



# Monitoring vegetatie ontwikkeling op land

Rapportage t.b.v project WN08 2019 Marker Wadden - Remote Sensing

**Deltares**

15 november 2021

Project Monitoring vegetatie ontwikkeling op land


Opdrachtgever Deltares

Document

Status Concept 01  
Datum 15 november 2021  
Referentie 119777/21-017.059

Projectcode 119777  
Projectleider ir. C.H. Clemens  
Projectdirecteur ir. R. Bouw

Auteur(s) F.L.H. Klein Schaarsberg MSc en dr. ir. K. Ivushkin  
Gecontroleerd door ir. C.H. Clemens en L.W. Moth MSc  
Goedgekeurd door ir. C.H. Clemens

Paraaf 

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

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

© Witteveen+Bos

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

## INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>5</b>
1.1	Achtergrond	5
1.2	Aanleiding	6
1.3	Doelstelling	7
1.4	Leeswijzer	7
<b>2</b>	<b>METHODEN</b>	<b>8</b>
2.1	Algemene werkwijze	8
2.1.1	Inrichting werkomgeving en kwaliteitsborging	9
2.1.2	Vaststellen veldwaarnemingen voor modelvalidatie	9
2.1.3	Model architecturen	9
2.1.4	Nauwkeurigheid van modellen	10
2.2	Methoden vaststellen kartering 2018	11
2.2.1	Selectie en voorbewerking Remote Sensing data	11
2.2.2	Vaststellen veldwaarnemingen	12
2.2.3	Modelopzet	13
2.3	Methoden vaststellen kartering 2020	13
2.3.1	Selectie van Remote Sensing data	13
2.3.2	Vaststellen veldwaarnemingen	15
2.3.3	Modelopzet	16
2.4	Methoden vaststellen kartering 2021	16
2.4.1	Selectie van Remote Sensing data	16
2.4.2	Vaststellen veldwaarnemingen	17
2.4.3	Modelopzet	18
2.5	Werkwijze vaststellen vegetatieontwikkeling	18
<b>3</b>	<b>RESULTATEN EN ANALYSE</b>	<b>19</b>
3.1	Resulterende vegetatiekartering per jaar	19
3.1.1	Vegetatiekartering 2018	19
3.1.2	Vegetatiekartering 2020	23
3.1.3	Vegetatiekartering 2021	26
3.2	Ontwikkeling van vegetatie	29
3.3	Relatie tot MEP indicatoren en doelen Marker Wadden	31

Laatste pagina 33

**Bijlage(n)** **Aantal pagina's**

I	Satellietbeeld Marker Wadden 2021	1
II	Veldwaarnemingen 2018	2
III	Veldwaarnemingen 2020	1
IV	Veldwaarnemingen 2021	1
V	Vegetatiekartering 2018	2
VI	Vegetatiekartering 2020	1
VII	Vegetatiekartering 2021	1
VIII	Vegetatiekartering 2018.zip (separaat digitaal bestand)	
IX	Vegetatiekartering 2020.zip (separaat digitaal bestand)	
X	Vegetatiekartering 2021.zip (separaat digitaal bestand)	

# 1

## INLEIDING

### 1.1 Achtergrond

Ten behoeve van het natuurlijk herstel van het Markermeer is een groep kunstmatige eilanden aangelegd in het Markermeer: de Marker Wadden. Afbeelding 1.1 laat een satellietbeeld zien van de eilanden, waarin de verschillende compartimenten zijn aangemerkt (een hoge resolutie afbeelding is opgenomen in bijlage I). Deze eilanden moeten enerzijds zorgen voor een betere waterkwaliteit in het Markermeer, en anderzijds dienen ze habitat te bieden aan tal van dieren zowel boven als onder water.

Ten gunste van de kennisontwikkeling rondom de Marker Wadden is het Kennis en Innovatieprogramma Marker Wadden opgesteld (KIMa). Een centraal onderdeel binnen KIMa is de monitoring van de ontwikkeling van de waterkwaliteit in het Markermeer en de vegetatie op de Marker Wadden. De informatie die hieruit voortvloeit dient inzicht te geven in thema 2 van KIMa (Ecosysteem van waarde); en dan specifiek op evaluatievraag 1:

---

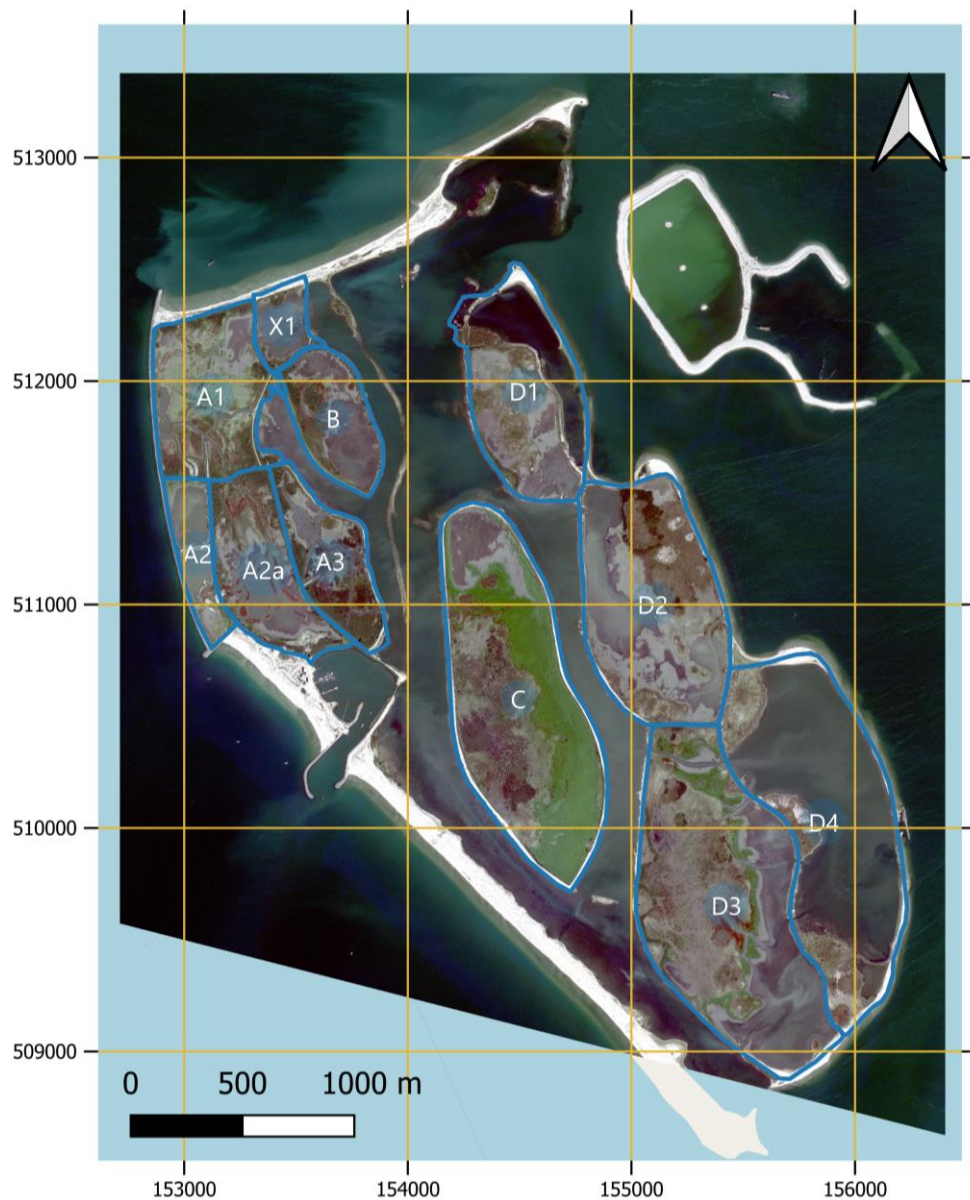
Kan een natuurlijk voedselrijk moeras zich ontwikkelen en duurzaam in stand houden? Het gaat hierbij om het ontstaan van gradiënten in bodemsamenstelling en dichtheid van macrofauna en vis. Wat is de invloed van de inrichting hierbij?

---

In het kader van KIMa heeft Deltares opdracht gekregen van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat voor de uitvoering van het project 'WN08 2019 Marken Wadden - Remote Sensing'. Daarbinnen is het de bedoeling dat de vegetatie geautomatiseerd gevolgd wordt met behulp van Remote Sensing data en methoden. Klassieke *in situ* monitoringstechnieken zijn vaak duur en tijdrovend. Met behulp van Remote Sensing kunnen in potentie grote oppervlakten bestudeerd worden.

Witteveen+Bos heeft van Deltares de opdracht gekregen om werkzaamheden met betrekking tot het deelproject 'het toepassen van Remote Sensing ten behoeve van inzicht in de vegetatieontwikkeling van de Marker Wadden' uit te voeren, overeenkomstig het plan van aanpak met kenmerk 191777/20-011.172, gedateerd 17 juli 2020.

Afbeelding 1.1 Satellietbeeld van de Marker Wadden genomen door Superview satelliet op 8 september 2021, met daarin de verschillende compartimenten aangegeven. Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



## 1.2 Aanleiding

In 2019 is door Witteveen+Bos in opdracht van Deltares een verkenning uitgevoerd met als doel vast te stellen in welke mate het mogelijk is om met behulp van Remote Sensing de ontwikkeling van vegetatie op de Marker Wadden te monitoren. Het rapport 'Verkenning Remote Sensing voor vegetatie op land' is opgeleverd met kenmerk 116909/19-020.349.

### Verkenning Remote Sensing voor vegetatie op land

In deze verkenning is gekozen om data te verzamelen voor de zomer van 2018. Voor die periode is een selectie uitgevoerd naar beschikbare en bruikbare Remote Sensing datasets. Daarbij is enerzijds bekeken welke openbaar beschikbare optische satellietdata geschikt zijn, en anderzijds welke aanvullende datasets reeds binnen KIMa beschikbaar zijn. Wat betreft satellietdata is gebruik gemaakt van spectrale data van de Triplesat en Sentinel-2 satellieten. Daarnaast zijn binnen KIMa hoge resolutie dronebeelden beschikbaar van het gebied. Deze beelden zijn gebruikt om enerzijds een vegetatiekartering in hoge resolutie te genereren, en anderzijds als bron voor het opnemen van veldwaarnemingen (ground truth).

Witteveen+Bos heeft diverse machine learning modellen onderzocht om met de verschillende datasets vegetatiekarteringen te genereren. Deze modellen worden met behulp van veldwaarnemingen 'getraind' in het herkennen van vegetatietypen in het beeldmateriaal. Voor satellietbeelden is onderzocht hoe *k-means clustering*, *support vector machines classificatie* en *random forest classificatie* modellen in staat zijn om vegetatie in kaart te brengen. Daarbij zijn statistieken 'accuracy', 'precision', 'recall' en 'f1-score' gebruikt om maat te geven aan de nauwkeurigheid van het model en de resulterende vegetatiekartering. Op het hoge resolutie dronebeeld is een convolutioneel neuraal netwerk (U-Net) toegepast. Dergelijke modellen gebruiken onderlinge verbanden tussen pixels in het beeld om vegetatie te herkennen, vergelijkbaar met het herkennen van (blad)structuur. Dit model resulteert in een vegetatiekartering met hoge resolutie, en hoge nauwkeurigheid.

In deze verkenning kwam naar voren dat de kwaliteit van de gebruikte data valt of staat met de kwaliteit van de vegetatiekartering. Ondanks dat de Marker Wadden vrij groot zijn, zijn de morfologische en ecologische patronen dusdanig fijn dat de relatief lage resolutie Sentinel-2 beelden niet voldoende zijn om informatie te verzamelen over de vegetatieontwikkeling. Bij voorkeur worden beelden gebruikt met een hogere resolutie, zoals een beeld van de Superview satelliet (vanaf 2019), of een hoge resolutie dronebeeld. De U-Netkartering laat zien dat het met hoge resolutie beelden van 2018 goed mogelijk is om vegetatie op de Marker Wadden in kaart te brengen.

### 1.3 Doelstelling

Doel van dit project is om de analysemethodiek zoals die is uitgewerkt in de verkenning en toegepast op data uit 2018, te herhalen voor 2020 en 2021. Dit laatste jaar is een belangrijk jaar in de evaluatie van de vegetatieontwikkeling op de Marker Wadden gezien de oplevering en evaluatie van de eerste fase. Het jaar 2019 is niet meegenomen in de analyse, omdat in dit jaar werkzaamheden zijn uitgevoerd die een negatief effect hadden op de vegetatiegroei. Daarom is voorgesteld om Remote Sensing toe te passen als meettechniek voor vegetatiekartering op die jaren waarin uitbreiding van vegetatie verwacht wordt.

Met het genereren van vegetatiekarteringen op basis van Remote Sensing data ontstaat een beeld van de vegetatie voor meerdere jaargangen. Deze kunnen vervolgens met elkaar worden vergeleken ten behoeve van het vaststellen van de MEP-indicatoren. Dit stelt ons in staat om de analyse toe te spitsen op het doelbereik van de Marker Wadden. Daarnaast kunnen we met de meetreeks van 2018 - 2021 de successiesnelheid in beeld brengen. Dit geeft ons een beeld hoe snel bepaalde habitattypen zich ontwikkelen.

### 1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk 2 beschrijft de methoden die zijn toegepast binnen dit project, in algemene zin, en specifiek voor het genereren van de Remote Sensing vegetatie karteringen voor de jaren 2018, 2020 en 2021 afzonderlijk. In dit hoofdstuk wordt ook beschreven hoe hieruit de ontwikkeling van vegetatie in beeld gebracht wordt. Hoofdstuk 3 gaat in op de resultaten (de vegetatie karteringen per jaar), en de analyse hiervan. Dit rapport wordt afgesloten door hoofdstuk 4, waarin conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen.

# 2

## METHODEN

Dit hoofdstuk beschrijft de methoden die worden gebruikt om vegetatiekarteringen te genereren. Aangezien deze methoden per monitoringsjaar lichtelijk verschillen is dit hoofdstuk als volgt opgezet:

- in paragraaf 2.1 wordt de algemene werkwijze toegelicht die is toegepast voor het genereren van de vegetatiekarteringen;
- achtereenvolgens gaan paragrafen 2.2, 2.3 en 2.4 in op de methoden voor het genereren van vegetatiekarteringen voor de jaren 2018, 2020 en 2021. Daarin wordt telkens toegelicht welke Remote Sensing data geselecteerd zijn, welke veldwaarnemingen gebruikt zijn en welke modelarchitectuur is toegepast;
- afsluitend gaat paragraaf 2.5 in op methoden wat betreft het in beeld brengen van de vegetatieontwikkeling.

De daadwerkelijke resultaten (welteverstaan de karteringen voor de jaren 2018, 2020 en 2021), alsmede de analyse op deze resultaten, zijn opgenomen in hoofdstuk 3 van dit rapport.

### 2.1 Algemene werkwijze

Samen met veldwaarnemingen vormt Remote Sensing data de basis voor de jaarlijkse vegetatiekartering. Met behulp van machine learning wordt een model 'getraind' om in de Remote Sensing data kenmerken te herkennen die uniek zijn voor de opgenomen vegetatie soort in de veldwaarnemingen. Daarmee is het model in staat om punten uit de Remote Sensing data toe te kennen aan een specifiek vegetatietype.

Door de modellen in de trainingsfase slechts een deel van de velddata te laten zien (zgn. trainingsdata, typisch 80 % van de beschikbare veldwaarnemingen), kan het model worden geëvalueerd aan de hand van de overige veldwaarnemingen. Zo kan de nauwkeurigheid van het model, en daarmee de nauwkeurigheid van de resulterende vegetatiekartering zonder vooroordeel gekwantificeerd worden.

De modellen worden vervolgens gebruikt om de vegetatie op de gehele Marker Wadden voor elk van de monitoringsjaren afzonderlijk in kaart te brengen. Daarmee ontstaat een gebied dekkende vegetatiekarteringen voor elk van de jaren 2018, 2020 en 2021. Om het eindbeeld wat betreft vegetatie van deze jaren zo goed mogelijk in kaart te brengen wordt Remote Sensing data geselecteerd aan het eind van het groeiseizoen van de vegetatie op de Marker Wadden.

Deze paragraaf is voornamelijk bedoeld om generieke methoden toe te lichten, daar waar ze nuttig zijn voor de leesbaarheid van de rest van het rapport. Werkwijzen specifiek voor het genereren van de vegetatiekarteringen voor de jaren 2018, 2020 en 2021 zijn afzonderlijk toegelicht in paragrafen 2.2, 2.3 en 2.4. In de paragrafen 2.1.1 tot en met 2.1.4 hieronder gaan in op het inrichten van de werkomgeving en kwaliteitsborging, op het vaststellen van veldwaarnemingen, op de gebruikte modelarchitecturen, en de nauwkeurigheidsbepaling van deze modellen.



## 2.1.1 Inrichting werkomgeving en kwaliteitsborging

Voor het project is ten behoeve van het projectteam een data-repository ingericht. In deze werkomgeving zijn de ruwe en bewerkte data opgeslagen. Voor dit project zijn de datasets zowel handmatig als via een script of een API verzameld.

Voor de gebruikte algoritmes is binnen Witteveen+Bos een codebase ingericht. Ook is binnen dit project gebruik gemaakt van de 'DataLens'. Dit is een Python-toolbox met scripts om Remote Sensing data in te winnen, op te werken, te analyseren en de resultaten te ontsluiten. De kwaliteit van alle gebruikte scripts in dit project is geborgd door aantoonbaar tweede lezerschap toe te passen in combinatie met versiebeheer. Hiervoor maken wij gebruik van GitLAB en wordt gewerkt overeenkomstig volgens Agile/Scrum en DevOps-methodiek welke is vastgelegd in interne procedures. Hiermee borgen wij dat de kwaliteit van de analyse en gemaakte code gehandhaafd blijft.

## 2.1.2 Vaststellen veldwaarnemingen voor modeltraining en -validatie

Een cruciaal onderdeel voor het vaststellen van gebied dekkende vegetatiekarteringen van de Marker Wadden zijn betrouwbare veldwaarnemingen. Deze veldwaarnemingen worden enerzijds gebruikt om modellen mee te trainen, en anderzijds om deze modellen mee te valideren.

Deze datasets met veldwaarnemingen worden per monitoringsjaar opgesteld. Deze datasets bevatten representatieve vlakken van de dominante vegetatietypen op dat moment (dit staat nader toegelicht in paragrafen 2.2 tot en met 2.4). Bij het intekenen van deze vlakken wordt ten behoeven van een nauwkeurige gebied dekkende kartering rekening gehouden met de volgende punten:

- 1 een vlak omvat slechts één vegetatie klasse;
- 2 per vegetatie klasse zijn meerdere vlakken opgenomen, en is in totaal voldoende oppervlak opgenomen in de dataset met veldwaarnemingen;
- 3 de vlakken zijn groot genoeg om meerdere datapunten in de Remote Sensing data te omvatten (in het geval van beeldmateriaal zijn de vlakken groot genoeg om meerdere beeldpixels te beslaan);
- 4 naast vegetatie zijn ook voorbeelden opgenomen in de klasse 'geen vegetatie klasse', daarbij kan worden gedacht aan kale bodem en water.

De datasets komen tot stand aan de hand van (gearchiveerde) veldwaarnemingen in de vorm van GIS kaarten en geogerefererde foto's in het veld. Met behulp van de Remote Sensing data worden vlakken ingetekend. Dit resulteert in een GIS kaart met daarin voorbeelden van de dominante soorten.

Voor elk van de jaren is een dataset met veldwaarnemingen opgesteld door een ecooloog binnen Witteveen+Bos met expertkennis van het gebied. Deze expert kennis waarborgt de kwaliteit van de veldwaarnemingen. De ecooloog selecteert representatieve vlakken op basis van de actuele veldsituatie (bijvoorbeeld aan de hand van gearchiveerde georefererde foto's uit het veld, en op basis van de gebruikte Remote Sensing data), en expert judgement.

## 2.1.3 Model architecturen

Binnen dit project is een tweetal model architecturen gebruikt om vegetatie in kaart te brengen: een *Random Forest* classificatie model, en het *U-Net*, een convolutioneel neurale netwerk. De opzet van deze modellen is hieronder kort toegelicht.

### Random Forest classificatie

Een *Random Forest* is een machine learning classificatie algoritme. Het model is opgebouwd uit meerdere *beslisbomen*. Een beslisboom is een algoritme dat data leert te categoriseren aan de hand van een model met knooppunten en vertakkingen. Bij elk knooppunt wordt een datapunt getest op een bepaalde variabele en op basis daarvan wordt bepaald naar welk volgende knooppunt het gaat voor de volgende test.

Uiteindelijk komt het dan uit bij een eindknooppunt, een blad (leaf). Hierbij wordt het datapunt dan gelabeld binnen een bepaalde klasse. De vertakkingscriteria in een beslisboom worden bepaald aan de hand van de gegeven trainingsdata. Door meerdere beslisbomen te genereren op een deelverzameling van de trainingsdata ontstaat een 'bos' van beslisbomen dat een klasse toekent aan een gegeven datapunt.

Binnen dit project wordt een Random Forest classificatie algoritme toegepast op gerasteriseerde Remote Sensing data. Daarbij is de invoer data een cel (bijvoorbeeld een pixel) uit de dataset, die uiteindelijk gecategoriseerd wordt tot een bepaalde vegetatieklasse.

### Textuuranalyse

Een Random Forest model kijkt in de beoogde opzet in principe niet verder dan een enkele raster cel. Om informatie uit en onderlinge relaties tot omliggende rastercellen mee te kunnen nemen in de modelopzet worden diverse structuur en textuur statistieken berekend. Per rasterlaag worden zo intensiteit, gradiëntintensiteit en lokale structuur berekend op verschillende schalen met behulp van *Gaussian* filters, deze parameters worden als extra rasterlagen toegevoegd aan de modelinvoer.

### U-Net

Een neuraal netwerk is een reeks algoritmen met als doel om onderliggende relaties in een data te herkennen via een proces dat de werking van het menselijk brein nabootst. De U-Net architectuur is een convolutioneel neuraal netwerk dat wordt gebruikt voor semantische segmentatie van beeldmateriaal. Het doel van semantische beeldsegmentatie is om elke pixel van een afbeelding te labelen met een overeenkomstige klasse van wat wordt weergegeven, in dit project een vegetatieklasse.

Daar waar een Random Forest model niet actief verder kijkt dan een enkele raster cel (pixel), leert het U-Net juist de patronen en relaties tussen pixels. Daarmee is het in staat om structuren te herkennen die kenmerkend zijn voor een gegeven klasse. In de beoogde opzet van de U-Net architectuur in dit project wordt getracht het U-Net de verschillen in bladstructuur tussen verschillende vegetatietypen te laten herkennen.

U-Net wordt getraind door het een reeks aan geannoteerde afbeeldingen van een vast pixelformaat te geven. In geannoteerde afbeeldingen is per pixel precies aangegeven tot welke klasse deze behoort. Op basis van Remote Sensing data worden deze afbeeldingen gegenereerd door het ruimtelijke databestand (typisch beeldmateriaal) op te knippen in tegels van een vast formaat.

## 2.1.4 Nauwkeurigheid van modellen

Om te bepalen wat de nauwkeurigheid is van de toegepaste classificatie-methoden zijn een aantal statistieken berekend aan de hand van de *confusion matrix* (zie onderstaande tabel 2.1 een voorbeeld met een probleem met twee klassen ('vegetatie' en 'geen vegetatie')).

Tabel 2.1 Voorbeeld probleem met twee klassen ('vegetatie' en 'geen vegetatie')

		Voorspelde klasse	
		vegetatie	geen vegetatie
Waargenomen klasse	vegetatie	aandeel juist voorspelde data in klasse 'vegetatie'	aandeel onjuist voorspelde data in klasse 'vegetatie'
	geen vegetatie	aandeel onjuist voorspelde data in klasse 'geen vegetatie'	aandeel juist voorspelde data in klasse 'geen vegetatie'

In een dergelijke tabel worden de daadwerkelijke en voorspelde klassen tegen elkaar uitgezet en het wordt makkelijk om te zien welke klassen met elkaar verward worden door het classificatie algoritme. Op basis van de matrix is het mogelijk een aantal kengetallen te berekenen. Het gaat dan om

- *precisie*, het aantal correcte positieve voorspellingen ten opzichte van het totaal aantal positieve voorspellingen;
- *recall*, het aantal correcte positieve voorspellingen ten opzichte van het aantal positieve waarnemingen in de validatiedata;
- *F1-score*, het harmonisch gemiddelde van precisie en gevoeligheid;  $2 \cdot (\text{precisie} \cdot \text{recall}) / (\text{precisie} + \text{recall})$ .

Deze zijn voor alle klassen en het totale gemiddelde berekend. Verder is ook de totale *nauwkeurigheid* berekend (het totale aantal juiste voorspellingen ten opzichte van het totaal aantal datapunten in de validatie data).

Om de classificatie verder te beoordelen is eveneens voor de verschillende vegetatie klassen de IoU (*intersection over union*) bepaald. De IoU wordt berekend door voor een specifieke klasse het oppervlakte van overlap (de *intersection*) tussen veldwaarneming en modelvoorspelling te delen door het totale oppervlakte (de *union*) van de annotatie en voorspelling. Dit is een conservatieve, maar eerlijke maat voor de nauwkeurigheid van de classificatie.

Bij het bepalen van de nauwkeurigheid van de modellen worden de veldwaarnemingen gesplitst in een deel voor de modeltraining (zgn. trainingsdata, 80 %), en modelvalidatie (zgn. validatie- of testdata, 20 %). Deze opsplitsing gebeurt willekeurig, waarbij rekening wordt gehouden dat er in verhouding voor elke klasse eenzelfde aandeel gerepresenteerd is in de trainingsdata als in de validatiedata. Ingetekende vlakken in de veldwaarnemingen worden als geheel opgenomen in de trainingsdata, dan wel de validatiedata.

Het model wordt vervolgens getraind op de trainingsdata, en bovenstaande parameters worden berekend aan de hand van de modelvoorspellingen op de validatiedata, dit is data die het model nog niet eerder heeft gezien. Op die manier ontstaat een eerlijk beeld van de voorspellende kwaliteit van het model.

## 2.2 Methoden vaststellen kartering 2018

Deze paragraaf beschrijft de methoden waarop de kartering van 2018 tot stand komt. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de selectie van Remote Sensing data, het vaststellen van de veldwaarnemingen, en de toegepaste modelarchitectuur.

### 2.2.1 Selectie en voorbereiding Remote Sensing data

Binnen het KIMa is voor 2018 een hoog resolutie dronebeeld beschikbaar. Dit beeld is gebied dekkend en heeft een ruimtelijke resolutie van 5 cm<sup>1</sup>, en bevat drie banden in het zichtbare spectrum rood, groen, blauw. De beelden zijn vastgelegd op verschillende dagen in het derde kwartaal van 2018, en zijn in afzonderlijke rasterbestanden beschikbaar.

Naast optische data is ook een puntenwolk van de Marker Wadden beschikbaar. Deze data is gebruikt als additionele laag ten behoeve van vegetatie classificatie. De originele gegevens zijn ontvangen in LAS-formaat. Om deze in de workflow op te nemen, is een Digital Surface Model (DSM) geproduceerd en gerasterd met een ruimtelijke resolutie van 25 cm.

---

<sup>1</sup> In de pilot welke is uitgevoerd voor een onderdeel van de Marker Wadden (rapport 'Verkenning remote sensing voor vegetatie op land' met kenmerk 116909/19-020.349) is een dronebeeld gebruikt van compartiment A3 met een ruimtelijk resolutie van 2 cm. In tegenstelling tot deze pilot is het gebied dekkende dronebeeld niet beschikbaar in 2 cm resolutie, maar in 5 cm. Dit is een belangrijk verschil aangezien hiermee in potentie ruim een factor 4 aan ruimtelijk detail verloren.

Tabel 2.2 hieronder geeft een totaaloverzicht van de gebruikte Remote Sensing data voor de kartering voor het jaar 2018. Afbeelding 2.1 geeft het gebied dekkende dronebeeld weer.

Tabel 2.2 Remote Sensing brondata gebruikt voor de vegetatiekartering van 2018

Omschrijving	Opnamedatum	Ruimtelijke resolutie (cm)
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten A-B noord	25-09-2018	5
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten A-B zuid	25-09-2018	5
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten C en D1	25-09-2018	5
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten D2 en D3	25-09-2018	5
naar raster geconverteerde puntenwolk met hoogtedata (gebiedsdekkend)	25-09-2018	25

Afbeelding 2.1 Gebied dekkend dronebeeld Marker Wadden 2018. Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



## 2.2.2 Vaststellen veldwaarnemingen

Voor 2018 is een dataset met veldwaarnemingen opgesteld aan de hand van de dominante vegetatietypen. Daarin zijn de volgende klassen opgenomen:

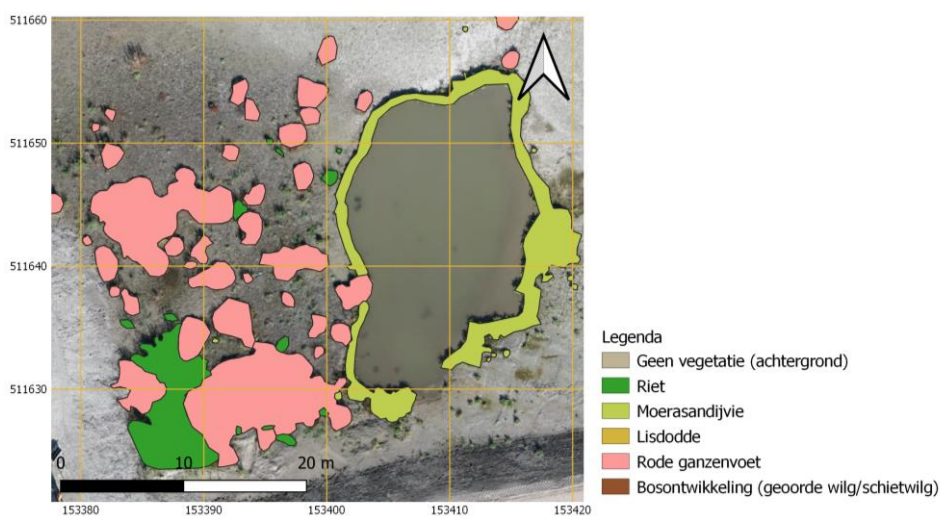
- riet;
- lisdodde;
- moerasandijvie;
- rode ganzenvoet;

- bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg);
- geen klasse (overige klasse voor alles wat niet vegetatie is).

De veldwaarnemingen zijn voornamelijk opgenomen in compartiment A3, aangezien daar van elk van bovenstaande typen representatieve velden te vinden zijn. Daarbij valt op dat vegetatie voornamelijk kleinschalig, en in uniforme vlakken groeit, afgebakend door onbegroeide bodem. Dit maakt het mogelijk om annotaties nauwkeurig in te tekenen.

Veldwaarnemingen zijn ingetekend in het dronebeeld door een ecooloog binnen Witteveen+Bos, en gevalideerd aan de hand van veldwaarnemingen. Deze zijn vervolgens opgewerkt tot volwaardige annotaties ten behoeve van de beoogde toepassing van U-NET. Afbeelding 2.2 geeft een uitsnede uit het dronebeeld weer met daarin een aantal geannoteerde soorten. Een totaaloverzicht met geannoteerde gebieden is opgenomen in bijlage II.

Afbeelding 2.2 Voorbeeld van geannoteerd gebied in het dronebeeld van 2018. Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



### 2.2.3 Modelopzet

Vanwege de beschikbaarheid van hoge resolutie dronebeelden, waarin nauwkeurig annotaties ingetekend kunnen worden wordt gekozen voor een U-Net architectuur gebruikt om de vegetatiekartering te genereren. Daartoe worden de geannoteerde delen van het dronebeeld opgeknipt in tegels van 256 bij 256 pixels (met een resolutie van 5 cm geeft dit tegels van ruwweg 160 m<sup>2</sup>. In totaal zijn 284 tegels gebruikt voor de modeltraining.

## 2.3 Methoden vaststellen kartering 2020

Deze paragraaf beschrijft de methoden waarop de kartering van 2020 tot stand komt. Voor 2020 zijn net als voor 2018 hoge resolutie dronebeelden beschikbaar, maar ook een hoge resolutie gebied dekkend satellietbeeld. In deze paragraaf wordt achtereenvolgens ingegaan op de selectie van Remote Sensing data, het vaststellen van de veldwaarnemingen, en de toegepaste modelarchitectuur.

### 2.3.1 Selectie van Remote Sensing data

Binnen het KIMa is voor 2020 een hoog resolutie dronebeeld beschikbaar. Dit beeld is gebied dekkend en heeft een ruimtelijke resolutie van 5 cm, en bevat drie banden in het zichtbare spectrum: rood, groen, blauw.

De beelden zijn vastgelegd op verschillende dagen in het derde kwartaal van 2020, en zijn in afzonderlijke rasterbestanden beschikbaar.

Naast optische data is ook een puntenwolk van de Marker Wadden beschikbaar. Deze data is gebruikt als additionele laag ten behoeve van vegetatie classificatie. De originele gegevens zijn ontvangen in LAS-formaat. Om deze in de workflow op te nemen, is een Digital Surface Model (DSM) geproduceerd en gerasterd met een ruimtelijke resolutie van 25 cm.

In de analyse is ook gebruik gemaakt van een beeld van de Superview satelliet. Dit gebied dekkende beeld heeft een ruimtelijke resolutie van 50 cm, en bevat vier spectrale banden: rood, groen, blauw en nabij-infrarood. De beelden zijn gedownload van Satellietdataportaal. De beelden van Satellietdataportaal zijn al voorbereid. De correcties in de voorbereiding zijn nodig om het ruwe beeld te bewerken tot bruikbaar beeld. Hierbij valt de denken aan zowel geometrische correcties van de pixels, dan wel correcties van de waarde van de pixels zelf. Er vindt in deze stap nog geen vergelijking plaats met andere beelden of met externe informatie. Ook zijn de bewerkingen omkeerbaar. De volgende voorbereidingsstappen zijn reeds op de data uitgevoerd:

- geometrische correctie;
- radiometrische correctie;
- orthorectificatie.

Op deze manier zijn beelden die via Satellietdataportaal zijn gebruikt al voorbereid voor de vegetatiekartering.

Tabel 2.3 hieronder geeft een totaaloverzicht van de gebruikte Remote Sensing data voor de kartering voor het jaar 2020. Afbeelding 2.3 geeft het gebied dekkende dronebeeld weer. Tot slot laat afbeelding 2.4 een uitsnede zien van het dronebeeld (links) en het Superview satellietbeeld (rechts).

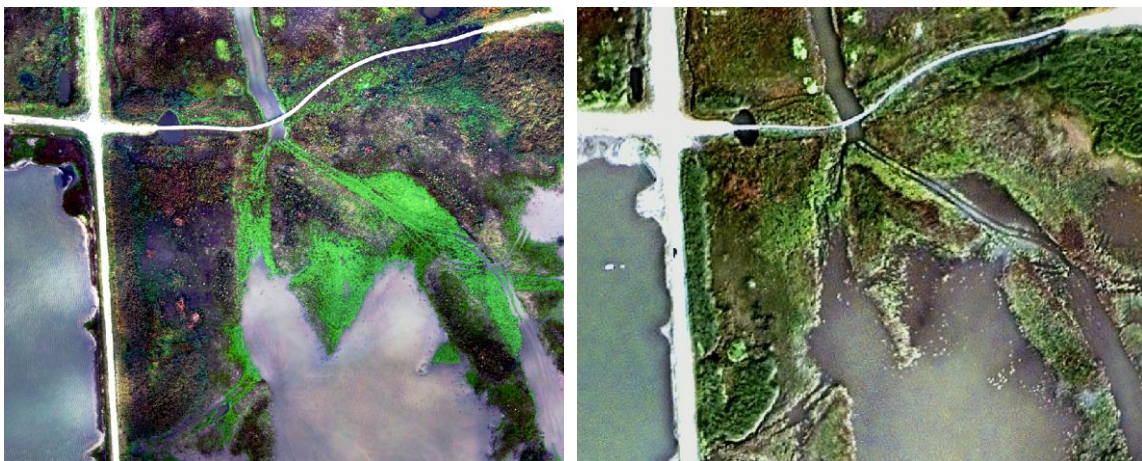
Tabel 2.3 Remote Sensing brondata gebruikt voor de vegetatiekartering van 2020

Omschrijving	Opnamedatum	Ruimtelijke resolutie (cm)
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten A-B	12-10-2020	5
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartiment C	07-10-2020	5
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten D1	28-10-2020	5
dronebeeld (rgb, orthomosaïc) compartimenten D2-D3	22-10-2020	5
naar raster geconverteerde puntenwolk met hoogtedata, gebied dekkend	12-10-2020 t/m 22-10-2020	25
satellietbeeld (rgbi), gebied dekkend	23-09-2020	50

Afbeelding 2.3 Gebied dekkend dronebeeld Marker Wadden 2020. Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



Afbeelding 2.4 Uitsnede van een dronebeeld (links) en superview satellietbeeld (rechts)



### 2.3.2 Vaststellen veldwaarnemingen

Voor 2020 is een dataset met veldwaarnemingen opgesteld aan de hand van de dominante vegetatietypen. Daarin zijn de volgende klassen opgenomen:

- riet;
- lisdodde;

- moerasandijvie;
- rode ganzenvoet;
- bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg);
- overige vegetatie (gemengde pioniervegetatie);
- geen klasse (overige klasse voor alles wat niet vegetatie is).

De klasse 'overige vegetatie' omvat pioniervegetatie die in een gemengd mozaïek voorkomt. De veldwaarnemingen zijn voornamelijk opgenomen in compartiment A3, aangevuld met representatieve vlakken uit andere compartimenten. Daarbij valt op dat vegetatie voornamelijk gemengd groeit, waarbij voor de dominante soorten wel uniforme vlakken aanwezig zijn. Een totaaloverzicht met geannoteerde gebieden is opgenomen in bijlage III.

### 2.3.3 Modelopzet

Voor de kartering van 2020 zijn een tweetal model architecturen onderzocht: het U-Net en een Random Forest classificatie. Beide toepassingen staan hieronder nader toegelicht.

Vanwege de beschikbaarheid van hoge resolutie dronebeelden is eerst de toepassing van U-Net uitgewerkt en onderzocht. Daartoe zijn de veldwaarnemingen opgewerkt naar nauwkeurige annotaties. Ten opzichte van 2018 zien we meer vegetatie, en meer vermengde vegetatie. Dat maakt het enerzijds ten opzichte van 2018 lastiger om annotaties in te tekenen, en anderzijds voor U-Net om hier een accurate voorspelling in te maken.

Om die reden is vervolgens ook een kartering onderzocht op basis van een Random Forest classificatie model. In het algemeen presteert een dergelijke modelarchitectuur beter op lagere resolutie beelden. Daarom is gebruik gemaakt van het Superview beeld (zie tabel 2.3). Daarbij speelt ook de bredere spectrale resolutie van het satellietbeeld mee (dit beeld geeft in tegenstelling tot het dronebeeld ook informatie in het nabij-infrarode spectrum), en het feit dat het beeld net iets eerder in het groeiseizoen is genomen. De modelinvoer is verrijkt met het de beschikbare hoogtedata, en diverse berekende parameters voor onderliggende structuren tussen de beeldpixels.

We zien dat de kartering gegenereerd met de Random Forest architectuur een robuuster resultaat geeft dan de kartering met U-Net. Met 'robuust' wordt bedoeld dat de resulterende kartering minder 'ruis' bevat, en (weliswaar in grovere lijnen) een beter beeld weergeeft van de vegetatie op de Marker Wadden in 2020. Om die reden is gekozen de uiteindelijke kartering voor 2020 te genereren op basis van het Superview satellietbeeld, aangevuld met hoogtedata, in combinatie met een Random Forest architectuur voor de classificatie.

## 2.4 Methoden vaststellen kartering 2021

Deze paragraaf beschrijft de methoden waarop de kartering van 2021 tot stand komt. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de selectie van Remote Sensing data, het vaststellen van de veldwaarnemingen, en de toegepaste modelarchitectuur.

### 2.4.1 Selectie van Remote Sensing data

Het voornaamste verschil ten opzichte van voorgaande jaren is dat voor 2021 geen dronedata beschikbaar zijn. Dat wil zeggen dat er geen hoge resolutie beeldmateriaal, en geen hoge resolutie hoogtedata beschikbaar is om de vegetatiekartering mee uit te voeren.

In deze analyse is daarom gebruik gemaakt van Remote Sensing data, namelijk een beeld van de

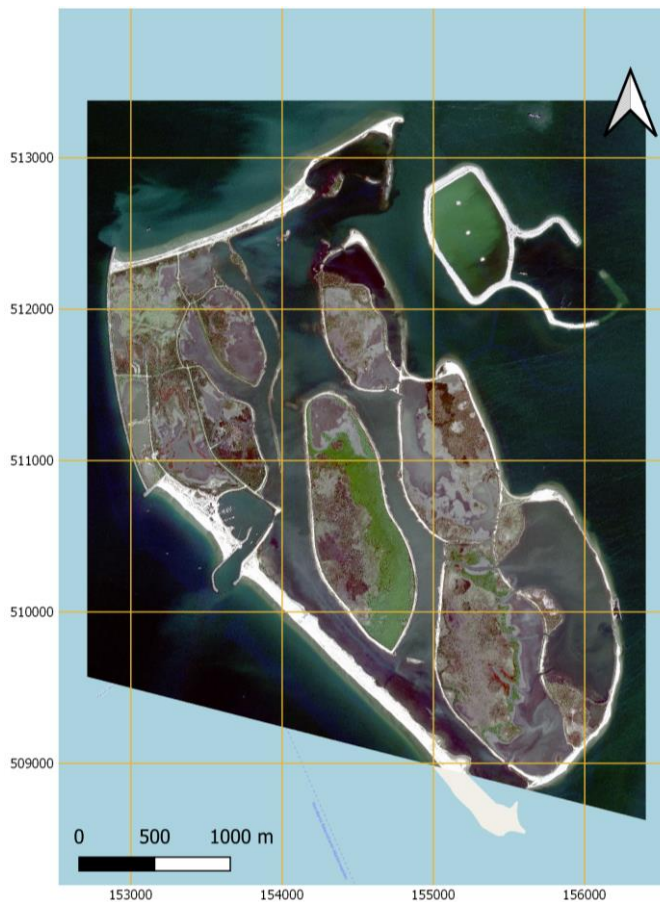


Superview-1 satelliet. Dit gebied dekkende beeld heeft een ruimtelijke resolutie van 50 cm, en bevat vier spectrale banden: rood, groen, blauw en nabij-infrarood. De beelden zijn gedownload van Satellietdataportaal, de voorbewerking van deze data is daarmee hetzelfde zoals beschreven voor 2020. Het geselecteerde beeld, met bijbehorende opnamedatum, is weergegeven in tabel 2.4. Afbeelding 2.5 geeft het gebied dekkende satellietbeeld weer.

Tabel 2.4 Remote Sensing brondata gebruikt voor de vegetatiekartering van 2021

Omschrijving	Opnamedatum	Ruimtelijke resolutie (cm)
satellietbeeld (rgbi) gebiedsdekkend	08-09-2021	50

Afbeelding 2.5 Gebied dekkend satellietbeeld Marker Wadden 2021. Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



## 2.4.2 Vaststellen veldwaarnemingen

Voor 2021 is wederom een dataset met veldwaarnemingen opgesteld aan de hand van de dominante vegetatietypen. Daarin zijn de volgende klassen opgenomen:

- riet;
- lisdodde;
- moerasandijvie;
- rode ganzenvoet;
- bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg);
- overige vegetatie (gemengde pioniervegetatie);
- geen klasse (overige klasse voor alles wat niet vegetatie is).

De klasse 'overige vegetatie' omvat pioniervegetatie die in een gemengd mozaïek voorkomt. De veldwaarnemingen zijn voornamelijk opgenomen in compartiment A3, aangevuld met representatieve vlakken uit andere compartimenten. Daarbij valt op dat vegetatie voornamelijk gemengd groeit, waarbij voor de dominante soorten wel uniforme vlakken aanwezig zijn. Een totaaloverzicht met geannoteerde gebieden is opgenomen in bijlage IV.

### 2.4.3 Modelopzet

De toegepaste modelopzet is vergelijkbaar met die zoals toegepast voor 2020, echter met afwezigheid van het hoogtepfiel als modelinvoer. De kartering van 2021 is gegenereerd met behulp van een Random Forest classificatie model, waarbij de invoerdata is verrijkt met diverse berekende parameters voor onderliggende structuren tussen de beeldpixels.

## 2.5 Werkwijze vaststellen vegetatieontwikkeling

De hiervoor beschreven methoden resulteren in een kaartbeeld met vegetatie op de Marker Wadden aan het eind van de groeiseizoenen 2018, 2020, en 2021. Deze kaartbeelden worden in het kader van vegetatieontwikkeling met elkaar vergeleken, en de ontwikkeling van de oppervlakten per vegetatiesoort worden per compartiment in beeld gebracht. Daarmee ontstaat een beeld van de ontwikkeling van verschillende vegetatietypen in de verschillende delen van de Marker Wadden.

# 3

## RESULTATEN EN ANALYSE

Dit hoofdstuk presenteert te resultaten zoals deze voortkomen uit de beschreven methoden in hoofdstuk 2. Daarnaast bevat dit hoofdstuk ook de analyse van deze kaartbeelden en een analyse van de ontwikkeling van vegetatie door de monitoringsjaren.

Dit hoofdstuk is als volgt ingedeeld: paragraaf 3.1 gaat in op de resulterende vegetatiekarteringen voor de afzonderlijke jaren 2018, 2020 en 2021. Paragraaf 3.2 brengt vervolgens de ontwikkeling van de vegetatie op de Marker Wadden in beeld. Tot slot gaat paragraaf 3.3 in op de relatie tot MEP indicatoren en de doelen van de Marker Wadden op het gebied van vegetatie ontwikkeling.

### 3.1 Resulterende vegetatiekartering per jaar

In deze paragraaf worden de resulterende vegetatiekarteringen voor elk van de monitoringsjaren afzonderlijk behandeld. De gepresenteerde karteringen zijn tot stand gekomen volgens de methoden zoals beschreven in hoofdstuk 2. Daarmee zijn de kaartbeelden directe modeluitkomsten; deze zijn niet naderhand gecorrigeerd.

Achtereenvolgens gaan de deelparagrafen hieronder in op de karteringen voor 2018, 2020 en 2021. Daarbij is telkens het kaartbeeld gepresenteerd, en wordt verder ingegaan op de stand van zaken rondom de vegetatie zoals gekarteerd. Daarnaast wordt ingegaan om de parameters voor modelkwaliteit.

#### 3.1.1 Vegetatiekartering 2018

De vegetatiekartering voor 2018 is weergegeven in afbeelding 3.1. Daarnaast is een vergrootte versie van deze afbeelding opgenomen in bijlage V, en is ook het ruimtelijke rasterbestand als separate digitale bijlage VIII bijgevoegd.

Afbeelding 3.1 Gebied dekkende vegetatiekartering Marker Wadden 2018 gegenereerd met U-Net architectuur. Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



### Analyse kaartbeeld

Het kaartbeeld van 2018 laat voornamelijk kale bodem zien. Daarnaast bevindt zich een groot deel van de vegetatie in pioniersstadium. Voornamelijk in de compartimenten A, B en D2 zijn grotere vlakken gedetecteerd, waaronder aanplant van riet. Wat daarnaast opvalt is dat er in enkele compartimenten geen vegetatie staat.

De gedetecteerde oppervlakten zijn gerapporteerd in tabel 3.1 hieronder. De tabel geeft per compartiment, per soort weer hoeveel oppervlak is gedetecteerd door het classificatiemodel. Daarbij zijn twee waarden weergegeven: een oppervlak in  $m^2$  (berekend door het totaal aantal geclassificeerde pixels van een bepaalde soort te vermenigvuldigen met de pixeloppervlakte, waarden zijn afgerond naar tientallen  $m^2$ ), en tussen haakjes het percentage van het totale oppervlak van het compartiment.

In aanvulling op tabel 3.1 geeft afbeelding 3.2 hieronder cirkeldiagrammen weer, waarin de onderlinge verhoudingen per vegetatiesoort gemakkelijk afleesbaar zijn.

Tabel 3.1 Kwantificatie vegetatie per soort per compartiment in kartering (modeluitkomst) voor 2018. Telkens weergegeven als 'oppervlak in m<sup>2</sup> (percentage van totale oppervlak)', waarbij de oppervlaktes in m<sup>2</sup> zijn afgerond naar tientallen. Compartimentering conform bijlage I

		Compartiment										
		A1	A2	A2a	A3	B	C	D1	D2	D3	D4	X1
Vegetietype	riet	4.070 (1 %)	0 (<1 %)	2.890 (1 %)	1.940 (<1 %)	1.520 (<1 %)	1.030 (<1 %)	1.110 (<1 %)	21.670 (4 %)	3.390 (<1 %)	110 (<1 %)	1.410 (2 %)
	moeras- andijvie	11.320 (3 %)	0 (<1 %)	7.370 (3 %)	1.650 (<1 %)	1.950 (<1 %)	120 (<1 %)	70 (<1 %)	120 (<1 %)	10 (<1 %)	40 (<1 %)	5.780 (7 %)
	lisdodde	90 (<1 %)	0 (<1 %)	250 (<1 %)	3.720 (2 %)	90 (<1 %)	1.380 (<1 %)	610 (<1 %)	17.980 (3 %)	3.260 (<1 %)	0 (<1 %)	0 (<1 %)
	rode ganzenvoet	9.550 (3 %)	0 (<1 %)	1.400 (<1 %)	120 (<1 %)	990 (<1 %)	40 (<1 %)	1.100 (<1 %)	130 (<1 %)	50 (<1 %)	140 (<1 %)	1.250 (1 %)
	bos- ontwikkeling	1.450 (<1 %)	0 (<1 %)	600 (<1 %)	510 (<1 %)	180 (<1 %)	20 (<1 %)	10 (<1 %)	30 (<1 %)	30 (<1 %)	0 (<1 %)	180 (<1 %)
	geen vegetatie	329.920 (93 %)	119.780 (100 %)	271.170 (96 %)	207.650 (96 %)	194.480 (98 %)	805.600 (100 %)	427.080 (99 %)	562.560 (93 %)	883.080 (99 %)	799.050 (100 %)	74.940 (90 %)
	<i> totaal</i>	<i>356.410</i> <i>(100 %)</i>	<i>119.780</i> <i>(100 %)</i>	<i>283.680</i> <i>(100 %)</i>	<i>215.580</i> <i>(100 %)</i>	<i>199.220</i> <i>(100 %)</i>	<i>808.200</i> <i>(100 %)</i>	<i>429.980</i> <i>(100 %)</i>	<i>602.500</i> <i>(100 %)</i>	<i>889.820</i> <i>(100 %)</i>	<i>799.350</i> <i>(100 %)</i>	<i>83.550</i> <i>(100 %)</i>

Afbeelding 3.2 Cirkeldiagrammen met verhouding vegetatie in kartering (modeluitkomst) voor 2018. De klasse 'geen vegetatie' is hierin niet opgenomen



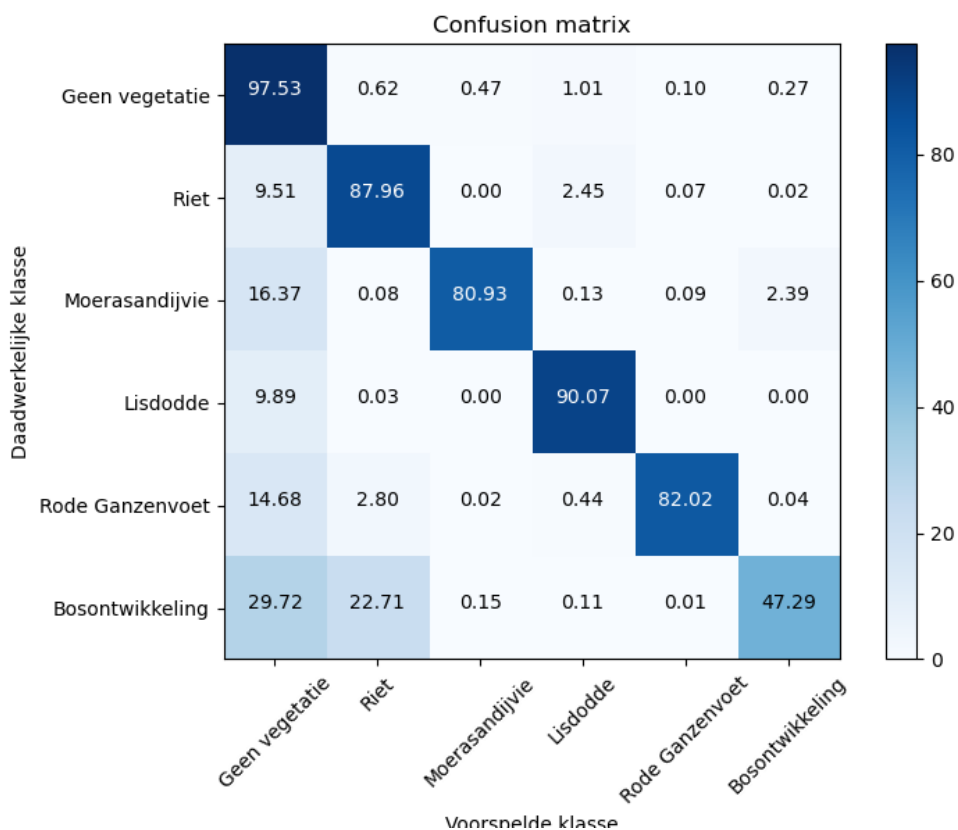
### Nauwkeurigheid model

De modelnauwkeurigheid is gerapporteerd aan de hand van de 'confusion matrix' in afbeelding 3.3. Daarnaast is in tabel 3.2 het classificatierapport opgenomen, met onder andere de *accuracy* en de *intersection over union* per vegetatie klasse.

Over de betrouwbaarheid van het U-Net model en de resulterende kartering voor 2018 kan het volgende worden gezegd:

- in het algemeen is de nauwkeurigheid van het model (op basis van de voorspellingen van de validatiedata) hoog. De gemiddelde gewogen *accuracy* is 80 %, met een gemiddelde *Intersection over Union* van 74 %;
- voornamelijk de klasse 'bosontwikkeling' blijkt lastiger te voorspellen. De voornaamste reden hiervoor is dat voor deze soort de minste bedekking beschikbaar is. Daarmee is het lastig om goede annotaties te genereren. Wat daarnaast meespeelt is dat bosontwikkeling slechts op kleine ruimtelijke schaal voorkomt, waarmee het visueel al lastig is om bosontwikkeling te onderscheiden in het dronebeeld in een resolutie van 5 cm. Gedetecteerde bosontwikkeling komt op basis van bovenstaande tabel en cirkeldiagrammen voornamelijk voor in compartimenten A1, A2a, A3 en B;
- als gevolg van de kleinschaligheid van veel van de vegetatie in dit jaar komt het voor dat het model niet altijd even goed het onderscheid kan maken tussen riet en lisdodde.

Afbeelding 3.3 Confusion matrix U-Net model gebruikt voor kartering 2018



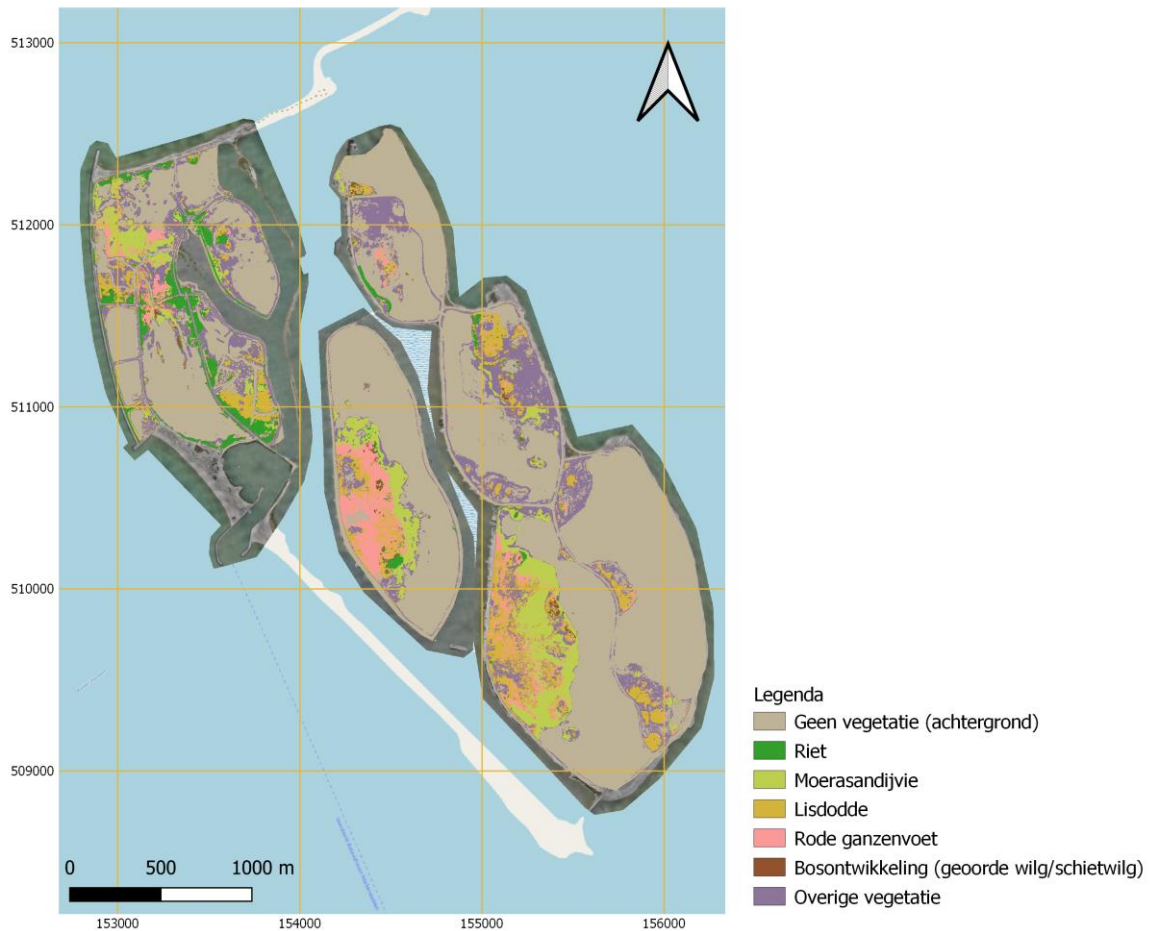
Tabel 3.2 Classificatierapport modelvoorspelling voor kartering 2018

Vegetatietype	Accuracy	IoU	Precision	Recall	F1-score
riet	88,0	77,9	0,87	0,88	0,88
moerasandijvie	81,0	75,9	0,92	0,81	0,86
lisdodde	90,1	82,4	0,90	0,90	0,90
rode ganzenvoet	82,0	76,9	0,92	0,82	0,87
bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)	47,3	39,8	0,72	0,47	0,57
geen vegetatie	97,5	93,4	0,96	0,98	0,97
gemiddeld	80,1	74,4			

### 3.1.2 Vegetatiekartering 2020

De vegetatiekartering voor 2020 is weergegeven in afbeelding 3.4. Daarnaast is een vergrootte versie van deze afbeelding opgenomen in bijlage VI, en is ook het ruimtelijke rasterbestand als separate digitale bijlage IX bijgevoegd.

Afbeelding 3.4 Gebied dekkende vegetatiekartering Marker Wadden 2020 gegenereerd met Random Forest architectuur.  
Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



#### Analyse kaartbeeld

Ten opzichte van 2018 zien we dat de hoeveelheid vegetatie naar 2020 aanzienlijk is uitgebreid. In het kaartbeeld zijn grote vlakken zichtbaar, voornamelijk voor de soorten riet, lisdodde en moerasandijvie. Daarnaast is er een aanzienlijk deel dat wordt aangemerkt als 'overige vegetatie' (gemengde pioniervegetatie). Bosontwikkeling (in groepjes geoorde wilg/schietwilg) komt voornamelijk voor in compartimenten A2a, C, D1, D2 en D3.

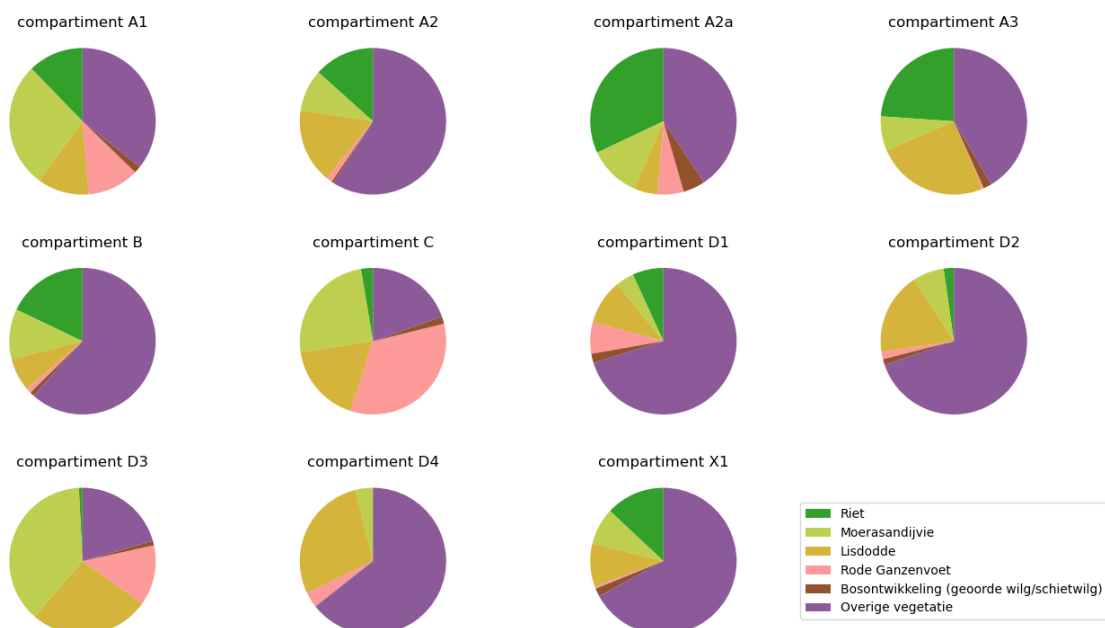
De gedetecteerde oppervlakten zijn gerapporteerd in tabel 3.3 hieronder. Wederom geeft deze tabel per compartiment, per soort weer hoeveel oppervlak is gedetecteerd door het classificatiemodel. Daarbij zijn twee waarden weergegeven: een oppervlak in m<sup>2</sup> (berekend door het totaal aantal geclassificeerde pixels van een bepaalde soort te vermenigvuldigen met de pixeloppervlakte, waarden zijn afgerond naar tientallen m<sup>2</sup>), en tussen haakjes het percentage van het totale oppervlak van het compartiment.

Aanvullend zijn in afbeelding 3.5 cirkeldiagrammen weergegeven, waarin de onderlinge verhoudingen per vegetatiesoort gemakkelijk afleesbaar zijn.

Tabel 3.3 Kwantificatie vegetatie per soort per compartiment in kartering (modeluitkomst) voor 2020. Telkens weergegeven als 'oppervlak in m<sup>2</sup> (percentage van totale oppervlak)', waarbij de oppervlaktes in m<sup>2</sup> zijn afgerond naar tientallen. Compartimentering conform bijlage I

		Compartiment										
		A1	A2	A2a	A3	B	C	D1	D2	D3	D4	X1
Vegetatietype	riet	30.240 (8 %)	4.770 (4 %)	28.340 (10 %)	35.070 (16 %)	15.010 (8 %)	7.980 (<1 %)	7.010 (2 %)	5.460 (<1 %)	3.470 (<1 %)	90 (<1 %)	2.900 (3 %)
	moeras- andijvie	68.290 (19 %)	3.260 (3 %)	10.190 (4 %)	11.160 (5 %)	9.240 (5 %)	74.150 (9 %)	4.110 (<1 %)	16.800 (3 %)	164.940 (19 %)	5.440 (<1 %)	1.820 (2 %)
	lisdodde	27.960 (8 %)	5.920 (5 %)	4.620 (2 %)	36.540 (17 %)	6.170 (3 %)	52.910 (7 %)	10.280 (2 %)	43.930 (7 %)	115.340 (13 %)	40.350 (5 %)	2.120 (3 %)
	rode ganzenvoet	28.180 (8 %)	480 (<1 %)	5.090 (2 %)	370 (<1 %)	950 (<1 %)	101.420 (13 %)	7.030 (2 %)	4.090 (<1 %)	57.810 (6 %)	4.860 (<1 %)	120 (<1 %)
	bos- ontwikkeling	3.860 (1 %)	180 (<1 %)	4.320 (2 %)	2.740 (1 %)	790 (<1 %)	4.780 (<1 %)	2.060 (<1 %)	3.140 (<1 %)	4.290 (<1 %)	130 (<1 %)	400 (<1 %)
	overige vegetatie	87.830 (25 %)	21.060 (18 %)	35.970 (13 %)	60.750 (28 %)	51.680 (26 %)	58.670 (7 %)	71.920 (17 %)	169.210 (28 %)	89.460 (10 %)	91.710 (11 %)	14.960 (18 %)
	geen vegetatie	110.050 (31 %)	84.120 (70 %)	195.140 (69 %)	68.940 (32 %)	115.390 (58 %)	508.280 (63 %)	327.570 (76 %)	359.880 (60 %)	454.520 (51 %)	656.760 (82 %)	61.230 (73 %)
	<i> totaal</i>	<i>356.410</i> <i>(100 %)</i>	<i>119.780</i> <i>(100 %)</i>	<i>283.680</i> <i>(100 %)</i>	<i>215.580</i> <i>(100 %)</i>	<i>199.220</i> <i>(100 %)</i>	<i>808.200</i> <i>(100 %)</i>	<i>429.980</i> <i>(100 %)</i>	<i>602.500</i> <i>(100 %)</i>	<i>889.820</i> <i>(100 %)</i>	<i>799.350</i> <i>(100 %)</i>	<i>83.550</i> <i>(100 %)</i>

Afbeelding 3.5 Cirkeldiagrammen met verhouding vegetatie in kartering (modeluitkomst) voor 2020. De klasse 'geen vegetatie' is hierin niet opgenomen



### Nauwkeurigheid model

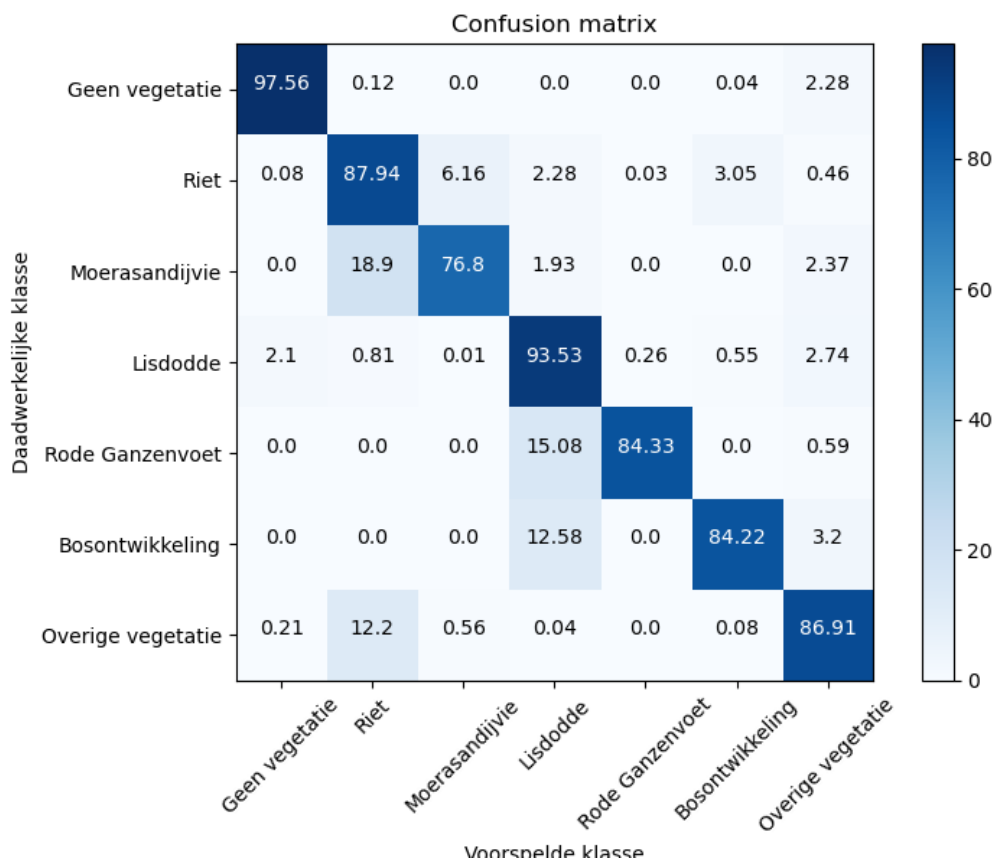
De modelnauwkeurigheid is gerapporteerd aan de hand van de 'confusion matrix' in afbeelding 3.6. Daarnaast is in tabel 3.4 het classificatierapport opgenomen, met onder andere de *accuracy* en de *intersection over union* per vegetatie klasse.



Over de betrouwbaarheid van het model en de resulterende kartering voor 2020 kan het volgende worden gezegd:

- in het algemeen is de nauwkeurigheid van het model (op basis van de voorspellingen van de validatiedata) hoog. De gemiddelde gewogen *accuracy* is 87 %, met een gemiddelde *Intersection over Union* van 78 %;
- de *confusion matrix* laat zien dat in de validatiedata een klein deel van de moerasandijvie wordt verward met riet, en dat een klein aandeel van zowel rode ganzenvoet als bosontwikkeling wordt verward met lisdodde;
- wat betreft bosontwikkeling zien we in vergelijking tussen de kartering en het onderliggende dronebeeld dat hier en daar kleine plukken riet onbedoeld worden aangemerkt als bosontwikkeling. Deze kleinere plukken komen qua ruimtelijke structuur en hoogtepatroon overeen met dat van bosontwikkeling.

Afbeelding 3.6 Confusion matrix modelvoorspelling voor kartering 2020



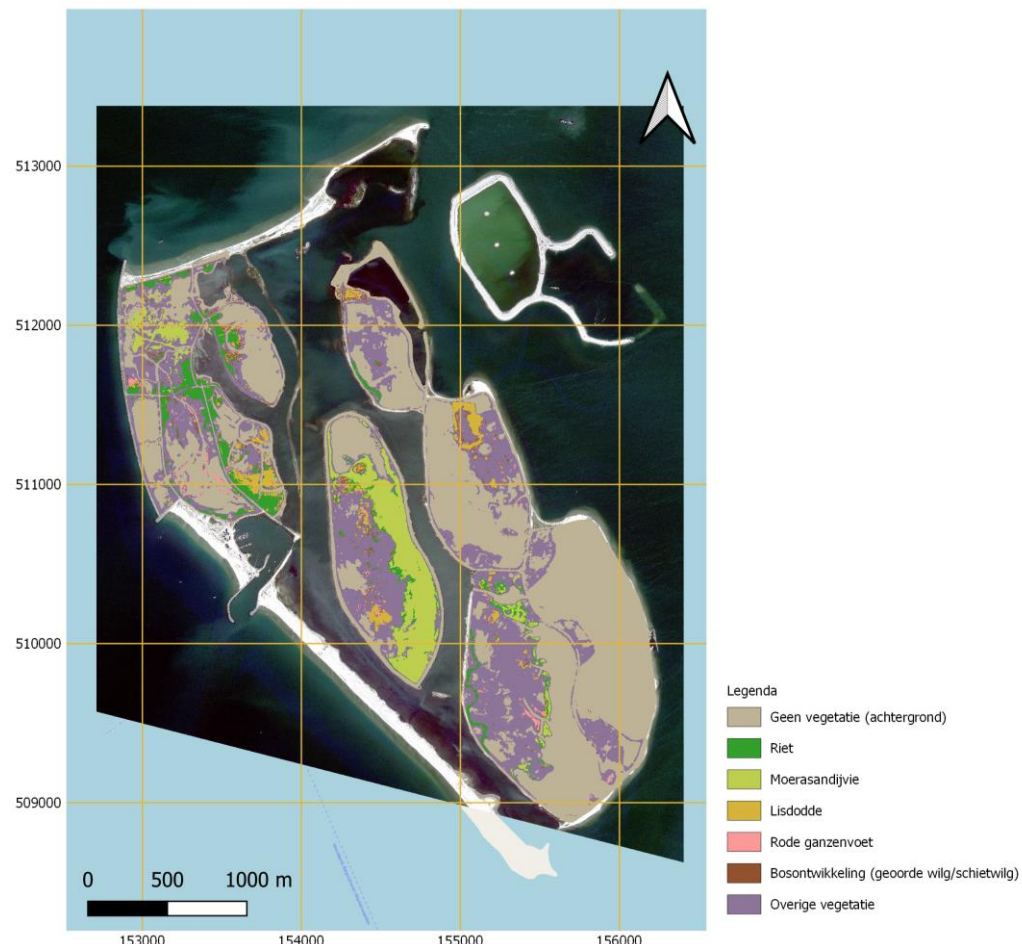
Tabel 3.4 Classificatierapport modelvoorspelling voor kartering 2020

Vegetatietype	Accuracy	IoU	Precision	Recall	F1-score
riet	87,9	66,6	0,98	0,98	0,98
moerasandijvie	76,8	72,0	0,94	0,88	0,91
lisdodde	93,5	70,9	0,29	0,77	0,42
rode ganzenvoet	84,3	84,1	0,97	0,94	0,95
bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)	84,2	81,2	0,83	0,84	0,84
overige vegetatie	86,9	77,8	0,17	0,84	0,28
geen vegetatie	97,6	95,3	0,84	0,87	0,85
gemiddeld	87,3	78,3			

### 3.1.3 Vegetatiekartering 2021

De vegetatiekartering voor 2021 is weergegeven in afbeelding 3.7. Daarnaast is een vergrootte versie van deze afbeelding opgenomen in bijlage VII, en is ook het ruimtelijke rasterbestand als separate digitale bijlage X bijgevoegd.

Afbeelding 3.7 Gebied dekkende vegetatiekartering Marker Wadden 2021 gegenereerd met Random Forest architectuur.  
Coördinaten in RD-New, EPSG:28992



#### Analyse kaartbeeld

In het kaartbeeld van 2021 worden de dominante soorten in grote vlakken duidelijk herkend, bijvoorbeeld het vlak moerasandijvie in compartiment C, en de aanplant van stroken riet in compartiment D3.

Daarnaast is er een aanzienlijk deel dat wordt aangemerkt als 'overige vegetatie' (gemengde pioniervegetatie). Zo liet de kartering van 2020 grote delen rode ganzenvoet zien in compartiment C, deze locaties worden nu aangemerkt als overige vegetatie (gemengde pioniervegetatie). Bosontwikkeling (in groepjes geoorde wilg/schietwilg) komt voornamelijk voor in compartimenten A1, A2a, B en D2.

De gedetecteerde oppervlakten zijn gerapporteerd in tabel 3.5 hieronder. Wederom geeft deze tabel per compartiment, per soort weer hoeveel oppervlak is gedetecteerd door het classificatiemodel. Daarbij zijn twee waarden weergegeven: een oppervlak in m<sup>2</sup> (berekend door het totaal aantal geclassificeerde pixels van een bepaalde soort te vermenigvuldigen met de pixeloppervlakte, waarden zijn afgerond naar tientallen m<sup>2</sup>), en tussen haakjes het percentage van het totale oppervlak van het compartiment.

Aanvullend zijn in afbeelding 3.8 cirkeldiagrammen weergegeven, waarin de onderlinge verhoudingen per vegetatiesoort gemakkelijk afleesbaar zijn.

Tabel 3.5 Kwantificatie vegetatie per soort per compartiment in kartering (modeluitkomst) voor 2021. Telkens weergegeven als 'oppervlak in m<sup>2</sup> (percentage van totale oppervlak)', waarbij de oppervlaktes in m<sup>2</sup> zijn afgerond naar tientallen. Compartimentering conform bijlage I

		Compartiment										
		A1	A2	A2a	A3	B	C	D1	D2	D3	D4	X1
Vegetatietype	riet	36.430 (10 %)	880 (<1 %)	29.860 (11 %)	43.310 (20 %)	16.890 (8 %)	32.280 (4 %)	5.900 (1 %)	260 (<1 %)	34.400 (4 %)	0 (<1 %)	2.720 (3 %)
	moeras- andijvie	50.480 (14 %)	2.570 (2 %)	240 (<1 %)	820 (<1 %)	1.140 (<1 %)	262.590 (32 %)	240 (<1 %)	190 (<1 %)	26.520 (3 %)	50 (<1 %)	90 (<1 %)
	lisdodde	3.250 (<1 %)	0 (<1 %)	1.640 (<1 %)	33.570 (16 %)	4.310 (2 %)	25.280 (3 %)	5.510 (1 %)	26.410 (4 %)	10.240 (1 %)	140 (<1 %)	670 (<1 %)
	rode ganzenvoet	2.170 (<1 %)	0 (<1 %)	9.300 (3 %)	730 (<1 %)	1.650 (<1 %)	5.380 (<1 %)	700 (<1 %)	2.440 (<1 %)	7.060 (<1 %)	1.100 (<1 %)	0 (<1 %)
	bos- ontwikkeling	7.660 (2 %)	270 (<1 %)	5.800 (2 %)	5.990 (3 %)	7.280 (4 %)	13.450 (2 %)	4.830 (1 %)	9.360 (2 %)	5.980 (<1 %)	900 (<1 %)	2.350 (3 %)
	overige vegetatie	155.500 (44 %)	34.450 (29 %)	105.270 (37 %)	54.960 (25 %)	45.850 (23 %)	278.080 (34 %)	101.090 (24 %)	169.580 (28 %)	379.270 (43 %)	104.990 (13 %)	12.450 (15 %)
	geen vegetatie	100.920 (28 %)	81.610 (68 %)	131.560 (46 %)	76.200 (35 %)	122.100 (61 %)	191.140 (24 %)	311.710 (72 %)	394.260 (65 %)	426.340 (48 %)	692.170 (87 %)	65.260 (78 %)
	<i> totaal </i>	<i> 356.410 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 119.780 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 283.680 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 215.580 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 199.220 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 808.200 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 429.980 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 602.500 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 889.820 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 799.350 </i> <i> (100 %) </i>	<i> 83.550 </i> <i> (100 %) </i>

Afbeelding 3.8 Cirkeldiagrammen met verhouding vegetatie in kartering (modeluitkomst) voor 2021. De klasse 'geen vegetatie' is hierin niet opgenomen



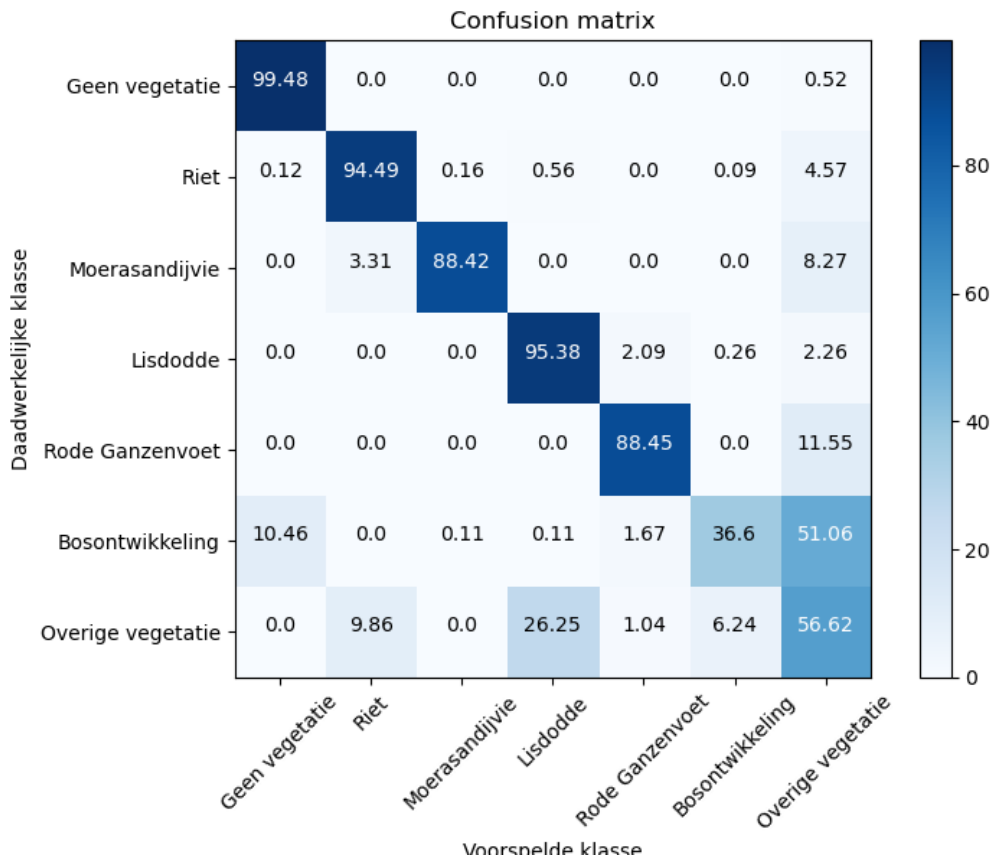
### Nauwkeurigheid model

De modelnauwkeurigheid is gerapporteerd aan de hand van de 'confusion matrix' in afbeelding 3.9. Daarnaast is in tabel 3.6 het classificatierapport opgenomen, met onder andere de *accuracy* en de *intersection over union* per vegetatie klasse.

Over de betrouwbaarheid van het model en de resulterende kartering voor 2021 kan het volgende worden gezegd:

- in het algemeen is de nauwkeurigheid van het model (op basis van de voorspellingen van de validatiedata) hoog. De gemiddelde gewogen *accuracy* is 80 % met een gemiddelde *Intersection over Union* van 70 %;
- de *confusion matrix* laat zien dat in de validatiedata een klein deel van de rode ganzenvoet wordt aangemerkt als 'overige vegetatie' (gemengde pioniervegetatie), daarnaast wordt een betrekkelijk groot deel van de bosontwikkeling ook aangemerkt als 'overige vegetatie' (gemengde pioniervegetatie);
- wat betreft bosontwikkeling zijn in de veldwaarnemingen voor dit jaar ook individuele boompjes aangemerkt. Deze zijn betrekkelijk klein in relatie tot de ruimtelijke resolutie van het satellietbeeld. Daarbij valt op dat het gaat om meerjarige soorten, de zeer-kleinschalige eenjarige zijn simpelweg te klein om in het Remote Sensing beeld duidelijk naar voren te komen. Om deze toch te kunnen detecteren worden diverse textuur- en filterlagen berekend op basis van het satellietbeeld. Het resultaat is dat het model in staat is om ook individuele bomen (kleinschalige structuren) te detecteren, echter wordt dan enkel de raster cel in het middelpunt van de boom aangemerkt als zijnde 'bosontwikkeling'. De daadwerkelijk gedetecteerd oppervlak bosontwikkeling voor een enkele boom ten opzichte van het geannoteerde oppervlak in de validatiedata is daarmee aanzienlijk kleiner, wat direct invloed heeft op de *accuracy* en de *IoU*. Overigens is de detectie van bosontwikkeling in het eindbeeld versterkt voor een extra filterlaag in de uitvoer toe te passen. Effectief worden de vlakken aangemerkt als bosontwikkeling daarmee iets vergroot.

Afbeelding 3.9 Confusion matrix model gebruikt voor kartering 2021



Tabel 3.6 Classificatierapport modelvoorspelling voor kartering 2021

Vegetatietype	Accuracy	IoU	Precision	Recall	F1-score
riet	94,5	83,5	0,95	0,94	0,95
moerasandijvie	88,4	88,2	1,00	0,88	0,83
lisdodde	95,4	75,2	0,82	0,95	0,88
rode ganzenvoet	88,5	84,4	0,79	0,88	0,83
bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)	36,6	34,3	0,22	0,37	0,59
overige vegetatie	56,6	31,8	0,62	0,57	0,59
geen vegetatie	99,5	90,0	1,00	0,99	1,00
gemiddeld	80,0	69,6			

### 3.2 Ontwikkeling van vegetatie

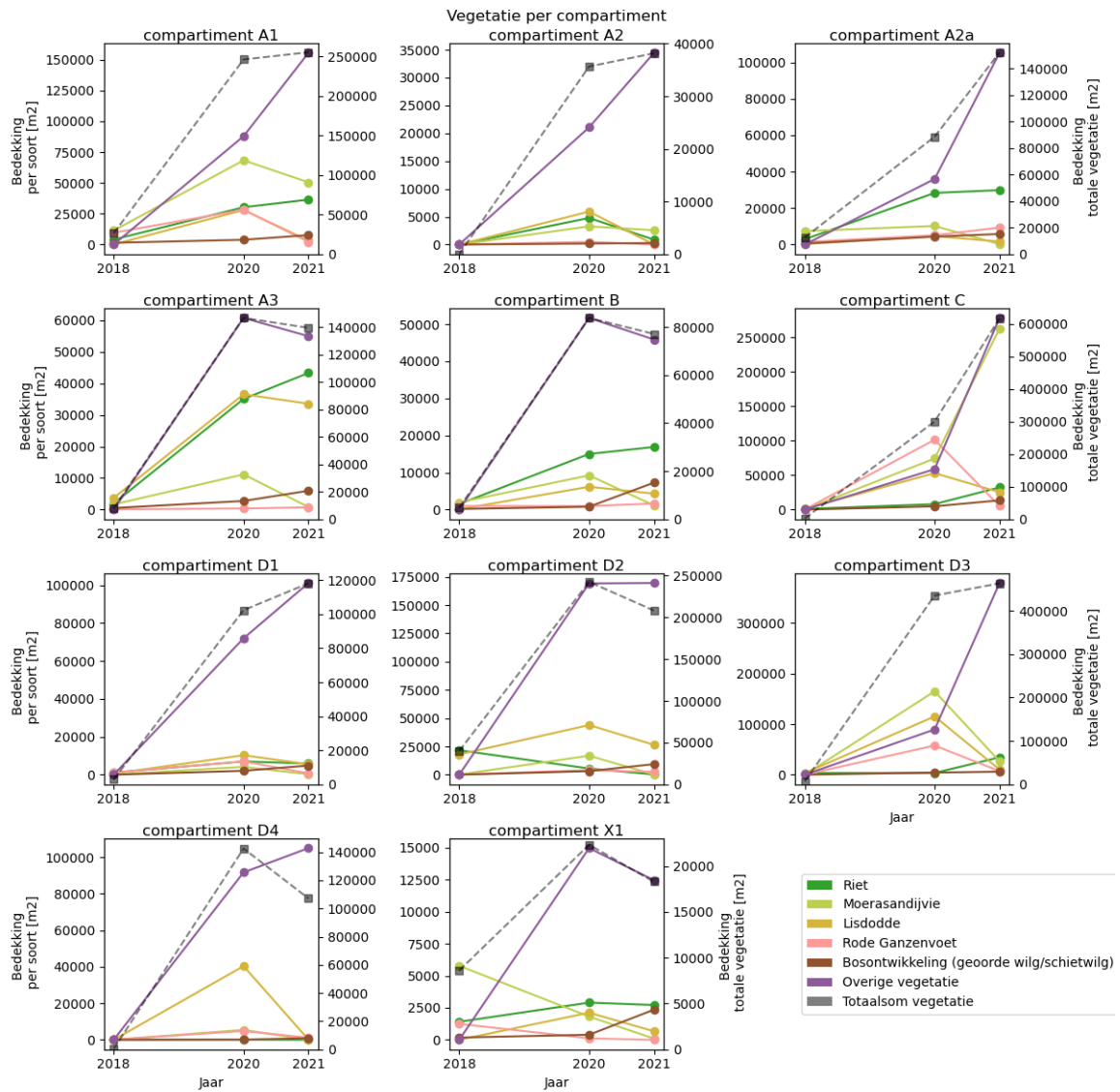
De voorgaande paragrafen presenteerden de status van de vegetatie op de Marker Wadden voor elk van de monitoringsjaren afzonderlijk. Deze paragraaf voegt deze resultaten samen, en kijkt daarmee naar de ontwikkeling van vegetatie.

Voor elk van de compartimenten geeft afbeelding 3.10 de ontwikkeling per vegetatie klasse in termen van oppervlak weer in de tijd (horizontale as). Telkens geeft de verticale as aan de linker kant de bedekking per soort in m<sup>2</sup> (corresponderend met de gekleurde grafieken met ononderbroken lijnen), en de verticale as aan de rechter kant het totaal oppervlak bedekt met vegetatie (corresponderend met de grijze grafiek met onderbroken lijn).

Op basis van deze grafieken en de beschreven kaartbeelden uit voorgaande paragrafen merken we het volgende op:

- de voornaamste analyse in vergelijking van de kaartbeelden tussen het begin (2018) en eind (2021) van de monitoringsperiode is dat voor elk van de compartimenten de hoeveelheid vegetatie sterk toeneemt. Daarbij is het generieke beeld dat er een sterke toename waarneembaar in 2020 ten opzichte van 2018, en dat er tussen de jaren 2020 en 2021 in het totaal aandeel van bedekking voor de meeste compartimenten gestaag toeneemt. Enkele compartimenten zijn hierop een uitzondering;
  - bij compartimenten A2a en C zien we een sterke toename in de totale bedekking tussen 2020 en 2021;
  - bij compartimenten A3, B, D2, D4 en X1 zien we een lichte afname in gedetecteerde bedekking, ofwel een lichte toename in de klasse 'geen vegetatie'. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn verschillen in waterstand (water behoort immers tot de klasse 'geen vegetatie'), marges in modelonzekerheid, of een daadwerkelijke geringe afname van vegetatie;
- voor elk van de compartimenten zien we in vergelijking tussen de jaren 2020 en 2021 voornamelijk een toename van oppervlak gekarteerd als 'overige vegetatie' (gemengde pioniervegetatie), ten koste van gebieden gekarteerd als een specifieke soort. Op compartiment D2 na is 'riet' hierop een uitzondering: daarvoor zien we een gestage toename van het oppervlak riet in de compartimenten. Mogelijk speelt hierin het ontbreken van een hoogtepunt een rol, echter zien we deze relatie ook terug in de validatiedata.

Afbeelding 3.10 Per compartiment de ontwikkeling van vegetatie door de monitoringsjaren. Met telkens op de linker verticale as het oppervlak per gekarteerde vegetatieklasse, en op de rechter verticale as de totaal som van vegetatie (gestippelde lijn). In beide gevallen zijn de oppervlaktes uitgedrukt in m<sup>2</sup>



### 3.3 Relatie tot MEP indicatoren en doelen Marker Wadden

De relatie van de kaartbeelden en methoden tot de MEP indicatoren en de doelen van de Marker Wadden sluiten aan op de vraag *'Kan een natuurlijk voedselrijk moeras zich ontwikkelen en duurzaam in stand houden?'.*

Met Remote Sensing is het mogelijk om de moerasvegetatie op de Marker Wadden grootschalig te volgen. Daarbij gaat het om het volgen van oppervlakten en gebiedsbedekkingen moerasvegetatie, zonder dat daarvoor veldwerk in het gehele gebied noodzakelijk is. Ook is het mogelijk om bosontwikkeling te monitoren, echter zien we dat het vooral de meerjarige vegetatie is die goed kan worden opgemerkt. Eénjarige bosontwikkeling is in de hoge resolutie satellietbeelden nauwelijks uit te filteren.

Uit de analyse van de kaartbeelden, de vegetatieontwikkeling, en kennis op het gebied van de ecologische ontwikkeling van moerasvegetatie op de Marker Wadden blijkt dat ook in 2021 een groot deel van de begroeide gebieden zich in een pioniersstadium bevindt. De Marker Wadden zijn nog volop in ontwikkeling, en de verwachting is dat het nog enkele jaren nodig heeft om zich door te ontwikkelen. Bij deze doorontwikkeling spelen bodemdaling, competitie en bosontwikkeling een rol. Het resultaat hiervan is dat het lastig is om in dit stadium te evalueren op de MEP indicatoren, aangezien het gebied nog niet zijn eindbeeld heeft bereikt.

# 4

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 4.1 Toegepaste Remote Sensing methoden voor vegetatiekarteringen

Voor het in kaart brengen van de vegetatie op de Marker Wadden met Remote Sensing data, zijn diverse methoden voor classificatie afgeleid en gevalideerd aan de hand van veldwaarnemingen. Geconcludeerd wordt dat het met de toegepaste methoden mogelijk is de vegetatie op de Marker Wadden aan de hand van dominante soorten met hoge nauwkeurigheid (rond 80 % gewogen *accuracy*) in kaart te brengen voor de jaren 2018, 2020 en 2021.

### 4.2 Resultaat vegetatiemonitoring en doelen Marker Wadden

Met de uitgewerkte methoden voor vegetatie kartering is het mogelijk om de ontwikkeling van de vegetatie op de Marker Wadden, onderverdeeld in dominante moerassoorten (riet, lisdodde, moerasandijvie, rode ganzenvoet, bosontwikkeling) te volgen. De resultaten laten zien dat wanneer vergeleken wordt tussen 2018 en het monitoringsjaar 2021 er sprake is van een toename van het totale oppervlak aan vegetatie op de Marker Wadden in elk van de compartimenten. Daarbij is het generieke beeld dat er een sterke toename waarneembaar in 2020 ten opzichte van 2018, en dat er tussen de jaren 2020 en 2021 in het totaal aandeel van bedekking voor de meeste compartimenten gestaag toeneemt.

Voor elk van de compartimenten zien we in vergelijking tussen de jaren 2020 en 2021 voornamelijk een toename van oppervlak gekarteerd als 'overige vegetatie' (gemengde pioniervegetatie), ten koste van gebieden gekarteerd als een specifieke soort. Enkele compartimenten vormen hier een uitzondering op.

Op basis van de vegetatiekarteringen zien we dat moerasvegetatie op de Marker Wadden zich ontwikkelt, maar dat het grootste deel zich in pioniersstadium bevindt. Daarmee is het lastig om in dit stadium op de MEP indicatoren te evalueren. De Marker Wadden zijn nog volop in ontwikkeling, en de verwachting is dat het nog enkele jaren nodig heeft om door te ontwikkelen. Daarbij spelen bodemdaling, competitie en bosontwikkeling een rol.

### 4.3 Aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde analyses wordt aanbevolen de vegetatiemonitoring op de Marker Wadden voort te zetten met behulp van Remote Sensing.

In het monitoringsjaar 2021 blijkt dat de beschikbaarheid van hoge resolutie dronebeelden binnen KIMa geen vanzelfsprekendheid is. Echter zien we daarmee wel dat de beschikbaarheid van hoge resolutie satellietbeelden hier wel een uitkomst biedt. Zo blijkt dat we met deze lagere resolutie beelden ook in staat zijn om betrekkelijk kleinschalige vegetatie in kaart te brengen, waarbij accurate veldwaarnemingen en expertkennis op het gebied van ecologie op de Marker Wadden cruciaal is. Met het oog op de toekomst biedt dit een steunpunt voor de monitoring van vegetatie in toekomstige monitoringsjaren. Aanbevolen wordt om aanvullend op satelliet beelden tevens hoge resolutie dronedata in te blijven winnen.

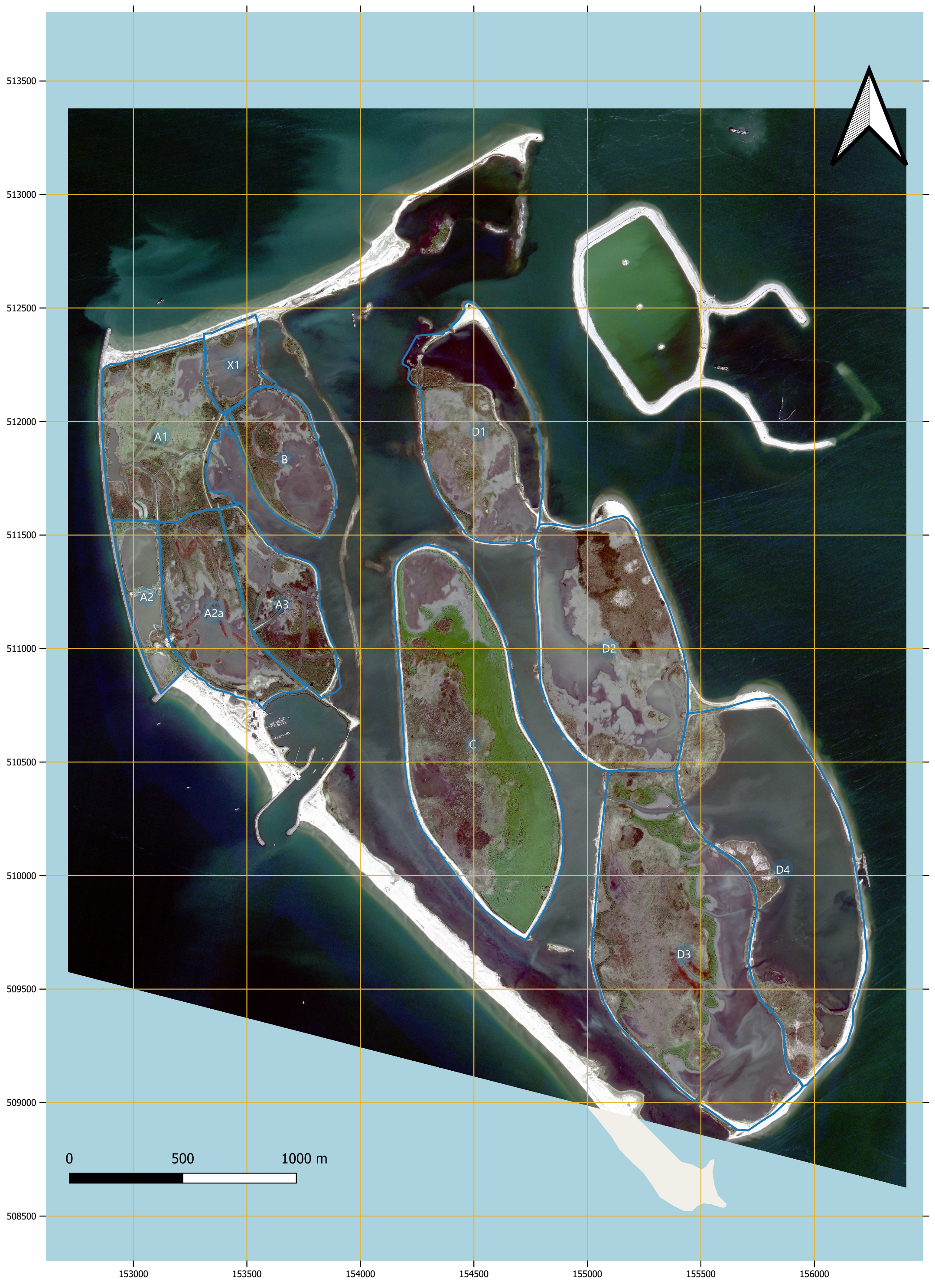


In relatie tot het vaststellen van de MEP indicatoren en de doelen van de Marker Wadden wordt ook aangeraden de monitoring voort te zetten. We verwachten dat de MEP indicatoren geëvalueerd kunnen worden wanneer het pioniersstadium voorbij is.

# Bijlagen

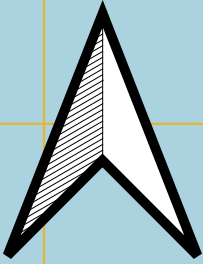


## BIJLAGE: SATELLIETBEELD MARKER WADDEN 2021





## BIJLAGE: VELDWAARNEMINGEN 2018



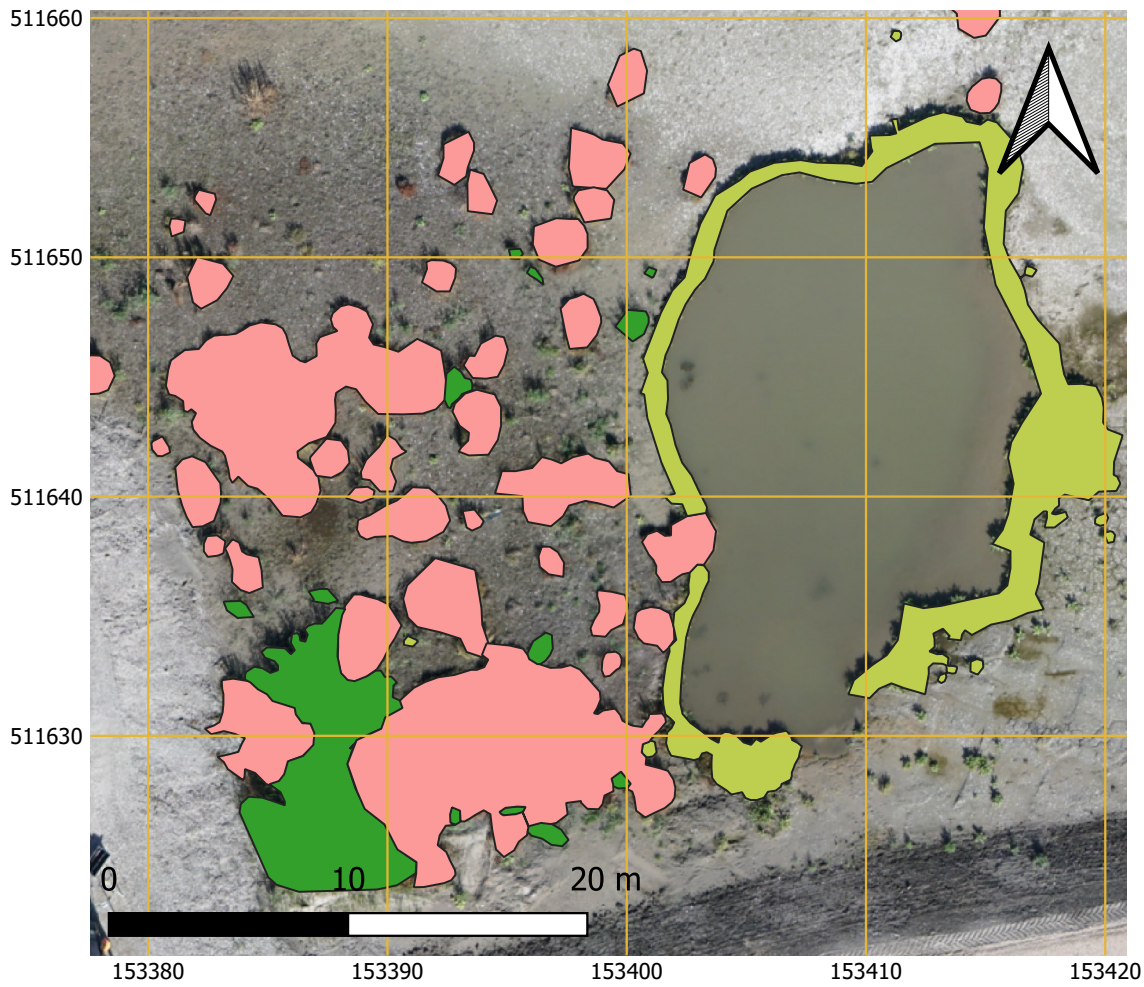
Legenda

- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandijvie
- Lisdodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)







0 500 1000 m

153000 153500 154000 154500 155000 155500 156000

513000  
512500  
512000  
511500  
511000  
510500  
510000  
509500  
509000  
508500



Legenda

-  Geen vegetatie (achtergrond)
-  Riet
-  Moerasandijvie
-  Lisdodde
-  Rode ganzenvoet
-  Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)



## BIJLAGE: VELDWAARNEMINGEN 2020





Legenda

- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandijvie
- Lisdodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)
- Overige vegetatie

0 500 1000 m

# IV

## BIJLAGE: VELDWAARNEMINGEN 2021



513000  
512000  
511000  
510000  
509000

153000 154000 155000 156000

**Legenda**

- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandijvie
- Lisdodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)
- Overige vegetatie





**BIJLAGE: VEGETATIEKARTERING 2018**



**Legenda**

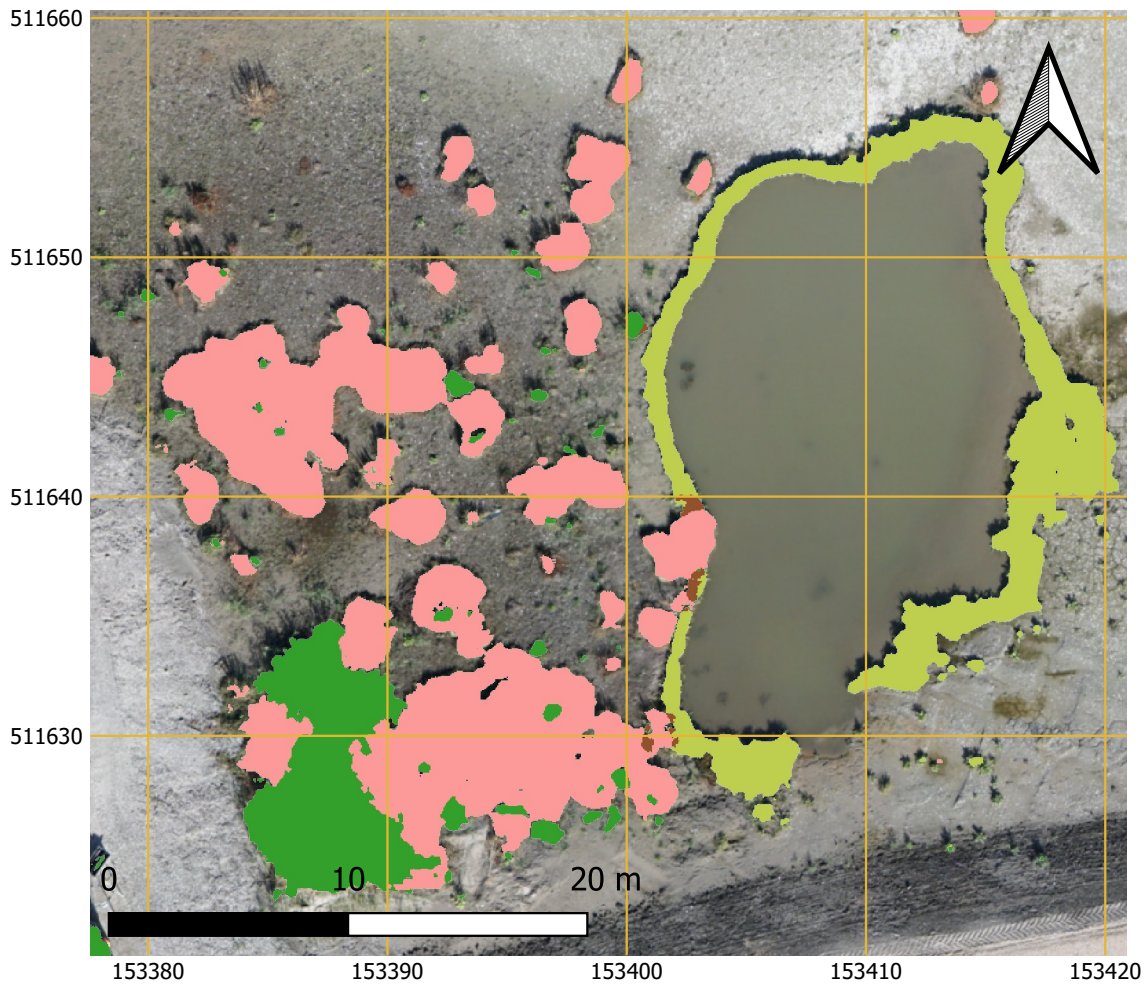
- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandijvie
- Lisdodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)

0 500 1000 m



153000 153500 154000 154500 155000 155500 156000

513000  
512500  
512000  
511500  
511000  
510500  
510000  
509500  
509000  
508500



### Legenda

- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandijvie
- Lisodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)

# VI

## BIJLAGE: VEGETATIEKARTERING 2020



Legenda

- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandijvie
- Lisdodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)
- Overige vegetatie

0 500 1000 m

153000 153500 154000 154500 155000 155500 156000

512500  
512000  
511500  
511000  
510500  
510000  
509500  
509000  
508500



# VII

## BIJLAGE: VEGETATIEKARTERING 2021

513500  
513000  
512500  
512000  
511500  
511000  
510500  
510000  
509500  
509000

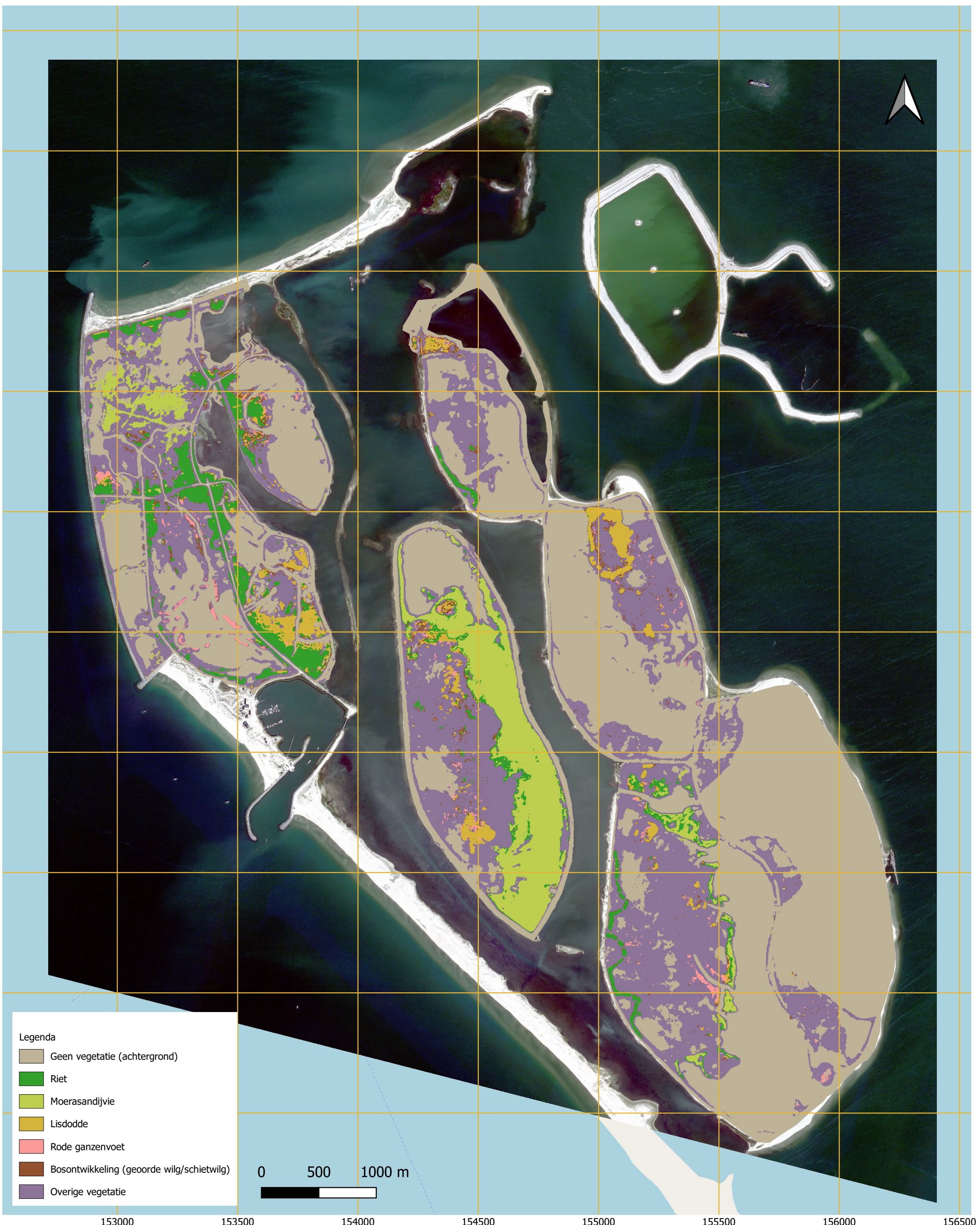


Legenda

- Geen vegetatie (achtergrond)
- Riet
- Moerasandjvie
- Lisdodde
- Rode ganzenvoet
- Bosontwikkeling (geoorde wilg/schietwilg)
- Overige vegetatie

0 500 1000 m

153000 153500 154000 154500 155000 155500 156000 156500



# VIII

**BIJLAGE: VEGETATIEKARTERING 2018.ZIP (SEPARAAT DIGITAAL BESTAND)**

IX

BIJLAGE: VEGETATIEKARTERING 2020.ZIP (SEPARAAT DIGITAAL BESTAND)



**BIJLAGE: VEGETATIEKARTERING 2021.ZIP (SEPARAAT DIGITAAL BESTAND)**

