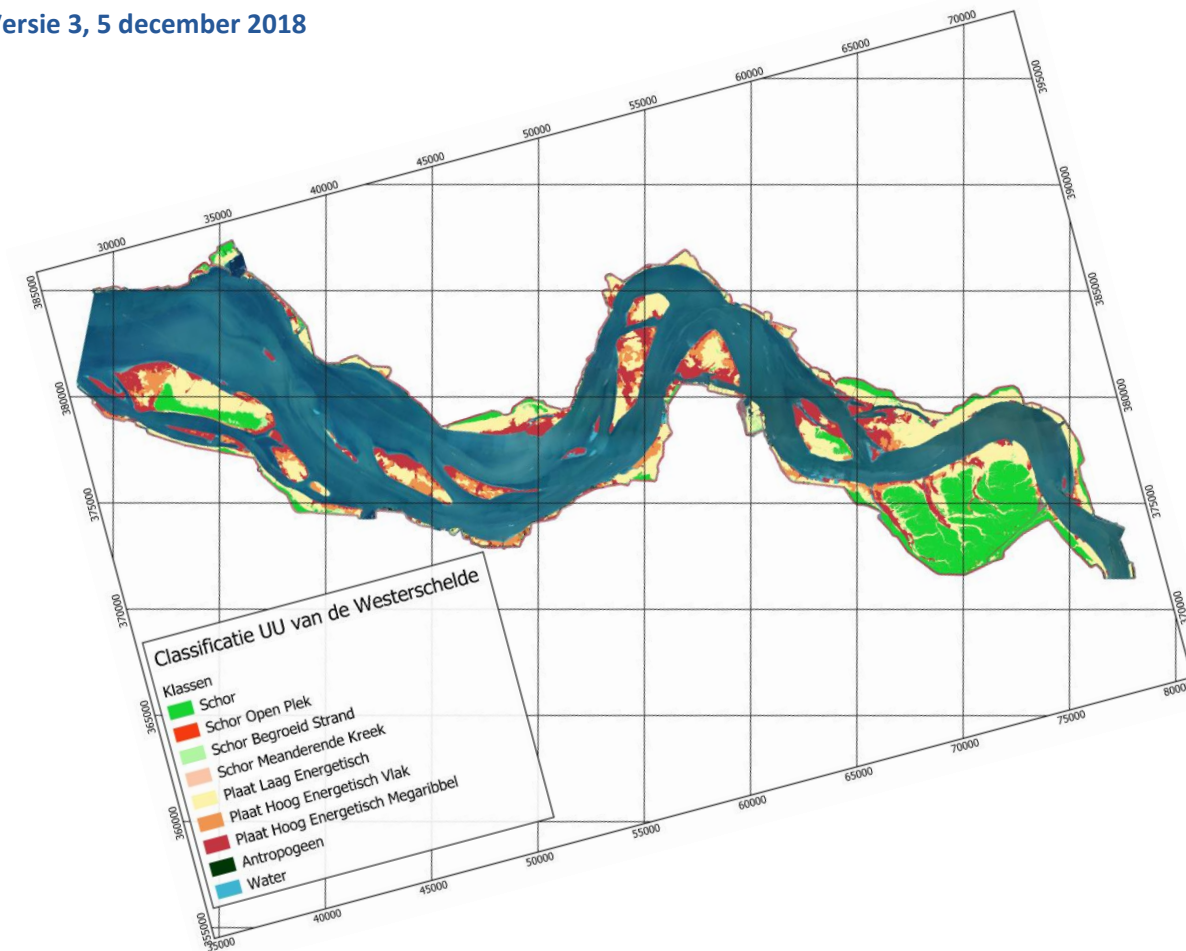


Verkenning productie Geomorfologische Kaart met behulp van Object-Based Image Analysis

Harke Douma, Elisabeth A. Addink & Maarten G. Kleinhans

Universiteit Utrecht, Faculteit Geowetenschappen, Departement Fysische Geografie

Versie 3, 5 december 2018



Het copyright van dit rapport is voorbehouden aan UU-DFG. Niets uit dit rapport mag op enigerlei wijze worden vermenigvuldigd zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van UU-DFG, noch mag het zonder voorafgaande schriftelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander doel dan waarvoor het is vervaardigd.

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Douma, H., E.A. Addink & M.G. Kleinhans (2018). Verkenning productie Geomorfologische Kaart met behulp van Object Based Image Analysis. Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie, rapport i.o. Rijkswaterstaat CIV.

Inhoud

Inhoud	2
Inleiding	3
Methode	5
Data en classificatie	5
Criteria voor vergelijking van de automatische en handmatige methode.....	6
Onzekerheid van de classificatie	6
Resultaten	8
Ontwikkelde ruleset	8
1. Water	10
2. Antropogeen.....	10
3. Schor	10
4. Plaat.....	10
Toevoeging van hoogtegegevens aan de ruleset	11
Vergelijking van de twee methoden voor beide jaren	12
Vergelijking van arealen	12
Objectgrootte van verschillende en overeenkomstige polygonen	16
Vergelijking van overeenkomstige en verschillende classificaties	16
Detail van de automatische methode en grootte van verschillend geclassificeerde arealen	18
Indicatie van bronnen van verschillen in classificatie	20
Inschatting van de meerwaarde van het gebruik van LIDAR pointclouds.....	23
Discussie: beantwoording onderzoeksvragen en aanbevelingen	25
Conclusies	28
Literatuur	29
Appendix: extra figuren	30

Inleiding

Biogeomorfologische kartering gebeurt ten behoeve van het maken van ecotopenkaarten (Kers et al. 2013). De biogeomorfologische kartering op grond van luchtfoto's gebeurt standaard en handmatig elke twee jaar in de Westerschelde en iedere zes jaar in de Oosterschelde (zie Cleveringa 2014 voor beschrijving en analyse). Deze kaarten worden bij Rijkswaterstaat geomorfologische kaarten (GMK) genoemd. Het gaat daarbij om het buitendijkse gebied binnen de landsgrenzen, en voor wat betreft de kartering met luchtfoto's om het getijdengebied (littorale gebied) met een droogvalduur van minimaal 4% van de tijd en het gehele buitendijkse supragetijdengebied. Een onderzoek door een Bachelorstudent aan de opleiding Aardwetenschappen in Utrecht (Coumou 2015, onder begeleiding van Addink en Kleinhans), liet zien dat een geautomatiseerde classificatie van de biogeomorfologie op basis van luchtfoto's mogelijk is. Dit is voor het eerst op het schaalniveau van een heel systeem uitgetest voor de Eems-Dollard (Douma et al. 2018), waarbij de precieze aanpak van Coumou niet is overgenomen, maar de methode opnieuw is opgebouwd met het oog op een generieke toepassing op meerdere gebieden. De toepassing in de Eems-Dollard werd beperkt door de kwaliteit en beschikbaarheid van luchtfoto's en aanvullende data, en een robuuste test van de geautomatiseerde methode was niet mogelijk omdat er geen kaart volgens de handmatige methode met de ZES systematiek (Zoute Ecotopen Stelsel, Bouma et al. 2005) beschikbaar was.

Het voorliggende rapport verslaat de verdere doorontwikkeling van de methode voor de Westerschelde, waar de datakwaliteit van de afgelopen jaren hoger is en waar wel handmatig geproduceerde biogeomorfologische kaarten beschikbaar zijn. Het onderzoek vond plaats in 2018 in nauw overleg met Robert Jentink, de opdrachtgever van RWS-CIV. Het onderzoek is deels gefinancierd door RWS-CIV en is deels verricht in het onderzoeksproject naar estuaria van Maarten Kleinhans.

De hoofdvraag was: kan de productie van geomorfologische kaarten door middel van Object-Based Image Analysis (OBIA) de bestaande standaard productiemethode van Rijkswaterstaat vervangen? Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn de volgende deelvragen beantwoord:

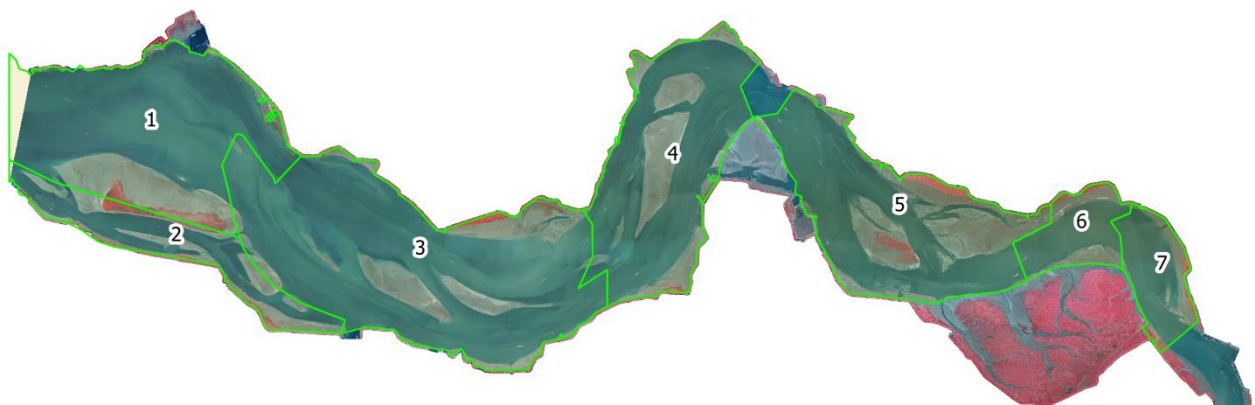
1. Is de OBIA-methode toepasbaar op watersysteemniveau, hier getest op de Westerschelde in 2016 voor het gehele buitendijkse gebied binnen de landsgrenzen?
 - a. Welke eisen worden er gesteld aan de inputbestanden?
 - b. Wat zijn de consequenties van gebiedsgrootte en van kwaliteit van inputbestanden, waaronder resolutie en belichtingsverschillen en van gebiedsgrootte voor de productietijd?
 - c. Welke Workflow en Ruleset (rekenregels) moeten worden gehanteerd?
 - d. In hoeverre is het productieproces te automatiseren en waarbij is handmatige bijsturing noodzakelijk?
 - e. Hoe goed zijn de OBIA kaarten op onderstaande criteria in vergelijking met de bestaande geomorfologische kaart van RWS?
 - i. arealen van geomorfologische eenheden per macrocel (Fig. 0)
 - ii. overeenkomstige arealen (tussen RWS en OBIA) per overeenkomstige geomorfologische klasse
 - iii. mate van detail van kartering van de grenzen per geomorfologische klasse
 - iv. mate van objectiviteit in het productieproces, ook gezien 1d.

2. In hoeverre is de OBIA-methode toepasbaar op meerdere jaargangen voor de Westerschelde, hier getest op het jaar 2010?
 - a. Welke eisen worden er gesteld aan de inputbestanden? Vergelijk met invoerbestanden onder deelvraag 1.
 - b. Wat zijn de consequenties van kwaliteit van inputbestanden voor de productietijd?
 - c. Wat zijn de consequenties voor eerder bepaalde Workflow en Ruleset? Is er een standaard Ruleset te definiëren?
 - d. In hoeverre is het productieproces te automatiseren en waar is handmatige bijsturing noodzakelijk?
 - e. Hoe goed zijn de OBIA kaarten op eerder genoemde criteria in vergelijking met de bestaande geomorfologische kaart van RWS?

In de oorspronkelijk bedachte aanpak zou de derde stap bestaan uit een toepassing op een ander watersysteem, met name de Oosterschelde in 2016. Het bleek echter dat het onderscheid tussen twee eenheden nog niet zodanig goed ging dat deze vergelijking al zin had. Naar aanleiding van het Zoute Ecotopenoverleg op 17 mei 2018 is daarom besloten eerst te testen of het toevoegen van hoogtedata de classificatie beter maakte, waarvan de resultaten ook hier worden gerapporteerd.

De toevoeging van de hoogtegegevens is in principe goed in overeenstemming met de idee van object-based image analysis. Classificatie op basis van pixels gaat uit van kleur/spectrale waarden en soms van textuur met gebruikmaking van aangrenzende pixels. De menselijke waarneming daarentegen gebruikt kleur, textuur, grootte, vorm, patronen, context en diepte, ondermeer door schaduwen, parallax en stereozicht. Dit zijn, behalve de diepte, precies de eigenschappen die worden gebruikt bij het definiëren en classificeren van objecten in de OBIA-methode (Addink et al., 2012). In de ZES systematiek van Rijkswaterstaat wordt hiernaast ook kwalitatief gebruik gemaakt van hoogte, met name helling en lokaal reliëf, door gebruik van stereoluchtfoto's en schaduw en het ligt daarom voor de hand om diepte mee te nemen in het classificatieproces voor het gehele gebied, met als onderzoeksvraag:

3. In welke mate geeft de combinatie van luchtfoto's met hoogtegegevens een betere classificatie?
 - a. Welke eisen worden er gesteld aan de inputbestanden?
 - b. Welke Workflow en Ruleset (rekenregels) moeten worden gehanteerd?
 - c. Hoe goed zijn de OBIA kaarten op eerder genoemde criteria in vergelijking met de bestaande geomorfologische kaart van RWS?



Figuur 0. Kaart van de macrocellen die gebruikt zijn bij het vervaardigen van de geomorfologische kaart.

Methode

Data en classificatie

Het studiegebied is exact gelijk aan het gebied weergegeven in de bestaande geomorfologische kaarten van de Westerschelde en het gebied is onderverdeeld in zeven macrocellen (Fig 0). Rijkswaterstaat-CIV heeft de volgende datasets uit de landelijke voorziening beschikbaar gesteld:

- geogerefererde false-colour luchtfoto's in TIF formaat van het gehele gebied voor 2010 en 2016, waarbij de pixelgrootte van beide sets identiek is, maar de resolutie waarmee is ingevlogen lager lijkt voor de 2010 foto's
- geomorfologische kaarten van Rijkswaterstaat van het gehele gebied voor 2010 en 2016
- bathymetrie met 2 m resolutie van het gehele gebied voor 2010 en 2016
- point clouds van LIDAR van het gehele gebied voor 2016

De classificatie wordt gedaan met objectgerichte beeldverwerking (*object-based image analysis*: OBIA). Dit betekent dat er, in plaats van met pixels, gewerkt wordt met objecten. Vergelijkbare buurpixels in een beeld worden gegroepeerd tot objecten. Het voordeel van werken met objecten ten opzichte van pixels is dat er naast spectrale waardes ook gebruik wordt gemaakt van textuur en context. Daarnaast wordt in deze classificatie gebruik gemaakt van meerdere segmentatieniveaus waar de objecten op het laagste niveau klein zijn, en op het hoogste niveau groot. De objecten van verschillende niveaus zijn genest, zodat de grotere objecten alleen complete objecten van de lagere niveaus omvatten. De informatie van een object in een hoger niveau bevat daardoor ook de eigenschappen van de subobjecten. Het gebruik van meerdere lagen helpt bij het bepalen van textuur en samenstelling van de objecten. In dit hoofdstuk wordt de opbouw en techniek van de classificatiemethode met de ruleset beschreven. De analyses zijn verricht met eCognition versie 9.2.1. Zie voor gedetailleerde voorbeelden Douma et al. (2018).

De volgende legendaklassen worden onderscheiden, waarbij een aantal klassen uit de GMK (geomorfologische kaart van Rijkswaterstaat) bij elkaar is gevoegd in de automatische analyses, net als in Douma et al. 2018):

Legendaklasse in dit rapport	Legendaklasse uit de GMK
Schor	S1a
Schor Open Plek	S1c
Schor Pionier	S2a en S2b-
Schor Meanderende Kreek	S3a
Plaat Laag Energetisch	P1-, K1-
Plaat Megaribbel	P2b-, P2a, K2a, K2b-
Plaat Hoog Vlak	P2c, K2c, P2d-
Antropogeen	H2-
Overig	O-, H1-

Criteria voor vergelijking van de automatische en handmatige methode

In de werkbeschrijving zijn drie kwantitatieve criteria benoemd om de automatische en handmatige classificatie te vergelijken, namelijk:

- i. de arealen van geomorfologische eenheden voor het hele gebied en per macrocel,
- ii. de overeenkomstige arealen (overlap tussen overeenkomstige geomorfologische klasse in RWS en OBIA)
- iii. de mate van detail van kartering van de grenzen per geomorfologische klasse

Deze kwantiteiten zijn onderling gerelateerd, wat zal worden onderzocht met een aantal GIS-analyses. Er kunnen vier soorten afwijkingen ontstaan, in alle mogelijke combinaties, in arealen van de beide methoden. De eerste en tweede mogelijke afwijkingen zijn dat er in de handmatige en/of automatische classificatie een fout is gemaakt. In dit rapport kunnen deze twee niet van elkaar worden onderscheiden zonder nadere handmatige controle.

De derde afwijking ontstaat door de veel gedetailleerdere automatisch bepaalde grenzen in vergelijking met handmatig gegeneraliseerde grenzen. In het eenvoudige hypothetische geval dat een gedetailleerde (geautomatiseerd berekende) grens zich heen en weer slingert om een (handmatig) gegeneraliseerde grens, kan het totale areaal van de eenheden aan weerszijden van de grens nog wel goed overeenkomen tussen handmatige en gegeneraliseerde, maar is het overeenkomstige areaal kleiner. Tussen de twee grenzen ontstaan kleine vlakken waar de toegekende klassen verschillend zijn. De grootte van deze vlakken zal relatief klein zijn, wat de mogelijkheid geeft om deze factor te identificeren in een grootteverdeling van de vlakken die verschillen tussen beide methoden.

De vierde set afwijkingen is dat de grenzen tussen twee eenheden verschoven zijn, waardoor het oppervlak van de ene eenheid kleiner en dat van de andere eenheid groter is. Dat betekent dat de eenheden wel ongeveer op de goede plek liggen, maar de locatie van de overgang ertussen door de operator (GMK) of de methode (OBIA) verschillend wordt gekozen. Deze afwijking kan betekenen dat de automatische ruleset biased is, of dat de handmatige methode biased is. Eventuele bias kan blijken uit een gemiddelde afwijking in arealen op het hele gebied of een subgebied; wanneer de afwijking willekeurig is zal de afwijking uitmiddelen. De afwijking heeft op zijn beurt tenminste drie bronnen, namelijk

- 1) variatie in beeldkwaliteit door bijvoorbeeld belichting,
- 2) subjectieve variatie in de handmatige classificatie veroorzaakt door expert judgement of veldverkenningen, of
- 3) variatie binnen het werkelijke oppervlak waar de automatische methode gevoelig voor is, zoals achtergebleven water en diatomeeën.

Deze afwijkingen zullen worden gekwantificeerd en geëvalueerd door analyse van verschillende classificaties op alle voorkomende grenzen tussen alle geomorfologische legendaklassen.

Onzekerheid van de classificatie

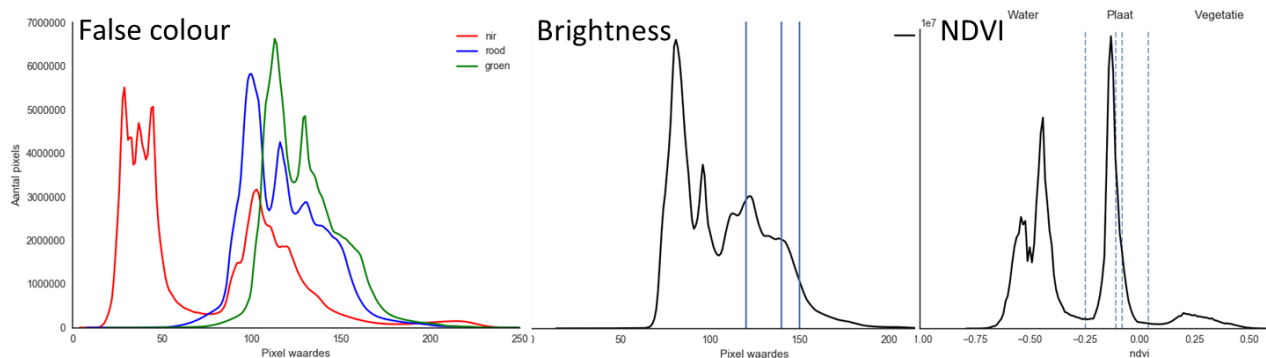
Een kwantificering van de fouten in de classificatie is feitelijk niet mogelijk omdat de handmatige methode onbekende fouten en bias bevat. Wel is een indicatie mogelijk van de zekerheid van de automatische classificatie. Deze gebeurt in stappen, welke nader toegelicht zullen worden, waarmee bekend is welk soort informatie gebruikt is voor classificatie van elk object. Er zal per klasse worden besproken welke stap in het proces waarschijnlijk betrouwbaarder is. De opgeleverde kaarten bevatten deze informatie ook,

zodat men zich bij de kwaliteitscontrole achteraf, die ook in het productieproces van de GMK gedaan wordt, op de onzekerder objecten kan richten. Ook maakt dit het mogelijk om op basis van expert judgement en eventuele velddata de klasse van objecten aan te passen zonder dat de grenzen van de samengevoegde, aangrenzende objecten van dezelfde klasse moeten worden aangepast.

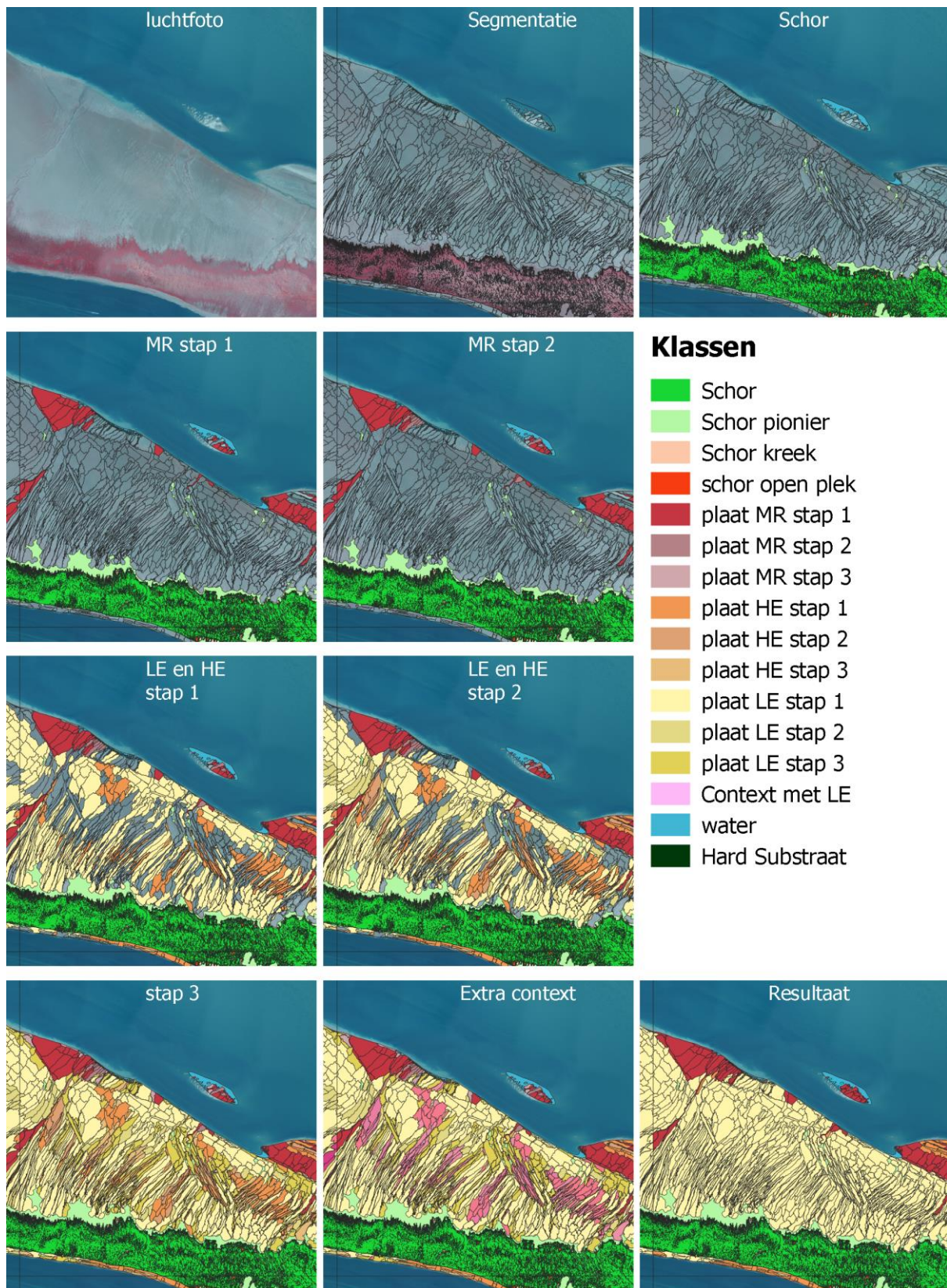
Resultaten

Ontwikkelde ruleset

De ruleset werkt volgens een vaste workflow waar het beeld stapsgewijs geïnclassificeerd wordt. Na uitvoerig testen is de volgende methode het meest effectief gebleken. Allereerst wordt een beeld gebruikt met de false colour banden, de daaruit berekende NDVI (waarbij NDVI staat voor normalized difference vegetation index; een genormaliseerde verhouding tussen nabij-infrarode en rode reflectie) en de Brightness (de totale reflectie zonder onderscheid naar golflengte) (Fig. 1). Het beeld wordt per object geïnclassificeerd, dus vooraf worden de objecten gecreëerd door het beeld te segmenteren. Per klasse wordt dit herhaald voor dat deel van het beeld dat nog niet geïnclassificeerd is. Daarnaast kunnen tijdelijk extra objecten worden gecreëerd, kleiner dan de hoofdataset, om informatie over het grote object te verkrijgen.



Figuur 1. Analyse van een deel van het beeld van Walsoorden uit 2016 ter illustratie van de verdeling van spectrale waarden van de foto's, de brightness en de NDVI. Hier gebruikte drempelwaarden voor verschillende eigenschappen zijn aangegeven.



Figuur 2. Voorbeeld van classificatie van objecten op Hooge Platen in vier hoofdstappen in de ruleset (waarbij Extra Context de vierde is). Twee andere voorbeelden staan in de appendix. Bij Resultaat zijn de stappen per klasse samengevoegd en wordt de kleur van stap 1 aangehouden. MR – Megaribbel, HE-hoogenergetisch, LE - laagenergetisch.

De classificatie verloopt, na begrenzing op basis van de 4% droogvalduurcontour, op hoofdlijnen in de volgende stappen (Fig. 2):

1. Water

Objecten worden op basis van een maximum NDVI drempelwaarde geselecteerd.

2. Antropogeen

Deze klasse wordt overgenomen uit het GMK. Er wordt een fijne segmentatie aangemaakt, waarna de objecten worden geselecteerd op basis van het GMK bestand.

3. Schor

- Objecten worden op basis van een minimum NDVI drempelwaarde geselecteerd.
- Objecten die groter zijn dan 400 m² krijgen de klasse Schor.
- Voor objecten kleiner dan 400 m² wordt een groei-krimp procedure toegepast, waarbij de objecten aan elkaar vast kunnen komen te zitten. Als de samengesmolten objecten vervolgens groter dan 400 m² zijn krijgen ze de klasse pioniervegetatie.
- Geulen in het schor worden herkend aan een langgerekte vorm, kleine breedte en begroeide omgeving.

4. Plaat

Alle overgebleven objecten zijn onderdeel van een Plaatklasse. Hiervoor worden vier stappen doorlopen:

1. Stap 1: op basis van kenmerken binnen elk object, namelijk spectraal, structuur van subobjecten, en helling en variatie in helling
2. Stap 2: op basis van context, in vergelijking met buur-objecten
3. Stap 3: voor nog ongeclassificeerde objecten het samenvoegen met de naastgelegen objecten waarmee het kleinste verschil bestaat in spectraaleigenschappen
4. Stap 4 (extra contextstap voor laag-energetische gebieden): de als hoog-energetisch (vlak en megaribbel) geclassificeerde objecten die grenzen aan hoge delen (schor en rand van het gebied) of die omgrensd worden door laag-energetische objecten worden omgezet naar laag-energetisch

Met name de eenheden die in de laatste bovengenoemde stap worden geclassificeerd zijn onzekerder en zouden met expert judgement en veldwerk gecontroleerd kunnen worden.

Het plaatareaal wordt als volgt geclassificeerd:

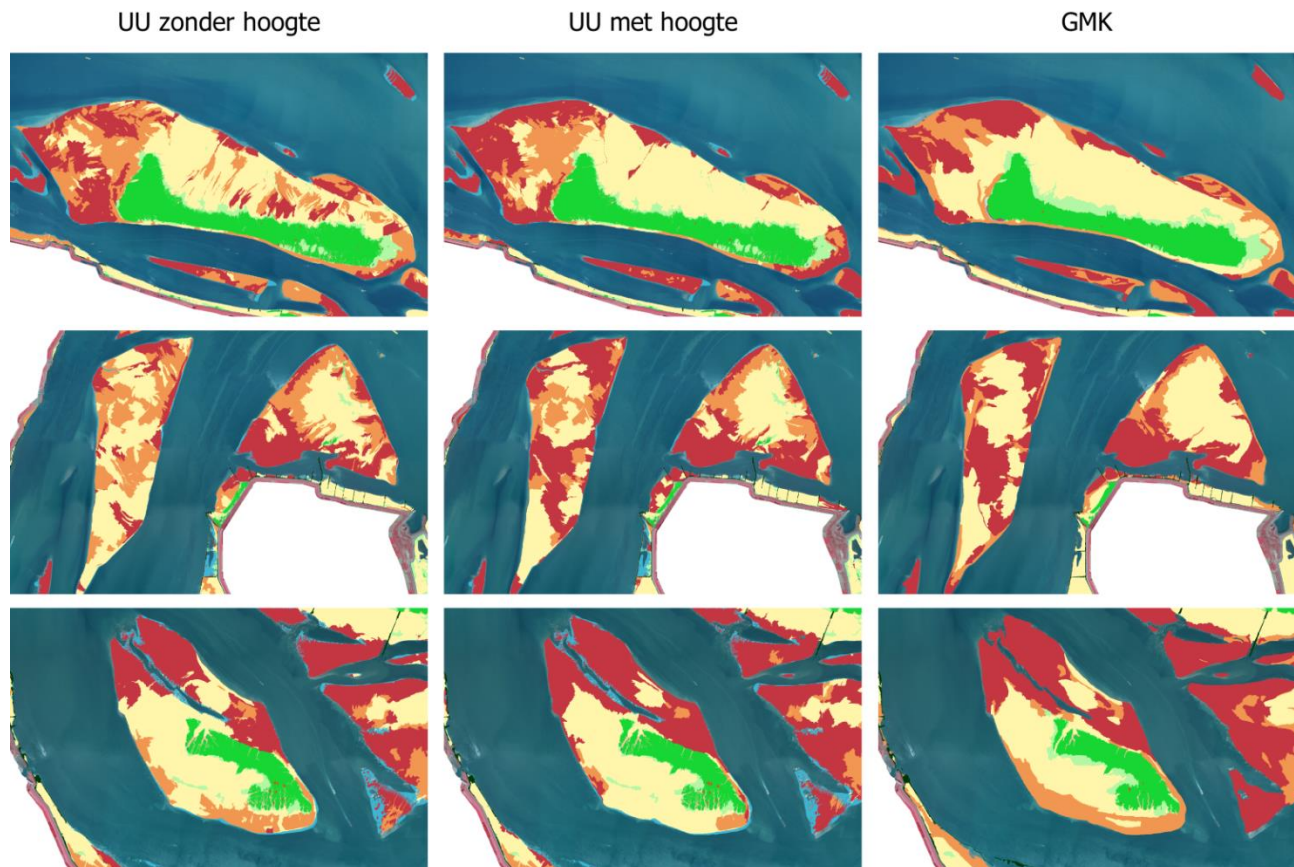
- Als eerste worden de Megaribbels onderscheiden.
 - Hiervoor worden brightness en NDVI drempelwaarden van subobjecten gebruikt.
 - Bij gebruikmaking van hoogte worden ook helling en variatie in helling gebruikt.
- Het resterende gebied is Plaat hoogenergetisch of Plaat laagenergetisch. Het onderscheid wordt gemaakt door brightness en NDVI drempelwaarden, voor zowel object als subobject-niveau, en op basis van context.

Toevoeging van hoogtegegevens aan de ruleset

Het toevoegen van hoogtegegevens in de classificatie heeft hypothetisch de volgende meerwaarden:

- de grootschalige helling van het terrein is een indicatie voor de locatie op de plaat, waarbij de helling nabij het water suggereert dat het om hoogdynamisch gebied gaat, en
- kleinschalige hoogtevariëaties of hellingvariëaties in combinatie met context zijn een indicatie voor megaribbels of geultjes in laagenergetisch oppervlak.

Bij megaribbels varieert de hellingshoek sterker dan bij andere klassen. In het classificatieproces zijn eerst de klassen water en vegetatie onderscheiden; hierna volgen de plaatklassen waarvan megaribbel de eerste klasse is die wordt onderscheiden. De oorspronkelijke classificatie is hier gevolgd, maar de megaribbel-objecten werden nu eerst gelabeld als kandidaat-megaribbel. Voor alle objecten kandidaat-megaribbel is vervolgens de standaarddeviatie in hellingshoek bepaald. Wanneer deze variatie te laag was is het object verwijderd uit de klasse en toegevoegd aan de nog ongeclassificeerde groep plaat-objecten. Vervolgens zijn binnen de groep plaat-objecten die objecten geselecteerd met een hoge variatie in hellingshoek en zijn deze alsnog geclassificeerd als megaribbel. Eerste tests voor drie contrasterende gebieden langs het estuarium, waaronder ook platen zonder schor (Fig. 3) suggereerden dat het gebruik van hoogtegegevens de classificatie van megaribbels sterk verbetert, waarbij zowel de false positives (onterecht als megaribbel geclassificeerde objecten) als de false negatives (onterecht niet als megaribbel geclassificeerde objecten) worden verminderd. Daarom is de methode toegepast op het gehele gebied en vergeleken met de methode zonder gebruik van hoogtedata.



Figuur 3. Voorbeelden van het effect van hoogtegegevens in de classificatie van megaribbels (in rood). Links: automatisch geclassificeerde geomorfologische kaart van 2016 op basis van de luchtfoto's. Midden: verbetering door gebruik van helling en hoogtevariëatie in objecten. Rechts: GMK ter vergelijking.

Vergelijking van de twee methoden voor beide jaren

De methode is toegepast op de foto's uit 2010 en 2016, en voor 2016 met en zonder bathymetriegegevens. De drie resultaatkaarten worden hier vergeleken met de handmatige classificaties uit de respectievelijke jaren, op verschillende manieren. Om te beginnen wordt het totaalareaal per klasse bekeken en wordt de verdeling van de grootte van de objecten/polygonen vergeleken voor overeenkomstige en verschillende classificaties. Vervolgens wordt het effect van de automatische belijning ten opzichte van handmatig intekenen geanalyseerd.

Vergelijking van arealen

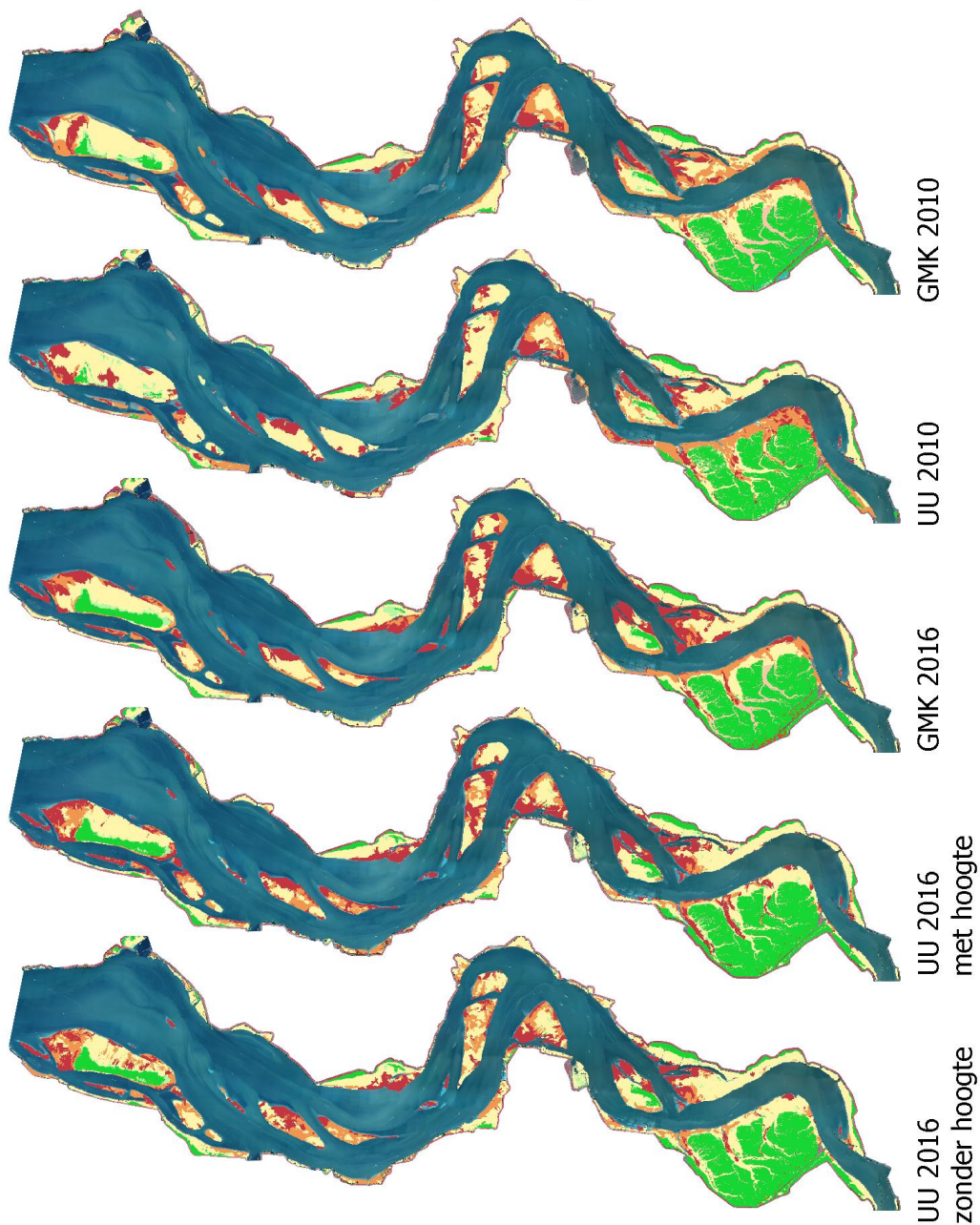
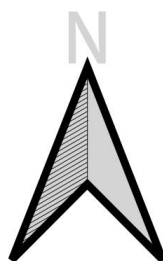
De resulterende kaarten van de automatische methode in vergelijking met de handmatige zijn op het eerste gezicht op hoofdlijnen goed vergelijkbaar (Fig. 3,4). De opvallendste verschillen zitten vooral in de klassen laag-energetisch onbegroeid, hoog-energetisch vlak en megaribbels.

De opgetelde arealen per klasse voor beide methoden voor het hele gebied zijn vergelijkbaar (Fig. 5), waarbij het grootste areaal bestaat uit laag-energetische plaat, daarna het schor en de hoog-energetische klassen.

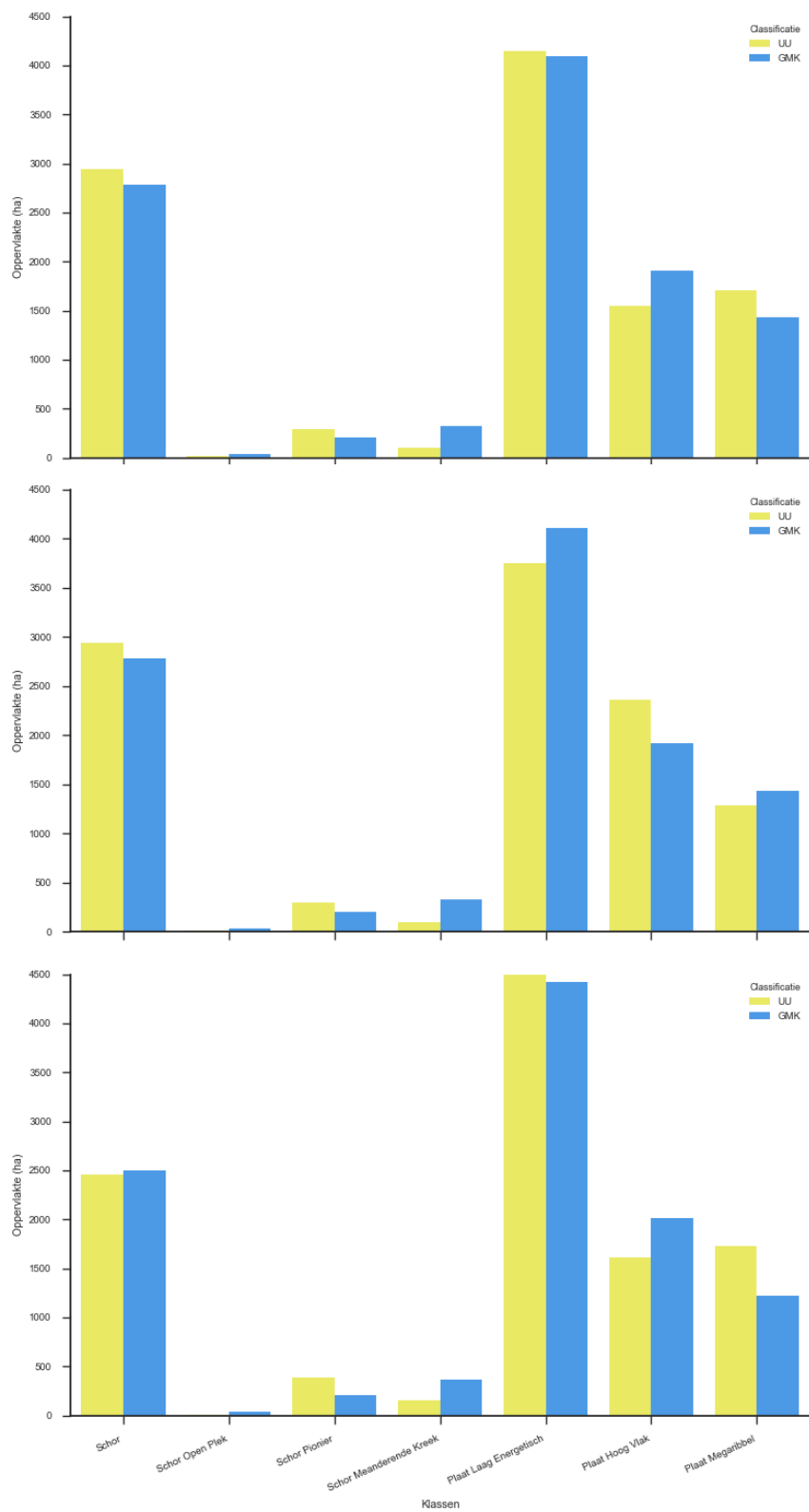
De voornaamste veranderingen tussen 2010 en 2016 worden goed gereproduceerd, namelijk een afname van laag-energetisch plaatareaal en een toename van het schor-areaal. De grootste verschillen ontstaan doordat de automatische methode een verschuiving tussen de beide hoog-energetische eenheden laat zien die de handmatige methode niet toont. Hetzelfde beeld is te zien bij de meeste macrocellen (Fig. 6 en Figuren A6 in de appendix). Dit is het eerste criterium voor de vergelijking van automatische methode.

Classificatie van de Westerschelde

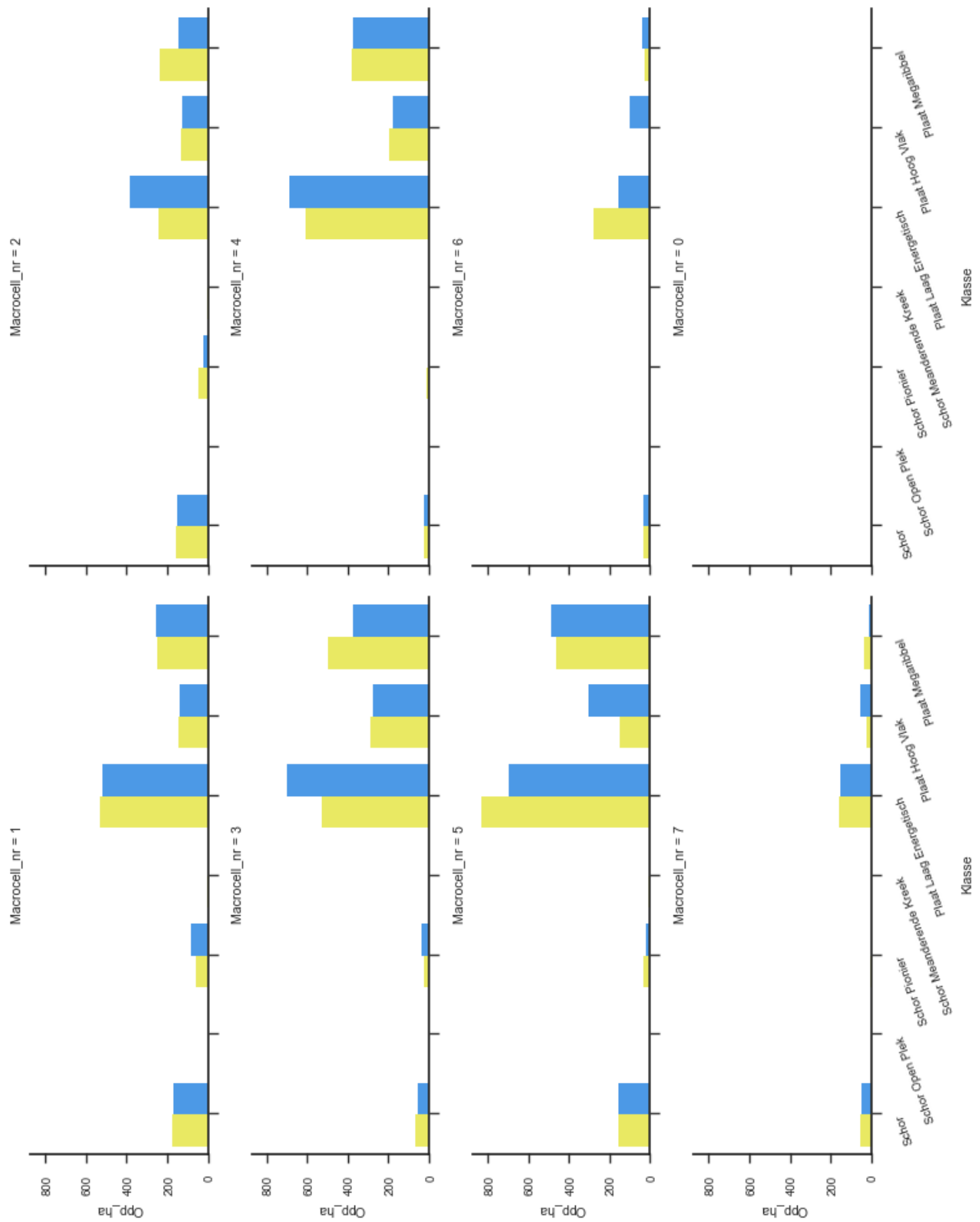
- | | |
|---------|----------------------------|
| Klassen | Schor |
| | Schor Open Plek |
| | Schor Pionier |
| | Schor Meand. Kreek |
| | Plaat L. Energ. |
| | Plaat H. Energ. Vlak |
| | Plaat H. Energ. Megaribbel |
| | Antropogeen |
| | Water |



Figuur 4. Geomorfologische kaarten voor 2010 en 2016 met beide methoden, en voor 2016 ook met gebruikmaking van hoogtegegevens.



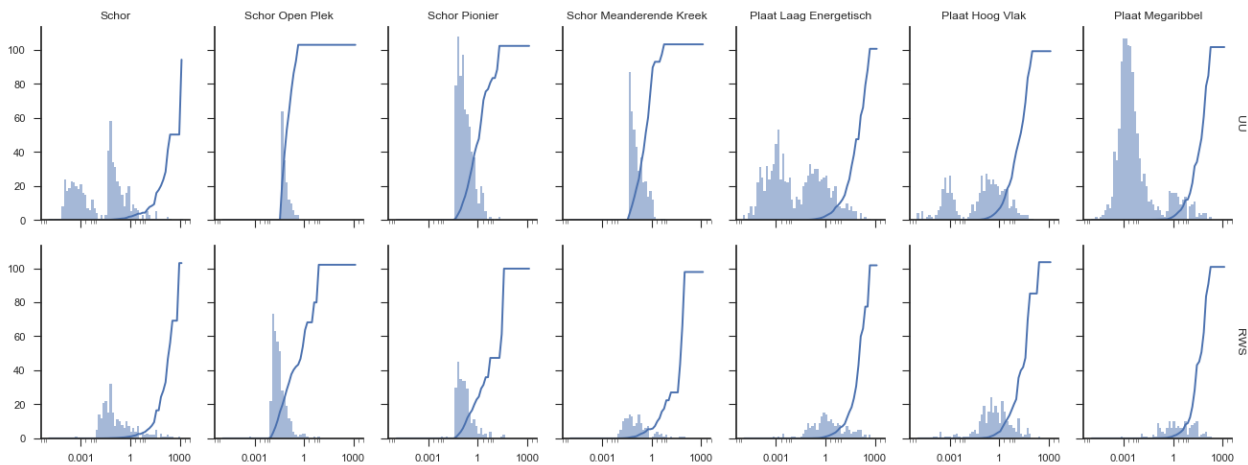
Figuur 5. Arealen per geomorfologische klasse voor de automatische en handmatige methoden voor het hele gebied voor 2016 zonder gebruikmaking van hoogte (boven), 2016 met gebruikmaking van hoogte (midden) en voor 2010 zonder hoogte.



Figuur 6. Arealen per geomorfologische klasse voor de automatische en handmatige methoden voor alle macrocellen voor 2016 met gebruikmaking van hoogte. De resultaten voor 2016 en 2010 zonder gebruik van hoogtedata staan in de appendix.

Objectgrootte van verschillende en overeenkomstige polygonen

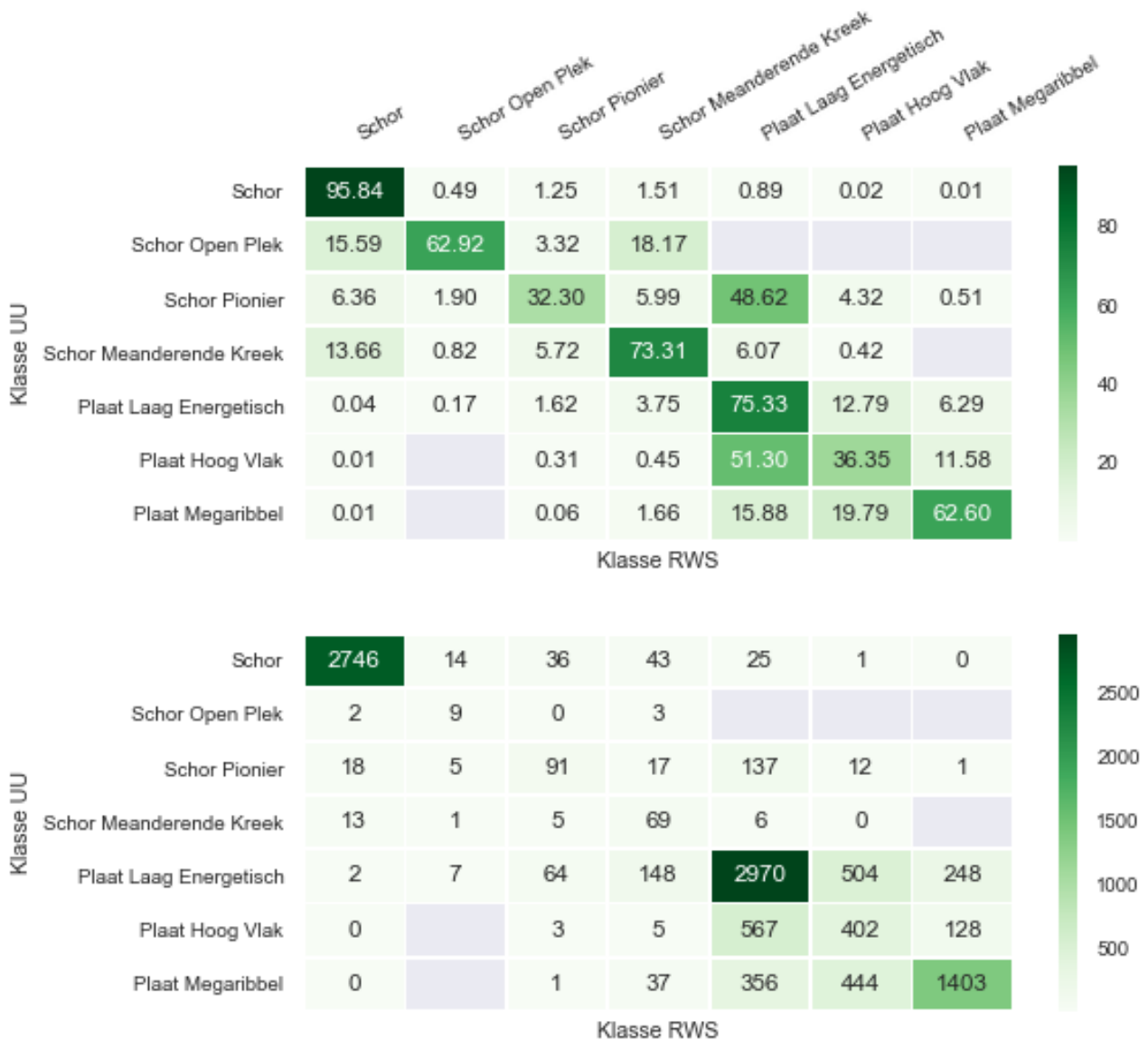
De grootte van de objecten is een maat voor de mate van detail van kartering. De frequentieverdeling van grootte van objecten per klasse (Fig. 7) is vergelijkbaar in vorm voor de grotere objecten en voor de meeste klassen, maar in de onbegroeide plaatklassen is een dubbele piek in de verdeling te zien bij de automatische methode, wat wijst op een groot aantal zeer kleine vegetatieobjecten. Met name de klassen laag-energetisch vlak en megaribbel laten een groot aantal kleine objecten zien met oppervlakten tussen de 1 m² en 1 ha. Dit laat zien dat er veel meer kleine objecten worden herkend in de automatische methode, wat kan omdat deze in veel hogere mate van ruimtelijk detail classificeert, maar het leidt wel tot de vraag of het verschil in hoog- en laagenergetisch tussen beide methoden vooral door deze kleine of ook door grotere objecten komt. Verder valt op dat de klassen met kleinschaliger schor-elementen hard zijn afgekapt op een oppervlak van 0.4 ha in de automatische methode volgens de ZES-systematiek, maar wel kleinere oppervlakten hebben in de handmatige methode, vermoedelijk door subjectieve inschatting van het oppervlak. Voor alle klassen geldt dat de kleine objecten gezamenlijk wel in aantal maar niet een oppervlak een grote fractie uitmaken van het totale oppervlak per klasse: met name de megaribbels en de laag-energetische plaat bestaan voor bijna 90% uit objecten kleiner dan 1 ha.



Figuur 7. Verdelingen (histogrammen) van aantallen geclassificeerde objecten in beide methoden in 2016 (met gebruikmaking van hoogte). Op de X-as staat de oppervlakte uitgedrukt in ha; op de Y-as aantallen objecten in percentages. Het aantal kleine objecten in de automatische classificatie (UU) is veel groter dan in de handmatige methode (RWS). De cumulatieve verdelingen (lijnen) tonen in hoeverre de kleine objecten bijdragen aan het totale areaal per klasse.

Vergelijking van overeenkomstige en verschillende classificaties

Figuur 8 laat de overeenkomstige arealen zien in beide methoden (op de diagonaal van de matrix) en tussen welke klassen de verschuivingen plaatsvinden. Dit is het tweede criterium voor de vergelijking van automatische methode. Het grote beeld is dat de schor-gerelateerde klassen zeer goed gaan, en de onbegroeide plaatklassen voor ruwweg tweederde goed gaan en verder veel onderling verwisseld is. Daarbij is een verschuiving tussen de laag-energetische klasse en de hoog-energetische klassen ongewenster dan tussen beide hoog-energetische klassen. Het overeenkomstige oppervlak tussen de automatische en de handmatige classificatie is 73% voor 2016 en 67% voor 2010. Later worden effecten van de opeenvolgende stappen beschreven.



Figuur 8. Overeenkomstig en verschillend geclassificeerd oppervlakte tussen de geautomatiseerde methode (rijen) en de handmatige (kolommen) in percentages van het totale oppervlak (boven, rijen tellen op tot 100%) en hectares (onder) voor 2016 met gebruikmaking van hoogte. Op de diagonaal van de matrices staan de overeenkomstig geclassificeerde arealen. De resultaten voor 2016 en 2010 zonder gebruik van hoogtedata staan in de appendix.

De geclassificeerde eenheid met de grootste overeenkomst is het schor, waarvan in 2016 maar 7% van het automatisch geclassificeerde oppervlak samenvalt met andere, vooral schor-gerelateerde, handmatig onderscheiden klassen. Omdat de schor-gerelateerde klassen een relatief zeer klein areaal beslaan, worden deze weliswaar procentueel minder goed geclassificeerd, maar dit gaat maar om enkele tientallen hectare in het gehele studiegebied.

Van het laag-energetisch areaal in 2016 komt bijna 70% van het automatisch geclassificeerd oppervlak overeen met het handmatig gekarteerde oppervlak, en meer dan 22% met hoog-energetische klassen. Van de klasse megaribbels overlapt 72% met de handmatige methode, 10% met de andere hoog-energetische

klasse, en 15% met de laag-energetische klasse. Een belangrijk verschil is te zien in de classificatie van hoog-energetisch vlak gebied, waar minder dan 40% overeenkomst tussen de methoden is en ruim 40% overlapt met de laag-energetische klasse uit de handmatige methode.

Dit resultaat is zeer vergelijkbaar voor 2010 en 2016. De grootste verschillen tussen de jaren zijn dat in 2010 de megaribbelklasse minder overlap heeft tussen beide methoden, en dat de schorklasse pioniervegetatie minder met de klasse laag-energetische plaat verward wordt. Het eerste verschil gaat om honderden hectaren en is onderdeel van de bovengenoemde verschuivingen tussen de drie onbegroeide plaatklassen. Het tweede verschil gaat maar om 87 hectare en heeft te maken met het verschil in minimale objectgrootte tussen de automatische herkenning van vegetatie-objecten groter dan 0.4 ha en de visuele inschatting daarvan in de handmatige methode.

Detail van de automatische methode en grootte van verschillend geclassificeerde arealen

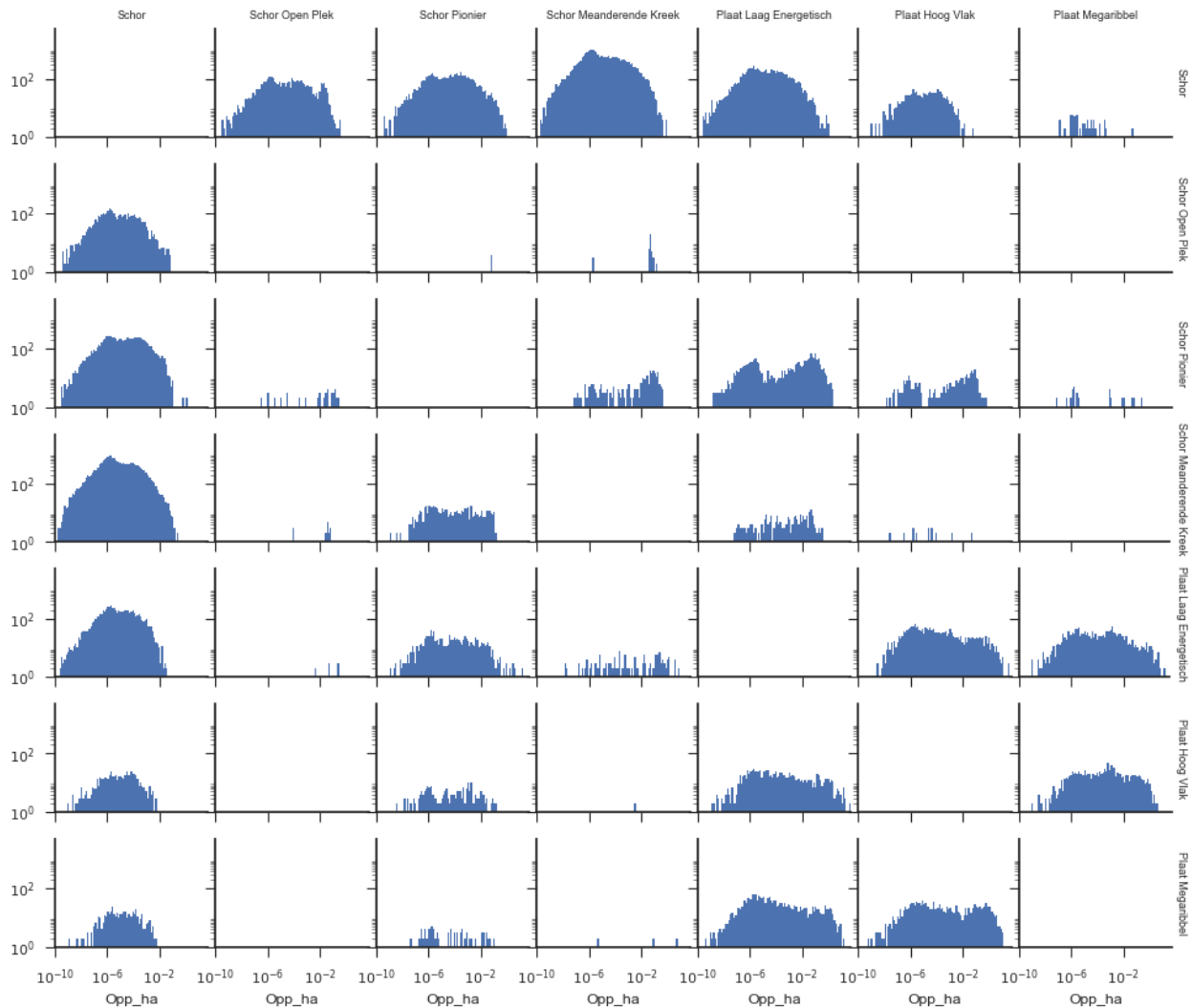
Om te onderzoeken of er sprake is van verschillen in classificatie door de meer gedetailleerde grenzen in de automatische methode of door bias in de automatische methode ten opzichte van de handmatige, is een verschilkaart tussen beide methodes berekend en zijn van alle verschillend geclassificeerde arealen de oppervlakten berekend per object. Dit is het derde criterium voor de vergelijking van automatische methode, en de grootte-verdeling zegt ten dele iets over de mate van detail waarin de grenzen zijn bepaald, en ook over de mate van verschuiving van grenzen tussen twee eenheden in vergelijking met de GMK.

De verdelingen van groottes zijn over het algemeen log-normaal en zeer breed, maar een aantal is ook bimodaal en soms licht trimodaal verdeeld (Fig. 9). De cumulatieve kansdichtheidverdelingen (Fig. 10) laten een vergelijkbaar variabel beeld zien met lognormale verdelingen, verdelingen met dikkere staarten en dus meer grote verschil-objecten dan kleine voor verschilobjecten van de onbegroeide plaatklassen, en verdelingen met plateaus die wijzen op bimodaliteit, met name in de automatisch geclassificeerde schorklasse pionier. De onregelmatige cumulatieve verdelingen hebben erg kleine aantallen verschil-objecten zoals de overeenkomstige histogrammen laten zien.

De verdelingen van de groottes van de verschil-objecten, d.w.z. de objecten die aan verschillende klassen zijn toegekend bij de automatische en de handmatige classificatie, worden als volgt geïnterpreteerd. De helft van de verschil-objecten is kleiner dan ruwweg 10^{-4} ha oftewel 1 m^2 . Dit duidt op ruimtelijke ruis en niet op essentiële verschillen, gezien de resolutie van de luchtfoto's en de schaal van de handmatige classificatie, en levert geen grote bijdrage aan het totaalareaal en het verschil in de methoden. Voor de schor-gerelateerde klassen zijn er nagenoeg geen verschil-objecten groter dan 1 ha, en zijn het dus ook vooral zeer kleine oppervlakten die in een andere klasse terecht komen. Het heeft wel een relatief groot effect op het verschil tussen de beide methoden voor de individuele schorklassen, doordat deze een zeer klein totaaloppervlak in het gebied hebben.

Voor de verschil-objecten van onbegroeide plaatklassen duidt de lange staart van grote objecten en de lichte bimodaliteit in de verdelingen op een dubbele oorzaak van de verschillen. Enerzijds is er een groot aantal verschil-objecten kleiner dan 1 m^2 , namelijk meer dan 100000, wat bijna de helft is van het totale aantal verschil-objecten. Anderzijds is er een groot aantal grote verschil-objecten, wat duidt op systematische verschillen in de classificatie en wat leidt tot een groot verschil in areaal. In 2010 is de verdeling van verschil-objecten van de megaribbels (met laag-energetisch en hoog-dynamisch vlak in de handmatige methode) zelfs trimodaal. Dit lijkt een artefact van de lagere inwinningsresolutie van de 2010

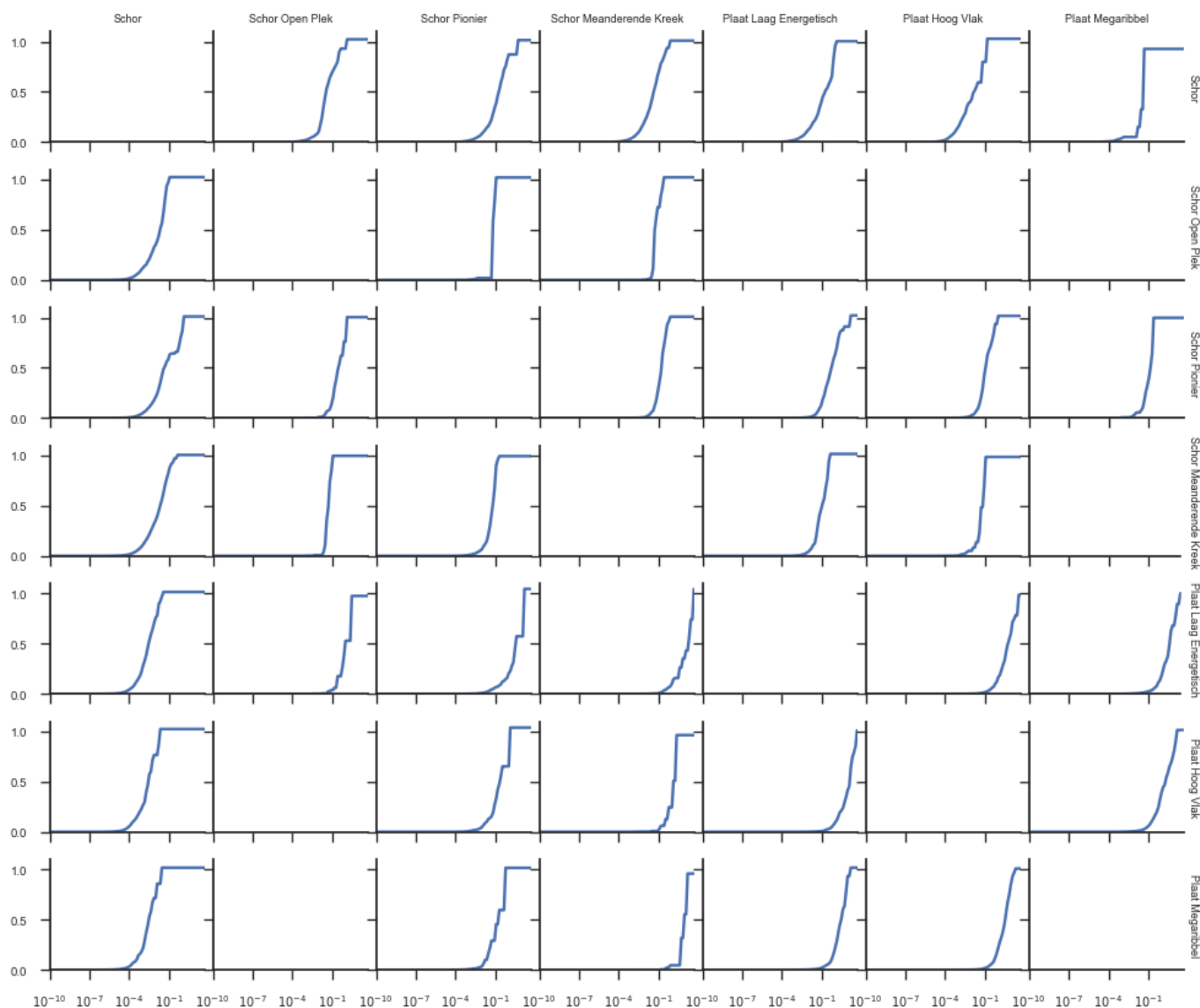
foto's, waardoor de grenzen van de eenheden minder duidelijk zijn te herkennen. Om hiervoor te corrigeren kunnen de instellingen van de segmentatie worden aangepast.



Figuur 9. Kansverdelingen van de grootte van verschil-objecten tussen de twee methoden. Hier zijn die voor 2016 met gebruikmaking van hoogtedata getoond, maar er zijn geen wezenlijke verschillen met die zonder hoogtedata en die voor 2010.

De eerste conclusie van de analyse van grootte van objecten en van grootte van verschilobjecten is dat de automatische methode veel meer detail toont in de zin dat de grenzen tussen klassen veel grilliger verlopen. Dit ondanks het aanhouden van een zekere schaalgrootte in de eerste segmentatie, en de identieke minimale grootte van bijvoorbeeld vegetatie-objecten in de classificatie van pionierschor als in de handmatige methode. Dit was het vierde criterium in de vergelijking van de handmatige en automatische methode.

De tweede conclusie is dat maar een zeer beperkt oppervlak van de classificatieverschillen tussen de automatische en handmatige methode lijkt te worden veroorzaakt door de mate van detail in de kartering, namelijk 1.63 hectare, wat een verwaarloosbaar klein deel is (0.015%) van het totale oppervlak van het gebied van 10542 hectare. Het verschil in arealen zit dus in objecten groter dan een vierkante meter die anders zijn geclassificeerd in de methoden.



Figuur 10. Cumulatieve verdelingen van het oppervlak van verschil-objekten tussen de twee methoden. Hier zijn die voor 2016 met gebruikmaking van hoogtedata getoond, maar er zijn geen wezenlijke verschillen met die zonder hoogtedata en die voor 2010.

Indicatie van bronnen van verschillen in classificatie

De precieze onzekerheid is niet goed in absolute zin aan te geven, omdat de verschillen tussen de handmatige en automatische methode uit beide methoden kan voortkomen (Fig. 11). De 'total accuracy' (rechtsonder) is het percentage van het totale littorale oppervlak (rechtsonder gegeven in ha) dat hetzelfde is geïdentificeerd in de methoden (som van de diagonaal in de figuur). Zowel rijen als kolommen zijn gesommeerd, op basis waarvan twee maten voor classificatiesucces zijn uitgerekend per legendaklasse met als suggestie dat de ene of de andere methode correct classificeert. Welke in werkelijkheid het beste is, is onbekend.

Uitgaande van het scenario dat de GMK perfect is, geeft de rij met 'user accuracy' het percentage van oppervlak in de GMK aan dat met de automatische methode totaal met dezelfde legendaklasse is gevonden. Dit betekent bijvoorbeeld dat er van de 1780,8 ha megaribbel-areaal in de GMK 78,8% als

hetzelfde is herkend in de automatische methode, en dat het overige oppervlak in de automatische methode is geclassificeerd als megaribbel maar dat volgens de GMK niet is.

Uitgaande van het scenario dat de automatische methode perfect is, geeft de kolom met 'classification accuracy' het percentage van het met de automatische methode gevonden oppervlak in een legendaklasse dat volgens de GMK dezelfde legendaklasse heeft. Dit betekent bijvoorbeeld dat van het door de automatische methode herkende 2241,6 ha megaribbel-areaal 62,6% ook als zodanig wordt geclassificeerd in de handmatige methode, die het overige oppervlak vooral optekent als vlakke plaat.

	Schor	Schor Open Plek	Schor Pionier	Schor Meanderende Kreek	Plaat Laag Energetisch	Plaat Hoog Vlak	Plaat Megaribbel	Total row (ha)	Total diagonal (ha)	Classification Accuracy (%)	Total Accuracy (%)
Schor	2745.9	14.1	35.8	43.2	25.4	0.6	0.2	2865.1	95.8		
Schor Open Plek	2.2	8.7	0.5	2.5				13.8	62.9		
Schor Pionier	17.9	5.3	90.8	16.8	136.7	12.2	1.4	281.1	32.3		
Schor Meanderende Kreek	12.8	0.8	5.4	68.8	5.7	0.4		93.8	73.3		
Plaat Laag Energetisch	1.7	6.6	64.0	147.9	2970.1	504.2	248.1	3942.6	75.3		
Plaat Hoog Vlak	0.1		3.4	4.9	566.8	401.5	127.9	1104.7	36.3		
Plaat Megaribbel	0.2		1.4	37.2	356.0	443.6	1403.2	2241.6	62.6		
Total column (ha)	2780.8	35.5	201.2	321.4	4060.6	1362.5	1780.8				
Total diagonal (ha)								7688.9			
User Accuracy (%)	98.7	24.5	45.1	21.4	73.1	29.5	78.8				
Total Accuracy (%)											72.9

Klasse RWS

Figuur 11. Overeenkomstig en verschillend geclassificeerd oppervlakte tussen de geautomatiseerde methode (rijen) en de handmatige (kolommen) in hectares voor 2016 met gebruikmaking van hoogte. Het omlijnde deel is hetzelfde als Fig. 8. De 'total accuracy' (nauwkeurigheid of betrouwbaarheid; rechtsonder) is het percentage van het totale littorale oppervlak (rechtsonder gegeven in ha) dat hetzelfde is geclassificeerd in de methoden. De rij met 'user accuracy' (betrouwbaarheid per klasse) geeft het percentage van oppervlak in de GMK aan dat met de automatische methode totaal met dezelfde legendaklasse is gevonden. De kolom met 'classification accuracy' (nauwkeurigheid per klasse) geeft het percentage van het met de automatische methode gevonden oppervlak in een legendaklasse dat volgens de GMK dezelfde legendaklasse heeft. De resultaten voor 2016 en 2010 zonder gebruik van hoogtedata staan in de appendix.

Het is wel te achterhalen voor elk object in welke stappen van de automatische classificatiemethode deze uiteindelijk worden geïdentificeerd. Een deel van de onzekerheid in classificatie van het onbegroeide plaatareaal, of deze nu in de handmatige of automatische kaarten zit, komt tot uiting in de bijdragen van de latere stappen in de automatische classificatie. Het voorbeeld van de classificatie van objecten in stappen volgens de ruleset (Fig. 2) laat zien hoe met name objecten in het laagdynamisch plaatareaal tot een paar maal van legendaklasse kunnen wisselen. Hieruit blijkt dat de automatische classificatie van het begroeide deel van de plaat in overeenstemming met de GMK grotendeels in de eerste stap plaatsvindt, en alleen voor pionierschor niet zo goed gaat. Voor de onbegroeide oppervlakken daarentegen, voegen de latere stappen meer oppervlak toe, met name in de legendaklassen laag-energetisch en megaribbel. Ofschoon dit tot een groter overeenkomstig geïdentificeerd oppervlak leidt, wordt ook het niet-overeenkomstig oppervlak vergroot. Dit alles wijst erop dat de klassen in de legenda in de werkelijkheid geleidelijk in elkaar overlopen. Dat roept de vraag op of deze legendaklassen niet goed genoeg kunnen worden herkend met de huidige ruleset, of dat in de handmatige methode per geval een net iets andere beslissing is genomen, al dan niet na expert judgement en bijstelling op basis van veldwerk, dan de automatische methode numeriek doet.

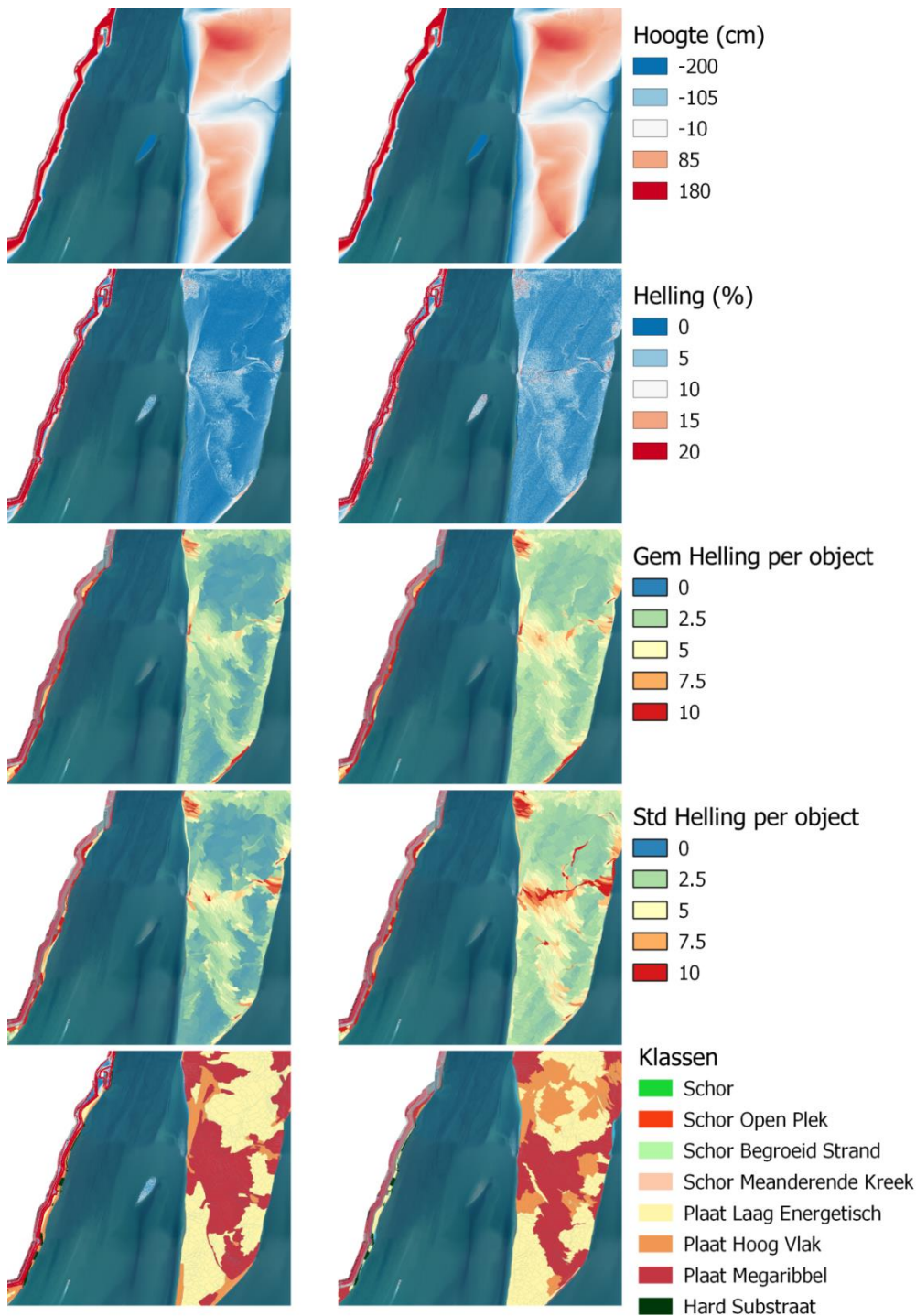
	Schor	Schor Open Plek	Schor Pionier	Schor Meanderende Kreek	Plaat Laag Energetisch	Plaat Hoog Viak	Plaat Megaribbel
schor stap 1	2705.4	6.2	28.4	29.6	19.2	0.4	0.1
schor stap 2	29.3	3.7	3.0	1.9	0.7	0.0	
schor stap 3	11.2	4.2	4.4	11.7	5.4	0.2	0.0
schor open plek	2.2	8.7	0.5	2.5			
schor pionier	17.9	5.3	90.8	16.8	136.7	12.2	1.4
schor kreek stap 1	10.0	0.3	4.1	55.3	4.8	0.3	
schor kreek stap 2	2.8	0.5	1.3	13.4	0.9	0.0	
plaat LE stap 1	0.6	6.2	44.7	104.1	2202.0	298.7	120.3
plaat LE stap 2	0.2	0.1	2.9	8.4	182.8	39.0	18.6
plaat LE stap 3	0.9	0.3	13.3	24.1	434.2	105.0	71.5
plaat LE context	0.0		3.1	11.3	151.1	61.5	37.7
plaat HE stap 1	0.0		1.0	1.8	308.3	233.4	42.3
plaat HE stap 2	0.0		0.2	0.7	69.0	56.7	30.3
plaat HE stap 3	0.1		2.2	2.5	189.4	111.4	55.3
plaat MR stap 1	0.0		0.0	19.8	195.5	289.3	1024.2
plaat MR stap 2	0.0		0.2	12.8	99.4	94.0	327.6
plaat MR stap 3	0.1		1.1	4.6	61.1	60.4	51.4

Klasse_RWS

Figuur 11. Bijdrage in hectare van de opeenvolgende stappen in de automatische classificatie aan het eindresultaat, vergeleken met de handmatige methode van RWS. Omliggende delen horen bij dezelfde legendaklasse in de automatische methode, en de som van de kolommen binnen de omliggende delen met dezelfde legendaklasse in beide methoden geven het totale oppervlak op de diagonaal in Fig. 8 en 11.

Inschatting van de meerwaarde van het gebruik van LIDAR pointclouds

Op basis van een subgebied is de mogelijke meerwaarde onderzocht van het gebruik van hogere resolutie hoogtedata in de classificatie (Fig. 12). Daar de classificatie gebruik maakt van helling en de standaarddeviatie van helling binnen de objecten, is het kaartbeeld van deze variabelen vergeleken.



Figuur 12. Vergelijking van hoogtedata van de gebiedsdekkende grids met 2 m resolutie (links) en pointclouds van de LIDAR (rechts) voor de absolute hoogte (boven), de helling (tweede rij), de gemiddelde helling binnen objecten (derde rij) en de standaarddeviatie van helling binnen objecten (vierde rij). De GMK (linksonder) en automatische classificatie (rechtsonder) is voor hetzelfde gebied gegeven.

Het kaartbeeld is goeddeels hetzelfde en er lijken geen verschillen te vinden te zijn in de hellingkaarten die de verschillen tussen de GMK en de automatische classificatie kunnen verklaren. Wel zijn de gemiddelde helling per object en de standaarddeviatie van helling per object anders, maar dat wordt verklaard door het oplossend vermogen van details met de hogere resolutie. Dit laat zien dat de criteria voor helling en variatie afhankelijk zijn van de resolutie van de hoogtedata, maar niet dat een hogere resolutie meerwaarde heeft.

Discussie: beantwoording onderzoeksvragen en aanbevelingen

In deze paragraaf worden de onderzoeksvragen beantwoord (voor vraagnummers tussen haken zie de inleiding).

De OBIA-methode is toepasbaar op het hele watersysteemniveau van de Westerschelde in 2010 en in 2016 voor het gehele buitendijkse gebied binnen de landsgrenzen (**1**). De GMK en de UU-kaart zijn ruimtelijk voor 73% vergelijkbaar. De beschikbare luchtfoto's voldeden in kwaliteit in het ongecomprimeerde TIF formaat (**1a**), maar een punt van aandacht is het verschil in belichting dat kan ontstaan bij de dataverzameling over het gehele gebied (**1b**). In dit geval laten de arealen van geomorfologische eenheden per macrocel (**criterium 1e-i**) geen ruimtelijke trend zien in verschillen tussen de methoden. Dit betekent dat de classificatieregels niet te hoeven worden aangepast voor deelgebieden.

De verwerkingstijd (**1b**) zonder aanpassing van de ruleset voor een gebied van de grootte van de Westerschelde is minimaal een week als er geen problemen met data hoeven te worden opgelost, zoals niet-uniforme belichting. De kale rekentijd met de bestaande ruleset op een zware desktop PC met 8 CPU en 32 GB RAM voor de gehele Westerschelde bedraagt ongeveer 24 uur bij het gelijktijdig verwerken van 2 tegels. Voor dit rapport is een machine gebruikt met 12 cores Intel XEON E5-1650 v3 @3.5Ghz met 128 GB RAM. Voor toekomstige toepassing moet wel rekening worden gehouden met noodzakelijke tests voor het afstellen van de drempelwaarden op een deel van het gebied omdat per dataset de belichting van de foto's zal verschillen door, onder andere, zonnehoek en weersomstandigheden.

De ruleset is toegelicht in de resultaatsectie (**1c**), waarbij een beperkt aantal drempelwaarden is opgelegd die waarschijnlijk voor een ander jaar handmatig moeten worden bijgesteld afhankelijk van kwaliteit van luchtfoto's en ruimtelijke resolutie van hoogtedata. De onderliggende drempelwaarden in de ruleset zijn automatisch van deze drempels afhankelijk gemaakt met als doel om het aantal vrije parameters te beperken (**1d**). De ruleset is hier ongewijzigd toegepast op de data van 2010, waarbij de overeenkomst met de GMK2010 67% bedroeg. De genoemde drempelwaarden zijn hierbij niet aangepast.

In vergelijking met de RWS-kaarten zijn de arealen van de automatische methode per geomorfologische klasse (**criterium 1e-ii**) met name voor de schorklassen rond de 90% overeenkomstig. De onbegroeide plaatklassen gaan minder goed omdat er vooral verschuivingen tussen deze klassen optreden door de mate van detail van kartering.

De mate van ruimtelijk detail van kartering van de grenzen per geomorfologische klasse (**criterium 1e-iii**) is veel hoger in de automatische methode dan in de RWS-kaarten, doordat de grenzen subtiele verschillen tussen individuele pixels kunnen beschouwen. Dit impliceert dat de objecten zelfs zonder classificatie al van waarde zijn voor de handmatige classificatie, omdat het tijdrovende en subjectieve proces van grenzen trekken kan worden geautomatiseerd. De mate van objectiviteit in het productieproces (**criterium 1e-iv**) is in de automatische methode veel groter dan bij de RWS-kaarten op een aantal niveaus. Het eerste is dat de grenzen in de automatische methode niet handmatig worden getrokken en gegeneraliseerd maar op hoge resolutie worden berekend. Ten tweede worden de grenzen per jaar geheel opnieuw berekend in de automatische methode, terwijl de RWS-kaarten een aanpassing zijn van vorige jaren. Daarmee zou bias kunnen ontstaan. Ten derde ontbreekt bij de OBIA methode de subjectiviteit die de verschillende interpreteurs door de jaren heen, en wellicht door het gebied heen, introduceren. De enige subjectieve beslissing in de automatische methode zoals deze nu is ontwikkeld, is de bepaling van grenswaarden van

brightness en NDVI voor het hele gebied in één keer, welke afhangen van omstandigheden van de belichting en de camera-eigenschappen.

De overeenkomsten tussen de automatische en handmatige methoden zijn groot. De verschillen komen voort uit verschillend ruimtelijk detail bij de belijning van vlakken, verschillende locaties van de grens tussen twee eenheden die in beide classificaties voorkomen, en foute classificaties in beide methoden. Gezien deze drie punten kan het percentage overeenkomst daarom worden gezien als een onderschatting van de nauwkeurigheid, en het percentage verschil als het onwaarschijnlijke plafond van de misclassificatie. Het is onvermijdelijk dat de waarheid ergens in het midden ligt.

De GMK heeft na productie op grond van luchtfoto's nog een controleslag ondergaan met expert judgement en controle en monsternamen in het veld. Daarbij is de luchtfoto wel leidend in de zin dat megaribbelveldverplaatsing niet wordt meegenomen maar wel vagere grenzen tussen bijvoorbeeld laagenergetisch en pionierschor worden herzien. Het is aan te bevelen een dergelijke slag ook toe te passen op de automatisch geproduceerde kaart, waarbij ook Antropogeen (H1) en Overig (H2 en O) worden meegenomen. Daarbij is er tijdswinst tov de handmatige kartering omdat de eenheden in de classificatie een aanduiding van zekerheid hebben meegekregen. Bovendien hoeven ze niet te worden begrensd. Om deze analyse mogelijk te maken zijn de bestanden met niet-samengevoegde objecten met hoge resolutie aangeleverd. Dit biedt bovendien de mogelijkheid om voor de minst zekere objecten steekproeven te doen bij toepassing van de automatische methode op een nieuwe dataset. Het verdient aanbeveling de methode verder te testen op andere watersystemen en toe te passen op de Waddenzee, waar de handmatige methode door het grote oppervlak erg kostbaar zal zijn.

Gebruik van hoogtedata (**3**) heeft meerwaarde voor de classificatie van met name de onbegroeide plaatklassen, ofschoon daar ook nieuwe verschillen tussen beide methoden mee ontstaan. De hoogtedata (**3a**) hadden in deze studie een resolutie van 2m (tov 25cm voor de foto's). De analyse van pointcloud data laat zien dat een hogere resolutie waarschijnlijk geen meerwaarde heeft, zelfs niet voor de legendaklassen megaribbels en laagenergetisch met geultjes. Wel blijkt uit de analyse dat de gekozen grenzen voor gemiddelde helling en hellingvariatie binnen objecten resolutie-afhankelijk zijn, omdat er meer relief en dus meer helling kan worden herkend in gedetailleerdere data. Dit betekent dat bij een andere resolutie de ruleset moet worden aangepast (**3b**). Een probleem met de LIDAR data is echter dat deze meestal op een ander moment wordt geschoten dan de luchtfoto's, wat tot fouten kan leiden bij de automatische classificatie. Het verdient daarom aanbeveling om te onderzoeken of er hoogtedata, welke toch vooral lokaal en relatief gebruikt wordt, kan worden berekend uit de stereoluchtfoto's die ook voor de automatische classificatie gebruikt worden (**3a**). Zeker in de Waddenzee, waar het tijdverschil tussen opnames van LIDAR en luchtfoto's op kan lopen tot jaren, zou dit mogelijk een uitkomst bieden voor de automatische productie van biogeomorfologische kaarten. De gebruikte ruleset (**3b**) is beschreven in de resultaatsectie. De overeenkomst tussen de automatisch gegenereerde kaart en de handmatige classificatie, met gebruik van hoogtedata, is 73% (**3c**).

Handmatige controle van de hier gerapporteerde OBIA kaart (gebaseerd op foto's en hoogtedata) door Robert Jentink toonde aan dat 79% van het oppervlak juist geclassificeerd is in overeenstemming met visuele controle en expert judgement. Het oppervlak (21%) dat onjuist in de kaart staat, valt met name in in de klassen Hoogdynamisch Megaribbel (7,4%), Plaat laag energetisch vlak (6,8%), Plaat hoog energetisch vlak (4,7%) en Pionier schor (1,0%). Bij de eerste twee klassen hoorden de meeste objecten eigenlijk bij de klasse Plaat hoog energetisch, terwijl bij de laatste twee de juiste klasse in de meeste gevallen Plaat laag

energetisch bleek. Een belangrijke foutenbron bleek een onnauwkeurige belijning van de betrokken objecten, wat verrassend was omdat juist deze belijning met de automatische methode veel nauwkeuriger kan. De reden is waarschijnlijk dat de mate van toegestane spectrale variatie in objecten te groot is gekozen, wat tot grotere objecten heeft geleid dan wenselijk. Er zal hierom een aanpassing worden gemaakt in de ruleset om kleinere objecten te creëren, waardoor extra grenzen worden toegevoegd. Dit geeft ook aan dat de objectgrootte voor toepassing in de Waddenzee en kleinere systemen in het buitenland moet worden aangepast op de karakteristieke grootte van eenheden, die daar waarschijnlijk kleiner is dan in de grote estuaria.

Bij toepassing van de ruleset ontwikkeld voor 2016 op de foto's uit 2010 was de overeenkomst met de GMK 67% **(2)**. Voor de inputbestanden is het essentieel dat er ongecomprimeerde data (TIFF) wordt gebruikt opgenomen bij laag water **(2a)**. Wanneer de foto's ook worden gebruikt om stereografisch hoogte te bepalen is een overlap van 60% tussen de foto's wenselijk **(2a)**. Voor een soepele verwerking van de foto's is het van belang dat er geen belichtingsverschillen binnen of tussen de foto's optreden **(2b)**, aangezien dit de drempelwaarden beïnvloedt en deze dan lokaal moeten worden bijgesteld. De huidige ruleset heeft vier hoofddrempelwaarden die per gebied en fotoset moeten worden ingesteld. Beslissingswaarden later in de ruleset worden hiervan afgeleid **(2c)**. Na het instellen van de hoofddrempelwaarden kan de ruleset worden toegepast zonder handmatige bijsturing, mits er geen grote technische verschillen tussen de foto's bestaan (zoals belichting) **(2d)**. Zoals eerder aangegeven verdient het net als bij de handmatige kartering ook hier aanbeveling een handmatige controleslag uit te voeren aan de hand van veldgegevens **(2d)**.

Conclusies

We hebben op basis van eerder werk in de Eems-Dollard een methode ontwikkeld om biogeomorfologische kaarten te maken ten behoeve van ecotopenkaarten op grond van luchtfoto's in kleur met nabij-infrarood. Deze methode maakt niet alleen gebruik van de spectrale informatie, maar ook van de structuur van het landschap boven water. Het resultaat is een vlakdekkende kaart met biogeomorfologische eenheden die passen in het zoute-ecotopenstelsel.

De handmatig en automatisch geproduceerde kaarten zijn goed vergelijkbaar met 73% overeenkomstig oppervlak met dezelfde klasse (antwoord op onderzoeksvraag **1**). De automatische methode levert veel gedetailleerdere kaarten maar de verschillen tussen beide methoden zijn niet toe te schrijven aan het detail, maar vooral aan verschillend geclassificeerde objecten (**1e**). Een handmatige controle van de geautomatiseerde kaart gaf aan dat 21% van het oppervlak een verkeerd label had gekregen. De minst hoge overeenkomsten werden gevonden voor eenheden met de legendaklassen hoog- en laag-energetische plaat. Een aanpassing om deze verwarring te verminderen door het creëren van kleinere objecten wordt momenteel al doorgevoerd. Toepassing van de automatische methode op de beelden van 2010 zonder het bijstellen van drempels leverde 67% overeenkomst op (**2**). Deze waarden moeten worden gelezen als het verschil tussen de handmatige en automatische methode, waarbij niet duidelijk is welke fouten in welke mate van één van de twee methoden afkomstig zijn. De automatische methode maakt het mogelijk om per object vast te stellen in welke stap van de methode deze worden geclassificeerd. Dit is een vorm van onzekerheid waarop de handmatige controlestappen kunnen worden geconcentreerd, zonder noodzaak om nieuwe grenzen te trekken, waarmee een expert judgementstap na productie is vereenvoudigd.

Het is essentieel dat de data in ongecomprimeerd format worden aangeleverd, bv TIFF (**3**). Het toevoegen van hoogte-variabelen aan de dataset heeft een meerwaarde. In de huidige studie zijn LIDAR data gebruikt, die niet op hetzelfde moment als de foto's zijn ingewonnen. De dynamiek in de Westerschelde zal er plaatselijk toe hebben geleid dat het reliëf in de tussenliggende periode is veranderd. Wanneer de overlap tussen de foto's groot genoeg wordt, is het mogelijk hoogtegegevens af te leiden uit de foto's. Dan geven de foto's en de hoogtegegevens dezelfde situatie weer.

De automatische methode is toepasbaar op watersysteemniveau (**2**), waarbij na digitaal beschikbaar stellen van geogereferende beelden in minimaal een week een kaart kan worden uitgerekend. De kale rekentijd bedraagt hier 24 uur waarbij er 2 tegels tegelijk geclassificeerd worden. De methode is opgezet met drempelwaarden voor *brightness* en NDVI die voor het gehele gebied worden opgegeven, en welke moeten worden bijgesteld voor verschillende sets foto's in verschillende gebieden. Drempelwaarden voor uit hoogtegegevens berekende helling en variatie daarin hangen af van de ruimtelijke resolutie.

Aanbevelingen

Specifieke aanbevelingen, mede met het oog op het project om deze methode toe te passen op de Waddenzee, zijn als volgt:

- Bij de belijning van sommige onbegroeide plaatobjecten zouden er meer grenzen moeten worden toegevoegd. Dit kan worden bereikt door iets kleinere objecten maken. De objecten dienen voldoende groot te blijven om zinvolle subobjecten te kunnen creëren.
- De benodigde foto's moeten in een ongecomprimeerd formaat worden geleverd.
- Het zou goed zijn als de hoogtedata dezelfde situatie op hetzelfde moment als de foto's weergeven. Dit kan worden bereikt door of een LIDAR sensor op hetzelfde vliegtuig te monteren, of door de foto's met tenminste 60% overlap te vliegen waardoor er wellicht stereografische hoogtemodellen kunnen worden gecreëerd.

Literatuur

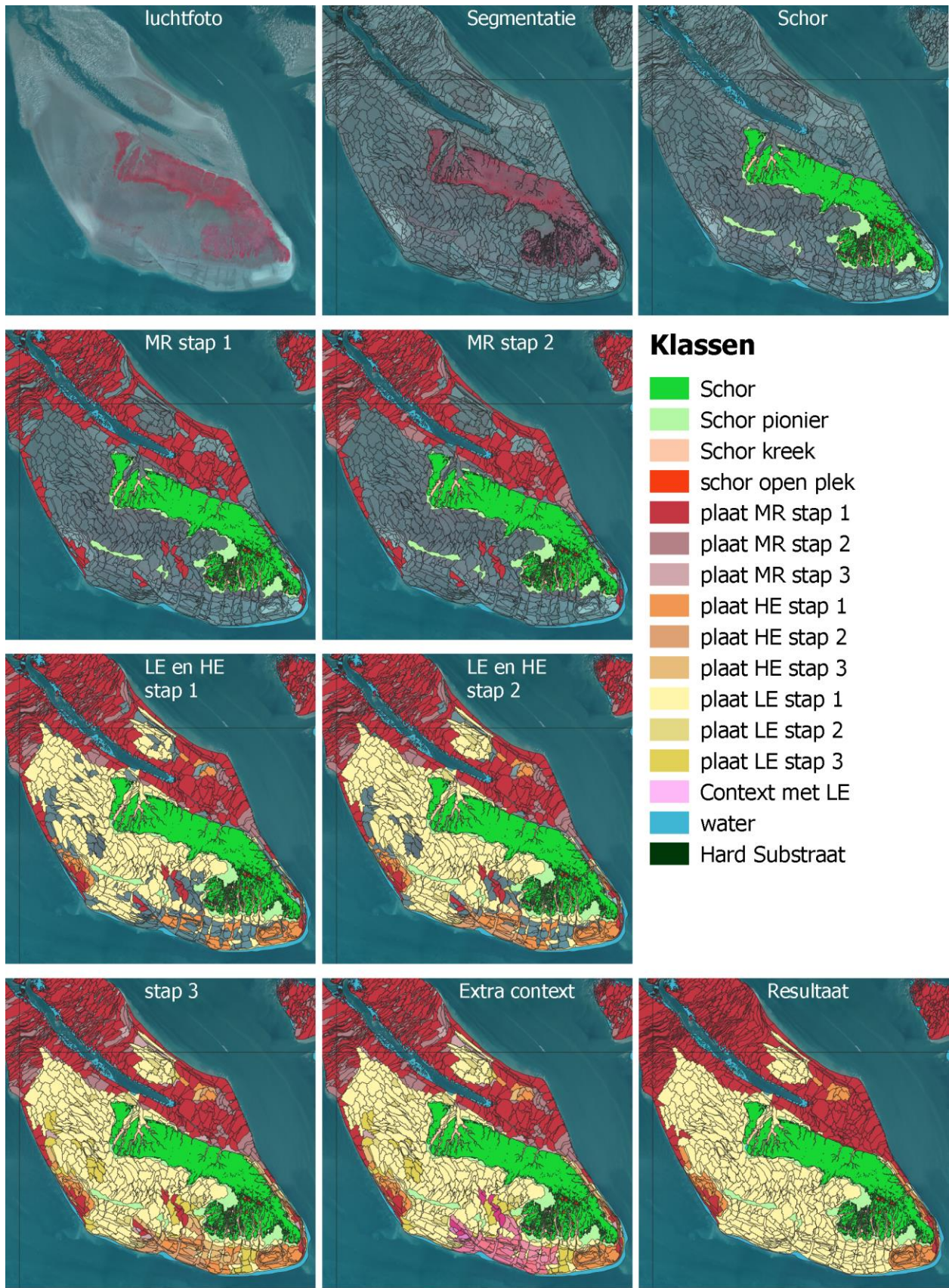
- Addink, E. A., F. M. B. Van Coillie, en S. M. de Jong. 2012. Introduction to the GEOBIA 2010 special issue: From pixels to geographic objects in remote sensing image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 15:1-6.
- Bouma, H., D.J. de Jong, F. Twisk en K. Wolfstein, 2005. Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1) voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren. Rapport RIKZ/2005.024.
- Cleveringa, J. 2014. Ecotopen in de Westerschelde. LTV Veiligheid en Toegankelijkheid. Arcadis.
- Coumou, L. 2015. Biogeomorphological Evolution of the Tidal Flat 'Plaat van Walsoorden' (Western Scheldt, NL) from 2004 to 2014 by Object-Based Image Classification of Aerial Photographs. Unpublished but over-abundantly distributed BSc-thesis Earth Sciences Utrecht University, supervision E.A. Addink and M.G. Kleinhans
- Douma, H., E.A. Addink & M.G. Kleinhans (2018). Automatische classificatie en analyse van luchtfoto's van het Eems-Dollard estuarium. Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie, rapport i.o. Rijkswaterstaat WVL ten behoeve van het ED2050 programma.
- Kers, A.S., L. Walburg, J. Bakker, A.H. Daane, D.J. de Jong, M. Schrijver, P. Lievense, L. Dekker & J. de Klerk. 2013. Dienstbeschrijving Zoute ecotopenkarteringen. Rijkswaterstaat CIV/ZD, Delft / Middelburg.
- Ysebaert, T.J.W., J.T. van der Wal, M. Tangelder, A.V. de Groot en M.J. Baptist, 2016. Ecotopenkaart voor het Eems-Dollard estuarium. IMARES Wageningen UR Rapport C059/15.

Appendix: extra figuren

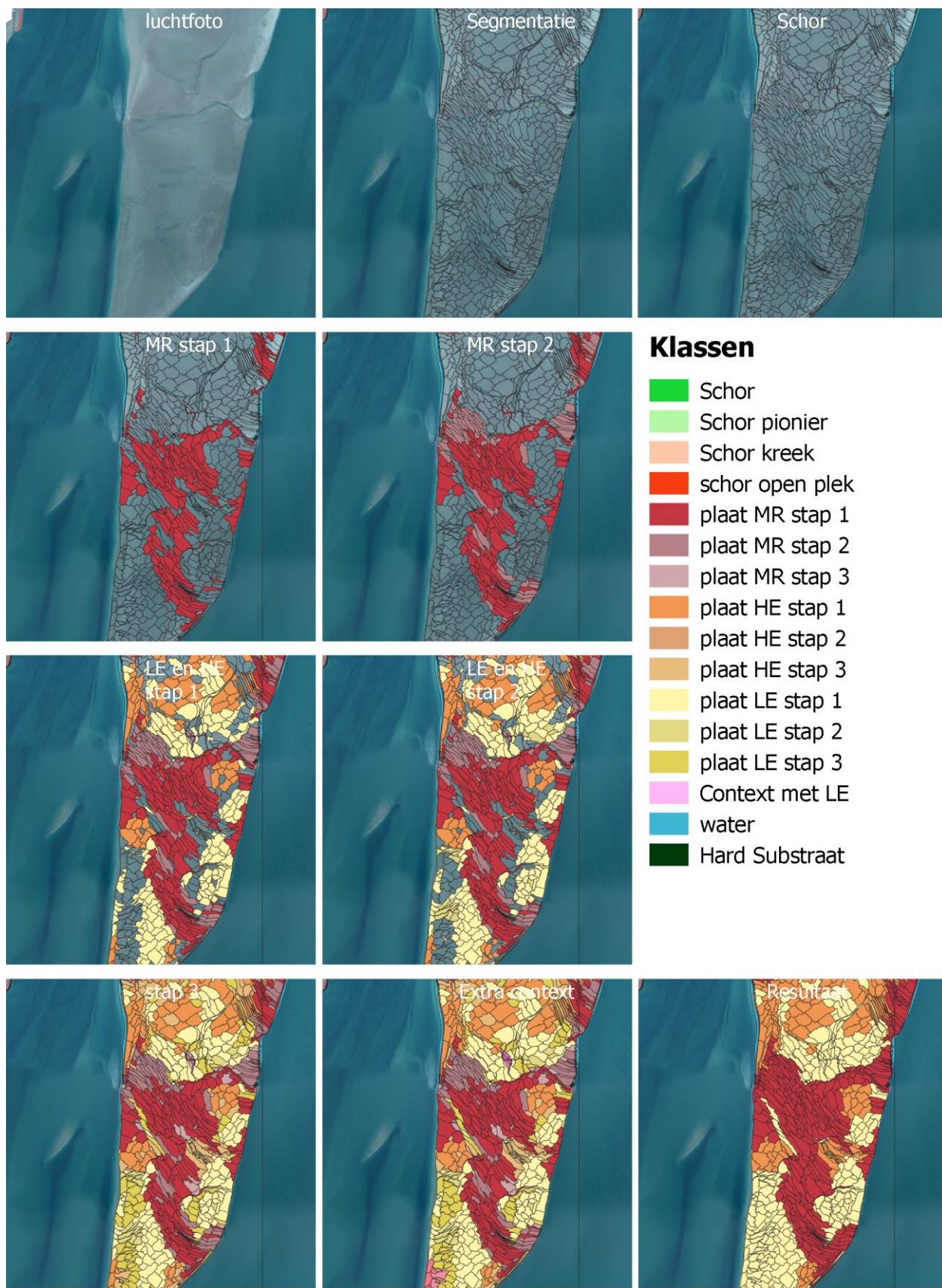
Nummers van appendixfiguren corresponderen met figuurnummers in de tekst, en worden voorafgegaan door de 'A'.

Digitaal aangeleverde GISbestanden van de classificatie met gebruikmaking van hoogte:

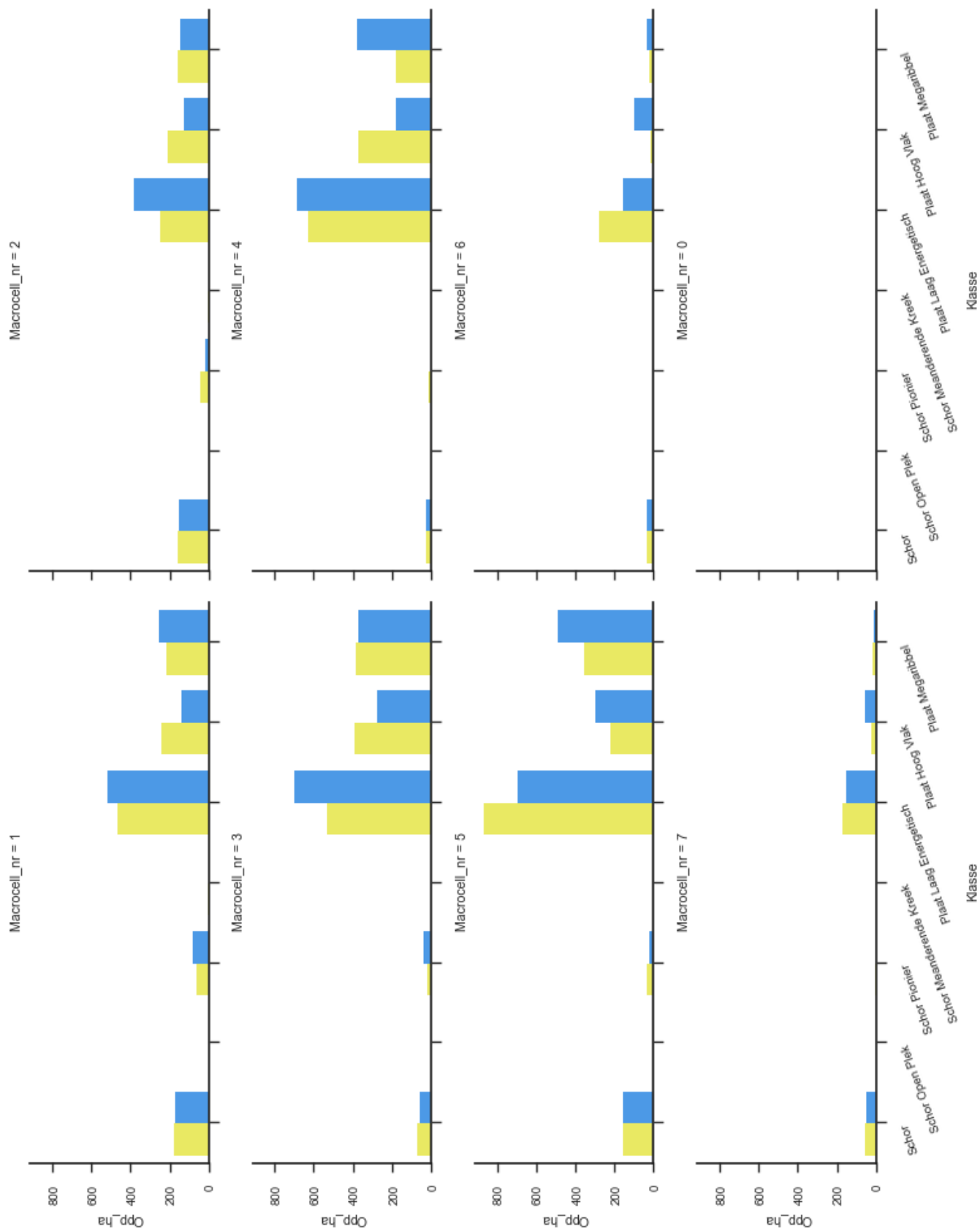
- Definitieve classificatie per tegel met overlap
 - Shapefile met extent van de luchtfototegels waarop de classificatie is gedaan
- Definitieve classificatie per tegel zonder overlap
 - extent van de luchtfoto tegels zonder overlap waar de classificatie op is geknipt en gemozaïeked.
- eCognition uitvoer per tegel
- Mozaïek van eCognition output
- Mozaïek van de verschilobjecten met de GMK met informatie in welke stap van het automatische proces de classificatie is gedaan



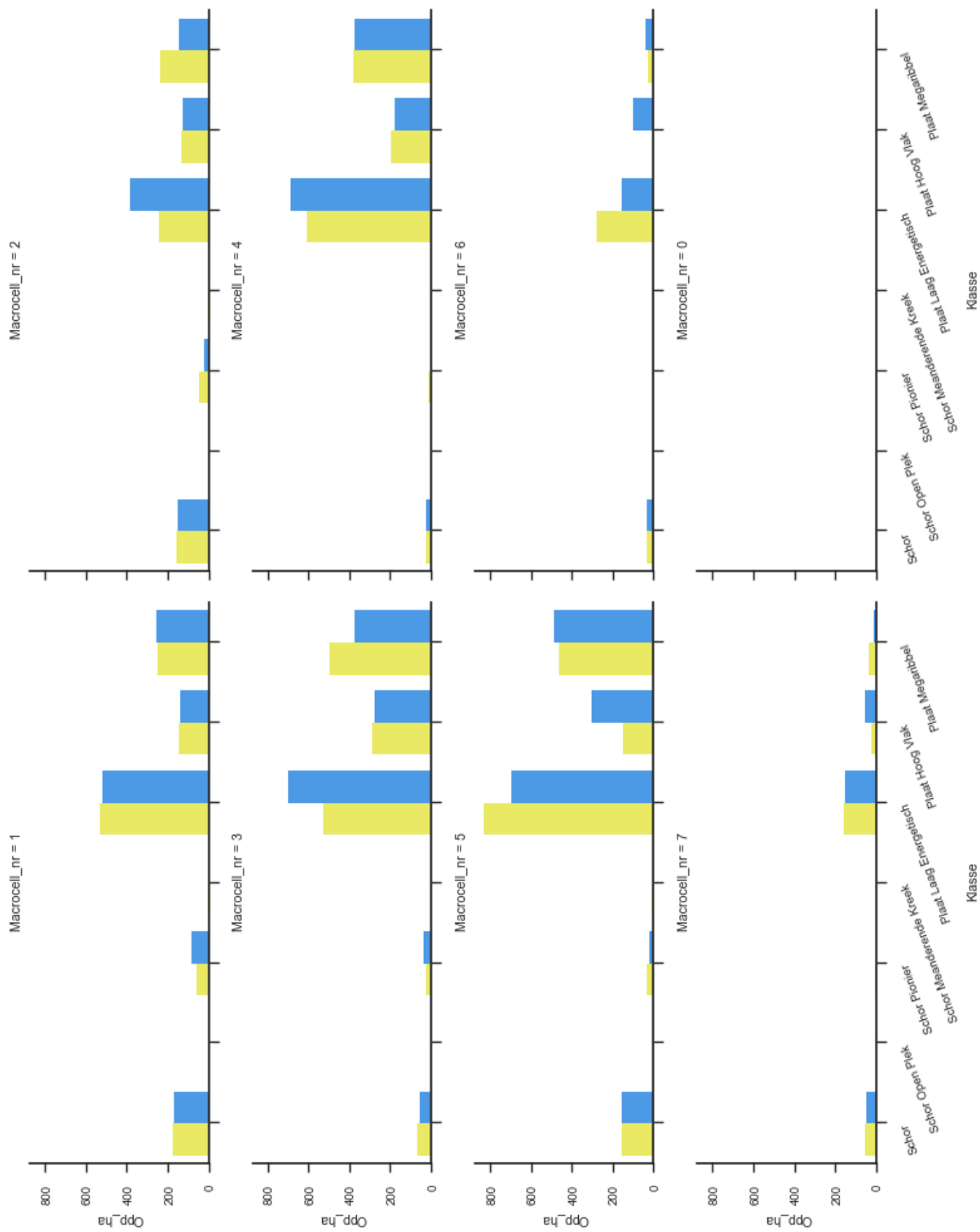
Figuur A2a. Voorbeeld van classificatie van objecten op Walsoorden in verschillende stappen in de ruleset. Bij Resultaat zijn de stappen per klasse samengevoegd en wordt de kleur van stap 1 aangehouden. MR – Megaribbel, HE- hoogenergetisch, LE - laagenergetisch.



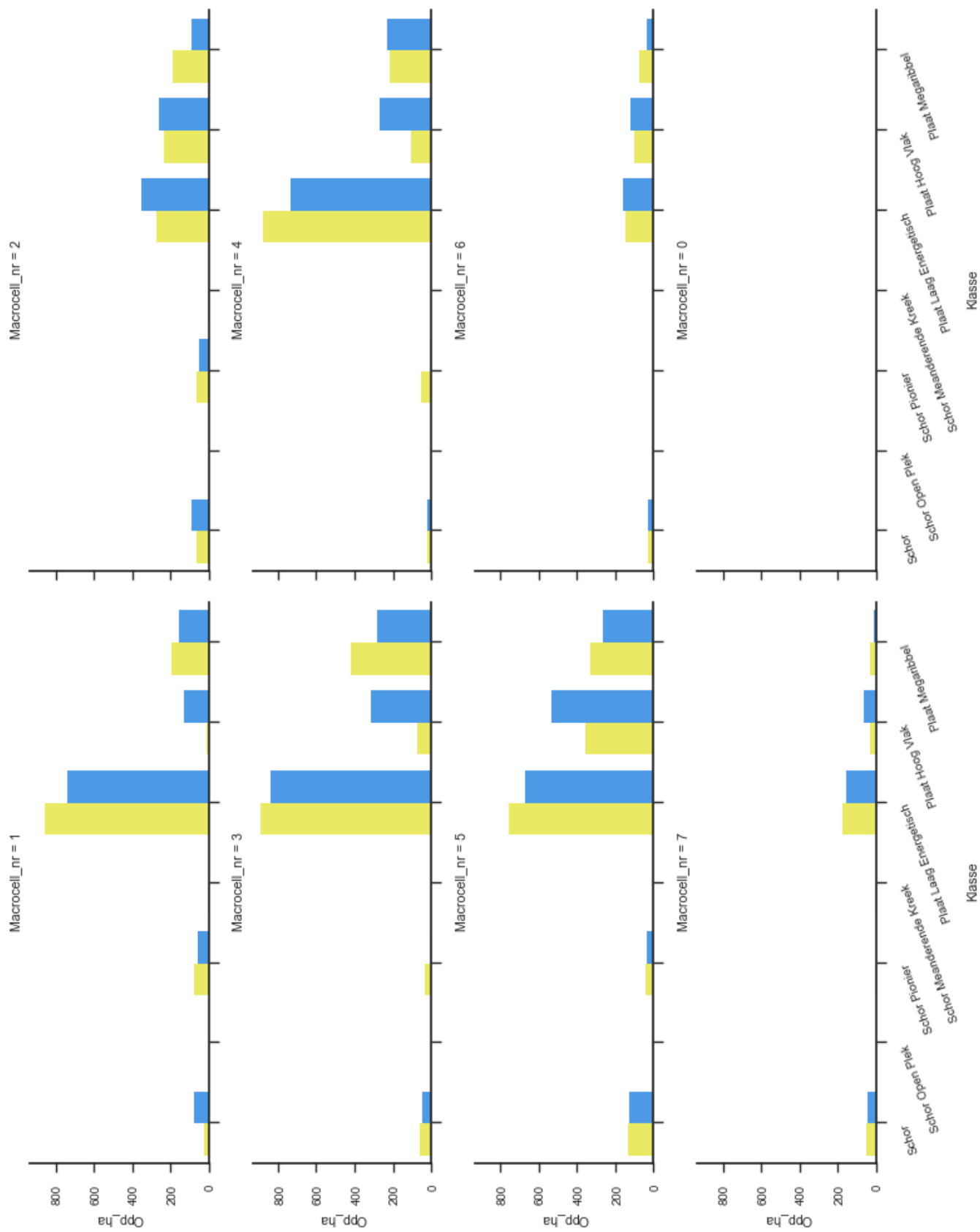
Figuur A2b. Voorbeeld van classificatie van objecten op de Plaat van Baarland in verschillende stappen in de ruleset. Bij Resultaat zijn de stappen per klasse samengevoegd en wordt de kleur van stap 1 aangehouden. MR – Megaribbel, HE- hoogenergetisch, LE - laagenergetisch.



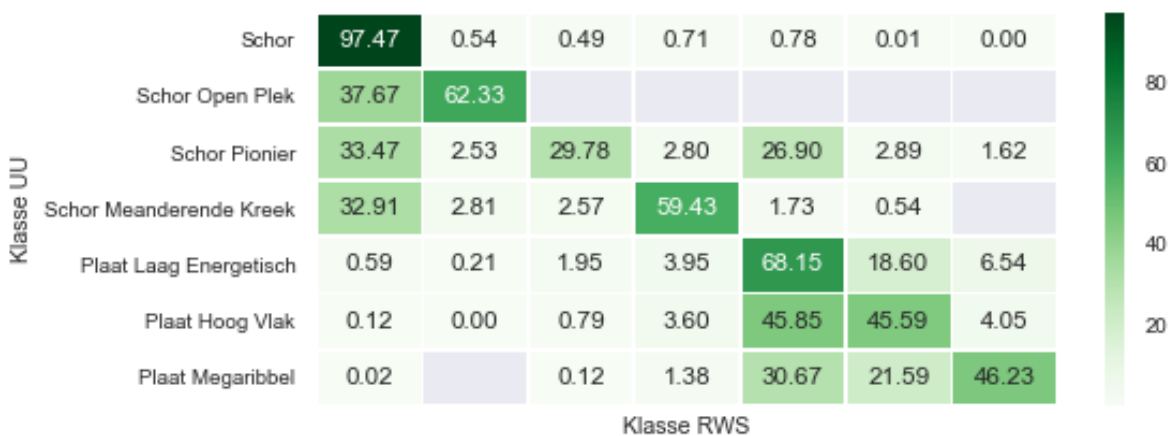
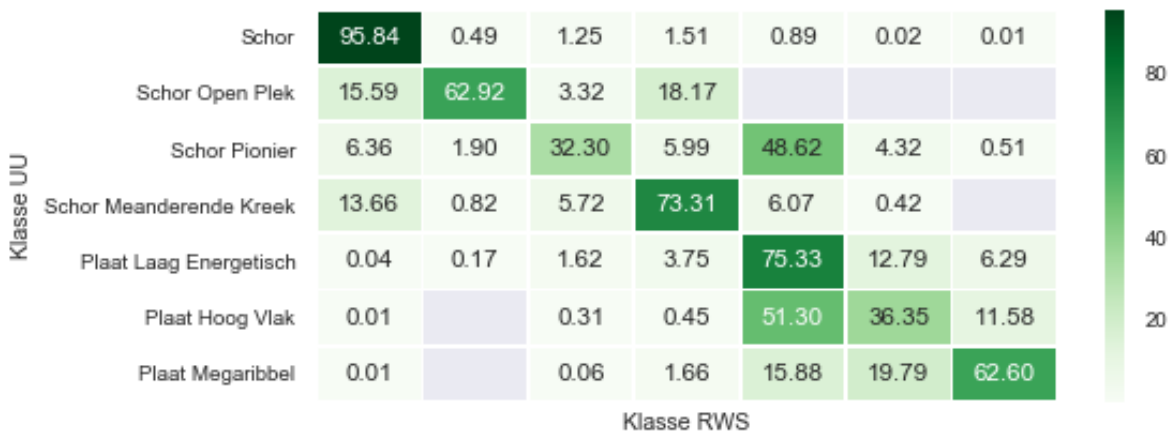
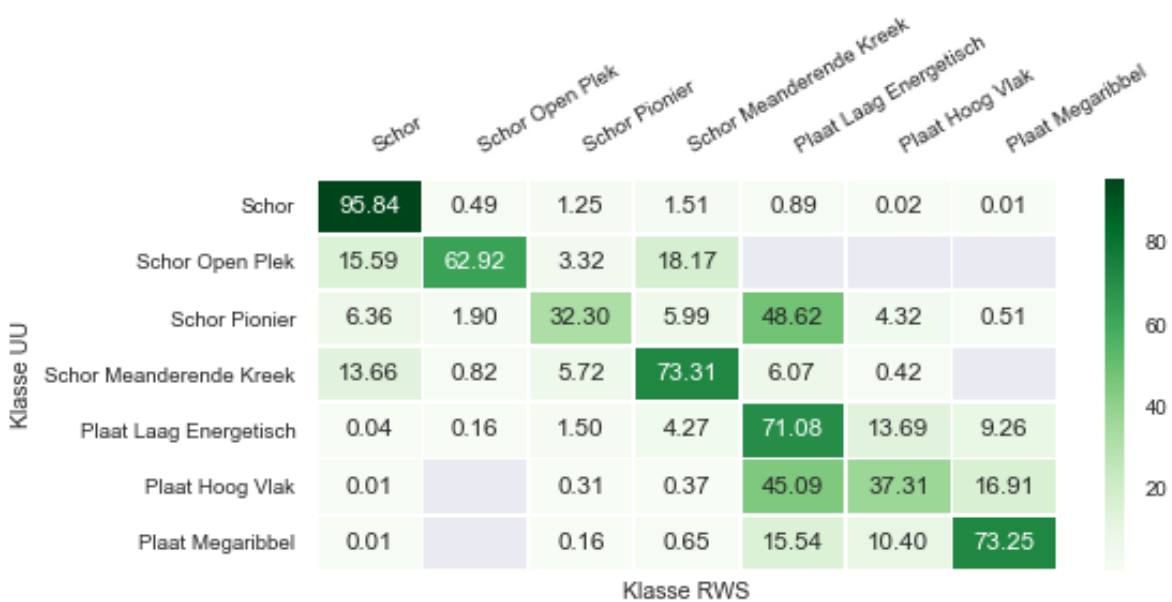
Figuur A6a. Arealen per geomorfologische klasse voor de automatische en handmatige methoden voor alle macrocellen voor 2016 zonder gebruikmaking van hoogte.



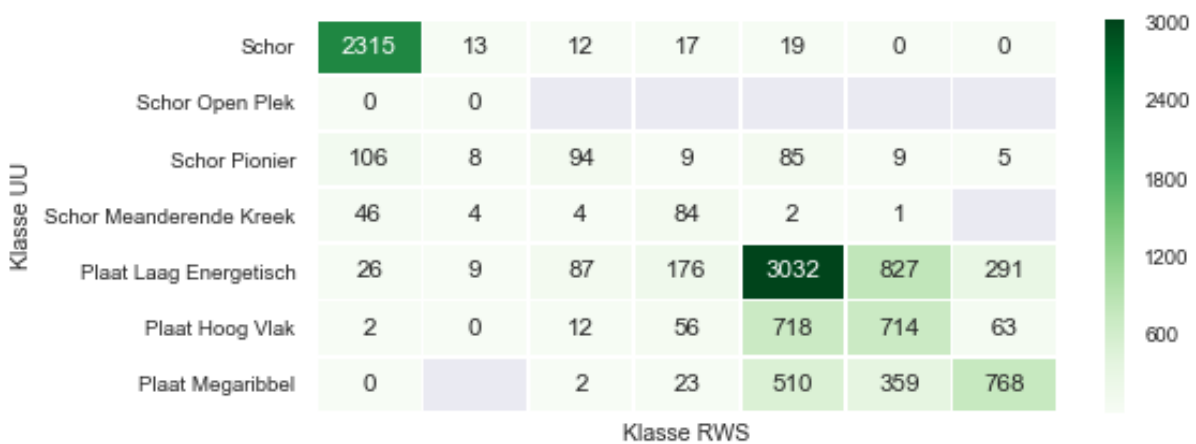
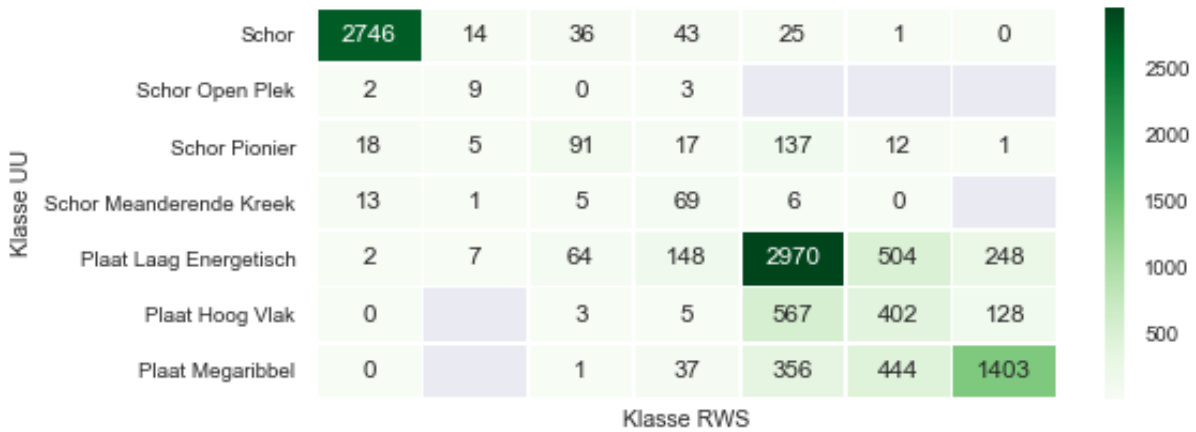
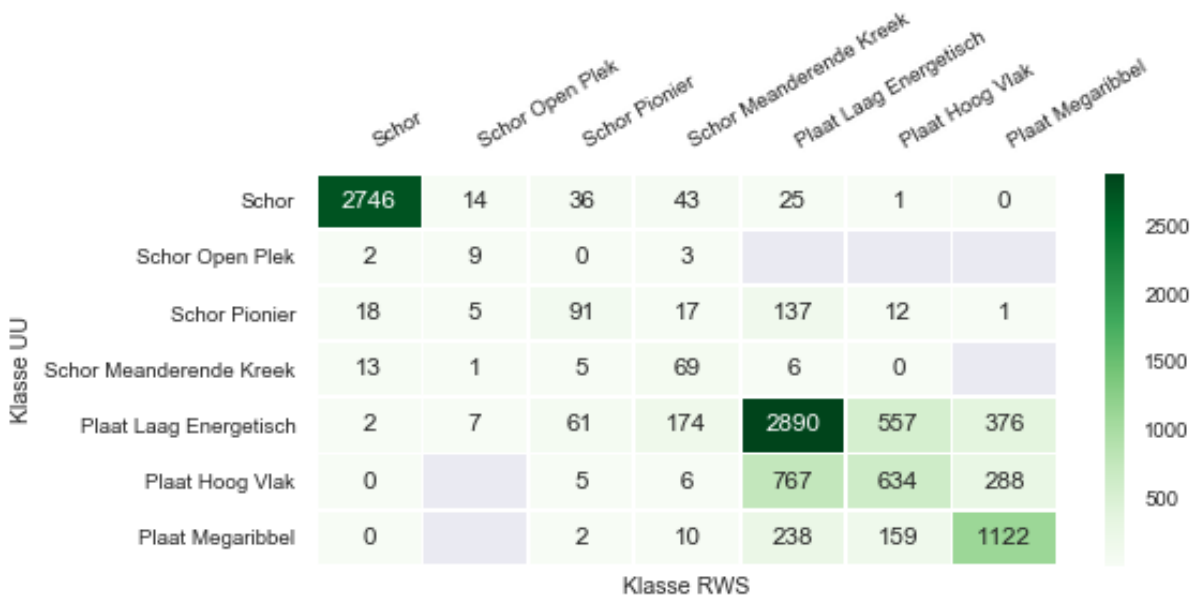
Figuur A6b. Arealen per geomorfologische klasse voor de automatische en handmatige methoden voor alle macrocellen voor 2016 met gebruikmaking van hoogte.



Figuur A5c. Arealen per geomorfologische klasse voor de automatische en handmatige methoden voor alle macrocellen voor 2010 zonder gebruikmaking van hoogte.



Figuur A8a. Overeenkomstig en verschillend geclassificeerd oppervlakte tussen de geautomatiseerde methode (rijen) en de handmatige (kolommen) in **percentages** van het totale oppervlak (boven, rijen tellen op tot 100%) voor 2016 zonder (boven) en met (midden) gebruikmaking van hoogte en voor 2010 (onder). Op de diagonaal van de matrices staan de overeenkomstig geclassificeerde arealen.



Figuur A8b. Overeenkomstig en verschillend geclassificeerd oppervlakte tussen de geautomatiseerde methode (rijen) en de handmatige (kolommen) in **hectares** voor 2016 zonder (boven) en met (midden) gebruikmaking van hoogte en voor 2010 (onder). Op de diagonaal van de matrices staan de overeenkomstig geclassificeerde arealen.

	Schor	Schor Open Plek	Schor Begroeid Strand	Schor Meanderende Kreek	Plaat Laag Energetisch	Plaat Hoog Vlak	Plaat Megaribbel	Total row (ha)	Total diagonal (ha)	Classification Accuracy (%)	Total Accuracy (%)
Klasse UU	Schor	2745.9	14.1	35.8	43.2	25.4	0.6	0.2	2865.1	95.8	
	Schor Open Plek	2.2	8.7	0.5	2.5				13.8	62.9	
	Schor Begroeid Strand	17.9	5.3	90.8	16.8	136.7	12.2	1.4	281.1	32.3	
	Schor Meanderende Kreek	12.8	0.8	5.4	68.8	5.7	0.4		93.8	73.3	
	Plaat Laag Energetisch	1.8	6.6	61.0	173.6	2890.5	556.7	376.4	4066.7	71.1	
	Plaat Hoog Vlak	0.2		5.3	6.2	766.9	634.5	287.6	1700.6	37.3	
	Plaat Megaribbel	0.1		2.4	10.0	238.1	159.3	1122.1	1532.0	73.2	
	Total column (ha)	2780.7	35.5	201.2	321.1	4063.2	1363.6	1787.8			
	Total diagonal (ha)									7561.2	
	User Accuracy (%)	98.7	24.5	45.1	21.4	71.1	46.5	62.8			
Total Accuracy (%)											71.6
Klasse UU added context	Schor	2745.9	14.1	35.8	43.2	25.4	0.6	0.2	2865.1	95.8	
	Schor Open Plek	2.2	8.7	0.5	2.5				13.8	62.9	
	Schor Pionier	17.9	5.3	90.8	16.8	136.7	12.2	1.4	281.1	32.3	
	Schor Meanderende Kreek	12.8	0.8	5.4	68.8	5.7	0.4		93.8	73.3	
	Plaat Laag Energetisch	1.7	6.6	64.0	147.9	2970.1	504.2	248.1	3942.6	75.3	
	Plaat Hoog Vlak	0.1		3.4	4.9	566.8	401.5	127.9	1104.7	36.3	
	Plaat Megaribbel	0.2		1.4	37.2	356.0	443.6	1403.2	2241.6	62.6	
	Total column (ha)	2780.8	35.5	201.2	321.4	4060.6	1362.5	1780.8			
	Total diagonal (ha)									7688.9	
	User Accuracy (%)	98.7	24.5	45.1	21.4	73.1	29.5	78.8			
Total Accuracy (%)											72.9
Klasse RWS											
Klasse UU	Schor	2314.7	12.9	11.6	16.8	18.6	0.2	0.0	2374.8	97.5	
	Schor Open Plek	0.1	0.2						0.3	62.3	
	Schor Begroeid Strand	105.8	8.0	94.1	8.9	85.0	9.1	5.1	316.0	29.8	
	Schor Meanderende Kreek	46.3	4.0	3.6	83.7	2.4	0.8		140.8	59.4	
	Plaat Laag Energetisch	26.4	9.3	86.7	175.7	3031.7	827.4	291.1	4448.4	68.2	
	Plaat Hoog Vlak	1.9	0.0	12.3	56.4	718.3	714.3	63.4	1566.7	45.6	
	Plaat Megaribbel	0.3		2.0	22.9	509.5	358.7	768.1	1661.5	46.2	
	Total column (ha)	2495.5	34.4	210.3	364.4	4365.5	1910.4	1127.8			
	Total diagonal (ha)									7006.7	
	User Accuracy (%)	92.8	0.5	44.7	23.0	69.4	37.4	68.1			
Total Accuracy (%)											66.7
Klasse RWS											

FiguurA11. 2016 zonder (boven) en met (midden) gebruikmaking van hoogte en 2010 (onder).