderen, 2018, Hoefsloot et al., 2020). Ook de variatie tussen de verschillende schorren kon niet afdoende worden verklaard. Het heeft daarom aanbeveling om aanvullend onderzoek te doen om deze kennislacune op te vullen.

Onderzoek naar de herkomst, ouderdom en labiliteit van de vastgelegde koolstof in het onderzoeksgebied is sterk aan te raden. Met name met betrekking tot hoeveel van de aanwezige koolstof in de schorrenbodem meegenomen mag worden als effectief en additioneel vastgelegde koolstof (en dus certificeerbaar is) bestaat nog de nodige onzekerheid (van de Broek et al., 2018, Hoefsloot et al., 2020). In de berekeningen in dit rapport hebben we specifiek voor de schorren van het Verdronken Land van Zuid-Beveland voor gekozen om het gemiddelde van 50% als allochtoon koolstof aan te nemen, dat wil zeggen dat maar 50% van de aanwezige koolstof als relevante en certificeerbare fractie wordt ingeschat. Ook Hoefsloot et al., (2020) komen op een gemiddelde van 50% voor schorren en kwelders, maar dat is voor heel Nederland. Alleen met aanvullend onderzoek waarbij de koolstofbijdragen worden gefractioneerd kunnen mogelijk op basis van gebiedseigen kenmerken betere inschattingen gedaan worden.

Ontwikkeling van modellering schordynamiek en koolstofvastlegging

De inzichten die opgedaan zijn in deze modelleringstudie geven duidelijk het belang aan van een goede inschatting van de lange-termijn dynamiek van een schor en het voorliggende slik. Deze dynamiek bepaalt immers de stabiliteit van koolstofvastlegging (en andere ecosysteemdiensten). Een analyse van de ruimtelijke lange-termijn ontwikkeling van de schorren in combinatie met modellering zal dus een wezenlijk onderdeel moeten uitmaken van elke strategie om extra koolstofvastlegging reëel in te kunnen schatten zodat een goede baseline bepaald kan worden (zie bv. Teunis & Didderen, 2018). Alleen dan kan ook de additionele waarde van eventuele maatregelen onder verschillende zeespiegelstijging- of managementscenario's ingeschat worden, met de daar bijhorende ruimtelijke variatie en temporele onzekerheden. De modellering kan helpen, zeker wanneer deze verder ontwikkeld wordt met aandacht voor de lokale sleutelfactoren en processen die de schordynamiek beïnvloeden, en ook de verschillende aspecten van de koolstofvastlegging (herkomst, ouderdom, labiliteit) meer expliciet in het model worden geïntegreerd.

7. Literatuur

- Al-Haj, A. N., & Fulweiler, R. W. (2020). A Synthesis of Methane Emissions from Shallow Vegetated Coastal Ecosystems. *Global Change Biology*.
- Allen, J. R. (2000). Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 19(12), 1155-1231.
- Allred, M., Borrelli, J. J., Hoellein, T., Bruesewitz, D., & Zarnoch, C. Marsh Plants Enhance Coastal Marsh Resilience by Changing Sediment Oxygen and Sulfide Concentrations in an Urban, Eutrophic Estuary. *Estuaries and Coasts*, 1-13.
- Balke, T., Stock, M., Jensen, K., Bouma, T. J., & Kleyer, M. (2016). A global analysis of the seaward salt marsh extent: The importance of tidal range. *Water Resources Research*, 52(5), 3775-3786.
- Baptist, M., Vroom, J., Willemsem, P., Puijtenbroek, M., van Maren, B., van Steijn, P., ... & Colosimo, I. (2019). *Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor': evaluation based on monitoring* (No. C088/19). Ecoshape.
- Bellis, V. J., & Gaither, A. C. (1985). Seasonality of aboveground and belowground biomass for six salt marsh plant species. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*, 95-109.
- Boerema, A., Geerts, L., Oosterlee, L., Temmerman, S., & Meire, P. (2016). Ecosystem service delivery in restoration projects: the effect of ecological succession on the benefits of tidal marsh restoration. *Ecology and Society*, 21(2).
- Bouma, T. J., van Belzen, J., Balke, T., Van Dalen, J., Klaassen, P., Hartog, A. M., ... & Herman, P. M. J. (2016). Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics. *Limnology and oceanography*, 61(6), 2261-2275.
- Bouma, T. J., van Belzen, J., Balke, T., Zhu, Z., Airoidi, L., Blight, A. J., ... & Lara, J. L. (2014). Identifying knowledge gaps hampering application of intertidal habitats in coastal protection: Opportunities & steps to take. *Coastal Engineering*, 87, 147-157.
- Boschker, H. T. S., De Brouwer, J. F. C., & Cappenberg, T. E. (1999). The contribution of macrophyte-derived organic matter to microbial biomass in salt-marsh sediments: Stable carbon isotope analysis of microbial biomarkers. *Limnology and Oceanography*, 44(2), 309-319.
- Cozzoli, F., Smolders, S., Eelkema, M., Ysebaert, T., Escaravage, V., Temmerman, S., ... & Bouma, T. J. (2017). A modeling approach to assess coastal management effects on benthic habitat quality: A case study on coastal defense and navigability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 184, 67-82.

- De Leeuw, J., Apon, L. P., Herman, P. M., de Munck, W., & Beeftink, W. G. (1994). The response of salt marsh vegetation to tidal reduction caused by the Oosterschelde storm-surge barrier. In *The Oosterschelde Estuary (The Netherlands): a Case-Study of a Changing Ecosystem* (pp. 335-353). Springer, Dordrecht.
- de Leeuw, C., Bakker, C., Baptist, M. J., & Elschot, K. (2018). *Kansen voor Kwelders*. Vereniging van Bos-en Natuurterreineigenaren, VBNE.
- De Leeuw, J., Van den Dool, A., De Munck, W., Nieuwenhuize, J., & Beeftink, W. G. (1991). Factors influencing the soil salinity regime along an intertidal gradient. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 32(1), 87-97.
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961-968.
- Elschot, K., Bouma, T. J., Temmerman, S., & Bakker, J. P. (2013). Effects of long-term grazing on sediment deposition and salt-marsh accretion rates. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 133, 109-115.
- Fagherazzi, S., Kirwan, M. L., Mudd, S. M., Guntenspergen, G. R., Temmerman, S., D'Alpaos, A., ... & Clough, J. (2012). Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, 50(1).
- Fivash, G. S., van Belzen, J. V., Temmink, R. J., Didden, K., Lengkeek, W., Heide, T. V. D., & Bouma, T. J. (2019). Elevated micro-topography boosts growth rates in *Salicornia procumbens* by amplifying a tidally driven oxygen pump: implications for natural recruitment and restoration. *Annals of botany*.
- Hoefsloot, G., H.A. van der Jagt & W.E. Van Duin, (2020). Blue carbon in Nederlandse kwelders. Kansen voor extra CO2-vastlegging in kwelders/ Bureau Waardenburg, Culemborg.
- Hu, Z., van Belzen, J., Van Der Wal, D., Balke, T., Wang, Z. B., Stive, M., & Bouma, T. J. (2015). Windows of opportunity for salt marsh vegetation establishment on bare tidal flats: The importance of temporal and spatial variability in hydrodynamic forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(7), 1450-1469.
- Janousek, C. N., Buffington, K. J., Guntenspergen, G. R., Thorne, K. M., Dugger, B. D., & Takekawa, J. Y. (2017). Inundation, vegetation, and sediment effects on litter decomposition in Pacific Coast tidal marshes. *Ecosystems*, 20(7), 1296-1310.
- Kirwan, M. L., Guntenspergen, G. R., d'Alpaos, A., Morris, J. T., Mudd, S. M., & Temmerman, S. (2010). Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophysical research letters*, 37(23).
- Kirwan, M. L., & Mudd, S. M. (2012). Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change. *Nature*, 489(7417), 550.
- Kirwan, M. L., & Murray, A. B. (2007). A coupled geomorphic and ecological model of tidal marsh evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(15), 6118-6122.

- Kirwan, M. L., Temmerman, S., Skeehan, E. E., Guntenspergen, G. R., & Fagherazzi, S. (2016). Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature Climate Change*, 6(3), 253-260.
- Ladd, C. J., Duggan-Edwards, M. F., Bouma, T. J., Pagès, J. F., & Skov, M. W. (2019). Sediment supply explains long-term and large-scale patterns in saltmarsh lateral expansion and erosion. *Geophysical Research Letters*.
- Lof, M., Schenau, S., de Jong, R., Remme, R., Graveland, C., & Hein, L. (2017). *The SEEA EEA carbon account for the Netherlands*. Statistics Netherlands.
- Mariotti, G., & Fagherazzi, S. (2010). A numerical model for the coupled long-term evolution of salt marshes and tidal flats. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F1).
- Mariotti, G., & Fagherazzi, S. (2013). Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 110(14), 5353-5356.
- Ma, Z., Ysebaert, T., van der Wal, D., de Jong, D. J., Li, X., & Herman, P. M. (2014). Long-term salt marsh vertical accretion in a tidal bay with reduced sediment supply. *Estuarine, coastal and shelf science*, 146, 14-23.
- Ma, Z., Ysebaert, T., van der Wal, D., & Herman, P. M. (2018). Conditional effects of tides and waves on short-term marsh sedimentation dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2243-2255.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., ... & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560.
- Moens, T. W. G., Herman, P. M. J., & Ysebaert, T. (2001). Eten en gegeten worden in het Schelde-estuarium. *De Levende Natuur*, 102(2), 52-55.
- Mueller, P., Schile-Beers, L. M., Mozdzer, T. J., Chmura, G. L., Dinter, T., Kuzyakov, Y., ... & Ibáñez, C. (2018). Global-change effects on early-stage decomposition processes in tidal wetlands—implications from a global survey using standardized litter. *Biogeosciences*, 15, 3189.
- Nabuurs, G. J., & Verkaik, E. (1999). De 10 meest gestelde vragen over koolstofvastlegging in bos. *Nederlands Bosbouw tijdschrift*, 71(1), 2-5.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). Blue carbon: A Rapid Response Assessment. Environment.
- Nienhuis, P. H., & Smaal, A. C. (1994). The Oosterschelde estuary, a case-study of a changing ecosystem: an introduction. *Hydrobiologia*, 282(1), 1-14.
- Raupach, M. R., & Canadell, J. G. (2008). Observing a vulnerable carbon cycle. In *The Continental-Scale Greenhouse Gas Balance of Europe* (pp. 5-32). Springer, New York, NY.

- Schwarz, C., Gourgue, O., Van Belzen, J., Zhu, Z., Bouma, T. J., Van De Koppel, J., ... & Temmerman, S. (2018). Self-organization of a biogeomorphic landscape controlled by plant life-history traits. *Nature Geoscience*, *11*(9), 672.
- Silliman, B. R., Schrack, E., He, Q., Cope, R., Santoni, A., van der Heide, T., Jacobi, R., Jacobi, M. & van de Koppel, J. (2015). Facilitation shifts paradigms and can amplify coastal restoration efforts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(46), 14295-14300.
- Strain, E. M., van Belzen, J., Comandini, P., Wong, J., Bouma, T. J., & Airoldi, L. (2017). The role of changing climate in driving the shift from perennial grasses to annual succulents in a Mediterranean saltmarsh. *Journal of Ecology*, *105*(5), 1374-1385.
- Tamis, J. E., & Foekema, E. M. (2015). *A review of blue carbon in the Netherlands* (No. C151/15). IMARES.
- Teunis, M., & Didden, K. (2018). Blue Carbon in Nederlandse kwelders. Resultaten van vier kwelders in beheergebieden van Natuurmonumenten. Bureau Waardenburg Rapportnr. 18-301. Bureau Waardenburg, Culemborg.
- van Belzen, J., van de Koppel, J., Kirwan, M. L., van Der Wal, D., Herman, P. M., Dakos, V., ... & Bouma, T. J. (2017). Vegetation recovery in tidal marshes reveals critical slowing down under increased inundation. *Nature communications*, *8*, 15811.
- van de Broek, M., Baert, L., Temmerman, S., & Govers, G. (2019). Soil organic carbon stocks in a tidal marsh landscape are dominated by human marsh embankment and subsequent marsh progradation. *European Journal of Soil Science*, *70*(2), 338-349.
- van de Broek, M., Vandendriessche, C., Poppelmonde, D., Merckx, R., Temmerman, S., & Govers, G. (2018). Long-term organic carbon sequestration in tidal marsh sediments is dominated by old-aged allochthonous inputs in a macrotidal estuary. *Global change biology*, *24*(6), 2498-2512.
- van der Jagt, H.A., W.E. van Duin & G. Hoefsloot, (2020). Blue Carbon in Peazemmerlannen. Blue Carbon potentie bij verkweldering van een zomerpolder. Bureau Waardenburg Rapportnr. 19-250. Bureau Waardenburg, Culemborg.
- van Hulzen, J. B., Van Soelen, J., Herman, P. M. J., & Bouma, T. J. (2006). The significance of spatial and temporal patterns of algal mat deposition in structuring salt marsh vegetation. *Journal of Vegetation Science*, *17*(3), 291-298.
- Vertegaal, P., W. Borren, B. Schoute (2019). Natte natuur i het klimaatakkoord – win win in het kwadraat. Vakblad natuur bos landschap, februari 2019: 12-15.
- Wang, H., van der Wal, D., Li, X., Van Belzen, J., Herman, P. M., Hu, Z., Z., Ge, Z., Zhang, L. & Bouma, T. J. (2017). Zooming in and out: Scale dependence of extrinsic and intrinsic factors affecting salt marsh erosion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *122*(7), 1455-1470.
- Ysebaert, T., Walles, B., van der Werf, J., van Kessel, T., de Vet, L., Hansen, J., van Duren, L., Bouma, T.J., & Stronkhorst, J. (2020). Natuur Impuls Oosterschelde:

toepassingsmodelijkheden van slibrijk sediment voor natuurbouw. Wageningen Marine Research, Rapport [in prep.].

Zhu, Z., van Belzen, J., Zhu, Q., van de Koppel, J., & Bouma, T. J. (2019). Vegetation recovery on neighboring tidal flats forms an Achilles' heel of saltmarsh resilience to sea level rise. *Limnology and Oceanography*.

Websites:

<https://www.bese-products.com>

NWO-NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research is the national oceanographic institute and principally performs academically excellent multidisciplinary fundamental and frontier applied marine research addressing important scientific and societal questions pertinent to the functioning of oceans and seas.

NIOZ also serves as national marine research facilitator (NMF) for the Netherlands scientific community. NIOZ stimulates and supports multidisciplinary fundamental and frontier applied marine research, education and marine policy development in the national and international context.

NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research is part of institutes organization of NWO, since 2016 in cooperation with Utrecht University.



Utrecht University

www.nioz.nl

