

Rapportage meetplan 15

Procedure semi-automatische kartering embryonale duinen

Zandmotor

Notitie NOT2020.02.13, definitieve versie, 24 februari 2021

Bas Arens & Kees Vertegaal

Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek en Vertegaal Ecologisch Advies en Onderzoek

Inhoud

Inhoud	1
Inleiding	1
Metingen	3
Procedure voor semi-automatische kartering	4
Analyse	8
Vergelijking van methodes voor 2018	8
Veranderingen tussen 2018 en 2019	11
Bepaling hoogte van de duintjes voor 2018 en 2019 en verandering	23
Bepaling volume van de duintjes voor 2018 en 2019 en verandering	25
Conclusies	25
Literatuur	26
Bijlage	27

Inleiding

In 2013, 2014, 2015 en 2018 zijn veldmetingen gedaan naar het voorkomen van embryonale duinen op de Zandmotor. Hierbij werden duinvlakken (met een bedekking van duinvormende grassen en een hoogte van minimaal 20cm), plantvlakken (idem, maar kleiner dan 20 cm) en individuele duinvormende grassen ingemeten. Bij vlakken werden de contouren van het vlak ingemeten. Bij duinvlakken werd bovendien van karakteristieke punten binnen het duinvlak de

hoogte opgemeten. Individuele planten werden als punt opgemeten. Lagen planten op minder dan 2m van elkaar, dan werd het vlak rondom de planten ingemeten als plantvlak.

Noodgedwongen werd bij vrijwel iedere meting het opnamegebied verkleind, omdat het aantal embryonale duinen iedere keer weer verder was toegenomen dan verwacht. In oktober 2018 werd tegelijkertijd met de veldopname een opname vanuit de lucht gemaakt, waarbij ook de hoogte met behulp van Lidar werd ingemeten. Dat gaf de mogelijkheid om veldopname en luchtopnames rechtstreeks te vergelijken en op basis hiervan een nieuwe methode te ontwikkelen voor de volgende meetronde, gebaseerd op luchtopnames. Aangezien ook in oktober 2018 het aantal embryonale duinen weer explosief toegenomen was, bleek het ook niet haalbaar meer om met de tot dan toe gehanteerde veldmethode de inventarisatie voort te zetten.



Figuur 1. Ligging proefgebieden. Ondergrond luchtfoto Shore 2019.

De ligging en nummering van de proefgebieden is weergegeven in Figuur 1. De oorspronkelijke proefgebieden zijn aangegeven met nummers 1 t/m 5 en geel omgrensd. De eerste reductie was een versmalling, en resulteerde in de proefgebieden met nummer 10 t/m 50, omgrensd met blauw. De laatste reductie resulteerde in de proefgebieden 101, 201, 202, 301, 302, 303, 401 en 501 en zijn omgrensd met rood. De tussen de proefgebieden gelegen stroken zijn genummerd als 12 (tussen 1 en 2) t/m 45 (tussen 4 en 5).

De vergelijking van veldopname en opname vanuit de lucht heeft tot doel te onderzoeken of de resultaten van de veldopname (geheel of gedeeltelijk) overeenkomen met de luchtopname, en of een algoritme is af te leiden om vanuit de luchtopname dezelfde type gegevens af te leiden als voor de veldopname. De vraag is of de meetreeks van 2013-2015 en 2018 daarmee gecontinueerd kan worden, of dat de verschillen zodanig zijn dat de gegevens als twee verschillende meetreeksen moeten worden beschouwd.

Behalve de veldopname is ook vanaf 2011 gekarteerd vanaf luchtfoto's. Omdat de resolutie van luchtfoto's beperkt is (resolutie orde 0.10×0.10 tot $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$) zijn beginnende duintjes niet te zien. Grotere complexen zijn echter wel zichtbaar en zijn dus vanaf 2011 gekarteerd. Op de laseraltimetriedata van Rijkswaterstaat, met een resolutie van $2 \times 2 \text{ m}^2$ zijn nog grotere complexen nodig om in de data zichtbaar te worden. Het idee was dat veldopname en luchtfoto/laseraltimetrie opnames van RWS aanvullend waren, waarbij de details uit de veldopnames moesten blijken, en zodra de complexen een bepaalde grootte hadden bereikt, ze verder met luchtfoto's en laseraltimetrie gevolgd zouden kunnen worden.

Doel van deze notitie is de procedure voor het afleiden van embryonale duinen uit de aangeleverde hoogtegegevens en luchtfoto's te documenteren. Tweede doel is om een vergelijking te maken met deze semi-automatische classificatie van 2018 met de veldopname. Derde doel is om een eerste vergelijking te maken van de eerste resultaten van de semi-automatische classificatie van 2018 en 2019, waarbij aandacht wordt besteed aan de verandering van aantallen en oppervlaktes aan embryonale duinen in de verschillende proefgebieden en de volumeveranderingen.

Metingen

Op 9 oktober 2018 zijn op dezelfde dag zowel veldopnames uitgevoerd, als met een drone luchtfotobeelden en laseraltimetrieopnames gemaakt. De luchtfotobeelden bestrijken niet de gehele Zandmotor, maar alleen de voorste 50m van de zeereep en een strook zeewaartse hiervan van circa 125m. De laseraltimetrie is wel beschikbaar voor de gehele Zandmotor, in een resolutie van $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$. De orthofoto is beschikbaar in verschillende resoluties, met een maximum van $0.03 \times 0.03 \text{ m}^2$.

Toeval of niet, ook de laseraltimetrieopname van Rijkswaterstaat dateert van 9-10-2018, zodat voor die dag verschillende methodes vergeleken kunnen worden.

In 2019 heeft Rijkswaterstaat twee laseraltimetrieopnames laten uitvoeren, de eerste op 27-02-2019, de tweede op 30-10-2019. De laatste is nog niet beschikbaar.

Shore heeft in 2019 op 24-10-2019 een tweede opname gemaakt, met orthofoto, nu in een maximale resolutie van $0.015 \times 0.015 \text{ m}^2$ en laseraltimetrie, opnieuw in een resolutie van $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$. Beide opnames (dus foto en hoogte) zijn voor het grootste deel van de Zandmotor gemaakt (Figuur 1), zodat alle vijf proefgebieden die tijdens de veldopnames zijn ingemeten binnen het opnamegebied vielen.

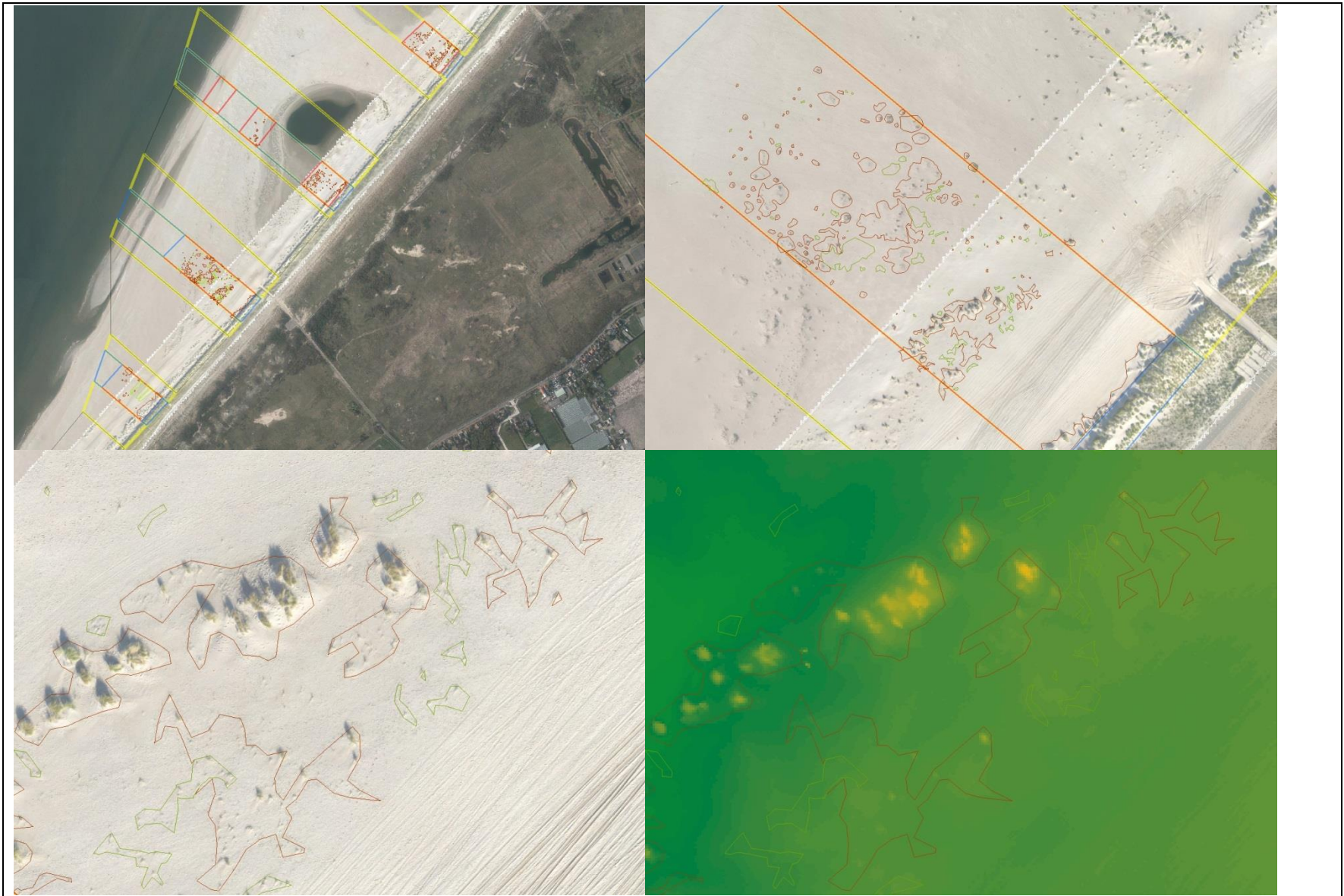
De reguliere luchtfoto's van Rijkswaterstaat van 2018 en 2019 zijn beschikbaar in een resolutie van $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$, met opname data xx-xx-2018 en xx-xx-2019. De foto's van 2019 zijn overigens nog niet opgeleverd, maar het deel van de Zandmotor met embryonale duinen is wel beschikbaar gesteld door RWS als screenshots.

Procedure voor semi-automatische kartering

Als eerste is visueel onderzocht of de in oktober 2018 gekarteerde vlakken en punten terug te zien zijn op de luchtfoto-opname en de laseraltimetrie. Een en ander wordt geïllustreerd door Figuur 2. Daaruit blijkt dat duinvlakken over het algemeen goed te herkennen zijn op de luchtfoto, plantvlakken vaak niet. Individuele punten zijn alleen zichtbaar als het duidelijke helmpollen of grotere planten betreft. In 2019 werd een Blauwe zeedistel aangetroffen, die inderdaad op de luchtfoto kon worden teruggevonden, maar alleen als een groene, verder niet herkenbare stip. Kleinere planten zijn of niet zichtbaar, of niet duidelijk genoeg herkenbaar. Dat laatste betekent dat soms een puntmeting wel op de luchtfoto is te herkennen als een vlek, maar dat omgekeerd een vlek op de luchtfoto geen puntmeting hoeft te zijn. Individuele planten zijn dus niet goed of zelfs helemaal niet vanaf de luchtfoto te detecteren, zeker niet automatisch.

De volgende stap was om een methode is te bedenken waarbij op basis van een automatische classificatie van de luchtfoto en/of laseraltimetrie de gekarteerde vlakken zijn te reproduceren. De resultaten zijn bevredigend, maar niet zodanig dat de mate van vergelijkbaarheid groot genoeg is om van een continuering van de oorspronkelijke meetreeks te kunnen spreken. De methode wordt hieronder in hoofdlijnen beschreven. De te volgen procedure in GIS is in de bijlage stap voor stap uitgewerkt en geïllustreerd met de kaarten die als tussenproduct zijn geproduceerd.

Essentie van de methode is dat embryonale duinen uitsteken boven het gemiddelde oppervlak en daarmee op de een of andere manier detecteerbaar moeten zijn. Probleem is dat het gemiddelde oppervlak geen simpel vlak is, maar helt van duinvoet naar waterlijn en ook parallel aan de waterlijn geen gelijkmatige hoogte heeft. Er is wel een soort van gemiddeld oppervlak af te leiden door de hoogtekaart, afkomstig van laseraltimetrie glad te strijken (te smoothen). Dit kan in GIS door voor iedere pixel de gemiddelde hoogte te berekenen voor een bepaald oppervlak rondom deze pixel. Hiervoor is de laseraltimetrie van RWS gebruikt, die vanwege zijn grovere resolutie van $2 \times 2 \text{ m}^2$ al enigszins gesmoothed is. Voor iedere pixel van $2 \times 2 \text{ m}^2$ wordt de gemiddelde hoogte berekend voor een cirkelvormig oppervlak rondom deze pixel, met een radius van 5 pixels, dus 10m rondom.



Figuur 2. Veldkartering over luchtfoto/DSM. Linksonder proefgebieden 2 t/m 5; rechtsboven detail van 401 met duinvlakken bruin, plantvlakken groen omgrensd; linksonder nog meer detail in proefgebied 401; rechtsonder zelfde uitsnede als linksonder maar nu met DSM als ondergrond.

Idealiter wordt deze procedure eenmaal uitgevoerd en wordt het dan gesmoothde oppervlak ieder jaar als basis gebruikt. Dit blijkt echter niet werkbaar, omdat er binnen het gebied enorm veel zandverplaatsingen zijn die van jaar tot jaar tot forse hoogteverschillen leiden. Dit betekent dat het vlak waarop de embryonale duinen zich ontwikkelen zelf ook steeds in beweging is. Daarom is onderzocht welke hoogtegegevens het beste als uitgangspunt kunnen dienen.

Voor de opname van oktober 2018 blijken de beste resultaten te worden verkregen door deze te vergelijken met de gladgestreken (gesmoothde) versie van de RWS-opname van een jaar eerder, najaar 2017 dus. Door tussen beide kaarten het hoogteverschil te berekenen en vervolgens contouren te maken voor bepaalde hoogteverschillen, ontstaat een lijnenkaart, waarbij verhoogde vormen, die dus boven het gemiddelde oppervlak uitsteken, omgrensd worden. De beste resultaten geeft de verschillijn van 0.2m (waarbij binnen het omgrensde vlak de hoogteverschillen tussen het DSM van 2018 en het gladgestreken DTM van een jaar eerder tenminste 0.2m bedragen). De meeste van de zo omgrensde vormen worden gevormd door embryonale duinen. Er zijn echter ook andere, niet begroeide reliëfvormen die hiermee omgrensd worden, die bijvoorbeeld ontstaan door sterke overstuiving van een zone (door opvulling van strandmeer of lagune bijvoorbeeld), of door andere ontwikkelingen (afslag en uitstuiven langs de zeewaartse rand van de Zandmotor bijvoorbeeld). Deze moeten handmatig verwijderd worden. Criterium hierbij is of op de luchtfoto al dan niet vegetatie zichtbaar is. Verhogingen met vegetatie worden beschouwd als duin, verhogingen zonder vegetatie worden niet beschouwd als embryonaal duin.

Het blijkt dat met deze methode hele kleine embryonale duinen vaak niet worden omgrensd, omdat het hoogteverschil niet groot genoeg is. Dat geeft een fout, het zijn immers embryonale duinen, maar ze worden niet herkend. Omdat ze klein zijn maakt dit voor het totale oppervlak niet veel uit (zie nauwkeurigheidanalyse hieronder), maar voor de aantallen maakt het wel veel uit. Om deze duintjes wel mee te kunnen nemen, is een extra stap toegevoegd, waarbij niet de 0.2m maar de 0.15m verschillijn (tussen DSM en gladgestreken DTM van het jaar er voor) wordt gebruikt. Hiermee wordt een groot deel van de kleinere duintjes wel omgrensd (hoewel nog geen 100%). Overigens wordt hiermee ook een hoop omgrensd wat niet begroeid is en wat dus niet onder embryonale duinen valt. Om hier een selectie in te maken wordt gebruik gemaakt van de groene band van de luchtfoto. Pixels met een hoge waarde in de groene band zijn meestal onbegroeid, pixels met een lage waarde begroeid. Binnen de onderscheiden vlakken kan in GIS berekend worden wat het gemiddelde, minimum, maximum etc van de binnen de vlakken liggende pixels is. Wanneer binnen een vlak een vastgesteld minimum aanwezig is, dan wordt dit beschouwd als begroeid, boven een bepaalde waarde als onbegroeid. Voor het onderscheid in onbegroeid en begroeid wordt ook nog gebruik gemaakt van de range, het verschil tussen minimum en maximum waarde voor de groene pixels in een vlak. Bij een embryonaal duin is de range over het algemeen hoog, omdat er zowel begroeid als onbegroeid binnen het vlak van een duintje aanwezig is. Voor een kaal vlak is de range meestal heel klein. De criteria voor de statistische parameters moeten overigens per luchtfoto vastgesteld worden, omdat de belichting van luchtfoto's sterk varieert. Daarvoor wordt per opname bekeken wat de waarde van de groene band is voor een aantal begroeide en niet begroeide oppervlakken. Op grond hiervan wordt het selectiecriterium voor die opname vastgesteld. Het vastgestelde criterium is gebruikt om

onbegroeide vlakken te verwijderen. Hierna moet handmatig nog het een en ander verwijderd worden.

Overigens is ook geprobeerd aan de hand van in de literatuur gepubliceerde vegetatie-indices een beter onderscheid in begroeid en onbegroeid te maken. Een overzicht van vegetatie-indices is gepubliceerd in Lussem et al (2018, met dank aan Merve Gunes, Deltares). Bijkomend probleem is vaak de schaduw, wat op de foto soms even donker is als een begroeid vlak en dan moeilijk te onderscheiden. De verwachting was dat dit met gepubliceerde vegetatie-indices beter te onderscheiden zou zijn. Er zijn vier verschillende berekeningen gemaakt (RGBVI, VARI en NGRDI, zie Figuur 3), maar allen gaven ze slechtere resultaten dan bij gebruik van de groene band alleen. Het zou wellicht helpen wanneer in de luchtfoto-opname ook de NIR wordt meegenomen, waarmee de NDVI berekend zou kunnen worden.

VI Name	Equation	Reference
RGBVI	$\frac{(R_G * R_G) - (R_R * R_B)}{(R_G * R_G) + (R_R * R_B)}$	Bendig et al. 2015
GLI	$\frac{(2 * R_G - R_R - R_B)}{(2 * R_G + R_R + R_B)}$	Louhaichi et al. 2001
VARI	$\frac{(R_G - R_R)}{(R_G + R_R - R_B)}$	Gitelson et al. 2002
NGRDI	$\frac{(R_G - R_R)}{(R_G + R_R)}$	Tucker 1979
NDVI_{NIR, RED}	$\frac{(R_{NIR} - R_R)}{(R_{NIR} + R_R)}$	Rouse et al. 1974
NDVI_{800,750}	$\frac{(R_{800} - R_{750})}{(R_{800} + R_{750})}$	Gnyp et al. 2015
SR_{810,750}	R_{810} / R_{750}	Gnyp et al. 2015

Table 1. Applied Vegetation indices. R = reflectance (%), R_R = red, R_G = green, R_B = blue, R_{NIR} = near-infrared, R_i = reflectance in narrow band region (R₈₀₀ = 800 nm).

Figuur 3. Berekeningen van vegetatie-indices voor het onderscheid van begroeid-onbegroeid. Bron: Lussem et al., 2018)

Hoewel de handmatige selectie van polygonen die wel/geen embryonaal duin zijn arbeidsintensief is, levert de automatische omgrenzing met deze methode enorm veel tijdswinst op ten opzichte van een reguliere kartering of veldopname. Het is echter de vraag in hoeverre de gegevens (goed) vergelijkbaar zijn en wat de nauwkeurigheid is van de semi-automatische methode t.o.v. de reguliere kartering en de veldopname. Dit wordt hieronder verder uitgewerkt.

Via allerlei GIS-bewerkingen (zie de Bijlage voor de details) is een polygonenkaart afgeleid met de embryonale duinen voor 2018. Op dezelfde manier is met de opname van 2019 (luchtfoto en laseraltimetrie) van Shore en het RWS-DTM van de Zandmotor van najaar 2018

een kaart voor 2019 afgeleid. In de vlakken is een onderscheid gemaakt in duintjes die tegen de zeereep aan zijn ontwikkeld, en duinen die meer op de Zandmotor liggen. Deze twee vormen zijn vrijwel overal gescheiden door een rijspoor. Door de duinenkaarten met een intersect te combineren met de kaart met proefgebieden, is vervolgens per deelgebied te bepalen wat de ontwikkeling van embryonale duinen van 2018-2019 is.

Analyse

In deze notitie wordt een eerste analyse gemaakt van de ontwikkeling van embryonale duinen. Na de opname van 2020 zal een meer uitputtende analyse volgen.

Als eerste wordt nagegaan in hoeverre de veldopname van oktober 2018 vergelijkbare resultaten heeft opgeleverd met de semi-automatische classificatie.

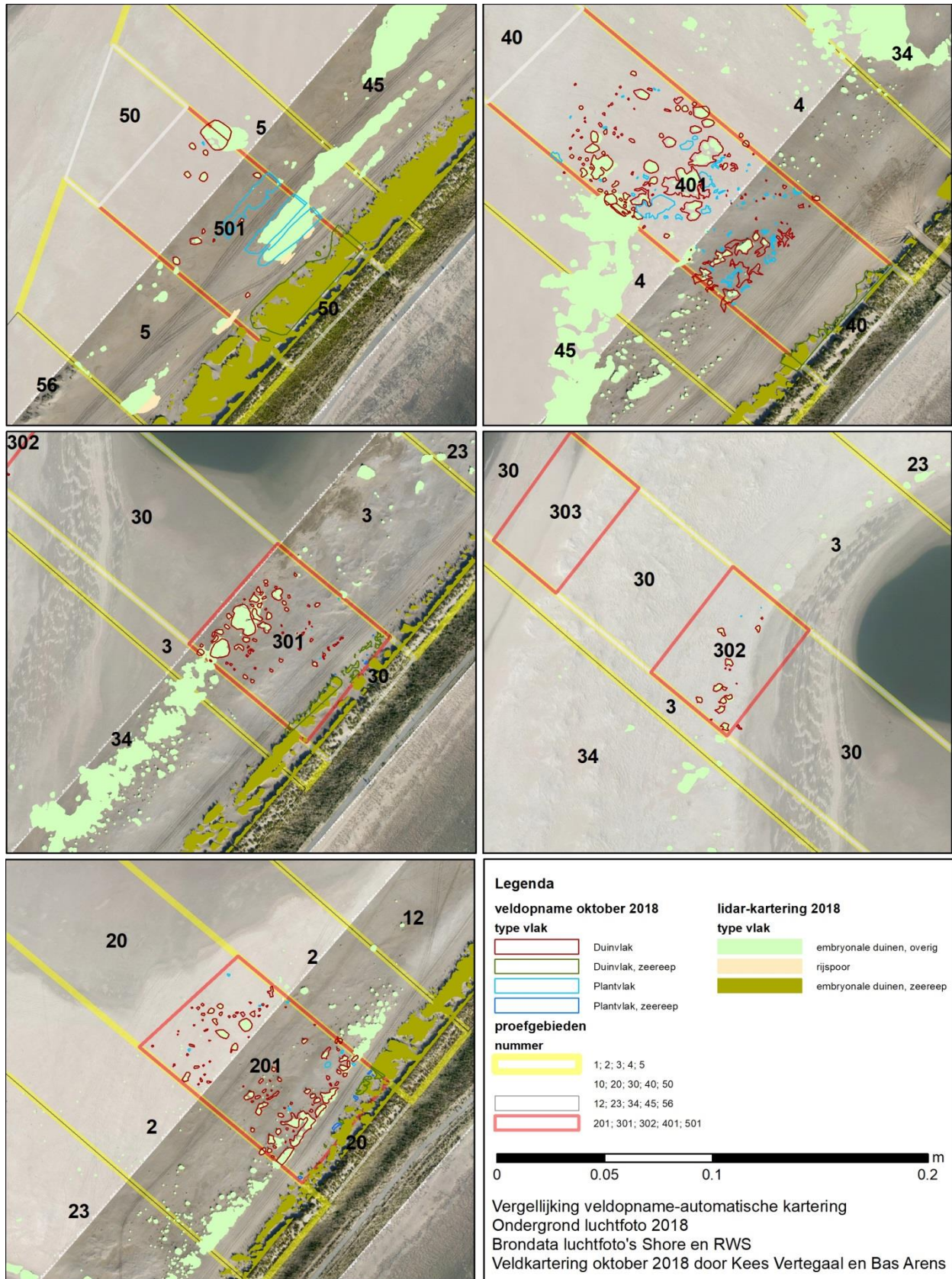
Daarna wordt aan de hand van de semi-automatische classificaties van 2018 en 2019 een eerste analyse gemaakt van de ontwikkelingen tussen 2018 en 2019, waarbij aandacht zal gaan naar de ontwikkeling van oppervlaktes, maar ook van het zandbudget van de embryonale duinen.

Vergelijking van methodes voor 2018

De veldkartering in oktober 2018 is uitgevoerd in de verkleinde proefgebieden, met rood omgrensd in Figuur 4. In deze figuur zijn alleen de proefgebieden aangegeven waar daadwerkelijk duinen zijn aangetroffen. In deelgebieden 202 en 302 is niets aangetroffen. De veldkartering en de semi-automatische classificatie hebben hier dezelfde resultaten (namelijk: geen duinen). Deelgebied 101 is niet onderzocht, omdat de tijd hier bij het veldwerk voor ontbrak. Op grond van de semi-automatische classificatie en de luchtfoto's is duidelijk dat hier in 2018 slechts op zeer beperkte schaal duintjes aanwezig waren.

De resultaten van de veldkartering en semi-automatische classificatie komen redelijk overeen. Voor de kwantitatieve vergelijking van oppervlaktes zijn alleen de resultaten van de overige duinen beschouwd, dus niet van de reeks duinen die tegen de zeereep liggen. In verband met verschillen in de landwaartse begrenzing zijn de oppervlaktes hiervan niet goed te vergelijken. Dit zijn bovendien de grote complexen, die al goed op zowel luchtfoto als laseraltimetrie zichtbaar zijn en waarvan het uitgangspunt was dat deze bij de veldopname niet centraal zouden staan. De contouren van veldkartering en semi-automatische classificatie komen hier overigens, afgezien van de verschillen in landwaartse begrenzing, redelijk overeen.

Figuur 5 toont de verschillende oppervlaktes per deelgebied. De veldkartering levert wel iets meer informatie vanwege het onderscheid tussen plantvlakken en duinvlakken. Voor sommige deelgebieden komen de resultaten goed overeen, voor andere minder. Voor deelgebieden 201, 301 en 302 zijn de contouren van de veldkartering goed vergelijkbaar met die van de semi-automatische classificatie. Uit Figuur 5 blijkt dat de oppervlaktes ook redelijk goed overeenkomen. De oppervlaktes van de semi-automatische classificatie zijn steeds iets kleiner dan die van de veldkartering. Dat is op zich logisch, omdat de semi-automatische classificatie met name binnen grotere eenheden tot een fijnere omgrenzing leidt, waardoor clusters die bij de veldkartering als één geheel zijn ingemeten bij de semi-automatische classificatie als

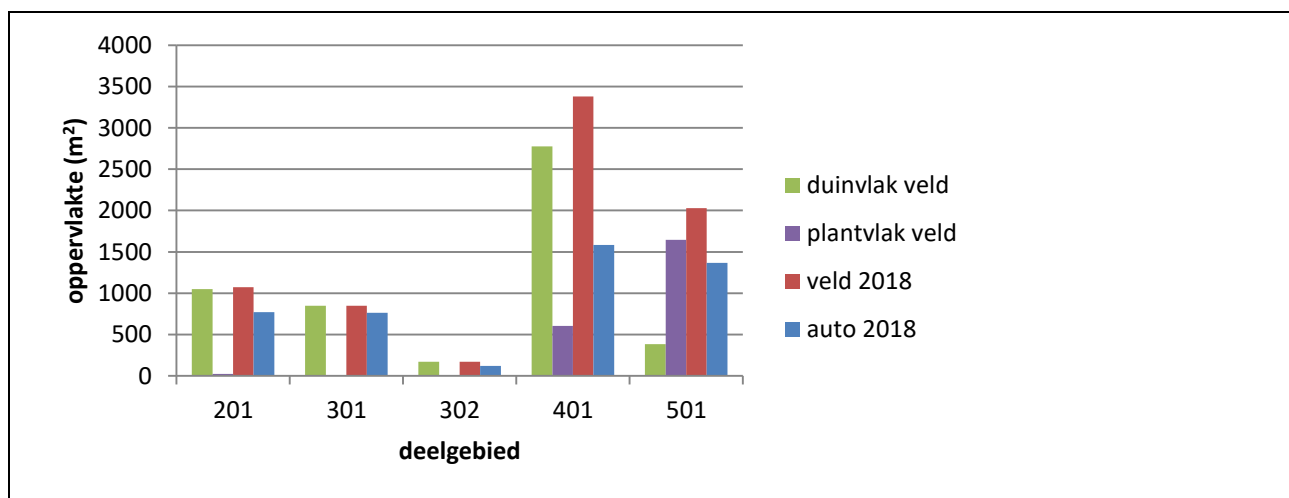


Figuur 4. Vergelijking van resultaten veldkartering en semi-automatische classificatie. Voor uitleg zie tekst.

aparte duintjes worden omgrensd. Verder zijn voor deze deelgebieden vrijwel alleen maar duinvlakken gekarteerd. Van de enkele plantvlakken die zijn gekarteerd in het veld worden de meeste in de semi-automatische classificatie niet herkend, wat op zich logisch is, omdat plantvlakken qua hoogte niet boven hun omgeving uitsteken. Het feit dat in sommige gevallen plantvlakken juist wel omgrensd worden, moet dan het gevolg zijn van een integrale verhoging van het vlak ten opzichte van de vorige hoogtemeting.

In deelgebieden 401 en 501 zijn de afwijkingen groter, deels omdat het aandeel plantvlakken veel groter is. In 401 wordt een belangrijk deel van de in het veld gekarteerde vlakken in de semi-automatische classificatie niet herkend, en dan met name de plantvlakken. Een deel hiervan is op de luchtfoto wel herkenbaar als (licht) begroeid, maar blijkbaar zijn deze vlakken dermate laag dat ze in het DSM niet gedetecteerd worden.

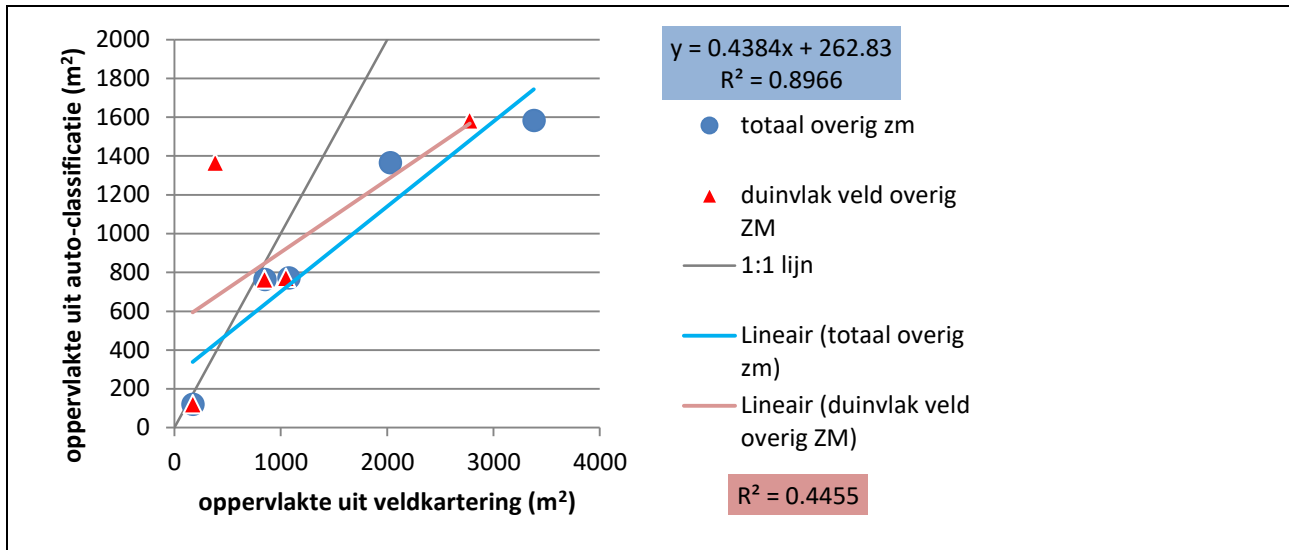
Voor de duinvlakken gaat het beter, hoewel ook hier enkele gekarteerde vlakken in de semi-automatische classificatie niet herkend worden. Bovendien zijn enkele grotere vlakken die in het veld als aaneengesloten duinvlak zijn gekarteerd in de semi-automatische classificatie als losse eenheden omgrensd. In deelgebied 501 liggen enkele grote plantvlakken, waarvan een deel wel in de semi-automatische classificatie tot uiting komt, een kleiner deel niet. De in het veld gekarteerde duinvlakken komen wel goed uit de semi-automatische classificatie.



Figuur 5. Vergelijking van oppervlaktes embryonale duinen volgens de veldkartering en de semi-automatische classificatie.

Figuur 6 toont de relatie tussen de veldkartering en de semi-automatische classificatie. De relatie tussen de veld- en de automatische kartering is beter wanneer voor de veldkartering zowel de plant- als de duinvlakken worden betrokken. De relatie is wel gebaseerd op slechts een beperkt aantal punten, namelijk de totale oppervlaktes voor deelgebieden 201, 301, 302, 401 en 501. Wanneer het gehele gebied wordt beschouwd, bestaat de indruk dat de semi-automatische classificatie zodra er van duinen sprake is een vrij goede benadering geeft. In de vergelijking drukt het magere resultaat van deelgebied 401 sterk op de matige correlatie. Vlakken waar slechts zeer schaars en nog niet geheel ontwikkelde vegetatie op voorkomt worden door de semi-automatische classificatie niet herkend. Alleen in deelgebied 501

worden enkele van de in het veld gekarteerde plantvlakken juist wel herkend en ook vrij goed omgrensd.



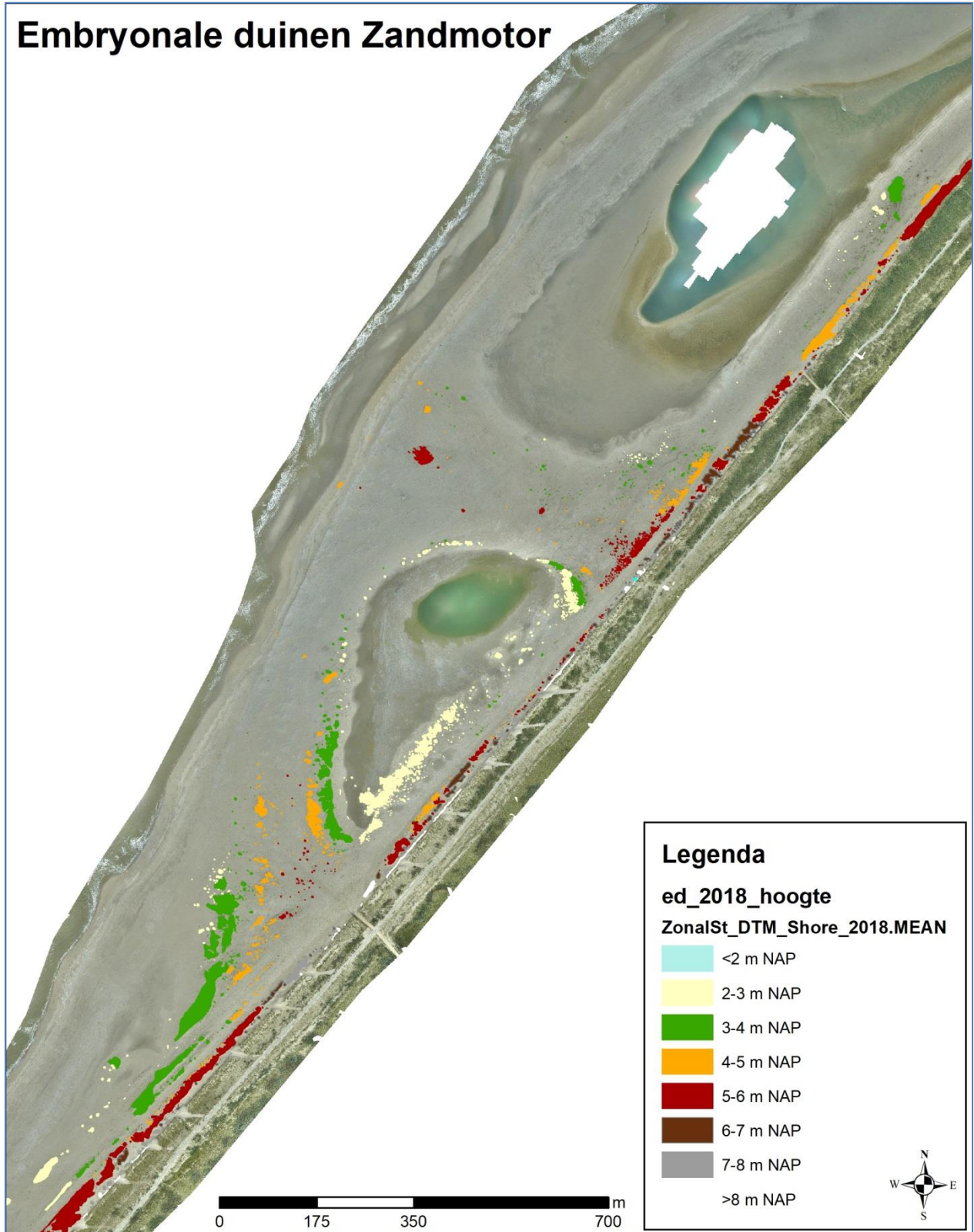
Figuur 6. Relatie tussen de totale oppervlaktes per deelgebied van de gekarteerde vlakken met de veldkartering en van de vlakken volgend uit de semi-automatische classificatie, op basis van de opnames van 2018.

Gezien deze verschillen is het onjuist om de gegevens van de semi-automatische classificatie als volledig vergelijkbaar met de gegevens uit de veldkartering te beschouwen. Bijkomend verschil is nog dat bij de veldkartering per vlak een schatting is gemaakt van de bedekking met de verschillende aanwezige plantensoorten. Bij de semi-automatische classificatie is dit niet het geval. Daarom is de conclusie dat beide methodes tot verschillende gegevens leiden, en dat er geen sprake is van één continue meetreeks. Voor de analyse moet daarom uitgegaan worden van twee verschillende meetreeksen. De eerste geeft de resultaten van de veldmetingen van 2013 t/m 2018, met gedetailleerd inzicht van duin- en plantvlakken met bedekking en planteninhoud. De tweede geeft de resultaten van de semi-automatische classificatie met vlakdekkend inzicht in oppervlakte en aantal van embryonale duinen en hun hoogteontwikkeling. Op grond van het totale oppervlak aan duinvlakken bij de veldkartering gekarteerd en het totaal oppervlak aan embryonale duinen met de semi-automatische classificatie gekarteerd voor het gehele gebied blijkt dat het oppervlak bij de semi-automatische classificatie 88% bedraagt van het oppervlak bij de veldkartering. Dit percentage kan eventueel gebruikt worden om de meetreeks te extrapoleren en hiermee een schatting te maken van de ontwikkeling van het oppervlak aan embryonale duinen sinds 2013. Dit percentage is overigens een gemiddelde. Uit Figuur 6 blijkt dat de ruimtelijke variatie fors is. De percentages per deelgebied zijn 74% voor 201, 90% voor 301, 70% voor 302, 57% voor 401 en 357% voor 501. De laatste wijkt zo af omdat hier een aantal plantvlakken in de semi-automatische classificatie herkend zijn als duin.

Veranderingen tussen 2018 en 2019

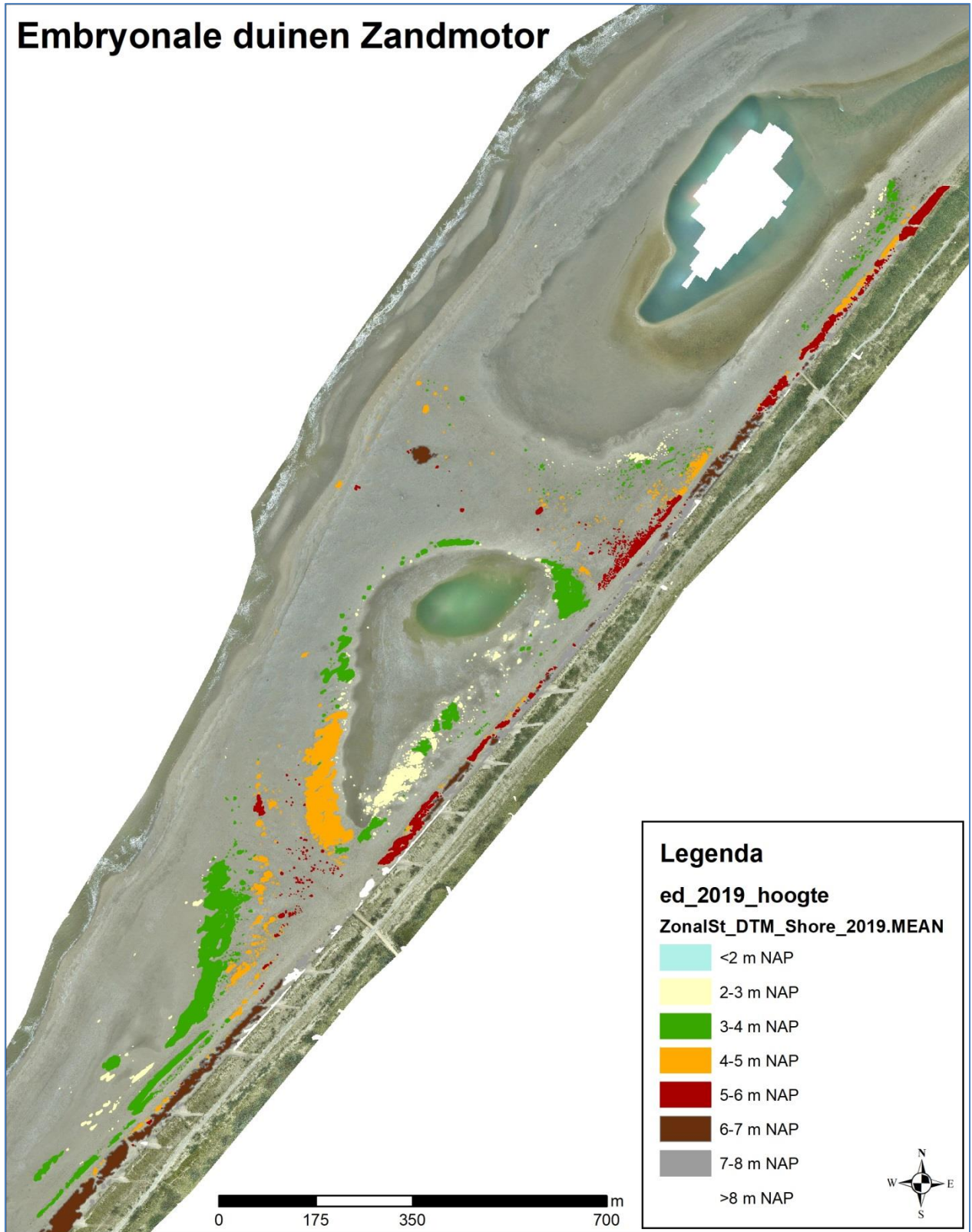
Met de semi-automatische classificatie is het mogelijk allerlei variabelen voor 2018 en 2019 te vergelijken. Voor de gekarteerde duinvlakken kunnen bijvoorbeeld per jaar de gemiddelde

hoogte en gemiddeld hoogteverschil worden weergegeven (Figuur 7 t/m Figuur 11). Vervolgens zijn hier allerlei kwantitatieve vergelijkingen mee te maken.



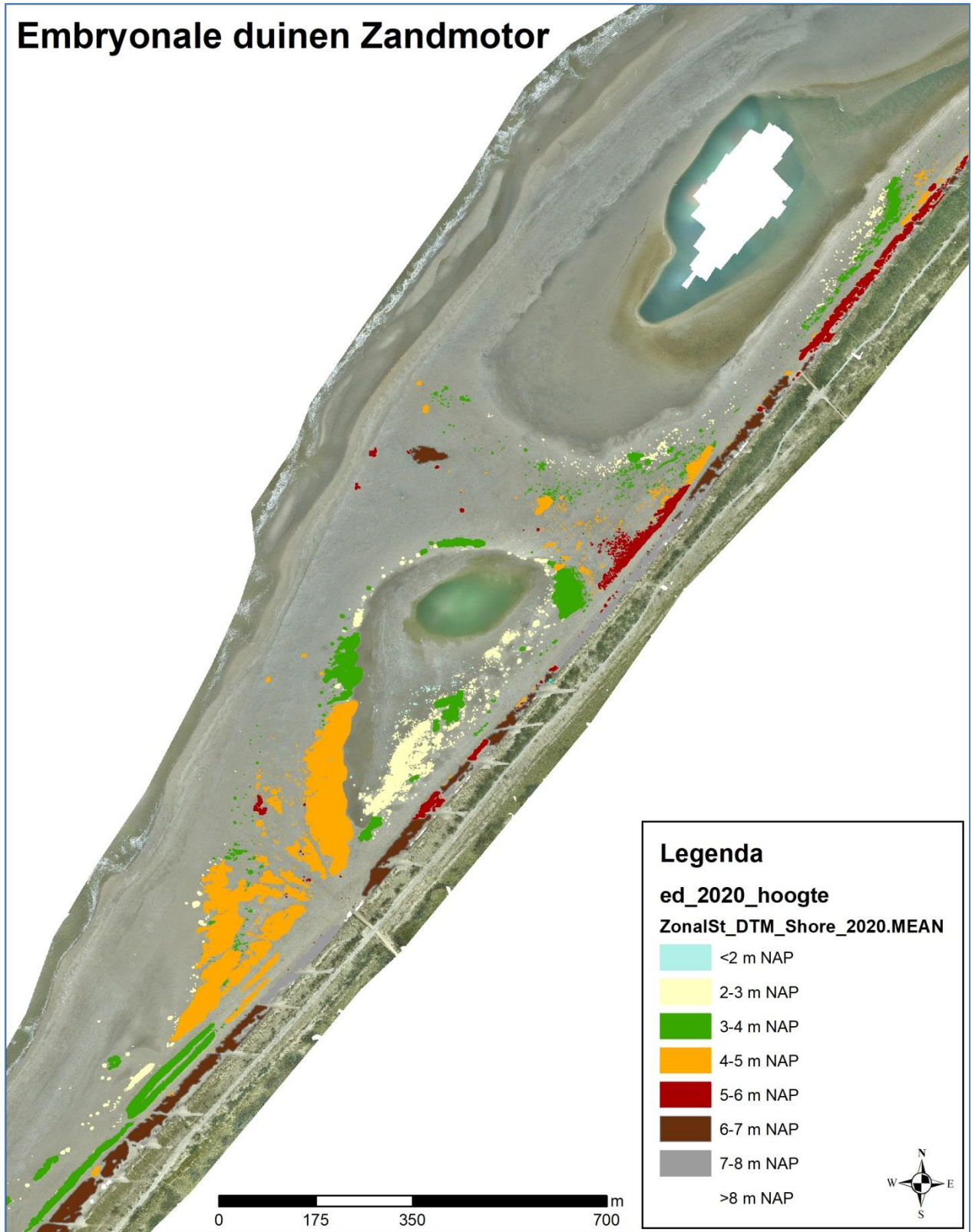
Figuur 7. Gemiddelde hoogte per duinvlak in 2018.

Embryonale duinen Zandmotor



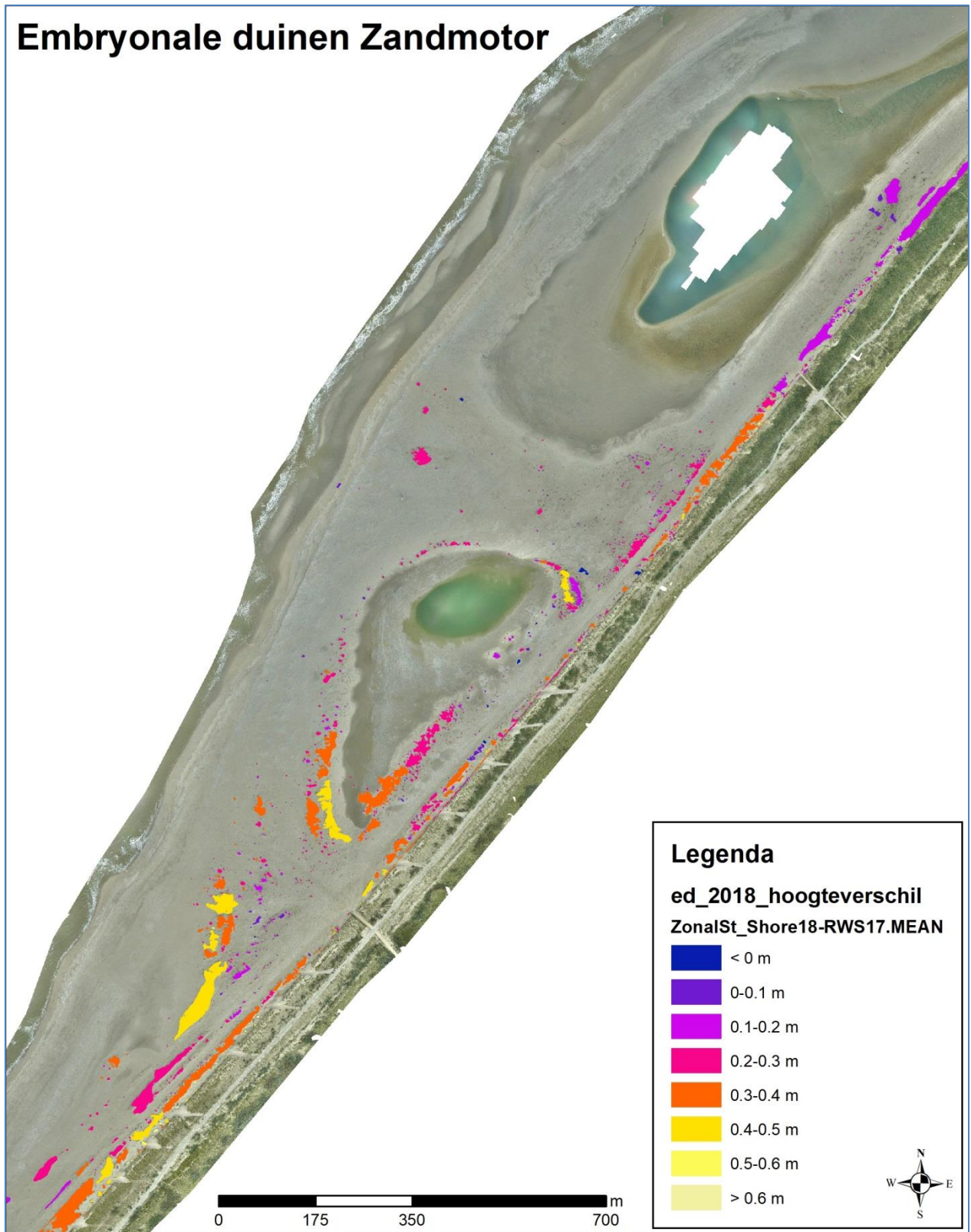
Figuur 8. Gemiddelde hoogte per duinvlak in 2019.

Embryonale duinen Zandmotor



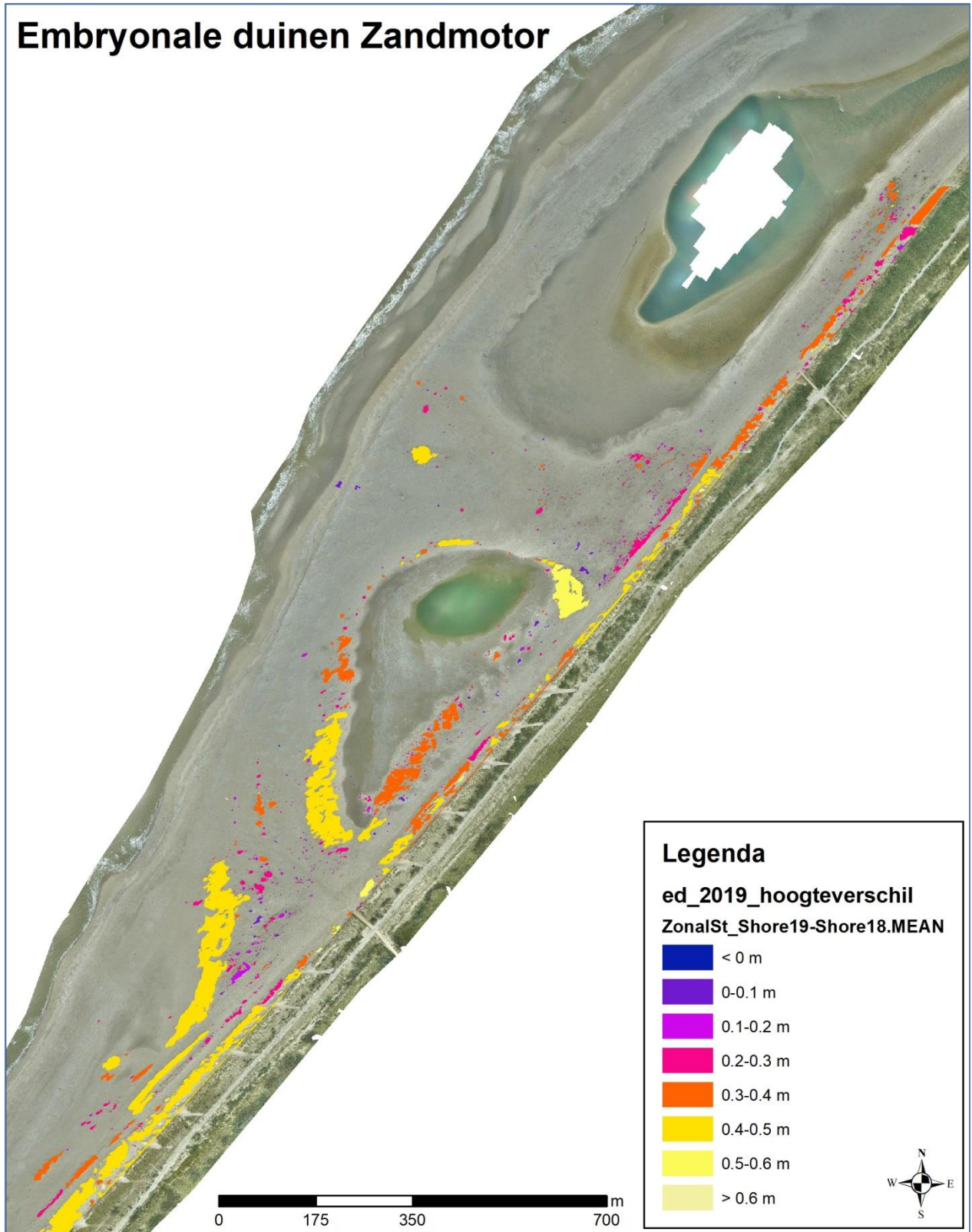
Figuur 9. Gemiddelde hoogte per duinvlak in 2020.

Embryonale duinen Zandmotor



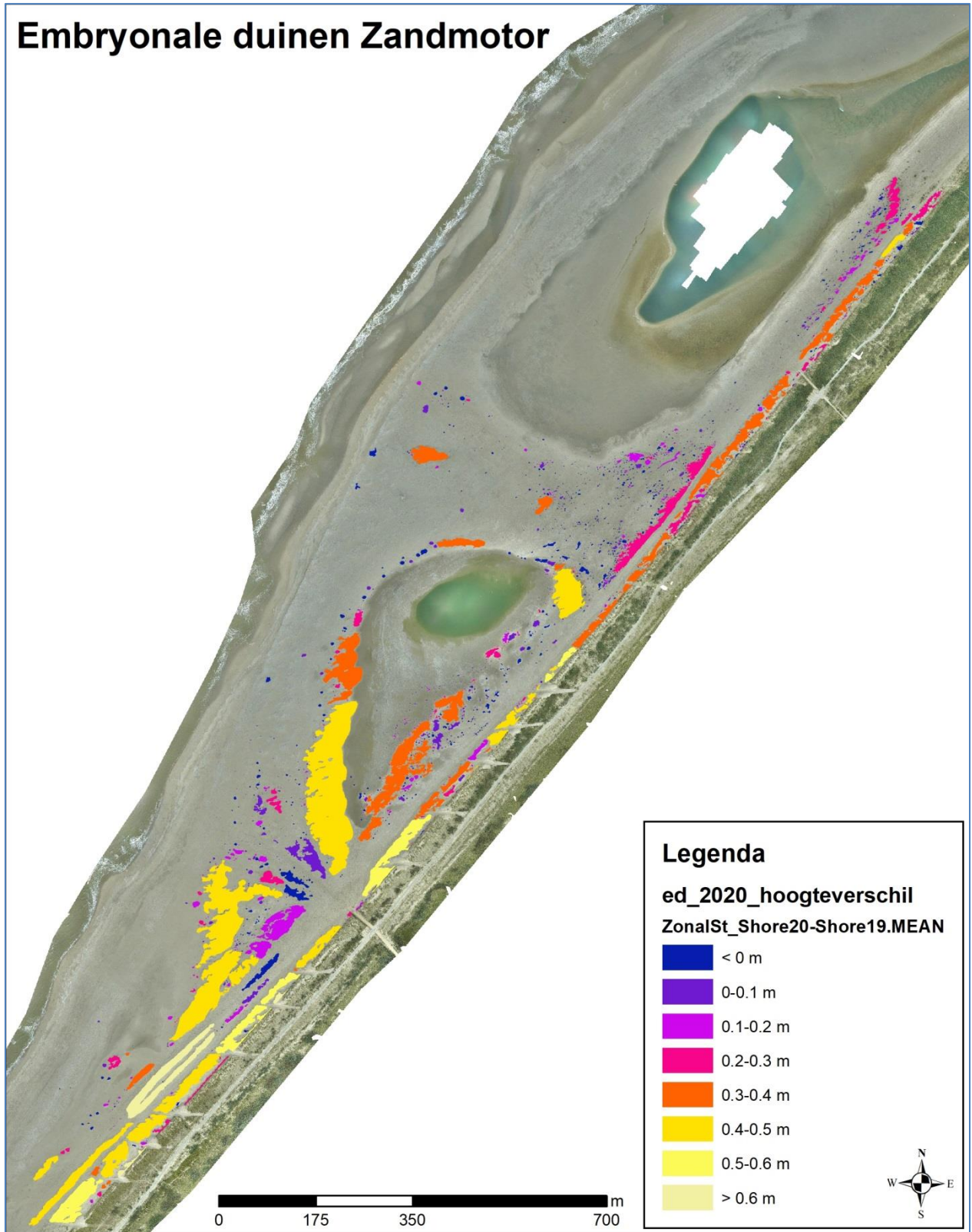
Figuur 10. Gemiddeld hoogteverschil per duinvlak tussen 2017 (RWS opname Zandmotor)-2018 (Shore).

Embryonale duinen Zandmotor



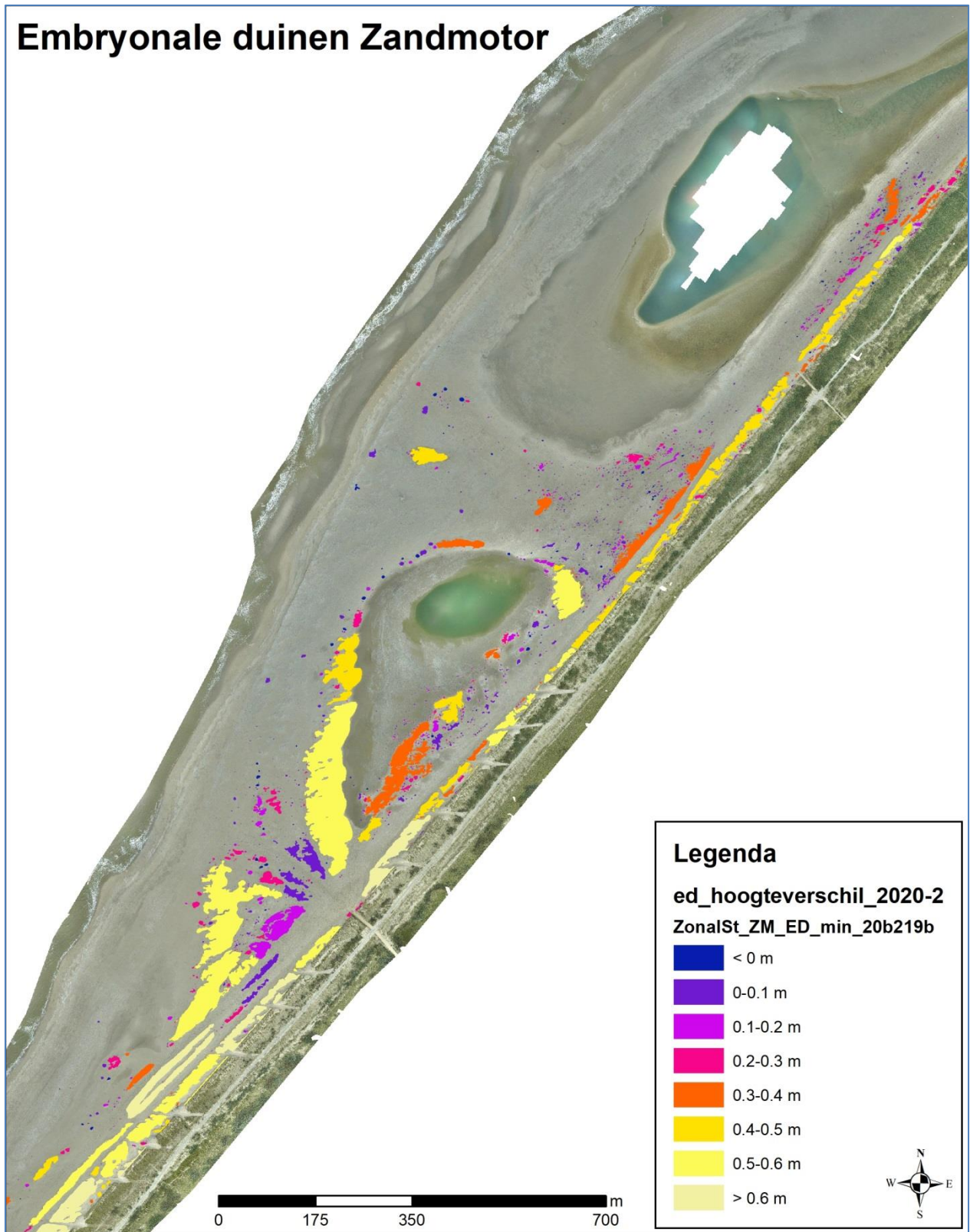
Figuur 11. Gemiddeld hoogteverschil per duinvlak tussen 2018 (Shore)-2019 (Shore).

Embryonale duinen Zandmotor

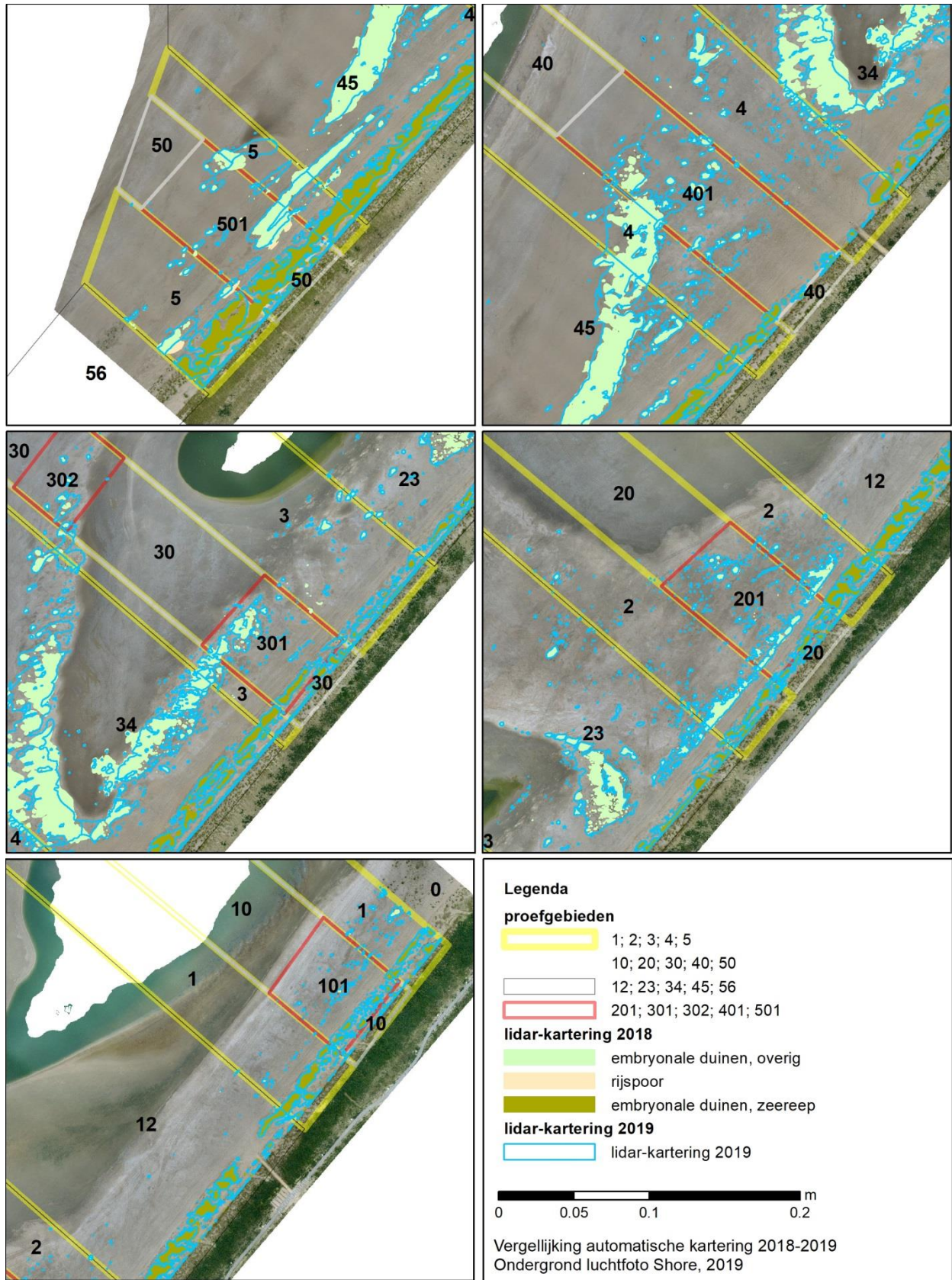


Figuur 12. Gemiddeld hoogteverschil per duinvlak tussen 2019 (Shore)-2020(Shore).

Embryonale duinen Zandmotor

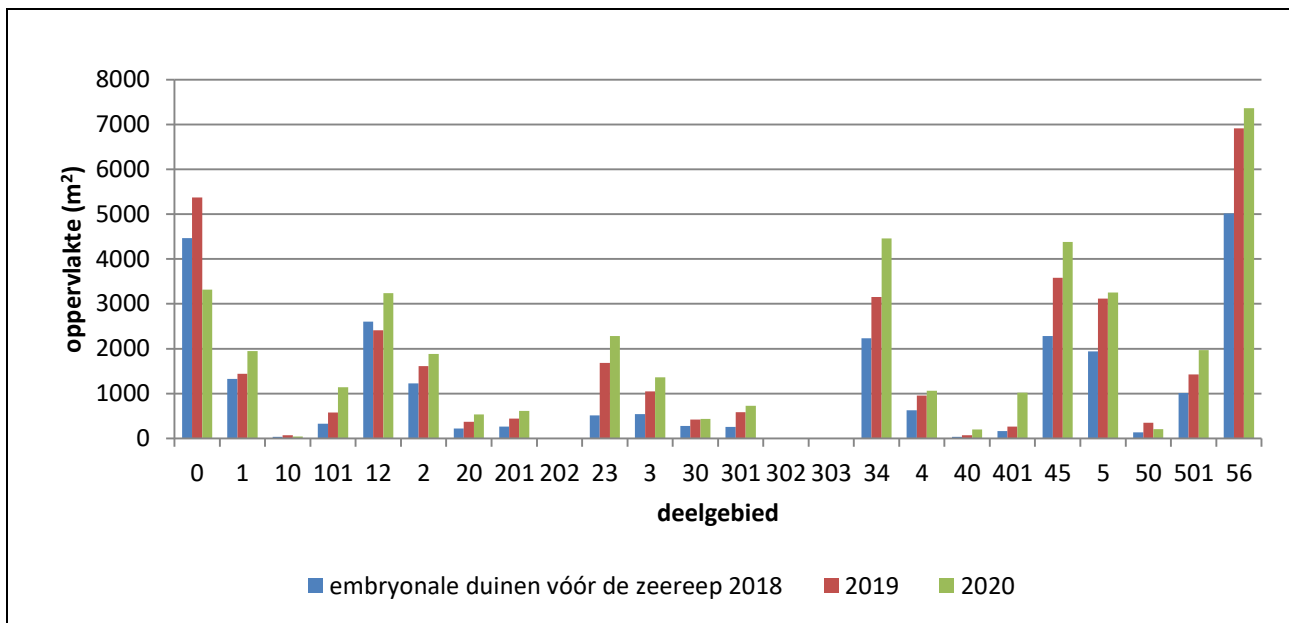


Figuur 13. Gemiddeld hoogteverschil per duinvlak tussen 2019 (RWS)-2020(Shore). (Verschil omdat DTM 2019 van Shore vegetatie meeneemt, in 2020 niet, waardoor er veel kleine vlakken zijn met een hoogteverlaging. Maakt voor het geheel ook nogal wat uit.)

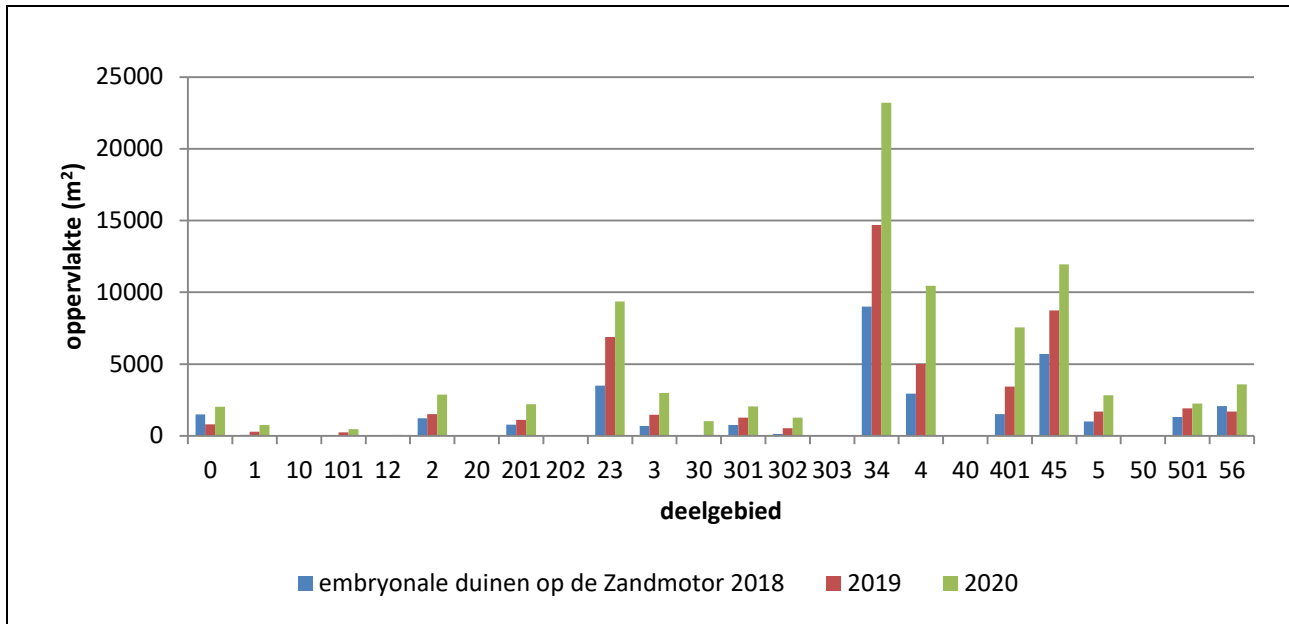


Figuur 14. Vergelijking van resultaten semi-automatische kartering voor 2018 en 2019.

In Figuur 14 is de semi-automatische classificatie van 2019 over die van 2018 gelegd. Over het algemeen is het oppervlak aan embryonale duinen, volgens verwachting, fors uitgebreid. In Figuur 15 en Figuur 16 is de ontwikkeling van de oppervlaktes van 2018-2019 per deelgebied uitgezet. Er is een onderscheid gemaakt tussen embryonale duinen tegen de zeereep aan en op de rest van de Zandmotor. Beide oppervlaktes zijn toegenomen. Het oppervlakte aan duintjes tegen de zeereep is toegenomen van 2.2 ha in 2018 naar 2.4 ha in 2019. Het oppervlakte aan duintjes op de rest van de Zandmotor is toegenomen van 3.4ha naar 5.1 ha. Totaal bedraagt de toename dus bijna 2 ha naar 7.5ha in 2019. De kustlangse lengte van het onderzochte gebied is 2250m. Gemiddeld betekent dit dat er per strekkende meter kust dwars op de kust een zone van 33m met embryonale duinen ligt.

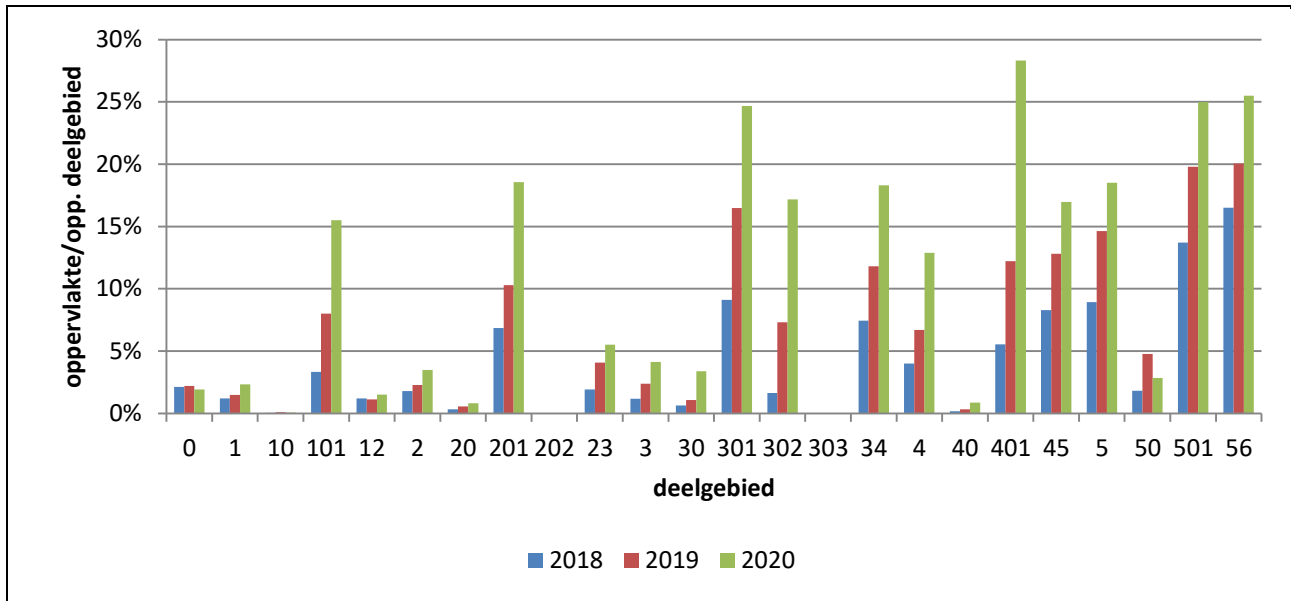


Figuur 15. Vergelijking van oppervlaktes van embryonale duinen tegen de zeereep voor 2018 en 2019.



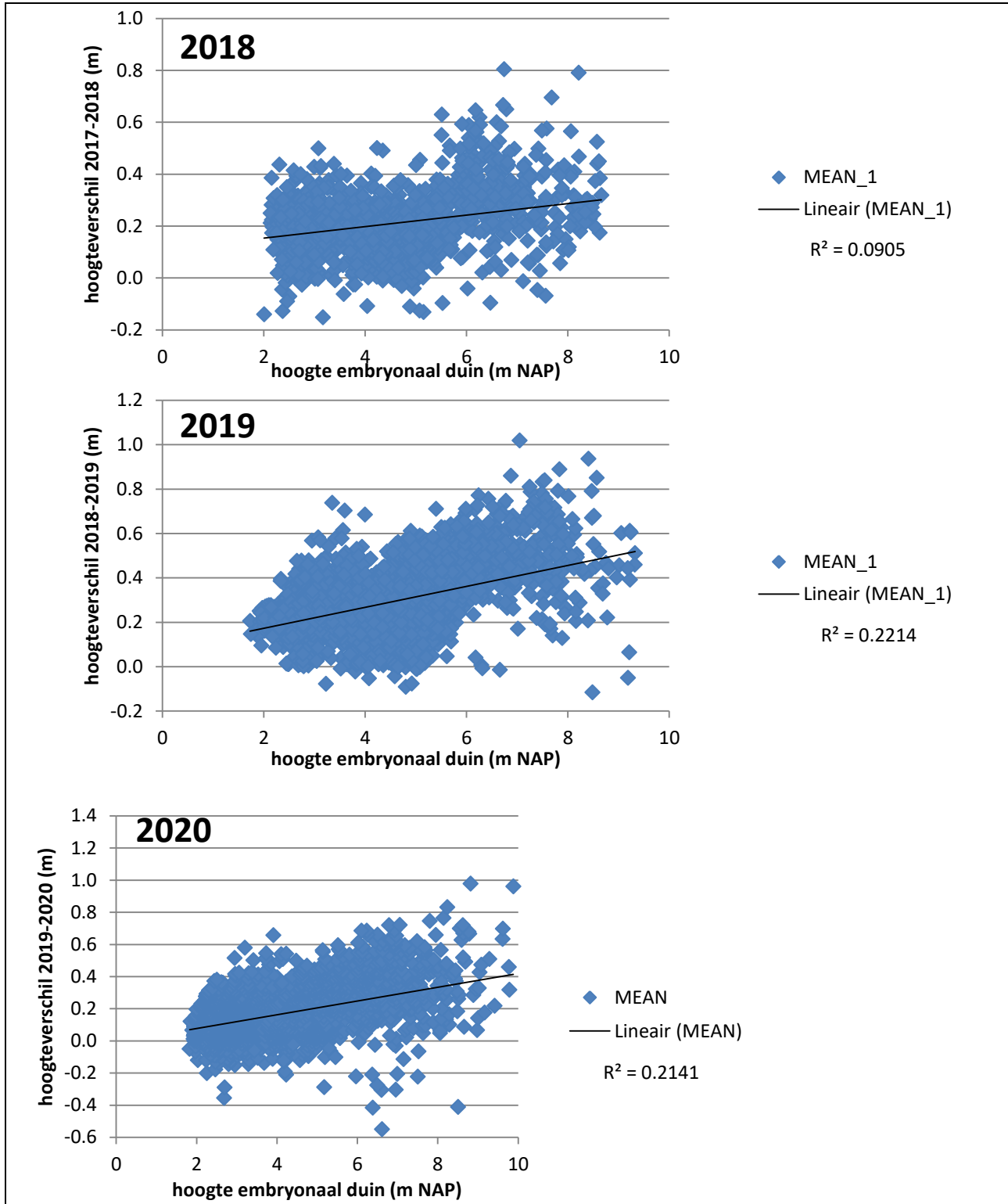
Figuur 16. Vergelijking van oppervlaktes van embryonale duinen op de Zandmotor voor 2018 en 2019.

Figuur 15 en Figuur 16 geven een goed beeld van de ruimtelijke verspreiding over de Zandmotor. Langs de zeereep zijn de verschillen minder groot dan op de Zandmotor zelf, hoewel ook hier een trend is te zien van toenemende oppervlaktes van noord (deelgebied 1) naar zuid (deelgebied 5). Op de Zandmotor zelf liggen de meeste duintjes tussen deelgebied 3 en 5. Het grote cluster bij deelgebied 3 en 34 (de strook tussen deelgebied 3 en 4) bestaat uit duintjes die in een rand rondom het strandmeer zijn ontwikkeld, op de helling die afloopt naar het strandmeer, in de luwte van een hogere strandrug die aan de zeewaartse zijde ligt. Deze rug heeft een hoogte van circa 5m NAP. Op de Zandmotor zelf is het oppervlak aan embryonale duinen tussen 2018 en 2019 overal toegenomen. Ook in deelgebied 101 begint de ontwikkeling nu op gang te komen. Opvallend is dat op de hoogste delen van de Zandmotor geen of vrijwel geen duintjes zijn ontstaan.



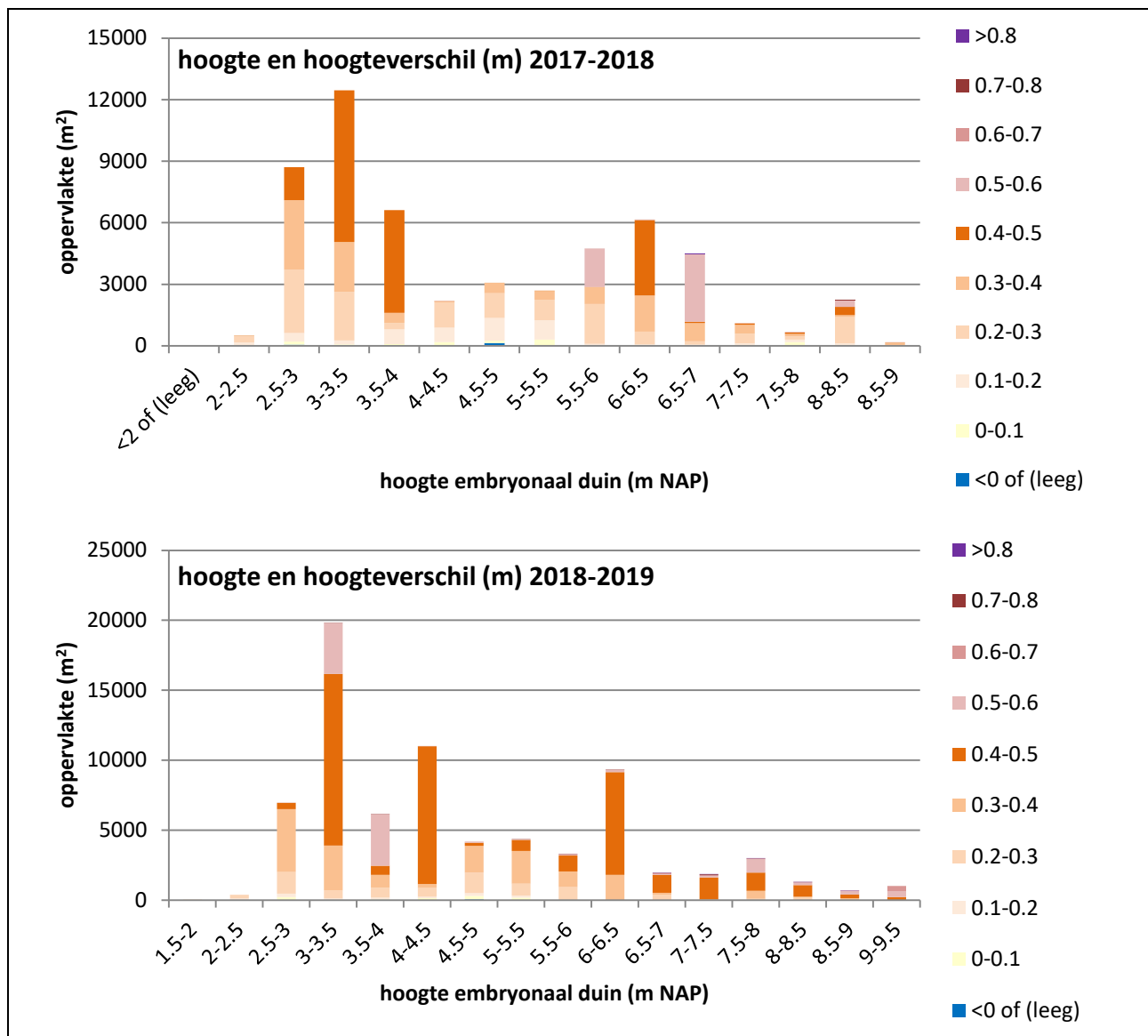
Figuur 17. Vergelijking van oppervlaktes van embryonale duinen op de Zandmotor voor 2018 en 2019. Uitgedrukt in percentage, als oppervlak ed gedeeld door oppervlakte deelgebied

Bepaling hoogte van de duintjes voor 2018 en 2019 en verandering

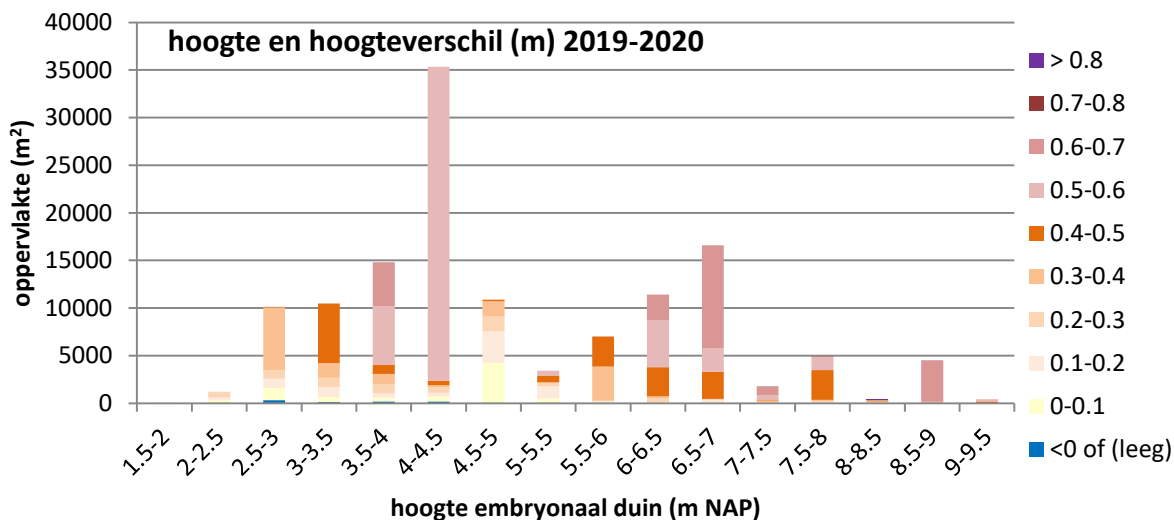


Figuur 18. Correlatie tussen hoogte van de embryonale duinen (in m NAP) en hoogteverschil tussen respectievelijk 2017-2018 (boven) en 2018-2019 (onder). Het hoogteverschil is steeds bepaald tussen de RWS opname van de Zandmotor en de Shore opname van het jaar daarna.

Figuur 18 illustreert de correlatie tussen de hoogte van de duintjes en de mate van aangroei. Er lijkt sprake van een vage relatie, van grotere hoogteverschillen bij hogere duintjes. Figuur 19 laat de hoogteverschillen zien per hoogteklaas. Duintjes van 3-3.5m NAP domineren. Er is een tweede piek bij duintjes van 6-6.5m. Dit zijn de duintjes die tegen de zeereep ontwikkelen. De laagst gelegen duintjes hebben in 2018 een hoogte van 2.01m NAP, in 2019 reikt de top van het laagst gelegen duintje op 1.73m NAP. Dat is erg laag in het profiel.



Figuur 19. Oppervlakte een waargenomen hoogteverschil (boven 2017-2018, onder 2018-2019) per hoogteklaas. Het hoogteverschil is steeds bepaald tussen de RWS opname van de Zandmotor en de Shore opname van het jaar daarna.



Uit Figuur 19 blijkt verder dat het overgrote deel van de duintjes een (gemiddelde) hoogteverandering van 0.4-0.5m heeft ondergaan, zowel tussen 2017-2018 als tussen 2018-2019. Veranderingen van 0.3-0.4 en 0.5-0.6 komen ook veel voor, maar kleinere en grotere veranderingen maar weinig. Overigens komen binnen vlakken wel grotere hoogteverschillen voor. In de embryonale duinen tegen de zeereep zijn van 2017-2018 plaatselijk hoogteverschillen van meer dan 1 tot 1.6m berekend, voor 2018-2019 zelfs van 2-2.3m.

Bepaling volume van de duintjes voor 2018 en 2019 en verandering

Met het gemiddelde hoogteverschil per duintje en de oppervlakte van het polygon is simpel de volumeverandering te bepalen. Uit de berekening volgt dat tussen 2017 en 2018 het volume in de duintjes is toegenomen met 19110 m³, tussen 2018 en 2019 met 31425 m³. Per meter kust berekend, betekent dit met een kustlangse lengte van 2250m een volumeverandering van respectievelijk 8.5 en 14.0 m³/m.jaar.

Conclusies

Er is een procedure uitgedokterd om met behulp van luchtfoto's en laseraltimetrie van voldoende resolutie (luchtfoto's orde 5x5cm², laseraltimetrie -0.25x0.25m²) een automatische classificatie van embryonale duinen op de Zandmotor te maken. Omdat er uiteindelijk een handmatige correctie nodig is om onjuist geclassificeerde polygonen te verwijderen, wordt verder gesproken van een semi-automatische classificatie.

De resultaten van deze methode zijn bevredigend. Voor 2018 is tevens een veldopname beschikbaar waarmee de resultaten van de semi-automatische classificatie konden worden vergeleken. De resultaten komen redelijk overeen. De in het veld onderscheiden plantvlakken zijn vaak niet in de semi-automatische classificatie terug te vinden, de duinvlakken meestal wel. De oppervlaktes van de duinvlakken die volgen uit de semi-automatische classificatie zijn vaak iets kleiner dan die uit de veldkartering. Gemiddeld bedraagt het oppervlak van de semi-automatische classificatie 88% van die van de veldkartering.

Gezien deze resultaten kan de semi-automatische classificatie niet gebruikt worden als voortzetting van de meetreeks van de veldopnames. Wel kan deze gebruikt worden voor een schatting van de ontwikkeling van het oppervlak aan embryonale duinen op de Zandmotor vanaf 2013. Niet voor het meer gedetailleerde inzicht in de ontwikkeling van duinvlakken vanuit plantvlakken of individuele planten en niet voor het inzicht in de begroeiing van de embryonale duinen (voor wat betreft dichtheid en plantensoorten).

Vergelijking van 2018 en 2019 laat zien dat de resultaten voldoende zijn om inzicht te geven in de ontwikkeling van embryonale duinen op de Zandmotor, in de zin van oppervlakte, aantallen, hoogte, ruimtelijke verspreiding etc. Ook is het goed mogelijk hiermee een berekening van de volumeveranderingen in de duintjes te maken.

Op grond van de vergelijking van de semi-automatische classificatie voor 2018 en 2019 is berekend dat het oppervlak aan embryonale duinen is toegenomen van 5.5 tot 7.5 ha. 2.4ha hiervan ligt tegen de zeereep aan, de overige 5.1ha is ligt op de Zandmotor zelf. Beide types zijn van elkaar gescheiden door een rijspoor. Op de Zandmotor zelf liggen de embryonale duintjes niet op de hoogste delen. De laagste reikt in 2019 tot 1.73m NAP. Het gros ligt tussen 3-3.5m NAP. Het grootste deel van de duintjes heeft zowel tussen 2017-2018 als tussen 2018-2019 een verhoging van 0.4-0.5m ondergaan. Tegen de zeereep aan is de verhoging plaatselijk veel groter, in 2018 tot maximaal 1.6, in 2019 tot maximaal 2.3m. Tussen 2017 en 2018 is het volume in de duintjes toegenomen met 19110 m³, tussen 2018 en 2019 met 31425 m³. Per meter kust berekend, betekent dit met een kustlangse lengte van 2250m een volumeverandering van respectievelijk 8.5 en 14.0 m³/m.jaar.

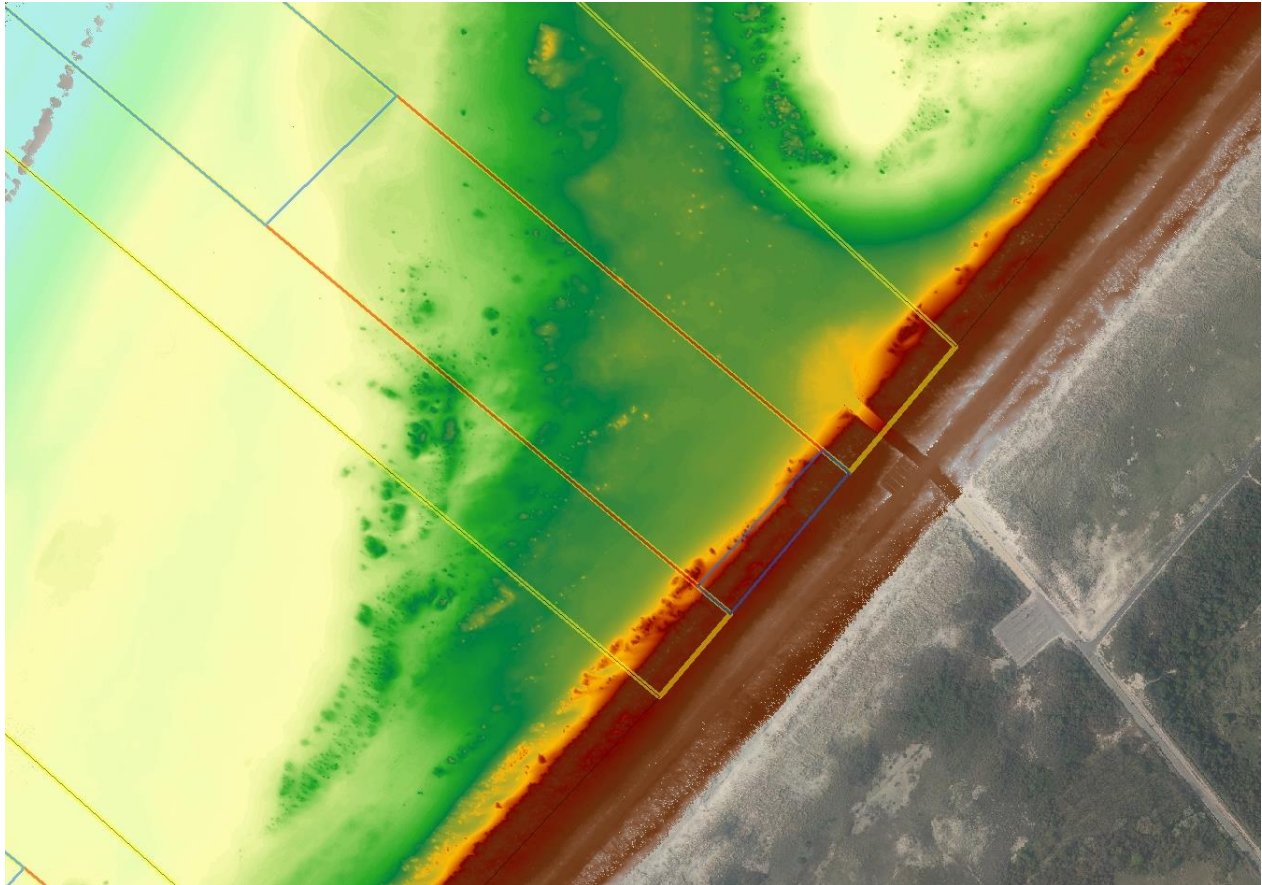
Literatuur

Lussem, U., A. Bolten, M.L. Gnyp, J. Jasper & G. Bareth, 2018. Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XLII-3. ISPRS TC III Mid-term Symposium "Development, Technologies and Application in Remote Sensing", 7-10 May, Beijing, China.

Bijlage

Afleidingskaart met embryonale duinen oktober 2018

- Verschil bepalen t.o.v. opname laseraltimetrie van RWS van jaar eerder.
- Voor 2018 vergelijk de shore-opname van oktober 2018 (DSM_ZM_LiDAR_0.25m_20181009.tif) met de RWS opname van najaar 2017 (zm_2017b).



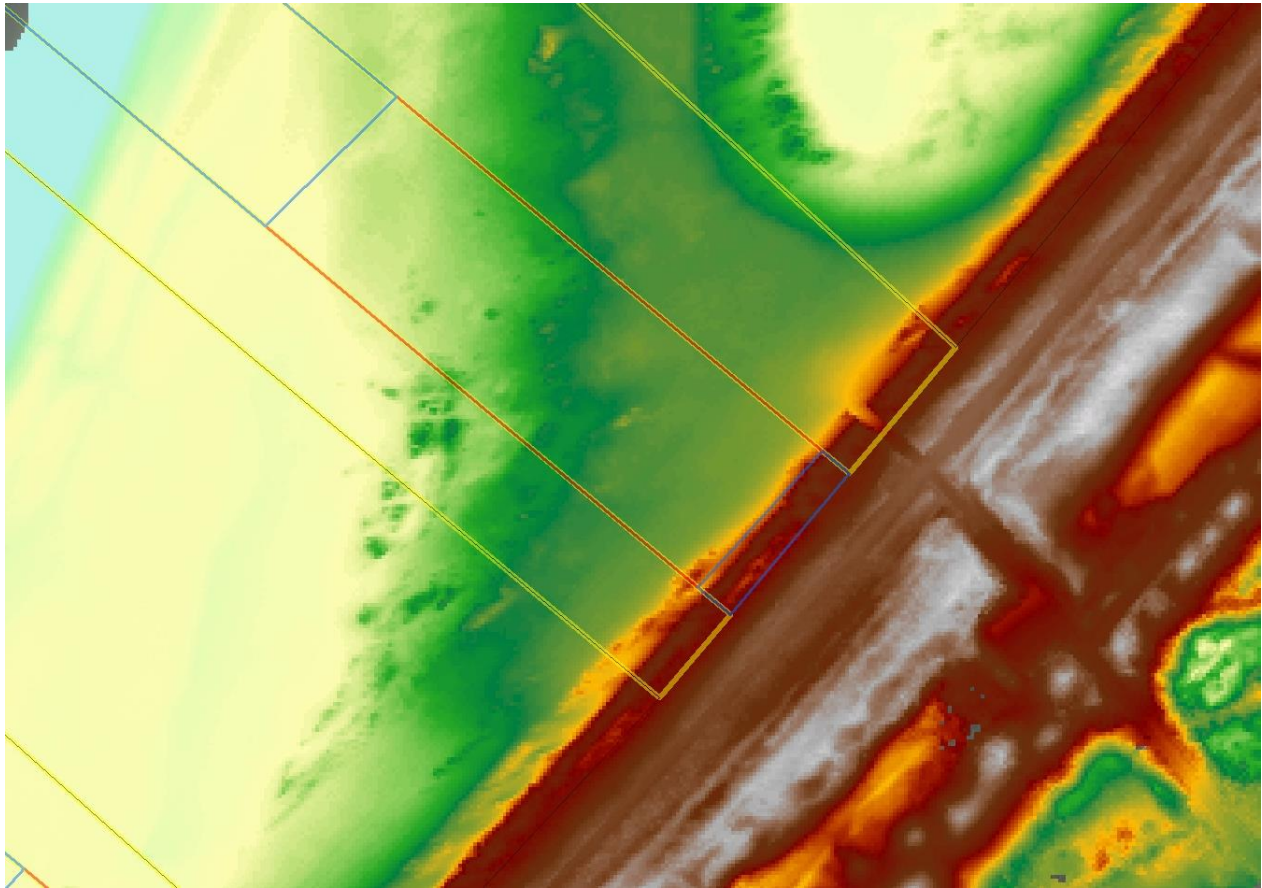
2018: DSM_ZM_LiDAR_0.25m_20181009.tif

2019: SHORE_DSM_025X025M_RDNAP_DLTRS_ZMLiDAR.tif

2020: SHORE_Zandmotor-LiDAR-DSM_RDNAP025m.tif

Afgeleid: SHORE_zm_2020_LiDAR-DSM_RDNAP025m_i.tif interpolatie om lege cellen op te vullen

2018 en 2019 blijkaar niet geïnterpoleerd



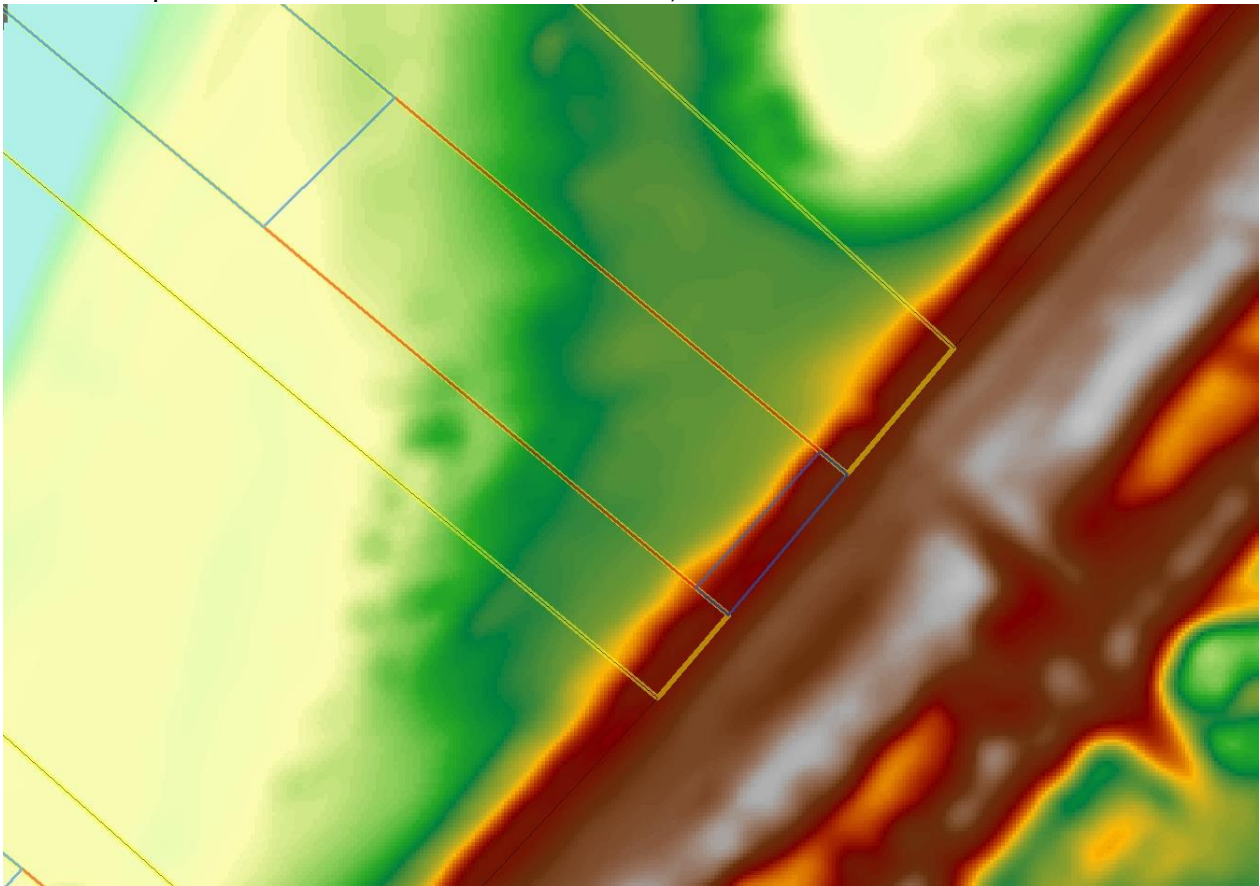
Voor afleiden embryonale duinen 2018: zm_2017b

Voor afleiden embryonale duinen 2019: zm_2018b_int_m

Voor afleiden embryonale duinen 2020: zm_2019b_ix

1. Interpoleer zm_2017b om eventuele gaten in de data op te vullen -> zm_2017b_int
2. Zet de data om naar m als ze in cm zijn -> zm_2017b_int_m

3. Smooth zm_2017b met de pixels van $2 \times 2 \text{m}^2$ met Focal Statistics, circle, 5, mean -> zm_2017b_FS_c5mean (dit gebeurt met het $2 \times 2 \text{m}^2$ grid, dus met een radius van 5 worden hier steeds voor iedere pixel gemiddelde hoogtes berekend voor een cirkel om het pixel heen met een doorsnede van 20m)



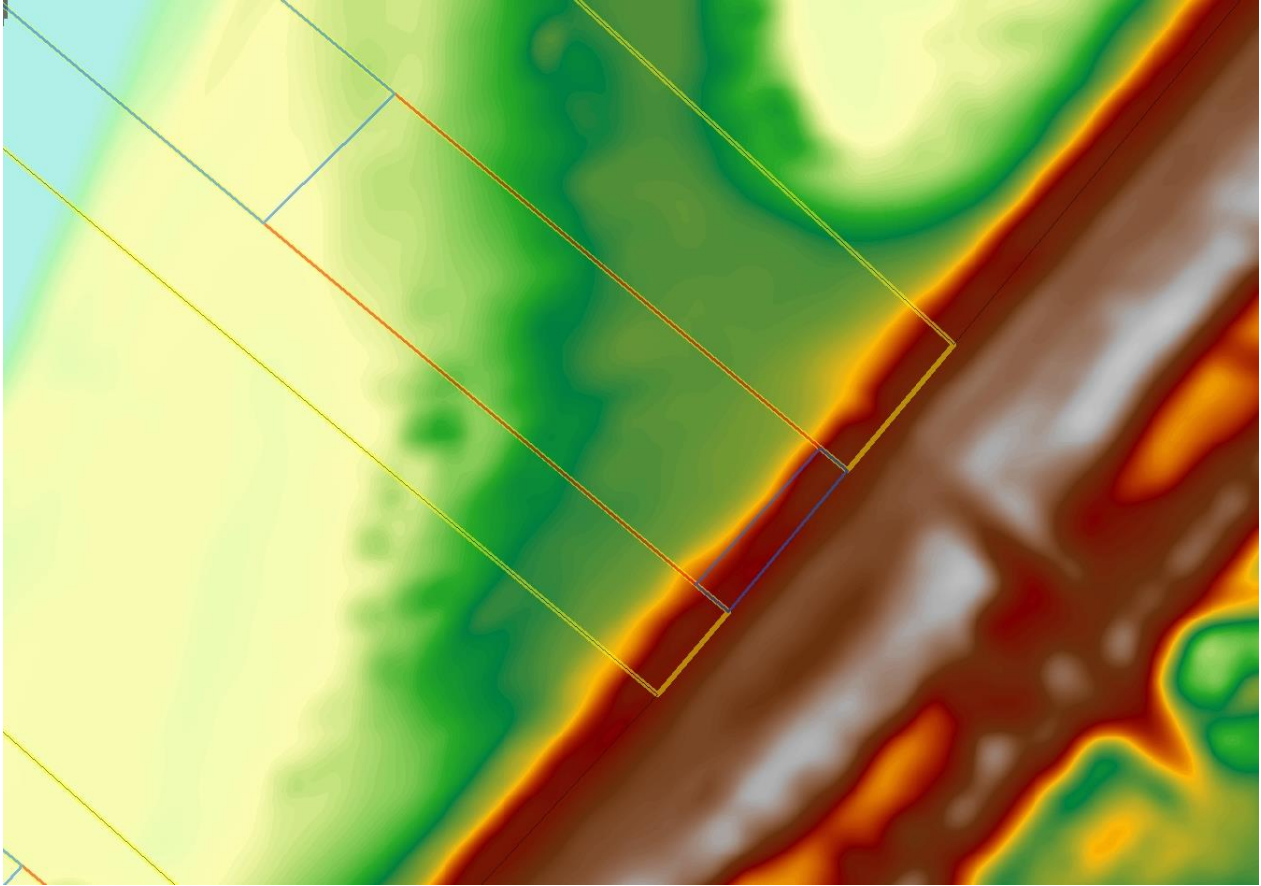
zm_2017b_FS_c5mean

zm_2018b_FS_c5mean

zm_2019b_FS_c5mean

4. Resample deze naar een gridgrootte van $0.25 \times 0.25 \text{m}^2$ om een goede verschilkaart te kunnen maken (in ArcGis moeten voor het juist berekenen van verschilkaarten de gridcellen exact even groot zijn en op dezelfde plaats liggen) met Resample met optie Cubic-> `zm_2017b_FS_c5mean_RS`

5.

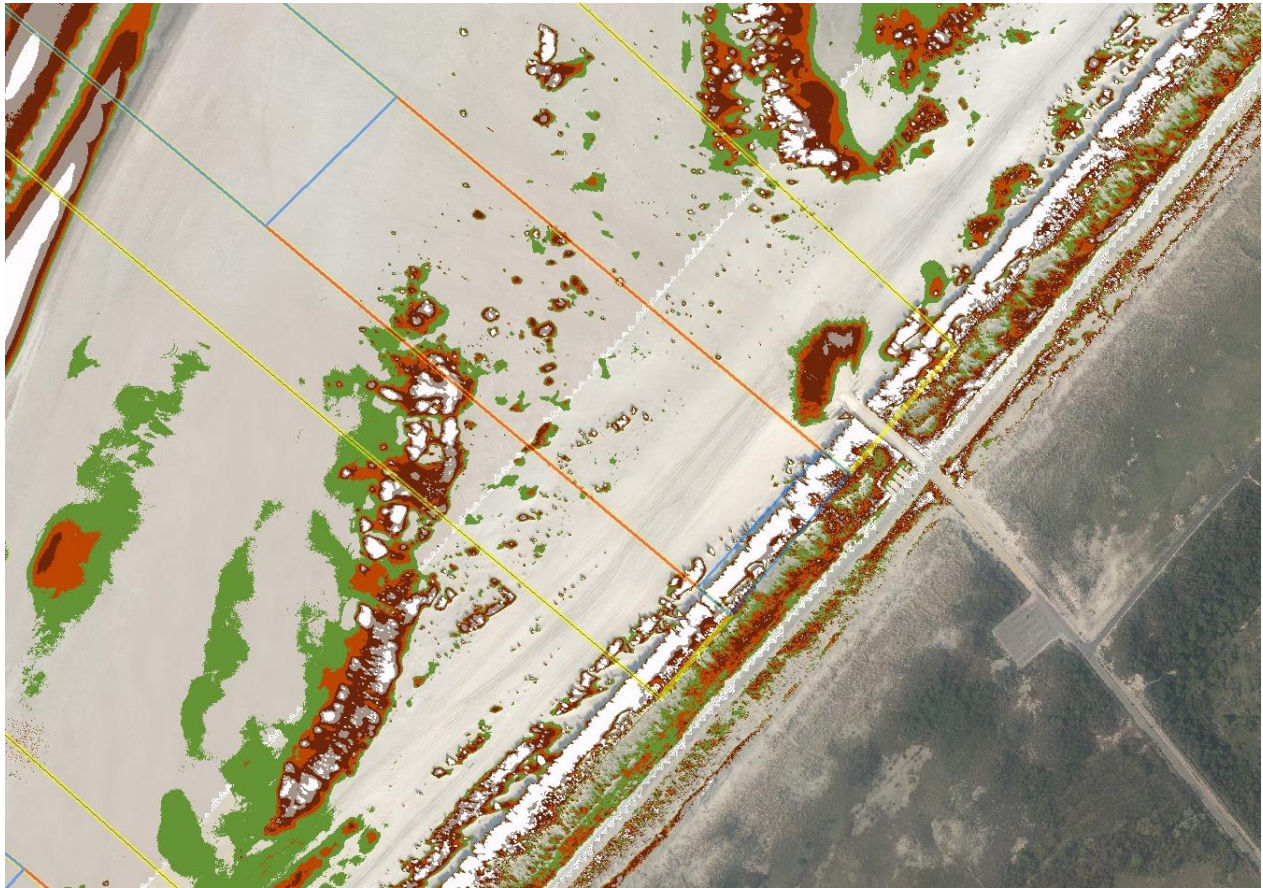


`zm_2017b_FS_c5mean_RS`

`zm_2018b_FS_c5mean_RS`

`zm_2019b_FS_c5mean_RS`

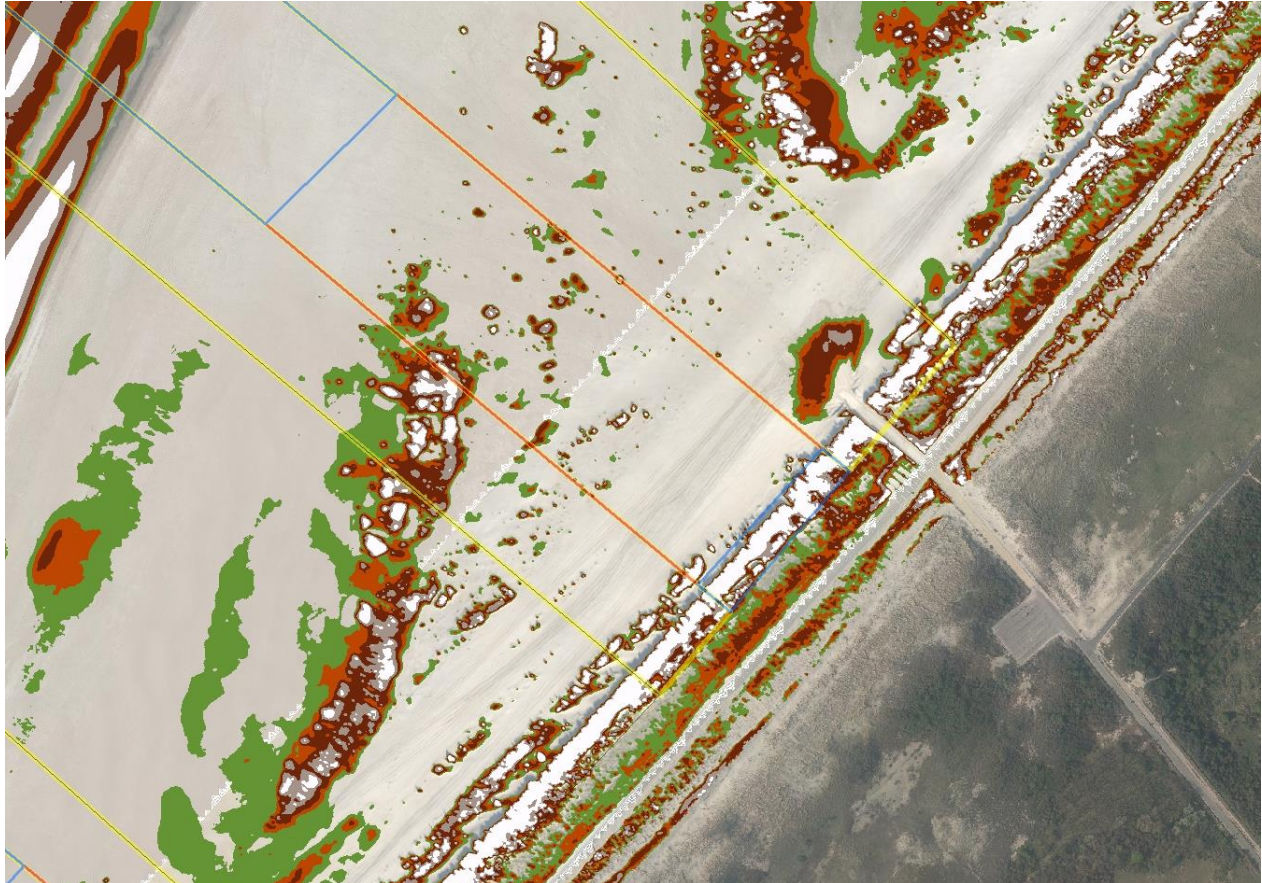
6. Bereken het verschil tussen het DSM van 2018 en de gesmoothde en geresamplede kaart van 2017b -> min_18_smooth17b



min_18_smooth17b

min_19_smooth18b
min_20DSM_smooth19b

7. Haal hier de onregelmatigheden uit met Focal Statistics, circle, 3, mean (nu voor een gridgrootte van 0.25x0.25, dus met een radius van 3 heeft de cirkel waarover hier gemiddeld wordt een doorsnede van 1.5m). Hiermee worden de contourlijnen in feite opgepoetst, en worden onregelmatigheden beperkt. -> FS_min_18_smooth17b



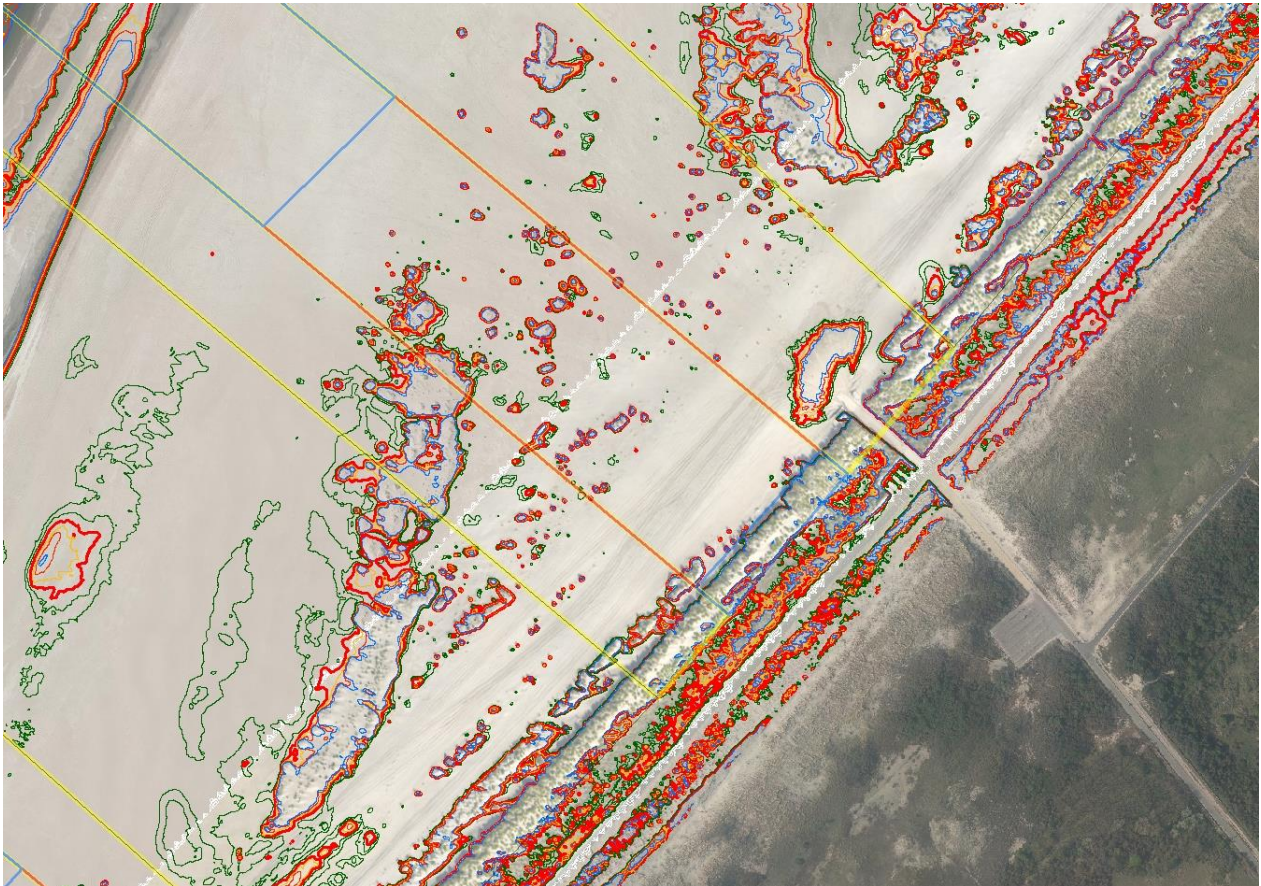
FS_min_18_smooth17b

FS_min_19_smooth18b

FS_min_20DSM_smooth19b

NB DSM staat hier alleen bij omdat in eerste instantie alleen het Dtm beschikbaar was en hier vast een exercitie mee was uitgevoerd. DSM is voor de andere karteringen 2018, 2019 ook gebruikt.

8. Maak contourlijnen voor deze verschilkaart. De contourlijn van 0.2m geeft het best de omgrenzing van de embryonale duinen weer. -> ED_2018_contours

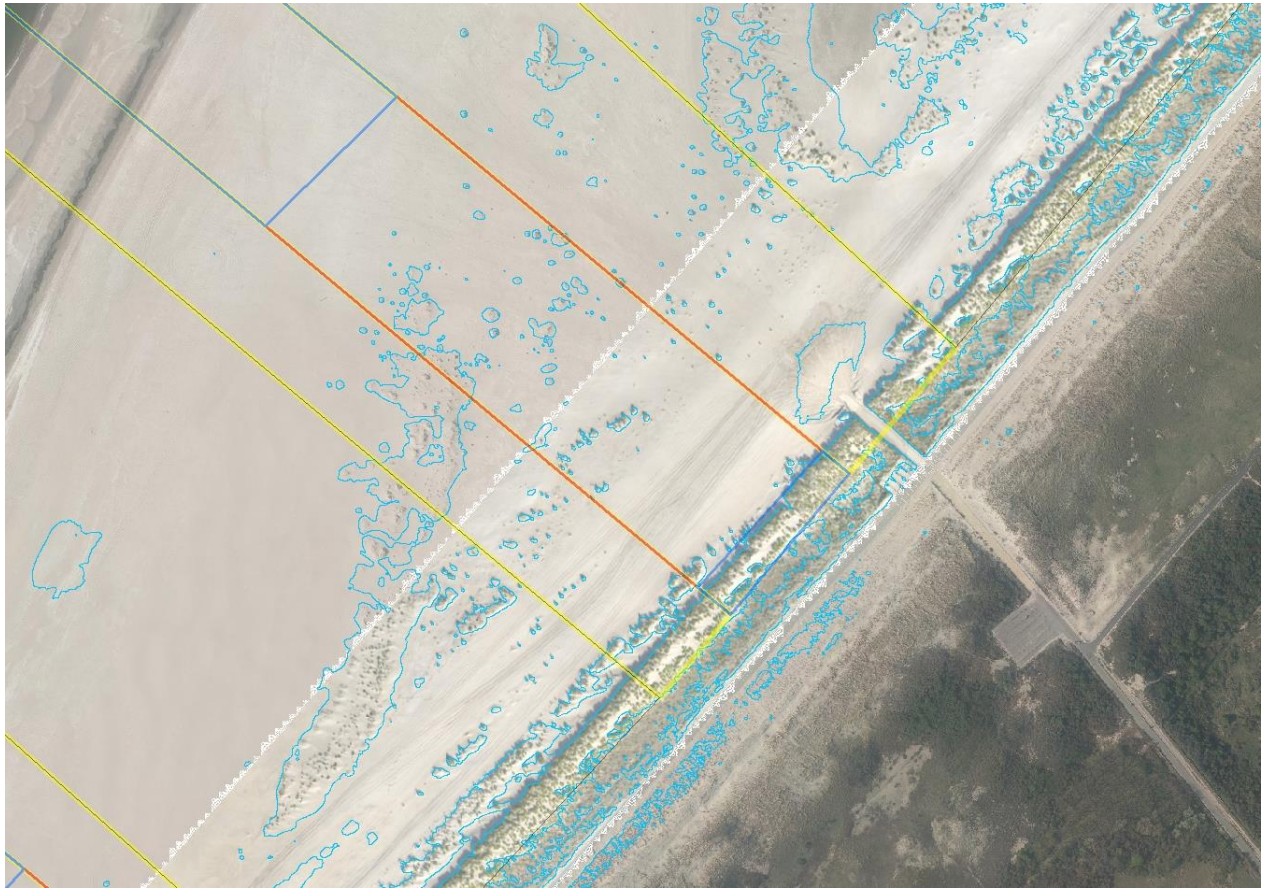


ED_2018_contours

ED_2019_contours

ED_2020_contours_DSM

9. Vorm de contourlijn van 0.2m (polyline) om naar een polygoon kaart. Dit is de basis voor de kaart met embryonale duinen. -> ED_2018



ED_2018

ED_2019

ED_2020

10. Alle vlakken waar echt geen enkele vegetatie op is te zien worden weggehaald. Staat er maar iets aan vegetatie in dan worden de vlakken gehandhaafd, en geclassificeerd als embryonaal duin. Er is een uitzondering voor vlakken met vegetatie die ook voor een groot deel kaal zijn door overduidelijke rijsporen. Daar is het deel met rijsporen afgehaald en als aparte klasse gekarteerd. -> ED_2018_bew



ED_2018_bew

ED_2019, bestand bewerkt is er niet, bewerkt dus in de oorspronkelijk shape ED_2019
ED_2020, bestand bewerkt is er niet, bewerkt dus in de oorspronkelijk shape ED_2020, de oorspronkelijke vlakken zijn terug te halen van de contourenkaart
De kaart van 2020 is wat meer bewerkt dan de bedoeling was, blijktbaar is de methode toch niet optimaal voor generieke toepassing. Er zijn grote vlakken die ten onrechte E zijn benoemd, maar er zijn ook verschillende grote vlakken die ten onrechte geen E zijn benoemd. Deze vlakken zijn aangegeven als geenE en weE. GeenE is later vervangen in Sd. De E's zijn opgesplitst in Ezr (tegen de zeereep aan) en Egr (niet tegen de zeereep aan, grote vlakken).

11. Eindresultaat is kaart met polygonen van embryonale duinen. Er is een onderscheid gemaakt tussen embryonale duinen die tegen de zeereep zijn gevormd, en embryonale duinen die op het strand, dus los van oudere duinen zijn ontwikkeld. Met een mask wordt er voor gezorgd dat iedere keer exact het zelfde gebied wordt gekarteerd. -> ED_2018_mask



ED_2018_mask

ED_2019_mask

2020 geen mask, dit gaat waarschijnlijk vooral over de landwaartse begrenzing. Dit is uiteindelijk alleen van belang voor de pure kartering van embryonale duinen. Voor de kartering geomorfologie wordt de landwaartse grens aangepast aan de kartering van strand/helmduinen, waarover de embryonale duinen worden gelegd.

Stap 6 wordt gedaan voor de grotere eenheden. Voor de vele kleine duintjes die dan gemist worden kan een extra stap worden toegevoegd. Stap 5 wordt dan wel uitgevoerd en stap 7 wordt aan de hand van deze (dus niet licht gesmoothde) kaart (resultaat van stap 5) gemaakt voor de hoogtelijn van 0.15m. Hierop een selectie toepassen door alleen die polylines te selecteren waarvan de lengte groter is dan 0.3 en kleiner dan 10m. Dit wordt de verzameling kleine, individuele embryonale duintjes, ED_2018_contours_c / ED_2019_contours_c /

ED_2020_contours_c_DSM. Hierbinnen wordt een selectie gemaakt van alle polylines waarvan de lengte (Shape_length) groter is dan 0.3 en kleiner dan 10m en die bovendien binnen het meetgebied liggen, clippen met Mask). Al deze lijnen worden gemerged tot één lijn, t.b.v. de conversie naar polygonen. ED_2018_contours_klein. Zet dan met de procedure polyline to polygon dit bestand om naar een polygonenbestand: ed_2018_klein_Clip / / ed_2018_klein_polygons / ed_2019_klein_polygons / ED_2020_klein_polygons. Clip dit naar het onderzoeksgebied met Mask ed_2018_klein_polygons_Clip / ed_2019_klein_polygons_Clip / in 2020 niet gedaan. Gooi hier alle polygons uit met een area < 0.05m²(dit is een oppervlak van circa 0.2x0.25m) ed_2018_klein_polygons_Clip2 / ed_2019_klein_polygons_Clip2 / ED_2020_klein_polygons_clip1. Pas hierop de selectie toe op basis van de waarde van de groene band.

2018: Alle vlakken met een Min>179 (voor lufo RWS 2018) worden weg gegooid. Hier wordt vervolgens nog één handmatige correctie voor uitgevoerd, voor alle vlakjes rondom het strandmeer en het natte strand. Dit zijn clusters van vlakjes zonder vegetatie en simpel te selecteren. De meeste vlakjes met een range van 15 (in het geval van de luchtfoto van 2018) of kleiner blijken ook kaal zand/strand te zijn en zijn ook verwijderd.

ed_2018_klein_polygons_Clip3 /

2019: ed_2019_klein_polygons_Clip3, wat was de kleur selectie hier?

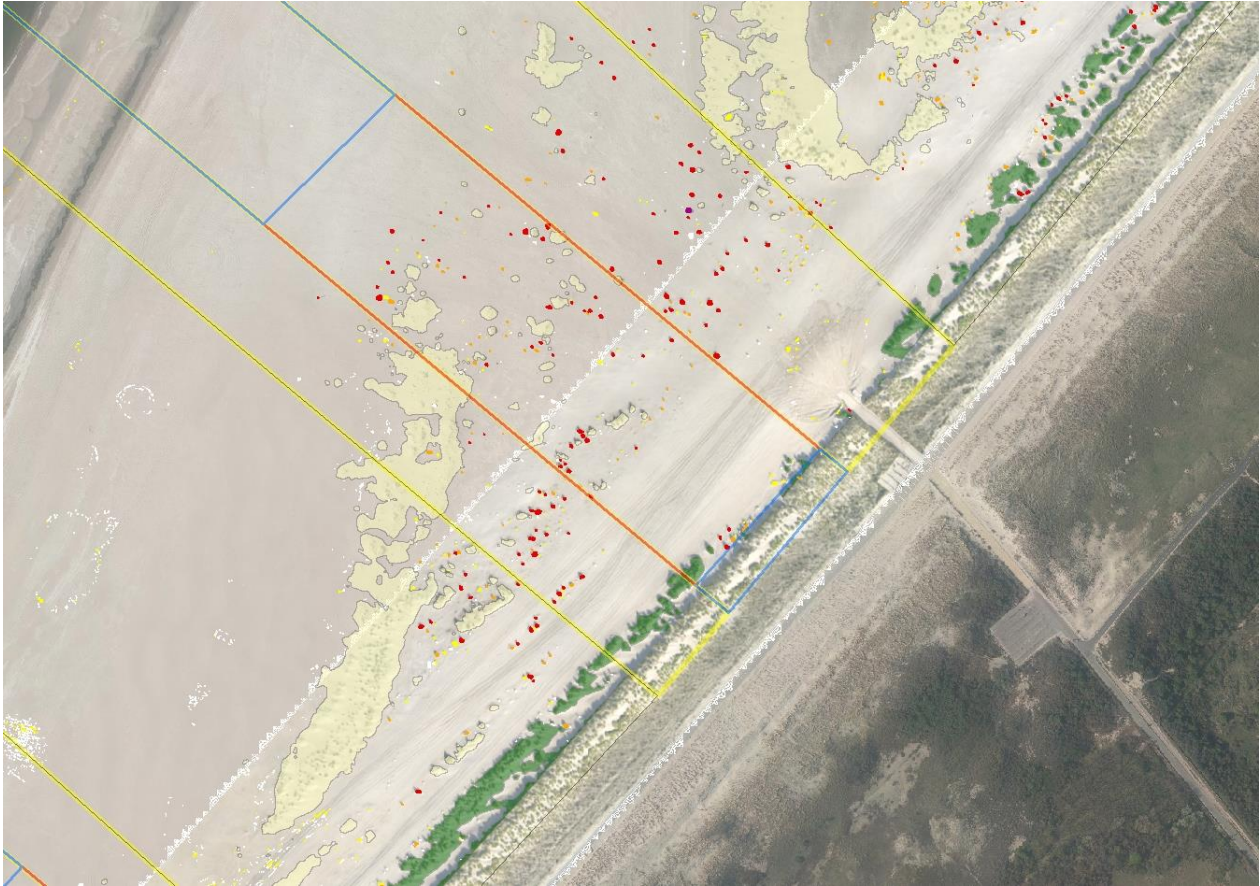
2020: kleurselectie groene band van ortho 2020 SHORE-Zandmotor-LiDAR-Ortho-RD002m.tif, zonal table gemaakt met ED_2020_klein_polygons_clip1 en de groene band van de luchtfoto. Daarna alle vlakjes met een min >108 weggegooid. Hiervan is verreweg het grootste deel geen embryonaal duin. Geen verder selectie criterium.

Daarna is er handmatig nog veel verwijderd.

ZM_geomorfolgie_2020_union_ed is de union van de uiteindelijke embryonale duinkaart en de kartering geomorfologie

ZM_geomorfolgie_2020_union_dis is de dissolved versie, dus het uiteindelijke product voor de kartering geomorfologie 2020

Er zit hier nog een overlap



ed_2018_klein_Clip

Aan de hand van de 0.15m verschillijn worden veel kleine vlakjes omgrensd, waarvan een groot deel ook werkelijk embryonaal duin is, maar niet alles. Hier kan weer met behulp van de kleur een selectie van worden gemaakt.

Deze kan vervolgens als mask worden gebruikt. Met Spatial Analyst>Extraction>Extract by mask, de luchtfoto van RWS 2018 (omdat de lufo van Shore alleen maar een strook geeft, die van RWS de gehele Zandmotor) en de polygonen op basis van de 0.15m verschillijn wordt een extract gemaakt van alle stukjes luchtfoto die door een 0.15m verschillijn worden omgrensd. Deze stap is niet noodzakelijk, maar het geeft wel een goed inzicht in de kleurverschillen binnen embryonale duinen. Ik heb dit nu gedaan voor de groene band (band 2), maar weet niet of dit de beste band is. Mogelijk is er met een combinatie van groen en rood een berekening te maken, waaruit een duidelijk verschil komt tussen schaduw en vegetatie.

Je hoeft dit raster met uitsnedes niet te maken, want je kunt met Zonal Statistics as Table voor alle polygonen per polygoon het gemiddelde berekenen van de waarde binnen een op te geven raster, in dit geval de luchtfoto van 2018 en de groene band. De tabel kan je joinen met de polygonenkaart, waardoor je per polygoon de gemiddelde waarde krijgt van alle groene rastercellen binnen het polygoon (en min en max, in feite alle statistieken, als je de optie ALL gebruikt). De minimum waarde kan je vervolgens weer gebruiken als selectiecriteria. Cellen

met een hoge waarde horen oha bij kaal zand, cellen met een lage waarde bij begroeid. Bij kaal zand is de spreiding (range, dus verschil tussen min en max) over het algemeen laag. Hier is geen vast criterium voor te geven, omdat de kleurstelling per jaar anders is. Dus per jaar moet je een criterium bepalen. Het zal niet helemaal waterdicht zijn, omdat bijvoorbeeld ook schaduwplekjes als vegetatie aangemerkt zouden kunnen worden. Het zou waarschijnlijk beter werken als ook een NIR band aanwezig zou zijn en de NDVI berekend zou kunnen worden. Een andere optie is op basis van literatuur benaderingen voor een vegetatieindex af te leiden (zie tabel met indices).

Met de toegepaste procedure worden nu twee bestanden gegenereerd. De eerste geeft de grote vlakken, de tweede de losse, kleine embryonale duinen. Deze worden tenslotte samengevoegd tot één bestand. Met een intersect wordt voor de definitieve kaarten van 2018 en 2019 vervolgens een combinatie met de proefgebieden gemaakt. In de uitvoer is dan per proefgebied en per tussenliggend gebied te bepalen wat het aantal aan embryonale duinen (of vlakken) is en het totale oppervlak. Voor 2018 is dit te vergelijken met de veldopname.

Voor 2018 zou dit eigenlijk in 2 stappen moeten, omdat de shore luchtfoto alleen een strook van het strand heeft. De RWS luchtfoto heeft een iets minder nauwkeurige georeferentie, waardoor polygonen (afgeleid uit het Shore dsm) niet helemaal boven de stukjes vegetatie op de rws luchtfoto liggen. Dit komt vooral omdat luchtfoto en dtm niet van dezelfde opname zijn, waardoor bobbeltjes in het DSM niet overeenkomen met begroeiing op de luchtfoto, maar net ernaast liggen.

Nu zijn er twee bestanden met polygonen, `ED_2018_mask` met de grote vlakken en `ed_2018_klein_polygons_Clip3` met de kleine vlakjes. Met union worden deze samengevoegd tot `ed_2018_definitief / ed_2019_definitief / 2020: ED_2020_Union1`. `Union2` is een kolom met eenheid aan toegevoegd. In `Union 1` zijn twee kolommen type en Type, de eerste met het type voor de kleine embryonale duinen, de tweede voor de grote. ED aan de zeereep zijn anders genoemd dan ED op de zandmotor zelf. Alle vlakken met eenheid zijn gevuld, zodat dit de totale kaart weergeeft.

Hierin zitten nu veel vlakken die uit meerdere delen bestaan. Dit is te vereenvoudigen met dissolve, tot bestand `ed_2018_definitief_Dissolve / ed_2019_definitief_Dissolve`. Dit is het definitieve bestand met de embryonale duinen van 2018.

Met behulp van de clips van de studiegebieden kan deze kaart direct vergeleken worden met de veldopname van 2018.

Afleiden kaart met embryonale duinen oktober 2019

- Verschil bepalen t.o.v. opname laseraltimetrie van RWS van jaar eerder.
- Voor 2019 vergelijk de shore-opname van oktober 2019 met de RWS opname van najaar 2018, dus `zm_2018b`

Doorloop alle bovenstaande stappen.

VI Name	Equation	Reference
RGBVI	$\frac{(R_G * R_G) - (R_R * R_B)}{(R_G * R_G) + (R_R * R_B)}$	Bendig et al. 2015
GLI	$\frac{(2 * R_G - R_R - R_B)}{(2 * R_G + R_R + R_B)}$	Louhaichi et al. 2001
VARI	$\frac{(R_G - R_R)}{(R_G + R_R - R_B)}$	Gitelson et al. 2002
NGRDI	$\frac{(R_G - R_R)}{(R_G + R_R)}$	Tucker 1979
NDVI_{NIR, RED}	$\frac{(R_{NIR} - R_R)}{(R_{NIR} + R_R)}$	Rouse et al. 1974
NDVI_{800,750}	$\frac{(R_{800} - R_{750})}{(R_{800} + R_{750})}$	Gnyp et al. 2015
SR_{810,750}	R_{810} / R_{750}	Gnyp et al. 2015

Table 1. Applied Vegetation indices. R = reflectance (%), R_R = red, R_G = green, R_B = blue, R_{NIR} = near-infrared, R_i = reflectance in narrow band region (R₈₀₀ = 800 nm).

Ik heb aan de hand van de luchtfoto van 2018 (RWS, dus met de gehele Zandmotor) berekeningen van RGBVI, NGRDI en VARI gemaakt, maar het geeft allemaal slechtere resultaten dan de simpele selectie op basis van de groene band. Met VARI en NGRDI komen de schaduwen er extra goed uit, maar het onderscheid tussen kaal zand en begroeiing helemaal niet. Dus deze kan hoogstens gebruikt worden om uit de selectie m.b.v. alleen de groene band de schaduwpartijen eruit te halen. Maar dat wordt wel heel omslachtig.

In RGB

Kaal zand: alles krijgt hoge waarde, dus R, G en B

Schaduw: middenwaarden, maar de waarde voor R, G en B zitten heel dicht bij elkaar in de buurt

Begroeid: bijna altijd vaste volgorde, R>G>B

Maar dit varieert heel erg per foto, dus werkt ook niet.