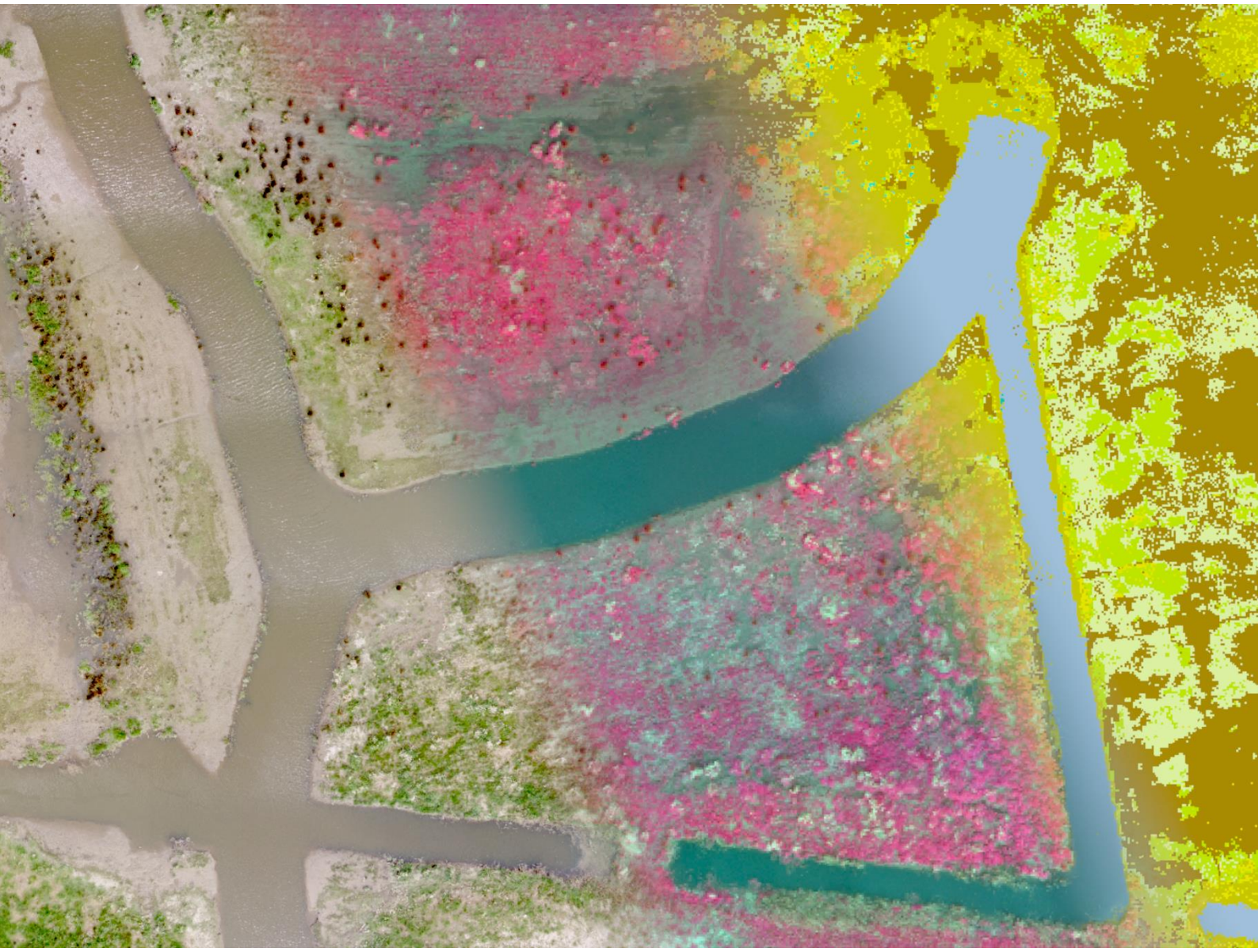
Remote sensing in de Noordwaard

Toegepast vegetatiestructuuronderzoek met geautomatiseerde classificatie



Amoun Mensink & Joost Boogaard

1 juni 2017

van hall larenstein
university of applied sciences

Bureau Waardenburg
Ecologie & Landschap

Remote sensing in de Noordwaard

Toegepast vegetatiestructuuronderzoek met geautomatiseerde classificatie

Auteur:	Amoun Mensink & Joost Boogaard
In opdracht van:	Bureau Waardenburg
Opleiding:	Bos- en Natuurbeheer op Hogeschool Van Hall Larenstein

Interne Publicatie:	Bureau Waardenburg bv; hogeschool Van Hall Larenstein
Plaats en datum:	Velp, 1 juni 2017
Omslagfoto:	Overgang van kleurenfoto via false colour infraroodfoto naar classificatieresultaat van een pilotgebied in de Noordwaard.

VOORWOORD

Deze scriptie is het slotstuk van de opleiding Bos- en Natuurbeheer op hogeschool Van-Hall Larenstein in Velp. Vanuit Bureau Waardenburg, in samenwerking met het Lectoraat Duurzaam Landschapsbeheer, hebben wij deze mooie kans gekregen om een vernieuwend onderzoek te doen. Namelijk de zoektocht naar een geschikte methode om met behulp van remote sensing de vegetatiestructuur in de Noordwaard te monitoren.

Dat wij ons onderzoek met behulp van vernieuwende technieken hebben uitgevoerd is ons niet altijd ten gunste gekomen. Al snel bleek dat de planning sterk afhankelijk werd van de levertijd van materiaal en de weersomstandigheden.

Gelukkig waren de personen en organisaties waar wij mee hebben mogen samenwerken ons beter gezind en is alles alsnog op zijn pootjes terecht gekomen. Daarvoor willen wij in het bijzonder onze begeleider vanuit Bureau Waardenburg Theo Boudewijn bedanken voor de goede begeleiding en mogelijkheden die hij ons heeft gegeven. Vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein willen wij Jack Schoenmakers bedanken voor de prettige samenwerking en in het bijzonder voor de privétijd die hij heeft opgeofferd om te zorgen dat onze planning toch gehaald kon worden. Ook willen we de mensen van DroneExpert bedanken voor het op zeer korte termijn in bruikleen geven van hun eigen multispectraalcamera. Tot slot bedanken we de vele personen die wij in verschillende contexten hebben geïnterviewd voor de prettige en verhelderende gesprekken.

Wij wensen u veel leesplezier toe,

Amoun Mensink & Joost Boogaard

Velp, 23 mei 2017

SAMENVATTING

Eind 2016 is vanuit o.a. Van Hall Larenstein en Bureau Waardenburg een KCNL project gestart voor integrale monitoring van begrazing in de Noordwaard met behulp van vernieuwende technieken. Een van de aspecten die onderzocht wordt is de vegetatiestructuurontwikkeling. Deze kennis kan gebruikt worden om de begrazing te sturen zodat er zo min mogelijk gemaaid hoeft te worden. Remote sensing (rs) wordt al langere tijd gebruikt om vegetatiestructuur te monitoren, maar de implementatie binnen het bedrijfsleven komt pas sinds kort op gang. Momenteel wordt de vegetatiestructuur in de Noordwaard in kaart gebracht met behulp van handmatige interpretatie van RGB luchtfoto's. Deze remote sensing techniek levert niet het gewenste resultaat. De hoofdvraag luidt dan ook: Wat is, ten opzichte van de huidige techniek, een betere techniek om met remote sensing de vegetatiestructuurontwikkeling in de Noordwaard te monitoren?

Om de hoofdvraag te beantwoorden is eerst literatuuronderzoek gedaan naar de bestaande technieken voor inwinning van gegevens en classificatie met remote sensing. Op basis van interviews met belanghebbenden van het onderzoek zijn criteria opgesteld, waaraan een vegetatiestructuurkaart moet voldoen. Vervolgens zijn deze criteria uitgewerkt tot technische eisen. Door technieken uit de literatuur te toetsen aan de eisen en de randvoorwaarden van het onderzoek zijn 24 technieken geselecteerd die haalbaar zijn om te testen in drie pilotgebieden. Deze technieken zijn unieke combinaties tussen spectrale banden (RGB, R, G, RE, NIR, CHM), resolutie (10, 25, 50 en 100cm) en classificatiemethodes in ArcGIS (MLC, SVM, Object Based). Er zijn luchtfoto's gemaakt met een onder een drone gemonteerde multispectraalcamera. De pilotgebieden zijn geselecteerd, omdat ze samen representatief zijn voor de vegetatiestructuur in de Noordwaard en omdat hier kan worden voldaan aan de wettelijke en praktische beperkingen van de drone. In deze pilotgebieden zijn vegetatiestructuuropnames gemaakt ten behoeve van een trainings- en validatieset voor de classificatie. De luchtfoto's zijn verwerkt tot orthofoto's en een DSM. Uit deze orthofoto's zijn rasters samengesteld met de bandcombinaties van de 24 technieken. Deze zijn geclassificeerd volgens de bovengenoemde classificatiemethodes met behulp van de trainingsset. Het resultaat van de classificatie volgens de 24 rs-technieken is gevalideerd aan de hand van de validatieset. De twee beste technieken zijn vergeleken met validatieresultaten van in 2016 door Bureau Waardenburg gemaakte vegetatiestructuurkaarten. Tot slot is aan de hand van een interview met Skeye BV bepaald of de beste techniek opgeschaald kan worden naar toepassing in het gehele studiegebied. Ook is bepaald of de beste onderzochte techniek voldoet aan de criteria van de belanghebbenden.

Uit de resultaten van de classificatie blijkt dat de orthofoto's per pilotgebied verschil in kwaliteit vertonen, vermoedelijk door wisselende weersomstandigheden en missende kalibratie. Ook is het duidelijk dat de verschillende bandcombinaties, resoluties en classificatiemethodes invloed hebben gehad op het resultaat. Uit de validatie blijkt dat de rs-techniek, bestaande uit de bandcombinatie G, R, NIR, RE en CHM met een resolutie van 25cm en geclassificeerd volgens MLC, de beste techniek is. Deze techniek is ook op te schalen naar toepassing in het gehele studiegebied en voldoet aan de meeste eisen van belanghebbenden. Omdat de nieuwe techniek een verbetering is op kwaliteit vanwege een hogere nauwkeurigheid en het haalbaar is om de techniek uit te voeren in het gehele studiegebied kan geconcludeerd worden dat de hierboven beschreven rs-techniek een betere techniek is om de vegetatiestructuur in het studiegebied in de Noordwaard te monitoren dan de huidig toegepaste methode. Vegetatiestructuurklassen die veel weerstand hebben als riet en lisdodde zijn echter niet goed te onderscheiden maar als er met goede weersomstandigheden en later in het groeiseizoen luchtfoto's worden gemaakt zou een betrouwbaarder resultaat geboekt kunnen worden. Dit zal nader onderzocht moeten worden.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting

Verklarende Woordenlijst

1 Inleiding ... 9

1.1 Probleembeschrijving en analyse ... 10

1.2 Onderzoeksvraag ... 10

1.3 Deelvragen ... 10

1.4 Randvoorwaarden ... 11

1.5 Doelstelling ... 11

1.6 Leeswijzer ... 11

2 Methode & Werkwijze ... 13

2.1 Deelvraag 1 Literatuuronderzoek ... 13

2.2 Deelvraag 2 Criteria Belanghebbenden ... 13

2.3 Deelvraag 3 Technische Eisen ... 13

2.4 Deelvraag 4 Kansrijke Technieken ... 14

2.5 Deelvraag 5 Selectie Pilotgebieden ... 14

2.6 Deelvraag 6 Vegetatieopnames ... 14

2.7 Deelvraag 7 Luchtfoto's & Classificatie ... 15

2.8 Deelvraag 8 Validatie ... 16

2.9 Deelvraag 9 Vergelijking huidige techniek ... 17

2.10 Deelvraag 10 Opschaling ... 17

2.11 Deelvraag 11 Toetsing criteria belanghebbenden ... 18

2.12 Conclusie en aanbevelingen ... 18

3 Literatuuronderzoek ... 19

3.1 Technieken inwinning ... 19

3.1.1 Spectrale banden ... 19

3.1.2 Vegetatiehoogte ... 21

3.1.3 Resolutie ... 23

3.2 Technieken classificatie ... 24

3.2.1 Minimum-Distance Classifier ... 25

3.2.2 Parallelepiped Classifier ... 25

3.2.3 Maximum likelihood ... 25

3.2.4 Support vector machine ... 25

3.2.5 Object based ... 26

3.3 Aanvullende informatie ... 26

3.3.1 Detailniveau vegetatieclassificatie ... 27
3.3.2 Wettelijke en praktische beperking drone ... 27
4 Resultaten ... 29
4.1 Criteria rs-technieken ... 29
4.1.1 Eisen belanghebbenden ... 29
4.1.2 Technische eisen en mogelijkheden ... 30
4.2 Kansrijke rs-technieken ... 30
4.3 Geselecteerde pilotgebieden ... 31
4.4 Classificatie vegetatiestructuuropnames ... 32
4.5 Classificatie rs-technieken ... 32
4.5.1 Resultaat orthofoto's ... 32
4.5.2 Resultaat hoogtemodel ... 34
4.5.3 Resultaat classificatie ... 34
4.6 Validatie rs-technieken ... 36
4.6.1 Resultaten rs-technieken ... 36
4.6.2 Validatieresultaten per pilotgebied ... 38
4.6.3 Validatieresultaten per klasse ... 38
4.6.4 Classificatie met minder klassen ... 39
4.7 Vergelijking met huidige techniek ... 40
4.7.1 Resultaat validatie huidige rs-techniek ... 40
4.7.2 Vergelijking met rs-technieken ... 41
4.8 Opschaling techniek ... 42
4.9 Toetsing van eisen ... 42
5 Discussie ... 43
6 Conclusie & aanbevelingen ... 47
6.1 Conclusie ... 47
6.2 Aanbevelingen ... 48
Bronvermelding ... 49
Bijlagen ... 53
Bijlage A Methodeschema ... 55
Bijlage B Beslisregels vegetatiestructuuropnames ... 57
Bijlage C Vertaaltabel vegetatiestructuurtypen ... 59
Bijlage D Volledige tabel technische eisen ... 61
Bijlage E Accuracy en kappa per pilotgebied ... 63
Bijlage F Accuracy en kappa per klasse ... 65
Bijlage G Verslag interview Skeye BV ... 67

Bijlage H Toetsing van eisen belanghebbenden 69
Bijlage I Studiegebied Noordwaard 71
Bijlage J Detail Pilotgebieden 73
Bijlage K Detail Pilotgebieden False Colour 75
Bijlage L Voorbeeld Classificaties D025 77
Bijlage M Classificatie met hoogste accuracy, B010 79
Bijlage N Classificatie met hoogste accuracy, D025 81
Bijlage O Classificatie met laagste accuracy, E010m 83
Bijlage P Classificatie met gereduceerd aantal klassen, D025 85

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Accuracy	Nauwkeurigheid classificatie, percentage correct geclassificeerde punten in de validatieset.
Balance Index (BI)	De Balance Index weegt de mate van misclassificatie, er wordt aangenomen dat verschillende klassen meer of minder overeenkomsten hebben. Misclassificatie tussen klassen met veel overeenkomst wordt als minder erg beschouwd dan misclassificatie tussen klassen die weinig overeenkomst vertonen.
Band	Reeks golflengtes in het elektromagnetische spectrum dat tot één informatiebron wordt gerekend. Vaak worden alle golfengtes die een sensor kan opnemen tot één band gerekend.
Canopy Height Model (CHM)	Kroonhoogtemodel, een hoogtekaart van de vegetatiehoogte. Wordt vaak samengesteld uit een DSM minus DTM.
Digital Elevation Model (DEM)	Digitaal hoogtemodel, verzamelnaam voor DSM's of DTM's (zie hieronder).
Digital Terrain Model (DTM)	Digitaal terreinmodel, een hoogtekaart van het maaiveld.
Digital Surface Model (DSM)	Digitaal oppervlaktemodel, een hoogtekaart het aardoppervlak inclusief gebouwen, kunstwerken en vegetatie.
Drone	Onbemand luchtvaartuig. Een luchtvaartuig zonder piloot aan boord. Wordt ook vaak aangeduid als UAV (Unmanned Aerial Vehicle).
False Colour foto	Foto waarin de kleur van één of meerdere banden is vervangen voor een andere kleur. Wordt vaak gebruikt om informatie die niet voor het menselijk oog zichtbaar is (bijv. infrarood) te visualiseren.
Georeferentie	Het toekennen van een coördinatensysteem aan een kaart of foto zodat de geografische locatie van objecten op de kaart of foto bepaald kan worden.
Ground Control Points (GCP)	In het veld aanwezige referentiepunten waarvan de locatie (X,Y,Z) bekend is en die herkenbaar zijn op de luchtfoto's ten behoeve van georeferentie.
Ground Sample Distance (GSD)	Afstand die één pixel op een foto bedraagt in het veld, het is een maat voor de schaal van een foto. Wordt ook wel aangeduid met resolutie, maar dit kan verwarrend zijn omdat resolutie ook voor andere eigenschappen van een foto gebruikt wordt.
Kappa	Cohens kappa is het percentage correct geclassificeerde punten in de validatieset, gecorrigeerd voor toevallige overeenstemming.
Multispectraal	Bevat of heeft betrekking op meerdere spectrale banden. De typische hoeveelheid banden is drie tot vijftien. In dit onderzoek heeft het betrekking op bandcombinaties die deels buiten het zichtbare spectrum vallen.
Near Infrared (NIR)	Lichtspectrum met golflengtes tussen 780 en 3000 nm. Bevind zich tussen rood en mid-infrarood. Wordt sterk gereflecteerd door o.a. levende vegetatie. Niet zichtbaar voor het menselijk oog.
Orthofoto	Een voor reliëf, vertekening en kijkhoek gecorrigeerde luchtfoto.
Red Edge (RE)	Het relatief smalle spectrum tussen rood en infrarood licht. Zeer gevoelig voor variaties in chlorofylgehalte.
RGB-foto	Ook wel 'true colour' foto genoemd. RGB staat voor rood, groen en blauw, ofwel de basiskleuren die binnen het visuele spectrum van de mens liggen.
Remote sensing (rs)	Het op afstand inwinnen van gegevens, in dit onderzoek beperkt tot het inwinnen van luchtbeelden met behulp van drones, vliegtuigen of satellieten.
Structure from Motion (SfM)	Digitale fotogrammetrietechniek om een 3D-model te maken van overlappende foto's, waarbij de camera langs het onderwerp bewogen wordt.

1 INLEIDING

Medio 2016 is het KennisCentrum Natuur en Leefomgeving (KCNL) opgericht. In dit samenwerkingsverband tussen bedrijfsleven, onderwijs en overheden, wordt gezocht naar innovatieve oplossingen voor maatschappelijke vraagstukken binnen de groene ruimte en leefomgeving (KCNL, 2016). Aanleiding voor de oprichting is de publicatie van de Human Capital Agenda Natuur en Leefomgeving (Dijksma et al., 2014), waar in gepleit wordt voor betere samenwerking tussen de bovengenoemde groepen om nieuw talent voor de groene sector op te leiden. Vanuit het KCNL kunnen projecten gefinancierd worden die bijdragen aan de doelstellingen van het samenwerkingsverband.

Eind 2016 is vanuit o.a. hogeschool Van Hall Larenstein, Free Nature, Rijkswaterstaat, Gebr. Van Kessel en Bureau Waardenburg bv een KCNL project gestart voor Integrale monitoring van de effecten van begrazing in de Noordwaard.

De Noordwaard is een recent ingericht hoogwaterdoorstroomgebied gelegen bij de Brabantse Biesbosch. In dit gebied zijn onder andere dijken aangepast en kreken gegraven, waarvan sommige in verbinding staan met het Hollands Diep en onderhevig zijn aan getijde invloed. Een groot deel van de landbouwgrond is omgevormd naar doorstroomgebied met als nevenfunctie natuur en wordt deels begraasd door waterbuffels, koniks, schotse hooglanders en schapen. Om de doorstroming van het gebied te garanderen wordt er naast begrazing in de herfst aanvullend maaibeheer uitgevoerd.

De betrokken partijen willen hier onderzoek doen naar de hydrologische, ecologische, sociale en economische effecten van begrazing. Hierbij ligt het zwaartepunt op testen van vernieuwende monitoringstechnieken zoals vegetatieonderzoek met drones en biomonitoring van de begrazing, met behulp van gezenderde halsbanden (Schoenmakers, 2016).

Remote sensing (rs) wordt al langere tijd gebruikt om vegetatieontwikkeling te monitoren (Assendorp, 2010; Bubberman & Swellen Grebbel,1955). Voor vegetatieonderzoek wordt voornamelijk gebruik gemaakt van spectrale data en bijbehorende digitale analysetechnieken (Wang, Franklin, Guo, & Cattet, 2010; Xie, Sha, & Yur, 2008). Tot voor kort was deze techniek erg prijzig of niet goed toepasbaar in kleinschalige gebieden. Met de recente opkomst van commerciële drones en de bredere beschikbaarheid van betere satellietbeelden zou dit kunnen veranderen (Salami, Barrado, & Pastor, 2014). Remote sensing kan dan bijdragen aan een efficiëntere verzameling van veldgegevens en, afhankelijk van het gebruikte platform (drone, vliegtuig of satelliet), de verstoring die daarmee gepaard gaat verminderen omdat er minder veldwerk noodzakelijk is.

Er is al veel wetenschappelijk onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van verschillende remote sensing technieken binnen landbouw en natuurbeheer (Franklin, 2001; Schmidt, Piórkowski, & Bartoszuk, 2000; Thenkabail, Eden, Ashton, & Van Der Meer, 2004). De implementatie van deze technieken binnen het bedrijfsleven komt echter pas sinds kort op gang. Er wordt druk gespeculeerd over toepassingen (Van Der Wal, Meijer, & Rip, 2016) maar deze technieken worden nog niet grootschalig toegepast in monitoring en beheer.

Dit onderzoek richt zich binnen het KCNL project op de toepasbaarheid van remote sensing (met behulp van drones) voor de monitoring van de vegetatiestructuurontwikkeling in de Noordwaard. Binnen dit project kunnen de resultaten van dit onderzoek gebruikt worden om een monitoringsplan voor de effecten van begrazing op te stellen. Met behulp van deze monitoringsgegevens kunnen vervolgens de hydrologische en ecologische effecten van de begrazing binnen het KCNL project nader onderzocht worden.

1.1 Probleembeschrijving en analyse

Een deel van de Noordwaard wordt beheerd met grote grazers met in het najaar aanvullend maaibeheer. Zo kan de ontwikkeling van soorten die veel weerstand hebben, zoals riet en lisdodde, worden afgeremd. Rijkswaterstaat heeft, in het kader van de hoogwaterveiligheid, bepaald dat op 1 november de vegetatie maximaal 6, 10, of 30 cm hoog mag zijn, afhankelijk van de locatie.

Om aan deze verplichting te kunnen voldoen worden zes maal per jaar een orthofoto (een voor reliëf, vertekening en kijkhoek gecorrigeerde luchtfoto) en een hoogtekaart van het gebied gemaakt die als basis dienen voor een vegetatiestructuurkaart. De laatstgenoemde kaart wordt twee maal per jaar gemaakt en wordt gebruikt ter onderbouwing van het bepalen van de maailocaties en het verdere beheer.

De inwinning en productie van de orthofoto en de hoogtekaart worden uitgevoerd door Skeye BV. Dit bedrijf produceert de orthofoto en de hoogtekaart met behulp van fotogrammetriesoftware uit een verzameling RGB-luchtfoto's. Bureau Waardenburg verwerkt deze data doormiddel van handmatige interpretatie tot een vegetatiestructuurkaart.

Deze handmatige interpretatie is tijdrovend en niet consistent. Tevens is de indeling in structuurtypen en bijbehorende spectrale eigenschappen niet gevalideerd met veldgegevens. Tot slot heeft een eerder onderzoek naar de mogelijkheden van geautomatiseerde beeldclassificatie met de huidig ingewonnen beelden niet het gewenste resultaat geleverd. Twee specifieke problemen die optreden zijn overlappende spectrale eigenschappen van verschillende structuurklassen en lokaal ontbrekende vegetatiehoogte (Mensink, 2017). Daardoor levert deze remote sensing-techniek (rs-techniek), op basis van gewone luchtfoto’s, onvoldoende inzicht in de vegetatieontwikkeling van de Noordwaard. Dit geldt zowel voor de onderbouwing van het maaibeheer als voor de vegetatiestructuurmonitoring die in een later stadium van het KCNL-project nodig is.

1.2 Onderzoeksvraag

Wat is, ten opzichte van de huidige techniek, een betere techniek om met remote sensing de vegetatieontwikkeling in de Noordwaard te monitoren?

1.3 Deelvragen

1. Wat zijn de in de literatuur beschreven technieken voor vegetatiemonitoring met behulp van remote sensing?
2. Welke criteria stellen de belanghebbenden van de monitoring aan de inwinning van gegevens, het resultaat en (kosten-)efficiëntie?
3. Aan welke technische criteria moet de rs-techniek voldoen voor een bruikbaar resultaat?
4. Welke rs-technieken zijn het meest kansrijk om het gewenste resultaat voor de belanghebbenden te verkrijgen?
5. Welke gebieden worden geselecteerd als pilotgebied?
6. Welke vegetatiestructuurtypen komen aan de hand van vegetatieopnames voor in de pilotgebieden?
7. Welke vegetatiestructuurtypen geven de verschillende rs-technieken in de pilotgebieden?
8. Van welke rs-techniek komen de resultaten het meest overeen met het resultaat van de vegetatieopnames?
9. Biedt het resultaat van de meest overeenkomende rs-techniek een verbetering ten opzichte van de huidig toegepaste techniek?
10. Kan de meest overeenkomende rs-techniek opgeschaald worden naar toepassing in het hele studiegebied binnen de Noordwaard?
11. Voldoet de meest overeenkomende rs-techniek aan de criteria van de belanghebbenden?

1.4 Randvoorwaarden

- Het studiegebied beperkt zich tot het doorstroomgebied van de Noordwaard. Zie Bijlage I voor een overzichtskaart van de exacte begrenzing.
- Als belanghebbenden van het onderzoek zijn bepaald: Rijkswaterstaat, Bureau Waardenburg, Gebr. Van Kessel, FREE Nature en Van Hall Larenstein.
- Alleen rs-technieken die uitvoerbaar zijn met de door Van Hall Larenstein beschikbaar gestelde drone en camera zijn onderzocht.
- De onderzochte rs-technieken zijn gevalideerd aan de hand van pilotgebieden die representatief zijn voor de relevante vegetatiestructuurtypen van het studiegebied in de Noordwaard.
- Het aantal pilotgebieden is beperkt door de tijd die voor veldwerk beschikbaar is vanuit de projectplanning.
- Het veldwerk is uitgevoerd in de maanden april en mei in verband met de onderzoeksperiode.
- De vegetatie is geclassificeerd op het structuurniveau dat door Gebr. Van Kessel en Bureau Waardenburg wordt gehanteerd. Dit gebeurt handmatig.
- Er is gezocht naar één methode waar zoveel mogelijk partijen baat bij hebben. De prioriteit ligt hierbij bij de bruikbaarheid van de gegevens voor Bureau Waardenburg en Gebr. Van Kessel.
- Een betere rs-techniek, zoals beschreven in de hoofdvraag, moet een verbetering bieden op kwaliteit, kosten of efficiëntie ten opzichte van de huidig toegepaste monitoringstechnieken, zonder in te leveren op de overige aspecten.

1.5 Doelstelling

Vaststellen of de toepassing van een aangepaste vorm van remote sensing kan bijdragen aan het efficiënt en effectief monitoren van de vegetatiestructuurontwikkeling in het studiegebied in de Noordwaard aan de hand van pilotgebieden.

1.6 Leeswijzer

Als eerste worden in hoofdstuk 2 de werkwijze en de daarbij gehanteerde methodes beschreven per deelvraag. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens een samenvatting gegeven van het literatuuronderzoek naar zowel inwinnings- als classificatietechnieken voor vegetatiestructuurmonitoring met behulp van remote sensing. De resultaten met de antwoorden op de overige deelvragen worden in hoofdstuk 4 gepresenteerd. Elke paragraaf behandelt een andere deelvraag. De gehanteerde methodes en de resultaten worden in hoofdstuk 5 bediscussieerd. Tot slot wordt in hoofdstuk 6 bij de conclusie antwoord gegeven op de hoofdvraag aan de hand van de antwoorden op de deelvragen en worden er aanbevelingen gedaan met betrekking tot de doelstelling van het onderzoek. Vaktermen worden uitgelegd in de verklarende woordenlijst die na de inhoudsopgave is opgenomen.

2 METHODE & WERKWIJZE

De werkwijzen en de daarbij gehanteerde methoden zijn beschreven per deelvraag. Na beantwoording van de deelvragen in de resultaten wordt in de conclusie en aanbevelingen antwoord gegeven op de hoofdvraag. In bijlage A staat een schema van de gehanteerde methode en werkwijze.

2.1 Deelvraag 1 Literatuuronderzoek

Wat zijn de in de literatuur beschreven technieken voor vegetatiemonitoring met behulp van remote sensing?

Er is literatuuronderzoek gedaan naar bestaande methodes voor vegetatiemonitoring met behulp van remote sensing. Hierbij is specifiek gezocht naar oplossingen voor de in de probleemstelling beschreven punten (spectrale overlap en ontbrekende vegetatiehoogte). De resultaten zijn in een samenvatting weergegeven. Zo ontstaat een overzicht van verschillende methodes die in deelvraag 4 verder gebruikt gaan worden. Het literatuuronderzoek beperkt zich tot internetbronnen, wetenschappelijke literatuur en interviews met ervaringsdeskundigen.

2.2 Deelvraag 2 Criteria Belanghebbenden

Welke criteria stellen de belanghebbenden van de monitoring aan de inwinning van gegevens, het resultaat en (kosten)efficiëntie?

De criteria die de belanghebbenden stellen aan de inwinning van gegevens en het resultaat is vastgesteld aan de hand van interviews. Van deze interviews is een samenvatting geschreven. Uit deze samenvatting is een tabel gemaakt waarin wordt weergegeven welke criteria de belanghebbenden stellen.

De vragen die gesteld zijn:

- In welk aspect van de verzamelde data is er interesse: terreinhoogte, vegetatiehoogte, structuur, specifieke soorten ect.?
- Welk classificatieniveau van vegetatiestructuurkartering is gewenst?
- Welk ruimtelijk detailniveau moeten de gegevens hebben?
- Met welke frequentie moet data verzameld worden?
- Hoeveel invloed mag de nieuwe rs-techniek hebben op de kosten en efficiëntie?

2.3 Deelvraag 3 Technische Eisen

Aan welke technische criteria moet de rs-techniek voldoen voor een bruikbaar resultaat?

Op basis van de criteria van de belanghebbenden en de probleemstelling die geschetst is, is bepaald aan welke technische eisen de rs-techniek moet voldoen, zodat de inwinning van de gegevens en het bijbehorende resultaat gerealiseerd worden.

Technische aspecten die zijn beschreven:

- Te gebruiken banden (infrarood, red edge, rgb, ect.)
- Benodigde sensor (multispectraal, lidar, ect.)
- Resolutie van de luchtfoto’s en de daarbij horende vlieghoogte
- Benodigde aanvullende gegevens (hoogtemodel, ect.)

Deze aspecten zijn toegevoegd aan de tabel, met de eisen van de belanghebbenden, uit deelvraag 2 en zo ontstaat er een nieuwe tabel. Hierdoor ontstaat een overzicht welke technische aspecten bij de criteria van de belanghebbenden horen. Een samenvatting van deze tabel wordt als resultaat gegeven.

2.4 Deelvraag 4 Kansrijke Technieken

Welke rs-technieken zijn het meest kansrijk om het gewenste resultaat voor de belanghebbenden te verkrijgen?

De rs-technieken die zijn samengevat in het literatuuronderzoek voor deelvraag 1, zijn vergeleken met de criteria van de belanghebbenden en de bijbehorende technische aspecten. Daarnaast zijn de rs-technieken getoetst aan de technische beperkingen zoals beschreven in de randvoorwaarden. Rs-technieken die grotendeels overeenkomen met de criteria en technische aspecten worden kansrijk geacht. Wanneer conflicten ontstaan tussen meerdere criteria is het criterium gekozen waar de meeste partijen baat bij hebben. De kansrijk geachte rs-technieken zijn getest in de pilotgebieden.

2.5 Deelvraag 5 Selectie Pilotgebieden

Welke gebieden worden geselecteerd als pilotgebied?

Op basis van de criteria uit deelvragen 2 en 3 en de randvoorwaarden zijn het aantal, de locatie en oppervlakte van de pilotgebieden bepaald. De vegetatiestructuurclassificatie en de benodigde beeldresolutie zijn hierbij leidend. De pilotgebieden hebben een mozaïek van verschillende vegetatiestructuurtypen. Daarnaast zijn alle in het studiegebied voorkomende typen minstens één keer vertegenwoordigd, met uitzondering van bos en struweel. Daarnaast voldoen de pilotgebieden aan de praktische en juridische beperkingen van het gebruik van de drone.

2.6 Deelvraag 6 Vegetatieopnames

Welke vegetatiestructuurtypen komen aan de hand van vegetatieopnames voor in de pilotgebieden?

De eerste stap in het beantwoorden van deze deelvraag is het maken van vegetatieopnames in de pilotgebieden. In elk pilotgebied zijn systematisch vegetatiestructuuropnames gemaakt volgens een raster met een interval van 15 meter. De cirkelvormige plots hebben een straal van 20 cm. In het veld is de beoordeling gemaakt of het plot een uniforme vegetatiestructuur had, en de locatie is zo nodig aangepast om uniformiteit te garanderen. Per vegetatiestructuurtype is gepoogd om minimaal 50 plots op te nemen om zo de validatie statistisch te kunnen onderbouwen (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015). Van vegetatiestructuurtypen die in de systematische opnames weinig voorkwamen, zijn zoveel mogelijk aanvullende punten opgenomen.

Er zijn nog meer methodes voor het verzamelen van veldgegevens (cluster sampling, stratified random sampling enz.). Er is voor de systematische methode gekozen omdat zo het meest efficiënt veel opnames konden worden verzameld.

De vegetatiestructuurtypen die in het veld zijn onderscheiden zijn de klassen zoals beschreven in de beslisregels in Bijlage B. De klassen ‘struweel’ en ‘bos’ zijn in niet in het veld opgenomen vanwege het ontbreken van deze structuurtypen in de pilotgebieden. Bos kwam voorheen wel voor in pilotgebied 2 maar dit bos is inmiddels afgestorven en daarmee niet representatief voor het type ‘bos’.

Een andere methode om tot een klasse-indeling te komen is door op de orthofoto's structuren te onderscheiden en hiervan in het veld het vegetatietype te bepalen. Deze klasse-indeling heeft waarschijnlijk minder overlap tussen klassen. Het nadeel van een dergelijke indeling is dat deze mogelijk voor beheer en monitoring onpraktische klassen krijgt. Daarom wordt deze methode in dit onderzoek niet toegepast.

De opnames zijn als volgt uitgevoerd, bij elke opname wordt per plot met behulp van een Trimble GPS (XYZ coördinaten en nauwkeurigheid van ca. 2 cm) de precieze locatie van het middelpunt van de plot bepaald. Vervolgens is van de plot het vegetatiestructuurtype, de maximale vegetatiehoogte en, wanneer aanwezig, de naam van de dominante soort genoteerd.

Daarnaast zijn in het pilotgebied piketpaaltjes geslagen die dienen als ground control points (GCP's) voor de orthofoto en de hoogtekaart. Deze paaltjes zijn gemarkeerd met op de luchtfoto zichtbare markers en daarvan zijn de XYZ coördinaten ingemeten met de Trimble GPS. De markers bestonden uit kartonnen bordjes (ø 22,5 cm) met een kruis van zwarte tape. In pilotgebied 1 en 2 zijn 9 GCP's geplaatst, in pilotgebied 3 zijn er 7 geplaatst. Er wordt aangeraden 5 tot 10 GCP's per pilotgebied te plaatsen voor een optimale georeferentie van de orthofoto en hoogtekaart (Pix4D, 2017c).

De vegetatiestructuuropnames zijn per klasse op aselecte wijze onderverdeeld in twee sets. Eén set is gebruikt voor de training van de beeldclassificatie met de rs-technieken. Dit is de trainingset. De andere set is gebruikt voor de validatie van die beeldclassificatie in deelvraag 7. Dit is de validatieset. De verhouding tussen het aantal opnames in de trainings- en validatieset bedraagt 1:4.

2.7 Deelvraag 7 Luchtfoto's & Classificatie

Welke vegetatiestructuurtypen geven de verschillende rs-technieken in de pilotgebieden?

De volgende stap was het inwinnen van de beeldgegevens met de multispectraalcamera met behulp van de drone. De drone werd aangestuurd door een remote controller die gekoppeld is aan een tablet met de autopiloot-app 'DJI GS Pro'. Met behulp van deze app is een vliegroute berekend voor de drone door middel van de invoer van de coördinaten van het pilotgebied, vlieghoogte, overlap van de foto's en een aantal parameters van de camera. Er is gekozen voor een vlieghoogte van 50 meter (dit geeft bij de gebruikte multispectraalcamera een GSD van ca. 5 cm), een frontale overlap van 80% en een zijwaartse overlap van 60%. De daadwerkelijk ingevlogen gebieden zijn groter dan de pilotgebieden om voor het hele pilotgebied voldoende overlap te garanderen.

Het inwinnen van de beelden heeft binnen vier dagen na het maken van vegetatieopnames plaatsgevonden. Het risico dat de vegetatieopnames in werkelijkheid niet overeenkomen met de beelden is hiermee geminimaliseerd. Er is rond 12 's middags gevlogen om slagschaduwen te verminderen. Ook is de vliegdatum zo gekozen dat op de gewenste tijd het getij laag was. Na het verzamelen van de beelden zijn deze met de fotogrammetriesoftware Pix4D Mapper verwerkt tot een orthofoto en een oppervlaktehoogtemodel (DSM). Bijzonderheden in het resultaat van zowel de orthofoto's als het DSM worden besproken.

Er wordt een vegetatiehoogtemodel (CHM) gemaakt door substractie van het DSM van het AHN3 terreinhoogtemodel (DTM) met een resolutie van 50 cm. Wanneer een negatieve vegetatiehoogte berekend zou worden, is de hoogte op nul gezet. Op dit CHM is een kwaliteitscontrole uitgevoerd aan de hand van de in het veld gemeten vegetatiehoogtes. Bij alle veldopnames (zowel trainings- als validatieset) is de hoogte van het CHM afgetrokken van de gemeten hoogtes. Voor deze afwijking is het gemiddelde en de standaarddeviatie berekend. Deze statistieken zijn ook per

vegetatiestructuurklasse berekend om onderscheid te kunnen maken in kwaliteit tussen de klassen. Vanwege de problemen bij modellering van bos en water (zie 3.1.2 Fotogrammetrie) zijn de statistieken nogmaals berekend zonder deze klassen.

De laatste stap om de deelvraag te beantwoorden is het classificeren van de beelden op basis van de rs-technieken die in deelvraag 4 als kansrijk zijn benoemd. In deze stap is de trainingsset van de vegetatieopnames gebruikt om in de classificatiesoftware de koppeling te leggen tussen een vegetatietype en de bijbehorende reflectie, het zogenaamde “trainen” van de software. De beschrijving van deze methodes is in deelvraag 4 gegeven. Alle classificaties zijn uitgevoerd met behulp ArcGIS Pro.

De resultaten zijn vegetatiestructuurkaarten van de pilotgebieden volgens alle toegepaste rs-technieken.

2.8 Deelvraag 8 Validatie

Van welke rs-techniek komen de resultaten het meest overeen met het resultaat van de vegetatieopnames?

De resultaten uit deelvraag 7 zijn gevalideerd aan de hand van de bij deelvraag 6 aangemaakte validatieset. Bij alle vegetatiestructuurkaarten is op de locaties van de validatieplots gecontroleerd of het vegetatiestructuurtype op de kaart overeenkomt met het type in de validatieplot.

De resultaten van de beeldclassificatie zijn uitgezet tegen de resultaten van de vegetatieopnamen in een confusion matrix (zie Tabel 1). Dit is gebeurd voor alle toegepaste classificatietechnieken. Uit de confusion matrix zijn de accuray (overeenstemming) en Cohen’s kappa berekend (Congalton & Green, 1999). Dit laatste is een methode die de overeenstemming tussen twee classificatoren berekent en corrigeert voor toevallige overeenstemming. Kappa is uitgedrukt in procenten, een kappa van 0% betekent dat er niet méér overeenstemming is dan door toeval te verwachten is. Een kappa van 100% betekent volledige overeenstemming tussen de validatieplots en de classificatie.

Omdat niet alle misclassificaties even ernstig zijn (Bijvoorbeeld: kruidige vegetatie dat is geclassificeerd als grasland is minder problematisch dan een classificatie als bos), is tevens een Balance Index berekend. De Balance Index is geïntroduceerd in een onderzoek naar vegetatiestructuurkartering met remote sensing om bijna correcte classificaties mee te laten wegen in de beoordeling van de methode (Geerling, Labrador-Garcia, Clevers, Ragas, & Smits, 2007).

Tabel 1. Voorbeeld van een confusion matrix voor overeenstemming tussen een handmatige en softwarematige classificatie. De grijs gearceerde getallen (diagonaal) geven overeenstemming aan.

		Software			
		A	**B**	**C**	**D**
Handmatig	**A**	2	2	3	1
	B	4	6	3	3
	C	7	5	5	2
	D	1	3	5	8

Tabel 2. Voorbeeld van een matrix om de Balance Index te berekenen. De cellen uit de error matrix worden vermenigvuldigd met de corresponderende cel in de balance matrix.

	A	**B**	**C**	**D**
A	3	2	1	0
B	2	3	2	1
C	1	2	3	2
D	0	1	2	3

Op basis van de afstand tot het optimum in de confusion matrix (e.g. correcte classificatie) is een weging toegekend (zie Tabel 2). Klassen dichter bij het optimum hebben een hoger gewicht gekregen dan klassen die er ver vanaf liggen. Hierbij wordt aangenomen dat klassen die naast elkaar liggen enigszins vergelijkbaar zijn. Dit betekent dat de klassen volgens een logische indeling geordend zijn, in dit geval is dat de hoogte van de vegetatie.

Het resultaat is een tabel die de validatie per rs-techniek toont. Ook is hier benoemd welke techniek de meest overeenkomende validatieplots heeft. De methode om de beste rs-techniek te bepalen is gebaseerd op het onderzoek van Geerling et al. (2007). De voorkeur ligt hier bij de techniek met de hoogste kappa, waarbij de Balance Index differentieert tussen methodes met een gelijke kappa.

2.9 Deelvraag 9 Vergelijking huidige techniek

Biedt het resultaat van de meest overeenkomende rs-techniek een verbetering ten opzichte van de huidig toegepaste techniek?

Om te bepalen of het resultaat van de meest overeenkomende rs-techniek een verbetering is, zijn de vegetatiestiestructuurkaarten van mei 2016 en augustus 2016 gevalideerd. Deze kaarten zijn door Bureau Waardenburg gemaakt met behulp van handmatige luchtfoto-interpretatie. De kaart van mei wordt gevalideerd omdat verwacht wordt dat de seizoensgebonden vegetatieontwikkeling van mei 2016 vergelijkbaar is met april 2017. Omdat de vegetatie in de loop van het seizoen verder is ontwikkeld, is ook gekozen om de vegetatiestructuurkaart van augustus te valideren. Hierbij wordt aangenomen dat de vegetatie sindsdien geen verdere successie heeft doorgemaakt, omdat deze kaart aan het eind van het groeiseizoen is gemaakt. Om de vegetatiestructuurkaarten te kunnen vergelijken met de vegetatieopnames van dit onderzoek, is beoordeeld of fouten te verklaren zijn door successie en een andere tijd in het groeiseizoen of dat de fout te verklaren is door grote inschattingsfouten bij de handmatige interpretatie. De vertaling tussen de vegetatiestructuurtypen van de kaart van mei 2016, augustus 2016 en dit onderzoek is weergegeven in de vertaaltabel in Bijlage C.

Hierna is de validatie eveneens gedaan op basis van de validatieplots die in deelvraag 7 zijn gebruikt en de berekening van Cohen's kappa en de Balance Index.

Als de kappa van de nieuwe rs-techniek hoger uitvalt dan die van de huidig toegepaste techniek, dan biedt de nieuwe techniek een verbetering ten opzichte van de huidige techniek.

2.10 Deelvraag 10 Opschaling

Kan de meest overeenkomende rs-techniek opgeschaald worden naar toepassing in het hele studiegebied binnen de Noordwaard?

Er is een interview met Skeye BV gehouden nadat de best gevalideerde rs-techniek bekend was. Tijdens dit interview is met deskundigen besproken of het technisch haalbaar is om de nieuwe rs-techniek toe te passen in het gehele studiegebied. Daarnaast heeft Skeye BV berekend wat de indicatieve kosten zijn om een false-colour orthofoto van het studiegebied te verkrijgen. Deze berekening is meegenomen in het resultaat.

De kosten van het uitvoeren van de rs-techniek zijn naast de kosten van de orthofoto ook afhankelijk van de kosten van de classificatie. De kosten van de classificatie zijn gebaseerd op een inschatting van het aantal uur dat het kost om met behulp van handmatige interpretatie het studiegebied te classificeren en hoeveel tijd het kost om dit met behulp van geautomatiseerde classificatie uit te

voeren. De kosten van het verkrijgen van de orthofoto zijn gecombineerd met de geschatte kosten van de classificatie en het resultaat is in een tabel weergegeven.

Voor de kosten van handmatige interpretatie (huidige methode) is uitgegaan van twee werkdagen arbeidstijd met arbeidskosten van € 83,- per uur. Deze informatie is geverifieerd bij Bureau Waardenburg. Bij de uitvoering van automatische beeldclassificatie zijn de ervaringen tijdens dit onderzoek gebruikt om een schatting te maken van de benodigde tijd. Hierbij is aangenomen dat er voor de training gebruik gemaakt van de in dit onderzoek verzamelde veldgegevens en dat de geautomatiseerde processen die veel tijd kosten buiten kantooruren uitgevoerd worden. Het merendeel van de bewerking bestaat dan uit de beoordeling van actualiteit de trainingsset en het trainen van de classificatie.

2.11 Deelvraag 11 Toetsing criteria belanghebbenden

Voldoet de meest overeenkomende rs-techniek aan de criteria van de belanghebbenden?

De rs-techniek is getoetst aan de hand van de criteria die in deelvraag 2 zijn bepaald.

Het resultaat is weergegeven in een tabel met criteria met toevoeging: behaald, niet behaald, en deels behaald. Na de tabel worden de eisen per categorie op hoofdpunten toegelicht.

2.12 Conclusie en aanbevelingen

Na beantwoording van alle deelvragen is de hoofvraag beantwoord. Er is één rs-techniek aangedragen en de conclusie getrokken of deze beter is dan de huidig toegepaste rs-techniek.

De bevindingen zijn bediscussieerd en in de aanbevelingen wordt uiteindelijk advies uitgebracht of, en hoe, deze methode in vervolgonderzoek en in het kader van het KCNL project toegepast kan worden.

3 LITERATUURONDERZOEK

In dit hoofdstuk is de wetenschappelijke stand van zaken omtrent vegetatieonderzoek met remote sensing en de bijbehorende technieken samengevat. De onderwerpen zijn beperkt tot hetgene dat relevant is voor het huidige onderzoek.

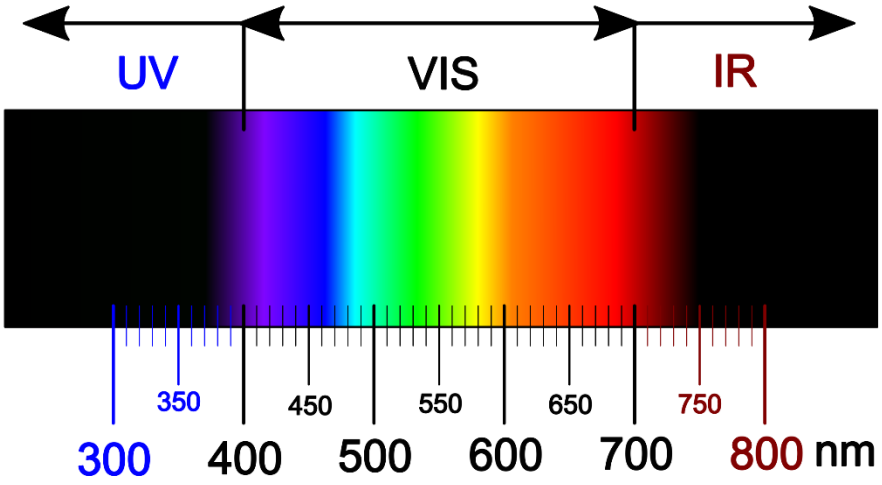
Het literatuuronderzoek is opgedeeld in drie delen. Eerst worden de verschillende technieken voor de inwinning van gegevens behandeld. In de daarop volgende paragraaf worden de verschillende classificatiemethodes besproken. Tot slot wordt in de derde paragraaf overige aanvullende informatie over de wettelijke en praktische beperkingen van drones en te hanteren classificatieniveau beschreven.

3.1 Technieken inwinning

Binnen het onderzoek naar een geschikte rs-techniek om de vegetatiestructuur in het studiegebied te monitoren wordt zowel aandacht besteed aan verschillende spectrale banden als de vegetatiehoogte. Deze twee categorieën zijn als afzonderlijke paragrafen beschreven.

3.1.1 Spectrale banden

Het lichtspectrum is groter dan wat visueel kan worden waargenomen, zie Figuur 1. De golflengtes die korter zijn dan het visuele spectrum bieden geen extra informatie die gebruikt kan worden met de optische interpretatie van luchtfoto's. Golflengtes die langer zijn dan het visuele spectrum bieden daarentegen juist wel extra informatie. De veelgebruikte banden die toegepast worden binnen remote sensing staan hieronder beschreven. Bij elke band staat de golflengte in nanometers (nm).



Figuur 1 Lichtspectrum met golflengte in nanometers. UV staat voor ultraviolet, VIS is het visuele lichtspectrum en IR is het infrarood spectrum. Aangepast overgenomen uit "Light spectrum (precise colors)" van Fulvio314, 2016 (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_spectrum_(precise_colors).svg). CC-BY-SA-4.0, Fulvio314.

Visuele spectrum

In het visuele spectrum worden kleurbanden met rood, groen en blauw toegepast binnen remote sensing. Blauw (450-520nm) wordt voornamelijk toegepast in het monitoren van waterecosystemen. De beelden van de blauwe band hebben over het algemeen minder contrast en zijn het meest gevoelig voor verstrooiing door de atmosfeer. Daarnaast wordt de band gebruikt voor onderzoek naar waterdiepte. De eigenschappen van groen (520-600nm) komen grotendeels overeen met blauw maar zijn minder extreem. Het voordeel is dat deze band ook minder last van verstrooiing heeft dan de blauwe band. Rood (630-690nm) wordt geabsorbeerd door het chlorofyl in de vegetatie en is

daarom binnen het visuele spectrum het meest geschikt om vegetatie te onderscheiden van andere structuren (Geospatial Innovation Facility, 2008; Lillesand et al., 2015).

Red edge

Red edge is het lichtspectrum dat tussen rood en nabij infrarood zit met een golflengte tussen de 680 en 780 nm. Levende planten absorberen veel rood licht maar reflecteren veel infrarood. Het red edge spectrum bestaat precies uit de overgang van lage naar hoge reflectie. Met behulp van de reflectie van red edge kan de concentratie chlorofyl in bladeren van planten bepaald worden (Fillella & Peñuelas, 1994). Het gebruik van de reflectie van het red edge lichtspectrum bij luchtfoto interpretatie met behulp van remote sensing beperkt zich voornamelijk tot de agrarische sector. Hier wordt met behulp van de reflectie van red edge de vitaliteit van planten bepaald en zo kan precisiebemesting op niet vitale landbouwpercelen worden toegepast (Delegido, Verrelst, & Moreno, 2011; Kanke, Tubaña, Dalen, & Harell, 2016).

Red edge wordt nog niet breed toegepast voor vegetatiestructuurkartering maar er is wel een onderzoek waaruit blijkt dat met behulp van verschillende red edge banden bepaalde vegetatieklassen in het boreaal gebied beter geclassificeerd konden worden dan met gebruikelijke luchtfoto's (Zarco-Tejada & Miller, 1999).

Infrarood

Infrarood is een breed spectrum. Binnen remote sensing worden drie typen infraroodbanden gebruikt, namelijk near infrared (NIR), mid infrared en thermal infrared (Lillesand et al., 2015). Omdat water vrijwel al het infrarood licht absorbeert worden bij NIR (760-900nm) waterlichamen zeer donker en zijn daarom goed te onderscheiden van land.

Mid infrared (2008-2350nm) heeft de zelfde eigenschappen, maar het grote verschil is dat met Mid Infrared beter verschillen tussen vegetatietypen kunnen worden onderscheiden (Geospatial Innovation Facility, 2008).

Thermal infrared (9000-9400) toont de temperatuur en kan toegepast worden om verschillende watertypen en bos te onderscheiden. Dit kan omdat verschillende watertypen, onder invloed van stroming en waterdiepte, onderscheidende temperaturen hebben en omdat bos een eigen microklimaat creëert dat doorgaans koeler is dan de omgeving. Daarnaast licht bebouwing sterk op en daarom is deze lichtband ook geschikt om bebouwing van verharding als wegen te onderscheiden. Daarnaast wordt deze band gebruikt om onder andere bezette weidevogelnesten en reekalveren in agrarische percelen op te sporen (Natuurmonumenten, 2016; Selles, 2017).

Veelgebruikte bandcombinaties

Voor het optimale resultaat bij de classificatie worden banden gecombineerd om meer informatie te geven. Door banden te combineren kunnen kleuren uitgedrukt worden in de foto.

Als de drie banden van het visuele spectrum, rood, groen en blauw, gecombineerd worden ontstaat een zogenaamde 'true colour' foto. Dit is een reguliere kleurenfoto en wordt binnen remote sensing voornamelijk aangeduid als RGB foto.

Als de blauwe band van een RGB foto vervangen wordt door NIR of red edge ontstaat er een 'false colour' foto. Door de onderscheidende informatie te combineren worden verschillende vegetatietypen en verschillende typen landgebruik getoond als verschillende kleuren waardoor de afbeeldingen opties te interpreteren zijn. Bij classificatie in software als ArcGIS worden de eigenschappen van alle banden gecombineerd om meer onderscheidende informatie te verkrijgen.

Een veel gebruikte combinatie is RGB met NIR. Deze combinatie toont duidelijk verschil tussen water, land en vegetatie. De combinatie RGB met Mid Infrared geeft betere resultaten door een beter onderscheidend vermogen tussen verschillende structuren maar deze band kan met veel multispectraalcamera's en in het verleden gebruikte satellieten als de Landsat niet worden opgenomen.

De combinatie rood, NIR en Mid Infrared geeft een helderder beeld omdat de twee banden met de kortste golflengte niet zijn meegenomen. Dit is de meest algemene bandcombinatie die tegenwoordig wordt toegepast (Lillesand et al., 2015).

De combinatie groen, NIR en Mid Infrared wordt ook toegepast maar in mindere mate dan met rood. Het grote verschil is dat vegetatie niet als rood maar als groen wordt weergegeven.

De combinatie blauw, NIR en Mid Infrared wordt op kleine schaal toegepast om bodemvochtigheid en vegetatiegezondheid van agrarische percelen te monitoren (Geospatial Innovation Facility, 2008).

3.1.2 Vegetatiehoogte

Bij verzameling van gegevens voor vegetatiestructuuronderzoek via remote sensing is vegetatiehoogte van belang om de driedimensionale structuur van de vegetatie te registreren. Hoewel er onderzoeken bekend zijn waarbij alleen de vegetatiehoogte gebruikt wordt (Streutker & Glenn, 2006), wordt bij veel onderzoeken gebruikt gemaakt van data fusion, het samenvoegen van data uit verschillende bronnen. Bij vegetatieonderzoek kan de vegetatiehoogte gecombineerd worden met (multispectrale) lucht-/satellietfoto's (Bork & Su, 2007; Geerling et al., 2007; Hantson, Kooistra, & Slim, 2012). Een raster dat bestaat uit vegetatiehoogte wordt in de literatuur ook wel aangeduid als canopy height model (CHM).

LIDAR

Een in wetenschappelijk onderzoek veelgebruikte methode is Light Detection and Ranging (LIDAR), ook wel laseraltimetrie genoemd. Bij deze techniek wordt met een laser een puls afgegeven en wordt de reflectie van deze puls gemeten. Door de gemeten tijd te delen door de lichtsnelheid kan de afstand berekend worden die de puls aflegt. Deze afstand gedeeld door 2 (heen en terugweg puls) en gecorrigeerd voor de hoek waaronder de puls uitgezonden is, geeft de hoogte van het gemeten object ten opzichte van de sensor. Omdat de reflectie van een door de LIDAR-unit zelf uitgezonden signaal gemeten wordt, spreekt men van actieve remote sensing.

Doorgaans is de LIDAR uitgerust met een GPS en, in het geval van een mobiel platform, een traagheidsmeetinstrument (inertial measurement unit, kortweg i.m.u.) waarmee de relatieve afstand van het gemeten object een absolute locatie binnen een coördinatensysteem kan krijgen. Per seconde worden duizenden tot honderdduizenden van deze pulsen uitgezonden, die met een spiegel verdeeld worden over het blikveld van de sensor.

LIDAR heeft als eigenschap dat het door meerdere vegetatielagen heen kan dringen, en één uitgezonden puls meerdere weerkaatsingen (returns) heeft. Hierdoor kan zowel de hoogte van bijvoorbeeld een boom (first return), als de hoogte van het maaiveld (last return) gemeten worden. Bij een hoog genoeg aantal metingen per m^2 kan ook de structuur van een boomkroon vastgelegd worden (Mongus & Žalik, 2015). Eerdere LIDAR-systemen konden maar één return opslaan als datapunt. Daaropvolgende systemen konden 3-5 returns registeren. Huidige systemen kunnen de complete reflectiepuls digitaliseren en opslaan. Dit levert echter een veelvoud aan data op ten opzichte van de eerder genoemde registratiemethodes (Schuckman & Renslow, 2017). Uit onderzoek is gebleken dat uit LIDAR-data afgeleide vegetatiehoogtes vaak onderschat worden, maar dat een

hogere puntdichtheid dit probleem waarschijnlijk mitigeert (Glenn, et al., 2011; Streutker & Glenn, 2006).

Na verzameling wordt de LIDAR-data gefilterd (opgeschoond) en zo nodig geclassificeerd (grond, gebouwen, vegetatie). Vanuit deze puntenwolk kan verdere analyse plaatsvinden. Om de vegetatiehoogte te bepalen, worden een oppervlaktehoogtekaart (Digital Surface Model, DSM) en een (Digital Terrain Model, DTM) gegenereerd. Substractie van het DTM van het DSM geeft de vegetatiehoogte.

Radar

Radar is een andere actieve remote sensing technologie die gebruikt wordt voor het verzamelen van beeldmateriaal. Radar heeft een veel grotere golflengte dan zichtbaar licht en wordt uitgezonden en ontvangen met antennes. Een groot voordeel van radar is dat het, bij selectie van de juiste golflengte, door mist en wolken heen kan dringen. In Tabel 3 zijn een aantal radarbanden weergegeven met bijbehorende frequentie en golflengte.

Tabel 3 Bandnamen met bijbehorende frquenties en golflengtes van enkele bij remote sensing gebruikte radarbanden. De hogere goflengtes dringen door vegetatie heen en worden o.a. gebruikt voor het vervaardigen van DTM's.

Bandnaam	Frequentie	Golflengte	Vegetatie-doordringend
P	< 300 MHz	> 100 cm	ja
L	1-2 GHz	15-30 cm	ja
C	4-8 GHz	3,75-7,5 cm	deels
X	8-12 GHz	2,5-3,75 cm	nee

Een unieke eigenschap van radar is dat zeer precies terreinverandering waargenomen kan worden door twee of meer radarbeelden in een tijdreeks over elkaar heen te leggen. Door het faseverschil tussen de twee beelden kunnen zeer kleine verschillen opgemerkt worden. Deze techniek wordt Inferometric synthetic aperture radar (InSAR) genoemd en wordt vaak toegepast bij vulkanologisch en seismologisch onderzoek (Zhou, Chang, & Li, 2009).

Met InSar kan een hoogtemodel (Digital Elevation Model, DEM) gemaakt worden, het concept is grotendeels vergelijkbaar met fotogrammetrie. (Lillesand et al., 2015). Voordeel van radar is dat sommige banden (L en P) door vegetatie heen kunnen dringen en dan door het aardoppervlak gereflecteerd worden. Uit deze beelden kan een DTM vervaardigd worden. De X en C band dringen niet, respectievelijk deels door de vegetatie heen en zijn geschikt om een DSM te maken (Zhou et al., 2009).

Fotogrammetrie

Een derde methode om vegetatiehoogte te meten is fotogrammetrie. Bij deze techniek wordt het verschil in kijkboek van twee overlappende foto's gebruikt om de hoogte van objecten te bepalen. Uit de parallax in de afbeeldingen en de (bekende) locatie van de objectieven, kan de hoogte van een object in de afbeelding berekend worden. Fotogrammetrie dateert van vóór de uitvinding van LIDAR, en werd in het verleden toegepast op analoge foto's. Tegenwoordig is er software beschikbaar die een 3D-model kan berekenen uit een set foto's (Lillesand et al., 2015).

Binnen fotogrammetrie zijn twee verschillende varianten te onderscheiden: Stereofotogrammetrie en Structure from Motion (SfM). Bij stereofotogrammetrie wordt gelijktijdig een opname gemaakt vanaf twee verschillende standpunten van hetzelfde onderwerp. Bij SfM beweegt het objectief langs het onderwerp en maakt met korte intervallen overlappende foto's. Omdat er een tijdsverschil zit tussen de opnames kan SfM alleen toegepast worden bij statische onderwerpen. Veelgebruikte fotogrametriesoftware als Pix4D en Agisoft Photoscan maken gebruik van SfM.

In de fotogrammetriesoftware wordt een 3D-puntenwolk samengesteld uit de verzamelde luchtfoto's. De kwaliteit van de puntenwolk hangt sterk af van de mate van overlap van de foto's (Dandois, Olano, & Ellis, 2015). Wanneer een punt op meer foto's zichtbaar is, kan de locatie van het punt beter bepaald worden. Leveranciers van fotogrammetriesoftware raden dan ook aan om minimaal 75% tot 85% frontale en 60% tot 70% zijwaartse overlap te gebruiken, afhankelijk van het soort terrein (Agisoft, 2017; Pix4D, 2016).

Om de puntenwolk aan een bestaand coördinatensysteem te koppelen, moeten ground control points (GCP's) toegevoegd worden. Dit zijn op de luchtfoto herkenbare punten waarvan de coördinaten bekend zijn. Uit deze puntenwolk kunnen vervolgens eindproducten gegenereerd worden, zoals een orthofoto en een hoogtekaart (DSM).

Fotogrammetrie heeft als nadeel dat alleen de toppen van objecten ingemeten kunnen worden. Om de vegetatiehoogte te krijgen moet een digitaal terreinmodel (DTM) van het DSM afgetrokken worden. Dit DTM kan uit een externe bron komen (LIDAR, radar) of geïnterpoleerd worden uit delen van het DSM waar aannemelijk is dat het DSM de terreinhoogte weergeeft zoals onbegroeid en onbebouwd terrein.

Een tweede probleem is dat ook met deze methode de vegetatiehoogte onderschat wordt (Dandois & Ellis, 2010; Dandois, Olano, & Ellis, 2015). Volgens Gillan, Karl, Duniway en Elaksher (2014) is de mate van foutieve hoogte is sterk afhankelijk van de structuur van de vegetatie en de resolutie. Gesloten dichte vegetatie wordt beter gemodelleerd dan ijle open vegetatie. Met voldoende onderzoek kunnen correctiefactoren voor verschillende vegetatietypen bepaald worden, deze zijn op dit moment echter nog niet bekend. SfM fotogrammetriesoftware heeft herkenbare punten nodig om foto's aan elkaar te kunnen rekenen. Bij bomen en dichte vegetatie is het vanwege hun complexe structuur soms moeilijk om herkenningspunten te vinden. Een groter overlap of een hogere vlieghoogte wordt geadviseerd voor betere herkenning, er treedt dan namelijk minder perspectiefvertekening op (Pix4D, 2017a).

Ook bij weinig structuurverschillen heeft de software moeite met het herkennen van unieke punten. Hierdoor treedt een koepelvormige vervorming op, het zogenaamde "doming". James en Robson (2014) stellen dat dit probleem sterker optreed bij verticaal (nadir) genomen luchtfoto's met weinig structuurvariatie. Een aantal oplossingen die zij aandragen is het gebruik van een correct cameramodel in de fotogrammetriesoftware, die de focale vertekening goed corrigeert. Een tweede oplossing is het gebruik van schuine (oblique) fotografie, de luchtfoto's worden niet recht naar beneden genomen maar onder een hoek. Wanneer alleen verticaal genomen luchtfoto's beschikbaar zijn, maar wel voldoende GCP's bekend zijn, kan de vertekening gecompenseerd worden door het berekenen van de correcte verkleiningsfactor.

Het is niet mogelijk om water correct te modelleren vanwege het uniforme oppervlak en de dynamiek in water (Pix4D, 2017b). Wanneer voldoende land zichtbaar is in foto's kunnen de oevers correct gemodelleerd worden, maar het wateroppervlak zelf vertoont zo grote afwijkingen dat het onbruikbaar is.

3.1.3 Resolutie

Bij remote sensing met behulp van multi spectraal sensors worden vier categorieën gehanteerd voor de te gebruiken resolutie. Onder een lage resolutie wordt een GSD van 30 meter of meer verstaan. Een medium resolutie heeft een GSD tussen de 2 en 30 meter. Een hoge resolutie heeft een GSD tussen de 2 en 0,5 meter en een zeer hoge resolutie heeft een GSD die kleiner is dan 0,5 meter (Navulur, 2007).

De resolutie is voornamelijk afhankelijk van de gebruikte inwinningsmethode. Satellietbeelden hebben gebruikelijk een lage tot medium resolutie. Beelden die met behulp van een vliegtuig zijn ingewonnen hebben doorgaans een hoge tot zeer hoge resolutie en met behulp van een drone kunnen beeldopnames met een zeer hoge resolutie tot enkele centimeters worden ingewonnen (Parrot, 2016).

Daarnaast is de te hanteren resolutie afhankelijk van de grootte van het onderzoeksgebied en de schaal van het onderzoek. Een groot onderzoeksgebied levert meer data op dan een klein onderzoeksgebied met dezelfde resolutie. De resolutie wordt beperkt door de beschikbare opslagcapaciteit en het vermogen van computers en bijbehorende gebruikte software. De schaal van het onderzoek bepaalt ook de resolutie die gehanteerd dient te worden. Wanneer vegetatie onderzocht wordt moet de resolutie groter zijn dan de oppervlakte van individuele planten, omdat vegetatie een specifieke samenstelling van plantensoorten is, maar niet te groot zodat verschillende vegetatieklassen met elkaar gaan overlappen (D. Assendorp, persoonlijke communicatie, 10 maart 2017).

3.2 Technieken classificatie

De classificatiemethodes voor beeldanalyse zijn grofweg in twee groepen in te delen. De ene groep is de pixel-based classificatie en de andere groep is de object-based classificatie. Voor pixel-based classificatie is een aantal verschillende methodes ontwikkeld, die hieronder beschreven zijn. Object-based classificatie is een nieuwere techniek, waarbij nog geen duidelijke verschillen tussen varianten te onderscheiden zijn. Object-based classificatie wordt in paragraaf 3.2.5 beschreven.

Een tweede indeling die gemaakt kan worden in classificatiemethoden is unsupervised of supervised. Bij unsupervised classificatie wordt door de software een vooraf bepaald aantal klassen onderscheiden op basis van spectrale overeenkomsten. Achteraf kan, op basis van handmatige interpretatie, aan de klassen een betekenis (bos, akker, water, etc.) gegeven worden. Bij supervised classificatie is vooraf bekend welke klassen er zijn en moet de software getraind worden om de juiste spectrale waarden aan de verschillende klassen te koppelen. De trainingssamples kunnen verzameld worden uit veldgegevens of aan de hand van handmatige beeldinterpretatie. Omdat supervised accurater lijkt te zijn dan unsupervised (Bahadur, 2009; Weih & Riggan, 2010) en de mogelijkheid bestaat om veldgegevens te verzamelen, wordt unsupervised in dit hoofdstuk niet verder behandeld.

Bij de beschrijvingen van pixel-based classificators wordt, ter illustratie van de methode, een scatterplot gebruikt waarbij twee spectrale banden tegen elkaar uitgezet zijn en waarin een aantal trainingssamples uitgezet zijn waarvan de klasse bekend is. Deze tweedimensionale weergave is overzichtelijk en illustratief, maar in werkelijkheid kan een dergelijk scatterplot nagenoeg oneindig veel dimensies hebben, afhankelijk van het aantal gebruikte banden. Tenzij anders vermeld is de informatie uit deze paragraaf afkomstig uit Lillesand et al. (2015).

Naast de bovengenoemde classificatiemethoden zijn er nog enkele andere methodes, bijvoorbeeld het gebuikt van afgeleide data (bijv. vegetatie-indices zoals NDVI) als inputraster in plaats van ruwe spectrale data (Zhang, Wu, Yan, & Chen, 2016), of het fitten van een curve door meerdere banden en een van deze curve afgeleide parameter gebruiken voor classificatie (Zarco-Tejada & Miller, 1999). Daarnaast is er een keur aan classificatiemethoden die ontwikkeld zijn voor machinaal leren, een aantal van deze zijn ook toegepast bij remote sensing. Het valt echter buiten de scope van dit onderzoek om al deze methoden te beschrijven. Het onderzoek is beperkt tot een aantal methoden die algemeen gebruikt worden bij remote sensing en die geïmplementeerd zijn in GIS of remote sensing software.

3.2.1 Minimum-Distance Classifier

Bij deze classificatiemethode wordt de directe afstand tussen een te classificeren pixel en het gemiddelde van de pixels van de verschillende klassen in de trainingsset berekend. De klasse met de kortste afstand tot de te classificeren pixel wordt toegekend aan de pixel. Deze methode is rekenkundig eenvoudig maar levert problemen op bij grote verschillen in de variantie tussen klassen. Daarom wordt deze methode niet veel meer toegepast.

3.2.2 Parallelepiped Classifier

Dit is een methode die beter met de variantie van klassen omgaat. Rond de punten die een klasse van de trainingssamples vormen, wordt een rechthoek getrokken (in een driedimensionaal model wordt dit een balk, een bijzondere vorm van een parallellepipedum). Wanneer een te classificeren pixel in één van deze rechthoeken valt, dan wordt de corresponderende klasse toegekend. Wanneer de pixel buiten alle rechthoeken valt, wordt deze als “onbekend” aangeduid. Deze methode werkt echter minder goed wanneer er overlappende klassen zijn, of er covariantie bestaat tussen de banden. Bij overlappende klassen wordt een pixel toegekend aan één van de overlappende klassen, of als “onzeker” geclassificeerd. Bij sterke covariantie bestaat de kans dat een pixel bij de verkeerde klasse wordt ingedeeld omdat de oppervlaktes van de rechthoek en de trainingspixels slecht overlappen.

3.2.3 Maximum likelihood

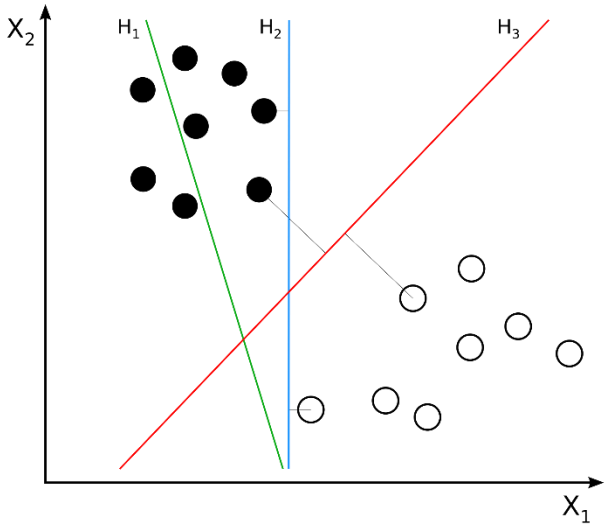
Maximum likelihood (MLC) is een classificatiemethode die zowel met de variantie als met de covariantie van een klasse rekening houdt. Er wordt aangenomen dat de pixels binnen de klasse een normaalverdeling hebben. Vanuit deze aanname kunnen voor de klassen waarschijnlijkheid-dichtheidsfuncties berekend worden. Voor de te classificeren pixel wordt hiermee voor elke klasse de waarschijnlijkheid berekend dat de pixel tot deze klasse behoort. De klasse met de hoogste waarschijnlijkheid wordt gekozen als classificatie van de pixel. Een variant op deze methode is het toekennen van een weegfactor aan de klassen, gebaseerd op het verwachte areaal in het te classificeren raster. Tevens wordt per klasse een “prijs” voor misclassificatie toegekend. Deze twee factoren zorgen theoretisch voor een optimale classificatie waarbij de “kosten” voor misclassificatie zo laag mogelijk gehouden worden. In de praktijk wordt deze variant weinig toegepast en wordt aangenomen dat alle klassen een gelijke kans op voorkomen hebben.

Maximum likelihood classification wordt veel toegepast bij wetenschappelijk onderzoek. Een nadeel is dat deze methode rekentechnisch zwaarder is dan de voorgenoemde methodes. De rekenduur neemt exponentieel toe met de toename van het aantal banden (Richards & Jia, 2006). Een tweede nadeel is de aanname dat de pixels binnen een klasse een normaalverdeling hebben, hoe schever een verdeling, hoe minder betrouwbaar MLC wordt.

3.2.4 Support vector machine

Een support vector machine (SVM) is een algoritme dat komt uit de wetenschap van machinaal leren. Het algoritme verdeelt een collectie punten in twee klassen op de meest optimale wijze. De meest optimale scheiding heeft een zo groot mogelijke marge tussen het scheidingsvlak en de meest dichtstbijzijnde punten (zie Figuur 2). Om meerdere klassen te definiëren in de feature space, wordt de classificatie opgesplitst in een aantal elkaar opvolgende binaire problemen (bijvoorbeeld: water of niet-water, vervolgens niet-water opsplitsen in bos en niet-bos enz.). SVM’s zijn ook in staat om, met behulp van kernel-functies, niet lineaire scheidingen tussen klassen in een puntenwolk op te lossen (Richards & Jia, 2006).

Onderzoek suggereert dat SVM's doorgaans hogere nauwkeurigheden boeken dan MLC (Karan & Samadder, 2016; Srivastava, Han, Rico-Ramirez, Michaela, & Islam, 2012).



Figuur 2 Schematische weergave van een tweedimensionale puntenwolk met twee klassen die op drie manieren lineair gescheiden wordt door een Support Vector Machine. H1 verdeelt de klassen incorrect. H2 scheidt de klassen correct, maar er is een bredere marge mogelijk tussen de scheidingslijn en de klassen. H3 geeft de optimale scheiding weer, met de breedst mogelijke marge tussen de scheiddslijn en de puntenwolken. De dichtst bij de scheidslijn liggende punten zijn de support vectors.Overgenomen uit "Svm separating hyperplanes" van Cyc, 2008 (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Svm_separating_hyperplanes.png). Publiek domein.

3.2.5 Object based

Object based classification is een manier van beeldclassificatie waarbij niet alleen wordt uitgegaan van de waarden van de individuele pixels maar ook de context waarin de pixels zich bevinden wordt meegenomen. De eerste stap bij deze methode is het segmenteren van het beeld op basis van overeenkomstige kleuren en edge-detection. Na de segmentatie worden van de segmenten verschillende attributen berekend die gebruikt kunnen worden voor de classificatie. Afhankelijk van de gebruikte classificatiesoftware is dit meer of minder uitgebreid. In ArcGIS zijn de attributen bijvoorbeeld: gemiddelde kleur, gemiddelde pixelwaarde, standaarddeviatie pixelwaarde, aantal pixels, compactheid (mate van rondheid), en mate van rechthoekigheid. De daadwerkelijke classificatie gebeurt door MLC of SVM (Esri, 2016). In eCognition (een gespecialiseerd classificatieprogramma) zijn er talloze attributen te berekenen die gebruikt kunnen worden bij de classificatie, voor de classificatie kan een keuze gemaakt worden uit MLC, SVM en een aantal andere classificatoren (K nearest neighbour, decision tree en random tree) die in dit onderzoek niet behandeld zijn (Trimble, 2016).

3.3 Aanvullende informatie

Naast de technieken die gehanteerd kunnen worden bij het inwinnen van gegevens en het classificeren zijn er nog twee onderwerpen die invloed hebben op het onderzoek, namelijk het detailniveau van de vegetatieclassificatie en de wettelijke en praktische beperkingen van het gebruik van drones.

3.3.1 Detailniveau vegetatieclassificatie

Bij onderzoeken waar remote sensing reeds is toegepast om natuurlijke vegetatie te karteren is voornamelijk vegetatiestructuur als detailniveau gebruikt en geen vegetatietypen (Assendorp, 2010; Hantson et al., 2012; Knotters & Brus, 2010; Kramer, Mücher, & Slim, 2014; Schmidt et al., 2000). Door luchtfoto interpretatie te combineren met de vegetatiehoogte is het wel mogelijk om specifiekere soortgroepen te classificeren (Hanston et al., 2012).

3.3.2 Wettelijke en praktische beperking drone

In de Nederlandse wetgeving wordt onderscheid gemaakt in het gebruik van drones voor recreatief gebruik en voor beroepsmatig gebruik. De verschillen zijn beschreven in het document 'regelgeving drones' (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Een aantal aspecten is voor beide partijen gelijk. De drone dient altijd in het zicht van de piloot te zijn, er mag alleen bij daglicht gevlogen worden, de drone moet altijd voorrang geven aan ander luchtverkeer en tot slot mag niet in gecontroleerd luchtruim gevlogen worden. Gecontroleerd luchtruim zijn gebieden waar het luchtverkeer in contact staat met de luchtverkeersleiding (Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Defensie, 2012). Hieronder staan de belangrijkste verschillen tussen particulier en beroepsmatig gebruik beschreven.

Wettelijke beperkingen

Als de drone hobbymatig of recreatief gebruikt wordt gelden er weinig beperkingen bovenop de hiervoor genoemde algemene beperkingen. Het belangrijkste is dat de maximale vlieghoogte 120 meter bedraagt, de drone maximaal 25 kilogram mag wegen en dat er niet boven mensenmenigten mag worden gevlogen. Er geldt geen maximale afstand tussen piloot en drone, maar de drone moet altijd in het zicht blijven van de piloot.

Wanneer de drone beroepsmatig gebruikt wordt of vluchten uitgevoerd worden tegen een vergoeding moet een opleiding worden gevolgd door de piloot. Daarnaast moet de piloot een verplichte WA-verzekering afsluiten en moet de drone gecertificeerd worden met een keurmerk.

Er zijn twee soorten opleiding tot dronepiloot (ROC en ROC-light) met elk hun eigen wettelijke beperkingen. Bij ROC-light is het maximale gewicht 4 kilogram tegen 15 kilogram bij ROC. De maximale vlieghoogte is bij ROC-light 50 meter en de maximale afstand tot de piloot 100 meter. Bij ROC is dit respectievelijk 250 en 500 meter. De geschatte kosten voor de opleiding om beroepsmatig te mogen vliegen is bij ROC circa 10.000 euro en bij ROC-light circa 400 euro.

Praktische beperkingen drones

De drone die gebruikt wordt om de luchtbeelden op te nemen die voor dit onderzoek gebruikt worden is een DJI Phantom 4 PRO. Het gebruik van deze drone houdt een aantal praktische beperkingen in. De praktische beperkingen en mogelijkheden staan beschreven in de user manual van DJI (2017).

In verband met de opslagcapaciteit van de accu is de maximale vliegtijd bij optimale weersomstandigheden 30 minuten. Bij harde wind of koude temperaturen wordt de vliegduur verkort.

Er kan alleen met de drone gevlogen worden bij gunstige weersomstandigheden, de drone is niet geschikt om te vliegen bij regen, sneeuw, mist en bij windsnelheden van meer dan 10 m/s. Dat is vergelijkbaar met windkracht 5 (KNMI, 2011).

Tot slot moet er tijdens het plannen van een vlucht rekening mee gehouden worden dat er geen obstakels in de buurt van de vliegroute zijn als hoogspanningskabels en bruggen.

4 RESULTATEN

In dit hoofdstuk wordt in negen paragrafen antwoord gegeven op deelvraag 2 tot en met 11. Deelvragen 2 en 3 (criteria belanghebbenden en de daaruit volgende technische eisen) zijn gecombineerd tot één paragraaf en de overige paragrafen behandelen ieder één deelvraag.

4.1 Criteria rs-technieken

In de eerste paragraaf van de resultaten worden zowel de eisen van de belanghebbenden van dit onderzoek besproken als wordt bepaald welke technische eisen daar bij horen.

4.1.1 Eisen belanghebbenden

Per belanghebbende partij staat in Tabel 4 weergegeven wat de eisen zijn voor zowel de inwinning van gegevens als ten aanzien van het resultaat dat met de classificatie geboekt wordt.

Tabel 4 Overzicht van de eisen per belanghebbende die gesteld worden aan de inwinning van gegevens en het resultaat van de vegetatiestructuurkartering.

Belanghebbenden	Eisen
Bureau Waardenburg (in opdracht van Gebr. Van Kessel)	- De Vegetatiestructuur, talrijke soorten en de vegetatiehoogte opnemen. - A.d.h.v. de vegetatiestructuurkaart in mei de vegetatiestructuur in augustus voorspellen. - De huidig toegepaste vegetatiestructuurindeling aanhouden. - Nauwkeurigheid van 1 tot 2 meter. - Minimaal twee keer per jaar een vegetatiestructuurkaart maken - De nieuwe rs-techniek moet een grote verbetering zijn als hij duurder is dan de huidige methode.
Gebr. van Kessel (afstudeeropdracht hydrologisch modeleren)	- Vegetatiestructuur in combinatie met dominante soorten waarvan de ruwheid bekend is dient opgenomen te worden. - Nauwkeurigheid van maximaal 2 meter - De vegetatiestructuurtypen van de kaart dienen vertaald te kunnen worden naar de vegetatieklassen waar de ruwheid van is bepaald.
FREE Nature	- Vaker dan twee keer per jaar een vegetatiestructuurkaart produceren. - Vegetatiestructuur, dominante soorten en de geschatte vegetatiehoogte opnemen. - Kwaliteit van de vegetatie opnemen (groene- of bruine vegetatie). - Het inwinnen van beeldgegevens mag geen onnodige verstoring van de aanwezige grazers veroorzaken. - De vegetatiestructuurkaart bevat naast de vegetatiestructuur ook de dominante soort. - nauwkeurigheid van maximaal 1 meter voor ruwe data en 5 meter voor vegetatiestructuurkaart -
Rijkswaterstaat	- maximaal één keer per jaar een kaart produceren. - Vegetatiehoogte en ruwheid i.c.m. de structuur opnemen - Resolutie van circa 12 centimeter gebruiken - Legenda moet overeenkomen met de legenda van de vegetatielegger - Foutmarge tussen riet en ruigte verkleinen - Braamstruiken onderscheiden - Verschillende watertypen onderscheiden

4.1.2 Technische eisen en mogelijkheden

In Tabel 5 is een samenvatting gegeven van de technische eisen in vier categorieën, namelijk de gehanteerde resolutie, frequentie, wat er geclassificeerd dient te worden en of de vegetatiehoogte wel of niet meegenomen moet worden. De volledige tabel staat in de Bijlage D.

Tabel 5 Technische eisen die bij de eisen van belanghebbenden uit tabel 3 horen

Belanghebbende	resolutie	frequentie	classificatie	vegetatiehoogte
Bureau Waardenburg	Max 2 m	2 x per jaar	Structuur + talrijke soorten. Huidige legenda hanteren	wel
Gebr. Van Kessel	5-20 m	1 x per jaar	RWS classificatie legenda(ruwheid)	niet
FREE Nature	Max 1 m	>2 x per jaar	Structuur + talrijke soorten en de biomassakwaliteit	wel
RWS	12 cm	1 x per jaar	RWS classificatie legenda	wel

4.2 Kansrijke rs-technieken

De rs-technieken die in de literatuurstudie zijn beschreven zijn getoetst aan de randvoorwaarden van het onderzoek. Er zijn drie categorieën rs-technieken die onderzocht kunnen worden. Dit zijn de verschillende soorten bandcombinaties die met de multispectraalcamera kunnen worden opgenomen, verschillende resoluties bij het classificeren en drie verschillende classificatiemethodes.

De voor dit onderzoek beschikbare multispectraalcamera was een Parrot Sequoia. Deze, voor montage op drones ontwikkelde, camera heeft naast een RGB sensor ook vier sensoren die individuele spectrale banden registreren in een lagere resolutie. De banden zijn groen (550nm, ± 20nm), rood (660nm, ± 20nm), red-edge (735nm, ± 5nm) en NIR (790 nm, ± 20nm). De Sequoia heeft ook een lichtsensor die lichtinval registreert tijdens een opname, hiermee zijn de foto's radiometrisch te kalibreren. Dit zou bij wisselende lichtinval toch homogeen belichte foto's op moeten leveren. De Sequoia was gemonteerd onder een DJI Phantom 4 Pro drone.

In de Tabel 6 staan de verschillende bandcombinaties die worden onderzocht in combinatie met verschillende resoluties. Dit zijn de bandcombinatie-resolutie technieken. Alle bandcombinaties worden op een resolutie van 10 centimeter geclassificeerd. Alleen bandcombinatie D, die alle beschikbare banden bevat, wordt ook in een resolutie van 25, 50 en 100 centimeter geclassificeerd. Zo wordt de omvang van de te classificeren rasters beperkt tot een aantal dat in de beschikbare tijd voor het onderzoek te classificeren is. Hierbij wordt de aanname gedaan dat het kwaliteitsverschil tussen de resoluties van 10 en 25, 50 of 100 centimeter te extrapoleren is naar de andere bandcombinaties.

Elke rs-techniek krijgt een code om de technieken te kunnen onderscheiden. De bandcombinaties krijgen een hoofdletter en de bijbehorende resolutie wordt in drie cijfers daarachter geplaatst. Het resultaat staat van voorlopige rs-technieken staat in Tabel 6.

Tabel 6 Voorlopige rs-technieken. De tabel toont met bijbehorende voorlopige code welke bandcombinatie met welke resolutie wordt gecombineerd.

	10cm	25cm	50cm	100cm
RGB + Vegetatiehoogte	A010	-	-	-
G,R,NIR + Vegetatiehoogte	B010	-	-	-
G,R,RE + Vegetatiehoogte	C010	-	-	-
G,R, RE, NIR + Vegetatiehoogte	D010	D025	D050	D100
G,R,RE,NIR	E010	-	-	-

Vervolgens worden de bandcombinatie-resolutie technieken volgens drie verschillende classificatiemethodes geclassificeerd. De geselecteerde classificatietechnieken zijn maximum likelihood, support vector machine en object based classifaction (zie voor beschrijving van de technieken hoofdstuk 3 Literatuur, paragraaf 3.2.3, 3.2.4 en 3.2.5). Deze classificatietechnieken zijn alle met ArcGIS uit te voeren. De overige beschreven classificatietechnieken zijn niet mogelijk met de beschikbare software en de verwachting is dat ze minder goede resultaten leveren vanwege de eenvoudigere classificatie-algoritmen. Voor object based classification is een aanvullend gesegmenteerd raster nodig. Hiervoor is een segmentatie uitgevoerd op de bandcombinatie R, NIR en CHM (resolutie 5 cm) met een spectraal detail van 20 en een ruimtelijk detail van 5 (beide getallen zijn dimensieloos, waarbij lagere getallen minder korrelige clusters geven, ten koste van discriminerend vermogen) en een minimale clustergrootte van 1600 pixels. Dit raster is voor alle object based classificaties gebruikt.

De definitieve rs-technieken zijn weergegeven in Tabel 7. Achter de codes van de bandcombinatie-resolutie technieken komt een kleine letter die aangeeft welke classificatiemethode wordt toegepast. Het resultaat zijn 24 rs-technieken die voor drie pilotgebieden worden getest.

Tabel 7 Definitieve rs-technieken waar de bandcombinaties en resoluties gecombineerd worden met drie verschillende classificatiemethodes. Elke code is een aparte rs-techniek die getoetst gaat worden.

Voorlopige rs-technieken	**Maximum Likelihood**	**Support Vector Machine**	**Object Based Classification**
A010	A010m	A010s	A010o
B010	B010m	B010s	B010o
C010	C010m	C010s	C010o
D010	D010m	D010s	D010o
D025	D025m	D025s	D025o
D050	D050m	D050s	D050o
D100	D100m	D100s	D100o
E010	E010m	E010s	E010o

4.3 Geselecteerde pilotgebieden

Op basis van o.a. een veldtest van de maximale vliegduur van de drone, de hoeveelheid veldopnames die in een dag op te nemen zijn, de aanwezige vegetatiestructuur en advies van Bureau Waardenburg, is een selectie gemaakt van drie pilotgebieden. Zie Bijlage I voor een overzicht van de ligging van de pilotgebieden in het studiegebied en Bijlage J voor detailfoto's van de pilotgebieden.

Pilotgebied 1 is gekozen voor de grote verscheidenheid aan vegetatiestructuurtypen die er voorkomen, bijna alle typen zijn hier vertegenwoordigd. Dit pilotgebied is het grootst met een oppervlakte van 10,8 hectare.

Pilotgebied 2 is hoofdzakelijk gekozen vanwege de aanwezigheid van bos, riet en lisdodde. Tijdens het veldwerk bleek overigens dat dit bos afgestorven was en daarmee waarschijnlijk niet representatief was voor deze vegetatiestructuurklasse. Dit pilotgebied is 8,6 hectare groot.

Pilotgebied 3 is gekozen op advies van Bureau Waardenburg omdat dit gebied buiten het begrazings- en maaibeheer valt. De verwachting was dat hier de vegetatie verder ontwikkeld was en daarmee een goede bron zou zijn van opnames in de ruigere structuurtypen. Vanwege de geïsoleerde ligging is de oppervlakte met 3,4 hectare maar half zo groot als die van de andere pilotgebieden.

4.4 Classificatie vegetatiestructuuropnames

Tabel 8 geeft het resultaat weer van de vegetatiestructuuropnames die in het veld zijn gemaakt. De klasse water is handmatig in ArcGIS ingevoerd aan de hand van de waterpartijen die op de orthofoto's zichtbaar zijn. Per pilotgebied is bepaald hoeveel punten tot een bepaalde vegetatiestructuurklasse behoren.

Tabel 8 overzicht vegetatiestructuuropnames per pilotgebied.

Structuurklasse	**Pilot 1**	**Pilot 2**	**Pilot 3**	**Totaal**
Water	30	59	35	**124**
Slik	56	49	45	**150**
Kale grond	46	5	0	**51**
Pioniervegetatie	72	21	20	**113**
Grasland	159	18	25	**202**
Kruidige vegetatie	45	13	10	**68**
Ruigte	34	10	29	**73**
Riet	15	22	2	**39**
Lisdodde	3	39	7	**49**
Verharding	35	0	0	**35**
Totaal	**495**	**236**	**173**	

Grasland en slik zijn de vaakst opgenomen klassen. Lisdodde, riet en verharding het minst vaak. Omdat verharding alleen in pilot 1 voorkomt, zijn er alleen in dit pilotgebied punten van opgenomen.

4.5 Classificatie rs-technieken

Eerst wordt aan de hand van voorbeelden het resultaat van de orthofoto's besproken waarna in de tweede deelparagraaf het resultaat van de vegetatiestructuurkaarten wordt besproken. Aan de hand van voorbeelden worden verschillen tussen het classificatieresultaat van de rs-technieken duidelijk gemaakt.

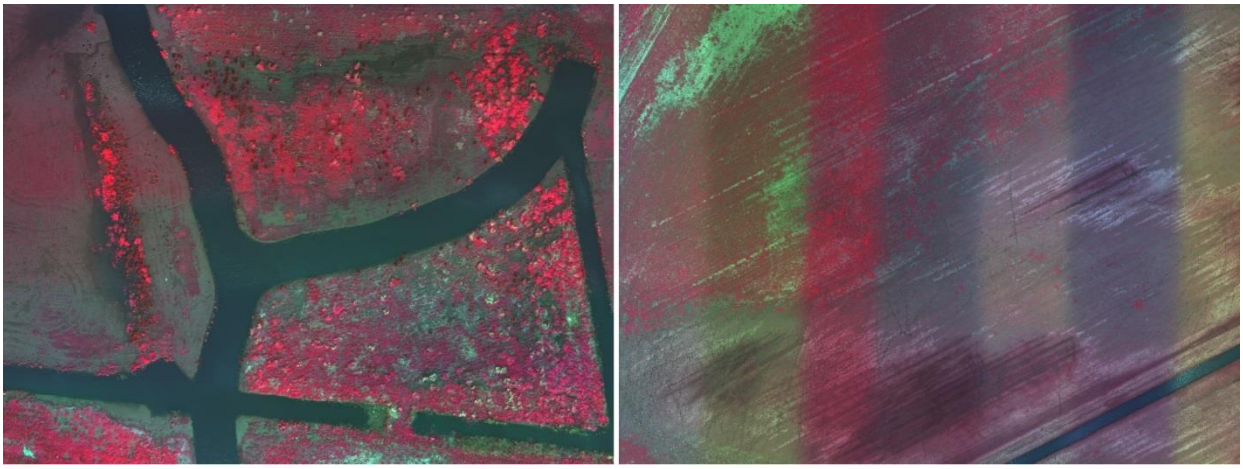
4.5.1 Resultaat orthofoto's

Van de luchtfoto's van de vier spectrale banden en rgb-bandcombinatie zijn orthofoto's gemaakt. De kwaliteit is per pilotgebied en per spectrale band wisselend. In Tabel 9 is een overzicht opgenomen van de kwaliteitsgegevens van de orthofoto's. Hierin is te zien dat de RGB orthofoto van pilotgebied 1 een zeer hoge RMS-error heeft voor de georeferentie, ook zijn maar vijf van de zeven GCP's gebruikt voor het maken van de orthofoto. De RMS-error is de restfout (afstand in X, Y en Z) na optimalisatie tussen de gemeten locaties van de GCP's en de locaties in de orthofoto's. De RGB-orthofoto was dan ook van dusdanig slechte kwaliteit dat deze niet gebruikt kon worden voor classificatie. De RGB orthofoto's van pilotgebied 2 en 3 zijn te vinden in Bijlage J, een false colour orthofoto van alle drie de pilotgebieden is te vinden in Bijlage K.

Tabel 9 Kwaliteisgegevens uit Pix4D van de orthofoto's. Uit de beschikbare gegevens is een selectie gemaakt die het beste de kwaliteitsverschillen tussen de verschillende orthofoto's benadrukt. De grote verschillen in GSD tussen de RGB en multispectrale orthofoto's worden veroorzaakt door een verschil in sensorresolutie. Ook zijn voor de multispectrale rasters meer foto's gebruikt omdat voor alle vier banden een aparte foto wordt opgeslagen. Pilotgebied 1 mist georeferentie bij een groot aantal foto's en er kon geen radiometrische kalibratie uitgevoerd worden. Pilot 1 RGB heeft een RMS-error die vele malen hoger is dan die van de overige orthofoto's. Het aantal GCP's dat getoond is, is het aantal dat door PiX4D succesvol gebruikt is voor het maken van de orthofoto. In het veld zijn 9 GCP's geplaatst in pilotgebieden 1 en 2, en 7 GCP's in pilotgebied 3.

Pilotgebied	**Gem. GSD (cm)**	**GCP's**	**Foto's gegeorefereerd/ totaal**	**Georeferentie RMS error (m)**	**Radiometrische kalibratie**
Pilot 1 RGB	0,1	5	418/1192	49,105	nee
Pilot 1 Multispectraal	4,85	9	1244/3480	0,016	nee
Pilot 2 RGB	1,27	9	1020/1020	0,027	ja
Pilot 2 Multispectraal	4,89	9	3080/3080	0,041	ja
Pilot 3 RGB	1,32	7	560/560	0,051	ja
Pilot 3 Multispectraal	4,89	7	1280/1280	0,02	ja

De orthofoto's tonen in meer of mindere mate strepen parallel aan de vliegrichting. Voornamelijk pilotgebied 1 heeft hiermee te maken. Daarentegen is dit effect in pilotgebied 3 nauwelijks zichtbaar. De strepen zijn, wanneer zichtbaar, op alle banden aanwezig. Figuur 3 geeft een voorbeeld van twee gebieden met verschillende zichtbaarheid van de strepen.



Figuur 3 Voorbeeld van het verschil in zichtbaarheid van de strepen van een false colour orthofoto (NIR-rood-groen). De linker afbeelding toont een uitsnede uit pilotgebied 3 waar de strepen amper zichtbaar zijn. In de rechter afbeelding, een uitsnede van pilotgebied 1, zijn de brede verticale strepen duidelijk zichtbaar. De diagonale strepen in de rechter foto zijn restanten van zaaisporen. De kaarten waar deze uitsneden uit komen, zijn te vinden in Bijlage K.

Ondanks een succesvolle testvlucht boven een gebied met een gelijk oppervlakte als pilotgebied 1, is de drone er niet in geslaagd het hele pilotgebied 1 in te vliegen. Hierdoor mist op de orthofoto langs de zuidwestelijke grens een strook van 12 meter breed.

4.5.2 Resultaat hoogtemodel

Tabel 10 geeft het resultaat van de validatie van het hoogtemodel. Aan de hand van dit resultaat kan de kwaliteit van het hoogtemodel beoordeeld worden.

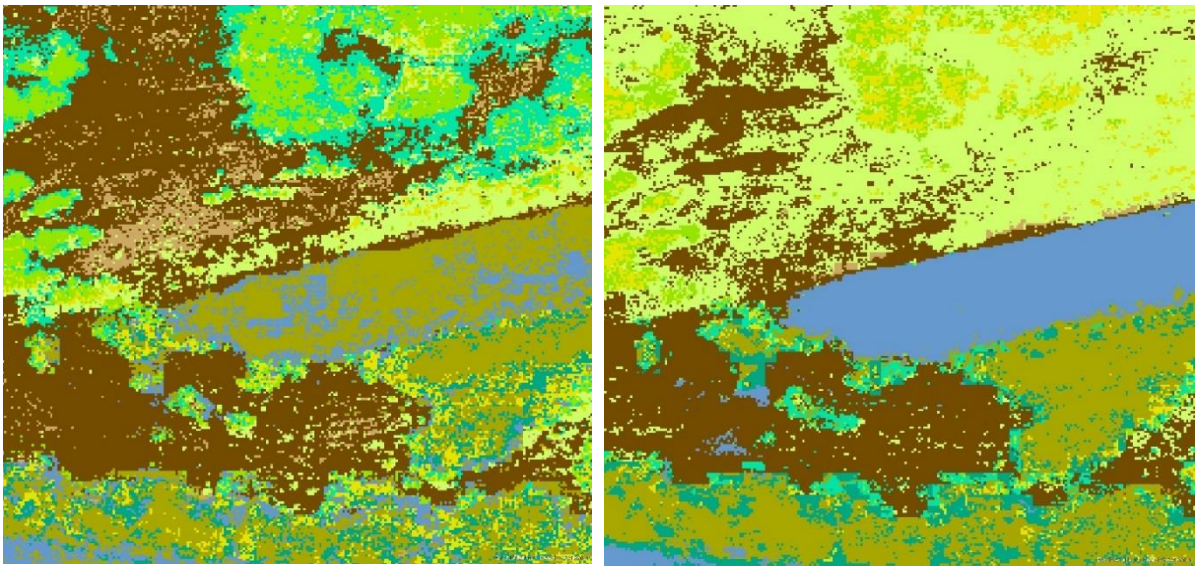
Tabel 10 Validatie van het hoogtemodel (CHM) van de drie pilotgebieden samen. Hierbij is de gemiddelde afwijking, de standaarddeviatie en de minimale en maximale afwijking gegeven. Het resultaat is uitgesplitst per vegetatiestructuurklasse. In de onderste regel zijn nogmaals de totalen berekend maar nu zonder de klassen bos en water.

	Aantal	Gem. afwijking (cm)	St. dev. (cm)	Min. Afwijking (cm)	Max. afwijking (cm)
Water	124	-70,34	56,48	-315	0
Slik	150	-5,11	7,05	-35	0
Kale grond	51	-0,88	3,36	-23	0
Pioniervegetatie	112	3,58	8,47	-36	43
Grasland	200	3,05	7,44	-33	19
Kruidige vegetatie	68	-0,66	13,46	-42	30
Ruigte	73	36,01	55,05	-3	347
Riet	37	47,70	38,59	2	168
Lisdodde	41	39,93	17,34	-46	63
Bos	20	1948,55	115,41	1489	2000
Verharding	35	-4,83	2,22	-10	0
Totaal:	**911**	**39,81**	**289,61**	**-315**	**2000**
Totaal zonder bos en water:	767	7,84	26,26	-46	347

De gemiddelde hoogteafwijking van alle vegetatiestructuurklassen samen is 39,81 centimeter. Dit is een grote afwijking maar uit de gemiddelde afwijking van de klassen blijkt dat water en bos de grootste afwijking hebben. Vermoedelijk komt de afwijking van water door het, in 3.1.2 van het literatuuronderzoek, beschreven probleem en komt de afwijking van bos vanwege het ontbreken van een bladkroon omdat het bos afgestorven is. Wanneer de klassen ‘bos’ en ‘water’ niet worden meegenomen in de validatie van het hoogtemodel heeft het hoogtemodel een gemiddelde afwijking van 7,84 centimeter.

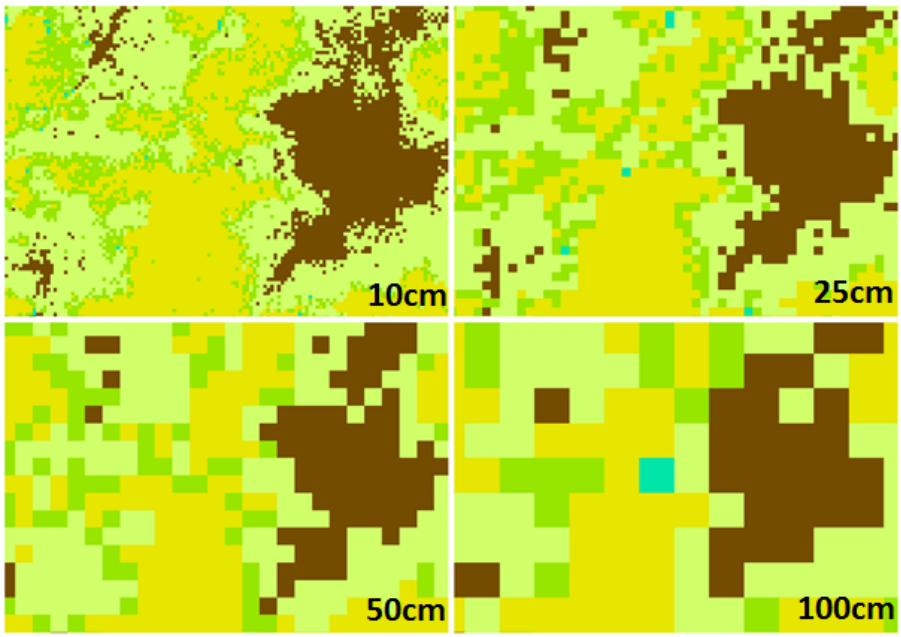
4.5.3 Resultaat classificatie

De vegetatiestructuurkaarten, die geclassificeerd zijn volgens de verschillende rs-technieken, tonen verschillen in resultaat. Zo toont Figuur 4 dat bij de bandcombinatie groen, rood en NIR duidelijk een sloot zichtbaar is in het classificatieresultaat, terwijl dit bij de classificatie van RGB niet het geval is. Daarnaast is in dit figuur te zien dat grove patronen bij beide classificaties vergelijkbaar zijn maar dat deze patronen vaak als een andere vegetatiestructuurtype zijn geclassificeerd.



Figuur 4 Voorbeeld van het verschil in classificatie van het waterlichaam op het midden van de uitsneden. links RGB (rs-techniek A010m) en rechts multispectrale beelden (D025m). Dit voorbeeld zijn uitsneden van de vegetatiestructuurkaarten van de desbetreffende rs-technieken.

Naast het verschil in resultaat tussen bandcombinaties is ook het verschil in resultaat bij vier verschillende resoluties zichtbaar. Dit is weergegeven in Figuur 5. Uit de figuur valt op dat naar mate de resolutie groter wordt, de nauwkeurigheid daalt. Er vinden grote verschuivingen plaats tussen verschillende vegetatieklassen.



Figuur 5 Voorbeeld van het verschil van geclassificeerde kaarten bij vier verschillende resoluties. De voorbeelden zijn uitsnedes (1:100) pilotgebied 3 van de vegetatiestructuurkaarten van de rs-technieken D010m, D025m, D050m en D100m.

Tot slot is in het voorbeeld in Bijlage L te zien hoe de classificatietechnieken bij hetzelfde raster tot onderscheidende resultaten komen. Het grootste verschil is dat object based classification een minder korrelig resultaat geeft dan MLC en SFM. Verder valt op dat er tussen MLC en FSC een groot verschil zit wat als slik en wat als pioniervegetatie wordt geclassificeerd.

4.6 Validatie rs-technieken

De resultaten van de validatie zijn samengevat in Tabel 11. Per rs-techniek staan in drie kolommen de Accuracy, de Kappa en de Balance Index (zie paragraaf 2.8 van Methode & Werkwijze voor verdere uitleg van accuracy, kappa en de Balance Index).

Tabel 11 Samenvatting validatieresultaten van classificatie volgens de verschillende rs-technieken. Accuracy is het percentage correct geclassificeerde validatiepunten. Kappa is de accuracy gecorrigeerd voor toevallige overeenstemming en de balance index is de accuracy gecorrigeerd voor de mate van vergissing (zie ook paragraaf 2.8). Per kolom is een kleurschaal (groener is beter) toegevoegd om snel een overzicht te krijgen van de kwaliteit van de classificaties, de overeenkomstige kolommen van de verschillende classificatietechnieken worden hiervoor als één kolom beschouwd.

Maximum Likelihood				**Support Vector Machine**				**Object Based**			
	Accuracy	Kappa	Balance Index		Accuracy	Kappa	Balance Index		Accuracy	Kappa	Balance Index
A010m	54%	47%	83%	A010s	51%	43%	81%	A010o	53%	43%	84%
B010m	56%	50%	89%	B010s	54%	47%	88%	B010o	53%	44%	87%
C010m	53%	47%	88%	C010s	54%	47%	88%	C010o	54%	44%	87%
D010m	55%	49%	89%	D010s	56%	49%	89%	D010o	55%	46%	87%
D025m	56%	50%	90%	D025s	54%	47%	88%	D025o	55%	46%	88%
D050m	51%	45%	88%	D050s	53%	46%	88%	D050o	55%	46%	87%
D100m	50%	43%	87%	D100s	52%	45%	88%	D100o	54%	44%	87%
E010m	47%	40%	85%	E010s	51%	44%	87%	E010o	55%	45%	87%

4.6.1 Resultaten rs-technieken

De rs-technieken “B010m” (zie Bijlage M voor classificatieresultaat) en “D025m”(zie Bijlage N) hebben de hoogste accuracy en kappa. “D025m” heeft een hogere balance-index dan “B010m” en heeft dus een minder grote fout bij misclassificatie. Het verschil tussen de twee best scorende rs-technieken is erg klein. In Tabel 12 en Tabel 13 staan de confusion matrixes van de rs-technieken “D025m” respectievelijk “B010m”. “E010m” (zie Bijlage O) heeft de slechtste accuracy en kappa en heeft dus het slechtste resultaat behaald.

Tabel 12 Confusion matrix van rs-techniek D025m (Spectrale banden: groen, rood, infrarood en red edge met een GSD van 25 cm en volgens maximum likelihood classification geclassificeerd). De kolommen geven de in het veld waargenomen vegetatieklassen aan voor de validatiepunten, de rijen geven het geclassificeerde resultaat voor dezelfde punten. De grijs gearceerde diagonaal geeft de correct geclassificeerde punten weer. De onderste drie regels tonen de accuracy, kappa en Balance Index (voor uitleg zie paragraaf 2.8). De producers accuracy is het percentage validatiepunten per klasse dat correct geclassificeerd is (omissiefout). De users accuracy is het percentage van het classificatieresultaat per klasse dat daadwerkelijk tot die klasse behoort (inclusiefout). Bijvoorbeeld: Wanneer er gekeken wordt naar de kolom met de klasse "Water", dan is te zien dat 91 punten correct geclassificeerd zijn, dat één punt foutief als "Grasland" en één punt foutief als "Verharding" geclassificeerd is. 91 correcte punten van de 93 punten in deze klasse geeft een producers accuracy van 98%. Wordt er naar de rij met klasse "Water" gekeken dan zijn naast de 91 correcte punten ook twee punten "Slik" en 1 punt "Lisdodde" foutief geclassificeerd als "Water". 91 correcte punten op een geclassificeerd resultaat van 94 geeft een users accuracy van 97%

	Water	Slik	Kale grond	Pionier-vegetatie	Grasland	Kruidige vegetatie	Ruigte	Riet	Lisdodde	Verharding	**Totaal**	**Users Accuracy**
Water	91	2	0	0	0	0	0	0	1	0	**94**	**97%**
Slik	0	55	4	30	4	1	0	0	2	1	**97**	**57%**
Kale grond	0	5	26	14	7	0	0	0	0	0	**52**	**50%**
Pioniervegetatie	0	30	7	29	26	3	0	0	4	0	**99**	**29%**
Grasland	1	5	0	9	72	14	2	3	1	0	**107**	**67%**
Kruidige vegetatie	0	0	1	2	12	15	12	6	0	0	**48**	**31%**
Ruigte	0	1	0	0	22	7	33	7	3	0	**73**	**45%**
Riet	0	2	0	0	5	7	4	11	4	0	**33**	**33%**
Lisdodde	0	11	0	1	4	4	4	2	22	0	**48**	**46%**
Verharding	1	2	0	0	0	0	0	0	0	25	**28**	**89%**
Totaal	**93**	**113**	**38**	**85**	**152**	**51**	**55**	**29**	**37**	**26**	**679**	
Producers Accuracy	**98%**	**49%**	**68%**	**34%**	**47%**	**29%**	**60%**	**38%**	**59%**	**96%**		
Accuracy	**56%**											
Kappa	**50%**											
Balance Index	**90%**											

Water en verharding hebben het beste resultaat opgeleverd. Pioniervegetatie is slecht geclassificeerd en heeft veel overlap met kale grond en slik. Ruigte heeft veel overlap met riet en kruidige vegetatie.

Tabel 13 Confusion matrix van rs-techniek B010m (Spectrale banden: groen, rood en infrarood met een GSD van 10 cm en classificatie volgens maximum likelihood classification). Zie Tabel 12 voor uitleg over hoe de tabel gelezen moet worden.

	Water	Slik	Kale grond	Pionier-vegetatie	Grasland	Kruidige vegetatie	Ruigte	Riet	Lisdodde	Verharding	**Totaal**	**Users Accuracy**
Water	91	1	0	0	0	0	0	0	0	0	**92**	**99%**
Slik	1	56	4	21	2	2	1	0	0	1	**88**	**64%**
Kale grond	0	9	24	24	5	0	0	0	0	0	**62**	**39%**
Pioniervegetatie	0	26	8	26	13	1	1	0	2	0	**77**	**34%**
Grasland	1	4	0	6	80	11	3	5	2	0	**112**	**71%**
Kruidige vegetatie	0	0	1	1	20	16	8	7	2	0	**55**	**29%**
Ruigte	0	3	0	0	11	5	29	9	4	0	**61**	**48%**
Riet	0	1	0	0	4	10	8	8	2	0	**33**	**24%**
Lisdodde	0	11	0	7	17	6	5	0	25	0	**71**	**35%**
Verharding	0	2	1	0	0	0	0	0	0	25	**28**	**89%**
Totaal	**93**	**113**	**38**	**85**	**152**	**51**	**55**	**29**	**37**	**26**	**679**	
Producers Accuracy	**98%**	**50%**	**63%**	**31%**	**53%**	**31%**	**53%**	**28%**	**68%**	**96%**		
Accuracy	**56%**											
Kappa	**50%**											
Balance Index	**89%**											

Net als bij rs-techniek D025m hebben water en verharding ook bij B010m de hoogste accuracies opgeleverd. Lisdodde heeft een hoge producers accuracy maar een lage users accuracy. Dit betekent dat de lisdodde opnames juist zijn geclassificeerd maar dat er ook veel punten als lisdodde zijn geclassificeerd die tot een andere klasse behoren.

4.6.2 Validatieresultaten per pilotgebied

In Bijlage E staan de accuracy en kappa van de rs-technieken per pilotgebied weergegeven. Hieruit blijkt dat er tussen de pilotgebieden een groot kwaliteitsverschil is in het resultaat van de classificatie. De accuracy van pilotgebied 2 en 3 liggen op slechts 2%-punt van elkaar maar pilotgebied 1 scoort 8%-punt slechter dan pilotgebied 2 en 10%-punt slechter dan pilotgebied 3.

4.6.3 Validatieresultaten per klasse

Daarnaast zijn ook de validatieresultaten per vegetatiestructuurtype bepaald, zie Bijlage F. Uit deze tabel blijkt dat water en verharding een hoge producers accuracy hebben van gemiddeld 0,96 voor water en 0,80 voor verharding. Dit betekent dat bijna alle validatiepunten van deze klasse correct geclassificeerd zijn. Daarentegen hebben de klassen riet (21%), ruigte (22%) en pioniervegetatie (28%) een lage producers accuracy gekregen. De overige klassen hebben wisselende resultaten geboekt.

4.6.4 Classificatie met minder klassen

Uit paragraaf 4.5.2 blijkt dat zowel slik, kale grond en pioniervegetatie als grasland en lage kruidige vegetatie veel overlap hebben. In de confusion matrix in Tabel 14 is het resultaat van de validatie te zien van de classificatie waar klassen met veel overlap zijn samengevoegd tot 'onontwikkeld' (slik, kale grond en pionier) en 'gras/kruidig', lisdodde is komen te vervallen als klasse. D025m met samengevoegde klassen heeft een accuracy van 75%, een kappa van 67% en een balance index van 76%. Zie Bijlage P voor de kaart van dit classificatieresultaat.

Tabel 14 Confusion matrix van rs-techniek D025m waarbij klassen die veel overlap vertonen in de originele confusion matrix samengevoegd zijn.

	Water	Onontwikkeld	Gras/kruidig	Ruigte	Riet	Verharding	**Totaal**	**Users Accuracy**
Water	91	4	0	0	0	0	**95**	**96%**
Onontwikkeld	0	201	33	1	1	0	**236**	**85%**
Gras/kruidig	1	25	116	13	6	0	**161**	**72%**
Ruigte	0	0	36	37	10	0	**83**	**45%**
Riet	0	5	18	4	12	0	**39**	**31%**
Verharding	1	2	0	0	0	25	**28**	**89%**
Totaal	**93**	**237**	**203**	**55**	**29**	**25**	**642**	
Producers Accuracy	**98%**	**85%**	**57%**	**67%**	**41%**	**100%**		
Accuracy	**75%**							
Kappa	**67%**							
Balance Index	**76%**							

4.7 Vergelijking met huidige techniek

In paragraaf 4.7.1 is het resultaat weergegeven van de validatie van de door Bureau Waardenburg gemaakte vegetatiestructuurkaarten uit mei en augustus 2016 (zie paragraaf 2.9 van Methode & Werkwijze). Daarna wordt in 4.7.2 de vergelijking gemaakt met de accuracy en kappa van de hoogst scorende rs-technieken.

4.7.1 Resultaat validatie huidige rs-techniek

Tabel 15 Validatie vegetatiestructuurkaart mei 2016 met vegetatieopnames april 2017.

	Water	Slik	Kale grond	Pionier-vegetatie	Grasland	Kruidige vegetatie	Ruigte	Riet	Lisdodde	Struweel	Bos	Verharding	**Totaal**	**Users Accuracy**
Water	74	0	0	0	1	1	0	8	0	0	0	0	**84**	**88%**
Slik	0	55	0	14	16	2	6	1	7	0	0	0	**101**	**54%**
Kale grond	0	0	0	2	4	1	2	0	1	0	0	0	**10**	**0%**
Pioniervegetatie	6	46	37	62	101	24	5	5	25	0	0	1	**312**	**20%**
Grasland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0%**
Kruidige vegetatie	0	11	0	5	16	14	24	12	3	0	0	0	**85**	**16%**
Ruigte	4	1	0	2	13	9	17	3	1	0	0	0	**50**	**34%**
Riet	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**9**	**0%**
Lisdodde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0%**
Struweel	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	**1**	**0%**
Bos	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	**1**	**0%**
Verharding	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25	**26**	**96%**
Totaal	**93**	**113**	**38**	**85**	**152**	**51**	**55**	**29**	**37**	**0**	**0**	**26**	**679**	
Producers Accuracy	**80%**	**49%**	**0%**	**73%**	**0%**	**27%**	**31%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**96%**		
Accuracy	**36%**													
Kappa	**28%**													
Balance Index	**83%**													

Tabel 15 toont dat de vegetatiestructuurkaart een accuracy heeft van 36% en een kappa van 28%. De grootste fout in de classificatie is dat in mei 2016 grasland als pioniervegetatie is geclassificeerd. Daarnaast zijn ook pioniervegetatie en ruigte vaak als kruidige vegetatie geclassificeerd. Slik is vaak als pioniervegetatie geclassificeerd. Verharding en water zijn de klassen waar de validatie de beste resultaten heeft gehad.

Uit Tabel 16 blijkt dat de vegetatiestructuurkaart van augustus een accuracy heeft van 32% en een kappa van 25%. Dit betekent dat de kaart van mei 2016 meer overeenkomt met de vegetatieopnames van april 2017 dan de vegetatiestructuurkaart van augustus 2016. Ook hier is grasland het meest foutief geclassificeerd maar dan als kruidige vegetatie in plaats van pioniervegetatie. Water en verharding zijn de klassen die het beste validatieresultaat hebben.

Tabel 16 Validatie vegetatiestructuurkaart augustus 2016 met vegetatieopnames april 2017

	Water	Slik	Kale grond	Pionier-vegetatie	Grasland	Kruidige vegetatie	Ruigte	Riet	Lisdodde	Bos	Verharding	**Totaal**	**Users Accuracy**
Water	57	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	**58**	**98%**
Slik	0	54	9	7	2	0	0	0	0	0	0	**72**	**75%**
Kale grond	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	**3**	**33%**
Pioniervegetatie	0	38	3	26	37	12	15	5	13	0	0	**149**	**17%**
Grasland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0%**
Kruidige vegetatie	9	15	24	44	93	26	19	7	23	0	1	**261**	**10%**
Ruigte	0	5	0	5	15	12	13	2	0	0	0	**52**	**25%**
Riet	26	1	0	2	4	1	8	14	0	0	0	**56**	**25%**
Lisdodde	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	**1**	**100%**
Bos	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	**1**	**0%**
Verharding	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	25	**26**	**96%**
Totaal	**93**	**113**	**38**	**85**	**152**	**51**	**55**	**29**	**37**	**0**	**26**	**679**	
Producers Accuracy	**61%**	**48%**	**3%**	**31%**	**0%**	**51%**	**24%**	**48%**	**3%**	**0%**	**96%**		
Accuracy	**32%**												
Kappa	**25%**												
Balance Index	**82%**												

4.7.2 Vergelijking met rs-technieken

De twee rs-technieken met de beste validatieresultaten zijn samen met de validatieresultaten van de vegetatiestructuurkaarten van mei en augustus 2016 in de onderstaande tabel gezet.

Tabel 17 Vergelijking van het resultaat van de validatie tussen de rs-technieken en de huidig toegepaste techniek op basis van de accuracy, kappa en de Balance Index.

	D025m	**B010m**	**Mei 2016**	**Augustus 2016**
Accuracy	56%	56%	36%	32%
Kappa	50%	50%	28%	25%
Balance Index	90%	89%	83%	82%

De rs-technieken met het beste validatieresultaat hebben een hogere kappa dan de vegetatiestructuurkaarten van mei en augustus 2016. De nieuwe rs-technieken D025m en B010m geven een beter resultaat in vegetatiestructuurkartering dan de huidige toegepaste methode.

4.8 Opschaling techniek

Uit het interview met Skeye BV (zie Bijlage G) blijkt dat er twee opties zijn om door Skeye BV false colour orthofoto 's van het gehele projectgebied te laten verkrijgen. De eerste optie is dat met behulp van de XCAM zowel RGB als NIR wordt opgenomen. De andere optie is om de Parrot Sequoia te gebruiken. Bij beide opties wordt de camera onder een vliegtuig van het type Cessna 172 bevestigd en is de minimale vliegsnelheid 70 knopen. Het is niet mogelijk om met behulp van een drone het gehele studiegebied in te vliegen. Bij beide opties is de frontale overlap minimaal 80% en de zijwaartse overlap minimaal 60%. In Tabel 18 zijn de resolutie en de door Skeye BV geschatte kosten van de twee opties en de reguliere RGB foto's weergegeven.

Tabel 18 Vergelijking van de indicatieve kosten van het maken van de orthofoto tussen de huidige RGB foto en twee opties vanuit Skeye BV om een false colour orthofoto te maken. Onder de kosten vallen: totale kosten van het vliegen met de Cessna, het gebruik van de (multispectraal)camera en de verwerking van de luchtfoto's tot een orthofoto en DSM.

	RGB (huidig)	RGB+NIR (XCAM)	Groen, rood, NIR, RE (Parrot Sequoia)
Resolutie (cm)	10	10	25
Indicatieve Kosten	€3900	€5800	€5800

De kosten van het verkrijgen van een false-colour orthofoto zijn aanzienlijk hoger dan de kosten van een RGB orthofoto. Naast de kosten van het verkrijgen van de orthofoto is de prijs van het uitvoeren van de remote sensing techniek afhankelijk van het aantal uren dat het duurt om de orthofoto te classificeren. Tabel 19 toont het verschil in tijd en kosten van de classificatie van de orthofoto 's tussen handmatige interpretatie en geautomatiseerde classificatie.

Tabel 19 Indicatief overzicht van de kosten van classificatie tussen de huidig toegepaste handmatige interpretatie en de nieuwe rs-techniek die gebruik maakt van geautomatiseerde classificatie. De prijzen zijn berekend op basis van de arbeidskosten van een GIS- medewerker van Bureau Waardenburg.

	Handmatige interpretatie	Geautomatiseerde classificatie
Uren voor classificatie	16	7
Indicatieve kosten	€1328	€581

Omdat de classificatie bij geautomatiseerde classificatie minder tijd kost dan bij handmatige interpretatie is deze techniek goedkoper om de Noordwaard te classificeren dan wanneer dit met behulp van handmatige interpretatie gedaan wordt.

4.9 Toetsing van eisen

In Bijlage H staat het resultaat of met het uitvoeren van de rs-techniek 'D025m' de criteria van de belanghebbenden zijn behaald. In deze paragraaf volgt een toelichting op de beoordeling.

De eisen die betrekking hebben tot de nauwkeurigheid zijn allemaal behaald omdat de nauwkeurigheid van de rs-techniek hoger is dan de eisen die gesteld worden door de verschillende belanghebbenden. Daarentegen zijn alle eisen die gesteld zijn met betrekking tot het kunnen karteren van individuele soorten niet behaald. Uit de confusion matrix in Tabel 12 blijkt dat ook de foutmarge tussen riet en ruigte met behulp van geautomatiseerde classificatie niet kleiner is dan met behulp van handmatige interpretatie. De eisen die betrekking hebben op de frequentie van de kartering zijn niet meegenomen in de beoordeling.

5 DISCUSSIE

In dit hoofdstuk wordt een reflectie gegeven over de gehanteerde methode en de resultaten.

De methode van de verzameling van veldgegevens, de inwinning en classificatie (deelvraag 6 t/m 8) is besproken met een remote sensing expert van Alterra, hij had geen opmerkingen of bedenkingen bij de beschreven methode (S. Mücher, persoonlijke communicatie, 18 april 2017).

Voor de object based classificatie is gekozen om één gesegmenteerd raster te maken op basis van de bandcombinatie CHM, NIR en rood met de originele resolutie (4,9 cm). De verwachting was dat met deze bandcombinatie het beste objecten onderscheiden konden worden. Dit betekent dat ook voor de bandcombinaties die in principe geen NIR of CHM bevatten, deze informatie gebruikt is. Er zou een betere inschatting van de kwaliteiten van de verschillende bandcombinaties mogelijk zijn wanneer de bandcombinaties zelf gesegmenteerd waren. Het vinden van de optimale segmentatieresolutie voor deze rasters zou echter tijdrovend zijn, en zonder aanvullend onderzoek zou onderbouwing van de gemaakte keuzes ontbreken. Ook zouden de classificaties moeilijker onderling te vergelijken zijn, omdat de segmentatie een extra onzekerheid geeft waardoor oorzaken van verschillen in resultaten moeilijker te verklaren zijn. Daarom is toch gekozen om voor elke object based classificatie het zelfde segmentatieraster te gebruiken. Dit kan wel verklaren waarom de accuracies van alle object based classificaties minder spreiding hebben dan van de andere classificatietechnieken.

In de methode is beschreven dat de Balance Index indiceert in welke mate de rs-technieken fout hebben geclassificeerd, omdat klassen die dicht bij elkaar staan minder fout zijn dan klassen die ver uit elkaar staan. Er wordt aangenomen dat de thematische afstand tussen verschillende, naast elkaar geplaatste klassen gelijk is, terwijl in werkelijkheid sommige klassen meer overeenkomst vertonen dan andere. Om hiervoor, door middel van een weging, te corrigeren was in dit onderzoek niet praktisch. Twee naastliggende klassen met grote verschillen zijn ‘lisdodde’ en ‘verharding’. Overlap hiertussen zou erg vertekenend zijn voor de Balance Index, in de resultaten geeft dit echter geen problemen omdat verharding en lisdodde geen overlap vertonen.

De vergelijking tussen de validatieresultaten van de nieuwe rs-techniek en de validatieresultaten van de vegetatiestructuurkaarten van mei en augustus is lastig. Er ontstaat een onzekerheidsmarge, omdat de vegetatieontwikkeling niet gelijk is aan de vegetatieontwikkeling tijdens het produceren van de vegetatiestructuurkaarten van mei en augustus 2016. Het zou aannemelijk zijn dat de vegetatiestructuurkaart van mei 2016 beter te vergelijken is met die van augustus 2016 omdat mei in hetzelfde seizoen is opgenomen als de validatiepunten. Echter, in mei 2016 stond een groot deel van het gebied onder water en was de vegetatie veel minder ontwikkeld dan in 2017 waardoor de vegetatiestructuurkaart van augustus 2016 toch een betere vergelijking oplevert met de huidige situatie. Ondanks de ruime onzekerheidsmarge zijn veel fouten herleidbaar tot fouten die ontstaan zijn door het “afronden” door het schaalniveau en verkeerde interpretatie.

De vergelijking tussen de verschillende rs-technieken is nu gebaseerd op de accuracy, waarbij de Balance Index differentiërend is. Er zijn statistische methodes om te bepalen of de verschillen tussen twee confusion matrices significant zijn, deze methodes zijn in dit onderzoek echter niet toegepast omdat de benodigde kennis ontbrak. Overigens worden in meer studies classificatoren met elkaar vergeleken zonder dat een statistische test wordt toegepast (Geerling et al., 2007; Hanston et al., 2012; Karan & Samadder, 2016).

In paragraaf 2.6 van Methode & Werkwijze staat beschreven dat per vegetatiestructuurklasse minimaal 50 opnames gemaakt worden om het resultaat statistisch te kunnen onderbouwen. Uit het

resultaat in paragraaf 4.4 blijkt dat de klassen riet, lisdodde en verharding niet aan deze eis voldoen. De reden hiervoor is dat deze klassen slechts in beperkte mate voorkomen in de pilotgebieden.

Tijdens het opnemen van de vegetatieplots bleek dat het bos in pilotgebied 2 afgestorven was door de verhoogde waterstand in het gebied. Een test heeft uitgewezen dat grote delen slik als bos geclassificeerd werden, waarschijnlijk, omdat tijdens de training de spectrale eigenschappen van de slijkige bosbodem toegekend zijn aan de klasse bos. Hierdoor was dit bos niet representatief en dus onbruikbaar voor de classificatie. Eerder onderzoek (Mensink, 2017) suggereert dat bos goed is te classificeren wanneer het voldoende in blad staat en de vegetatiehoogte onderdeel is van de classificatie. Het is dus de verwachting dat de nu geselecteerde methode levend bos correct kan classificeren. Desalniettemin had een inspectie van de pilotgebieden vóór het veldwerk geleid tot een betere selectie van pilotgebieden.

Er is een testvlucht gemaakt om te onderzoeken of de maximale vliegduur van de drone een beperkende factor zou zijn. Hieruit bleek dat de maximale vliegduur van de drone géén beperkende factor zou zijn. Omdat door leveringsproblemen de drone met multispectraalcamera nog niet beschikbaar was, is de testvlucht uitgevoerd met een ouder type van dezelfde drone. De verwachting was dat het hogere stroomverbruik door het toevoegen van de camera gecompenseerd zou worden door de grotere accucapaciteit van de nieuwe drone. Echter, tijdens het maken van de luchtfoto's stond een krachtigere wind dan tijdens de testvlucht. Dit heeft vermoedelijk invloed heeft gehad op de vliegtijd van de drone. Daarom is pilotgebied 1 niet volledig ingevlogen.

Het ontbreken van radiometrische kalibratie bij de luchtfoto's in pilotgebied 1 is mogelijk ook een gevolg van sterke wind. Vermoedelijk heeft de drone door een windvlaag een spanningsdip gehad en dit heeft de interne GPS van de camera uitgeschakeld. Zonder de GPS-data is kalibratie niet mogelijk. De ontbrekende kalibratie is hoogstwaarschijnlijk de oorzaak van de duidelijk zichtbare strepen in de orthofoto's van pilotgebied 1 (zie 4.5.1). Wisselende weersomstandigheden tijdens het maken van de luchtfoto's zijn daardoor niet gecompenseerd. De strepen zijn ook zichtbaar in de vegetatiestructuurkaarten. Dit verklaart waarom pilotgebied 1 een slechtere accuracy en kappa heeft dan pilotgebied 2 en 3, terwijl in pilotgebied 1 de meeste datapunten liggen. De verwachting is dan ook dat, wanneer er geen wisselende weersomstandigheden en missende kalibratie waren tijdens het inwinnen van de luchtfoto's, de resultaten beter zijn dan nu te zien is in het resultaat in 4.6.1.

Uit de beoordeling van het resultaat van het hoogtemodel in 4.5.2 blijkt dat de gemiddelde afwijking 7.8 centimeter is. Hieruit kan gesteld worden dat het resultaat bruikbaar is maar dat er, zeker bij hogere vegetatiestructuurklassen, wel fouten kunnen optreden. Een mogelijke oorzaak voor de foutmarge is dat hogere vegetatiestructuurklassen zoals riet en ruigte nog niet optimaal waren ontwikkeld in april 2017. Vermoedelijk is de foutmarge dus kleiner als er later in het seizoen een hoogtemodel wordt gemaakt.

Uit de validatie van de classificatie in paragraaf 4.6.1 blijkt dat de klasse 'Lisdodde' een grote overlap heeft met slik en grasland. De reden hiervoor is vermoedelijk dat eind april de lisdoddevegetatie nog niet voldoende was ontwikkeld om spectraal te kunnen worden onderscheiden van de onderliggende vegetatielaag.

Slik en kale grond hebben veel overlap met pioniervegetatie. De overlap tussen kale grond en pioniervegetatie is mogelijk te verklaren door de ondergrens van de bedekking (5%, zie Bijlage B) van de klasse pioniervegetatie. Misschien is deze lage bedekking spectraal onvoldoende differentiërend en zou een hogere grens minder overlap geven. De overlap tussen pioniervegetatie en slik kan ook deels verklaard worden door dit fenomeen. Een ander punt wat hier meespeelt, is algenbloei op de slikplaten. Dit geeft een groene waas over het slik dat mogelijk dezelfde spectrale eigenschappen

heeft als pioniervegetatie. Vermoedelijk treed dit probleem later in het seizoen nog sterker op wanneer de algenbloei meer op gang komt.

Grasland en kruidige vegetatie hebben ook veel overlap. Het hoge percentage gras dat in de klasse kruidige vegetatie kan voorkomen (90%, zie Bijlage B) draagt hier mogelijk aan bij. Ook hier kan het bijstellen van de grens tussen de klassen tot minder overlap leiden. Daarbij blijft natuurlijk de vraag of er voldoende spectraal onderscheid is tussen kruidige soorten en grassen.

Tijdens het opnemen van de vegetatiestructuur is in pilotgebied 1 een punt uit de validatieset, vermoedelijk 'kale grond', per ongeluk ingedeeld als 'verharding'. De punten zijn gecontroleerd maar deze fout is pas na validatie ontdekt. Hierdoor hebben alle validatieresultaten van de onderzochte technieken een kleine afwijking. Omdat alle classificaties dezelfde fout hebben, en daarmee nog steeds onderling te vergelijken zijn, is ervoor gekozen niet opnieuw te valideren.

6 CONCLUSIE & AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van beantwoording van de deelvragen de hoofdvraag beantwoord en de bijbehorende conclusie gegeven. Daarna worden aanbevelingen gedaan die voortkomen uit de discussie en de conclusie.

6.1 Conclusie

Nadat de in de literatuur beschreven technieken zijn getoetst aan de randvoorwaarden en de eisen van de belanghebbenden van dit onderzoek blijkt dat er 24 rs-technieken geschikt zijn om getest te worden. De technieken zijn elk unieke combinaties van verschillende bandcombinaties, verschillende resoluties en verschillende digitale classificatiemethodes. Deze technieken zijn getest in pilotgebieden die representatief zijn voor het studiegebied in de Noordwaard.

Nadat van de verschillende bandcombinaties de orthofoto's zijn gemaakt zijn deze foto's geclassificeerd en gevalideerd aan de hand van vegetatieopnames in de pilotgebieden. Uit deze validatie in paragraaf 4.6 blijkt dat techniek D025m met een accuracy van 56%, een kappa van 50% en een Balance Index van 90% het beste resultaat heeft geleverd. Rs-techniek D025m is de bandcombinatie groen, rood, NIR en RE en vegetatiehoogte met een GSD van 25 centimeter en is geclassificeerd volgens maximum likelihood classification in ArcGIS. Ondanks dat deze techniek het beste resultaat heeft, is de accuracy niet hoog. Wanneer de klassen die veel overlap vertonen in de validatie worden gecombineerd, behaald deze techniek een accuracy van 75% en een kappa van 67%. Het validatieresultaat van D025m is beter dan de validatie van de vegetatiestructuurkaarten die volgens de huidig toegepaste methode zijn gemaakt. Vanwege het grote verschil kan geconcludeerd worden dat de nieuwe rs-techniek een verbetering is ten opzichte van de huidige techniek.

Daarnaast is het mogelijk om deze techniek toe te passen op het gehele studiegebied, zolang de inwinning en het maken van de orthofoto's wordt uitbesteed aan Skeye BV. Ondanks dat de techniek minder tijd kost om te classificeren is de huidig toegepaste techniek kostenefficiënter. De reden hiervoor is dat aan het verkrijgen van een false-colour orthofoto meer kosten zijn verbonden dan een RGB foto. De nieuwe rs-techniek voldoet wel aan de meeste eisen van belanghebbenden.

Omdat de nieuwe techniek een verbetering is op kwaliteit vanwege een hogere nauwkeurigheid en het haalbaar is om de techniek uit te voeren in het gehele studiegebied kan geconcludeerd worden dat rs-techniek D025m een betere techniek is om de vegetatiestructuur in het studiegebied in de Noordwaard te monitoren dan de huidig toegepaste methode. Daarmee is de hoofdvraag bevestigend beantwoord. Met het uitvoeren van deze rs-techniek kan een vegetatiestructuurkaart worden verkregen die een beter beeld van de realiteit geeft en nauwkeuriger is dan de vegetatiestructuurkaarten zoals die in 2016 zijn gemaakt met de huidige techniek. Lisdodde en riet zijn in dit stadium echter nog niet voldoende te onderscheiden, terwijl juist deze soorten sterke invloed hebben op de doorstroming. Het begrazingsbeheer kan sneller en beter gestuurd worden als de kwaliteit van het resultaat verbeterd wordt. Hierdoor hoeft minder maaibeheer uitgevoerd te worden. Zo kan vegetatiestructuurkartering met behulp van geautomatiseerde classificatie bijdragen aan een duurzaam beheer van het studiegebied in de Noordwaard. Hiervoor moeten dan wel de problemen die in de discussie staan beschreven voorkomen worden.

6.2 Aanbevelingen

Om een zo betrouwbaar mogelijk resultaat te behalen moet de rs-techniek D025m later in het groeiseizoen worden uitgevoerd. De verwachting is dan dat de klassen 'lisdodde' en 'riet' beter te onderscheiden zijn. Vermoedelijk draagt het uitvoeren van de rs-techniek later in het seizoen ook bij aan een betrouwbaarder hoogtemodel. Daarnaast kunnen klassen met veel overlap zoals slik, kale grond en pioniervegetatie, en grasland en kruidige vegetatie gecombineerd worden om beter resultaat te behalen. Omdat slik, kale grond en pioniervegetatie niet actief worden beheerd en geen effect hebben op de doorstroming, kunnen deze klassen zonder problemen samengevoegd worden.

Vanwege de grote verschillen in beeldkwaliteit (streep effect) tussen de foto's met en zonder radiometrische kalibratie (zie Figuur 3 in paragraaf 4.5.1) is het sterk aan te bevelen om in de toekomst voor het verzamelen van de luchtfoto's gebruik te maken van een radiometrisch gekalibreerde camera. Ook het vliegen tijdens weersomstandigheden met een constante lichtsterkte (strak blauw of egaal bewolkt) heeft een groot positief effect op de beeldkwaliteit. Wanneer mogelijk moet hier rekening mee gehouden worden in de vluchtplanning. Om meer inzicht te krijgen in de mate van verbetering door radiometrische kalibratie kan aanvullend onderzoek uitgevoerd worden, bijvoorbeeld door het genereren van orthofoto's met en zonder kalibratie uit dezelfde luchtfoto-set.

Het is ook aan te bevelen om nader te onderzoeken of er beter resultaat verkregen kan worden wanneer in de beslisregels (zie Bijlage B) andere criteria gehanteerd worden met betrekking grenzen tussen vegetatiestructuurklassen. Bijvoorbeeld door de grens tussen lage kruidige vegetatie en gras van 90% bedekking grassoorten te verlagen naar 80%.

Met de bovenstaande aanpassingen is de verwachting dat de vegetatiestructuurontwikkeling effectief kan worden gemonitord. Door de techniek later in het groeiseizoen uit te testen en het resultaat van de classificatie en van het hoogtemodel te valideren, zal blijken of dit 'optimale' resultaat aan de verwachtingen voldoet.

Vanwege het verschil in vegetatieontwikkeling en plaats in het seizoen zijn de vegetatiestructuurkaarten van mei en augustus 2016 slecht te vergelijken met het classificatieresultaat van april 2017. Daarom zou de laatste versie van de vegetatiestructuurkaart, die volgens de huidig toegepaste methode is gemaakt, gevalideerd moeten worden wanneer deze kaart beschikbaar is.

Deze nieuwe techniek is wel tijdefficiënter maar niet kostenefficiënter dan de huidig toegepaste methode. Om er voor te zorgen dat de nieuwe rs-techniek uitgevoerd kan worden zonder dat de kosten hoger zijn dan de huidig toegepaste methode, zouden er vijf in plaats van de huidige zes vluchten uitgevoerd kunnen worden.

BRONVERMELDING

Agisoft. (2017). *Agisoft PhotoScan User Manual; Professional Edition, Version 1.3.* St. Petersburg: Auteur.

Assendorp, D. (2010). *Classification of pattern and process in small-scale dynamic ecosystems; with cases in the Dutch coastal dunes.* Amsterdam: University of Amsterdam.

Bahadur, K. K. (2009). Improving Landsat and IRS Image Classification: Evaluation of Unsupervised and Supervised Classification through Band Ratios and DEM in a Mountainous Landscape in Nepal. *Remote sensing*, *1*, 1257-1272. doi:10.3390/rs1041257

Bork, E. J., & Su, J. G. (2007). Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: A meta analysis. *Remote Sensing of Environment*, 111, 11-24. doi:10.1016/j.rse.2007.03.011

Bubberman, F., & Swellen Grebbel, E. (1955). *Bosbouwkundige luchtfoto - interpretatie : resultaten van een onderzoek over de kaartering van enige vegetatietypen van Noord - Suriname met behulp van luchtfoto's* (Scriptie). Landbouwhogeschool, Wageningen.

Congalton, R., & Green, K. (1999). *Assessing the accuracy of remote sensed data: principles and practices* (2e druk). Boca Raton, FL: Lewis.

Cyc. (2008, 16 februari). *Svm separating hyperplanes.* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Svm_separating_hyperplanes.png

Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2010). Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. *Remote sensing*, *2,* 1157-1176. doi:10.3390/rs2041157

Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing*, *7,* 13895-13920. doi:10.3390/rs71013895

Delegido, J., Verrelst, J., & Moreno, J. (2011). Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors, 11*, 7063-7081. doi:10.3390/s110707063

Dijksma, S., Kamphuis, D., van der Spek, M., Verstrael, T., Maat, A., Togtema, E., . . . Keizer-Mastenbroek, A. (2014, 31 januari). Human Capital Agenda Natuur en Leefomgeving. Groningen.

DJI. (2017, november). *Phantom 4 PRO/PRO+ - User manual (v1.2).* Shenzhen: Auteur. Geraadpleegd op 5 april 2017, https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/Phantom+4+Pro+Pro+Plus+User+Manual+v1.0.pdf

Esri. (2016). *Train Support Vector Machine Classifier*. Geraadpleegd op 21 maart 2017, van http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/train-support-vector-machine-classifier.htm

Fillella, I., & Peñuelas, J. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing, 15*(7), 1459-1470. Geraadpleegd op 29 mei 2017, van http://www.creaf.uab.es/global-ecology/Pdfs_UEG/IJRemSens1994.pdf

Franklin, S. E. (2001). *Remote sensing for sustainable forest management.* Boca Raton, FL: Lewis.

Fulvio314. (2016, 16 juli). Visible light spectrum with precise colors attribution. *Light spectrum (precise colors).* Geraadpleegd op 9 maart 2017, van https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_spectrum_(precise_colors).svg

Geerling, G. W., Labrador-Garcia, M., Clevers, J. G., Ragas, A. M., & Smits, A. J. (2007). Classification of floodplain vegetation by data-fusion of Spectral (CASI) and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing, 28*(19), 4263-4284. doi:10.1080/01431160701241720

Geospatial Innovation Facility. (2008). *RS/GIS Quick Start Guides - Landsat Spectral Band Information.* Berkeley, CA: Geospatial Innavation Facility, UC Berkeley.

Gillan, J. K., Karl, J. W., Duniway, M., & Elaksher, A. (2014). Modeling vegetation heights from high resolution stereo aerial photography: An application for broad-scale rangeland monitoring. *Journal of Environmental Management, 144*, 226-235. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.05.028

Glenn, N., Spaete, L., Sankey, T., Derryberry, D., Hardegree, S., & Mitchell, J.J. (2011). Errors in LiDAR-derived shrub height and crown area on sloped terrain. *Journal of Arid Environments, 75*, 377-382. doi:10.1016/j.jaridenv.2010.11.005

Hantson, W., Kooistra, L., & Slim, P. A. (2012). Mapping invasive woody species in coastal dunes in the Netherlands: a remote sensing approach using LIDAR and high-resolution aerial photographs. *Applied Vegetation Science, 15*(4), 536–547. doi:10.1111/j.1654-109X.2012.01194.x

James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes Landforms, 39*(10), *1413-1420*. doi: 10.1002/esp.3609

Kanke, Y., Tubaña, B., Dalen, M., & Harell, D. (2016). Evaluation of red and red-edge reflectance-based vegetation indices for rice biomass and grain yield prediction models in paddy fields. *Precision Agriculure, 17*(5), 507–530. doi:10.1007/s11119-016-9433-1

Karan, S. K., & Samadder, S. R. (2016). Accuracy of land use change detection using support vector machine and maximum likelihood techniques for open-cast coal mining areas. *Environmental Monitoring and Assessment, 188*(8), 1-13. doi:0.1007/s10661-016-5494-x

KCNL. (2016). *Over KCNL*. Geraadpleegd op 31 januari 2017, van http://www.groenecoes.nl/nl/coe/kcnl/over-kcnl.htm

KNMI. (2011, maart 18). *Nader verklaard, windschaal van Beaufort, Watson en Peterson (compleet).* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van http://bibliotheek.knmi.nl/scholierenpdf/Beaufort_schaal_compleet.pdf

Knotters, M., & Brus, D. J. (2010). *Sampling for validation of ecotope maps of floodplains in de Netherlands.* Leicester: Accuracy 2010 Symposium.

Kramer, H., Mücher, S., & Slim, P. (2014). *Geautomatiseerde vegetatiestructuurkartering Ameland-Oost.* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van http://edepot.wur.nl/328696

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation (*7e druk). Hoboken, NJ: Wiley.

Mensink, A. (2017). *Casus Remote Sensing Noordwaard* (minorrapport). Rapport in voorbereiding. Bos- en Natuurbeer, Van Hall Larenstein, Velp.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016, September). *Regelgeving drones - Verschillen in regelgeving recreatief-beroeps (stand van zaken september 2016).* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/drone/documenten/brochures/2016/07/06/regels-voor-drones-verschillen-tussen-recreatief-en-beroepsmatig-gebruik

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, & Ministerie van Defensie. (2012). *Luchtruimvisie – Bijlagerapport 1.* Den Haag: Miniserie van Infrastructuur en Milieu.

Mongus, D., & Žalik, B. (2015). An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 108*, 219-233. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.08.004

Natuurmonumenten. (2016, 9 juni). *Vijf reekalfjes ontkomen door drone aan maaimachine.* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van https://www.natuurmonumenten.nl/nieuws/vijf-reekalfjes-ontkomen-door-drone-aan-maaimachine

Navulur, K. (2006). *Multispectral Image Analysis Using The Object-Orietented Paradigm.* Boca Raton, FL: CRC.

Parrot. (2016). *Parrot Sequoia user guide.* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van https://parrotcontact.parrot.com/website/user-guides/sequoia/sequoia_user_guide.pdf.

Pix4D. (2016, 15 december). *Step 1. Before Starting a Project > 1. Designing the Image Acquisition Plan > a. Selecting the Image Acquisition Plan Type*. Geraadpleegd op 3 april 2017, van https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type#gsc.tab=0

Pix4D. (2017a, 15 mei). *How to improve the outputs of dense vegetation areas?* Geraadpleegd op 29 mei 2017, van https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560159-How-to-improve-the-outputs-of-dense-vegetation-areas-#gsc.tab=0

Pix4D. (2017b, 8 mei). *Is it possible to generate the Orthomosaic of Water Surfaces?* Geraadpleegd op 23 mei 2017, van https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558999-Is-it-possible-to-generate-the-Orthomosaic-of-Water-Surfaces-#gsc.tab=0

Pix4D. (2017c, 2 maart). *Step 1. Before Starting a Project > 4. Getting GCPs on the field or through other sources (optional but recommended)*. Geraadpleegd op 10 mei, 2017, van https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557489#gsc.tab=0

Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote Sensing DigitalImage Analysis: An Introduction.* Heidelberg: Springer.

Salami, E., Barrado, C., & Pastor, E. (2014). UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing, 6*, 11051-11081. doi:10.3390/rs61111051

Schmidt, A. M., Piórkowski, H., & Bartoszuk, H. (2000). *Remote Sensing Techniques and Geographic Information Systems for Wetland Conservation and Management: Monitoring scrub encroachment in Biebrza National Park.* Wageningen: Alterra.

Schoenmakers, J. (2016). *Intergrale monitoring van begrazing in de Noordwaard.* Velp: KennisCentrum Natuur en Leefomgeving.

Schuckman, K., & Renslow, M. (2017). *Characteristics of Lidar Data*. Geraadpleegd op 14 maart 2017, van https://www.e-education.psu.edu/geog481/l1_p6.html

Selles, J. (2017, 5 april). *Infrarood-drone redt weidevogels in Overijssel van wielen van tractor.* Geraadpleegd op 19 mei 2017, van http://www.destentor.nl/kampen/infrarood-drone-redt-weidevogels-in-overijssel-van-wielen-van-tractor~ab42d6f4/

Srivastava, P. K., Han, D., Rico-Ramirez, M. A., Michaela, B., & Islam, T. (2012). Selection of classification techniques for land use/land cover. *Advances in Space Research, 50*, 1250-1265. doi:10.1016/j.asr.2012.06.032

Streutker, D. R., & Glenn, N. F. (2006). LiDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights. *Remote Sensing of Environment, 102*, 135-145. doi:10.1016/j.asr.2012.06.032

Thenkabail, P. S., Eden, E. A., Ashton, M. S., & Van Der Meer, B. (2004). Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing of Environment, 91*, 354-376. doi:10.1016/j.rse.2004.03.013

Trimble. (2016). *eCognition Developer 9.2; User Guide.* München: Auteur.

Van der Wal, T., Meijer, M., & Rip, F. I. (2016). *Een verkenning naar toepassing van drones in landbouw en natuur.* Wageningen: Wageningen Environmental Research.

Wang, K., Franklin, S. E., Guo, X., & Cattet, M. (2010). Remote Sensing of Ecology, Biodiversity and Conservation: A Review from the Perspective of Remote Sensing Specialists. *Sensors, 10*, 9647-9667. doi:10.3390/s101109647

Weih, R. C., & Riggan, N. D. (2010). Object-based classification vs. pixel-based classification: Comparitive importance of multi-resolution imagery. *GEOBIA 2010: Geographic Object-Based Image Analysis* (p. 6). Ghent, Belgium: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Geraadpleegd op 29 mei 2017, van http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-C7/

Xie, Y., Sha, Z., & Yur, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology, 1*(1), 9-23. doi: 10.1093/jpe/rtm005

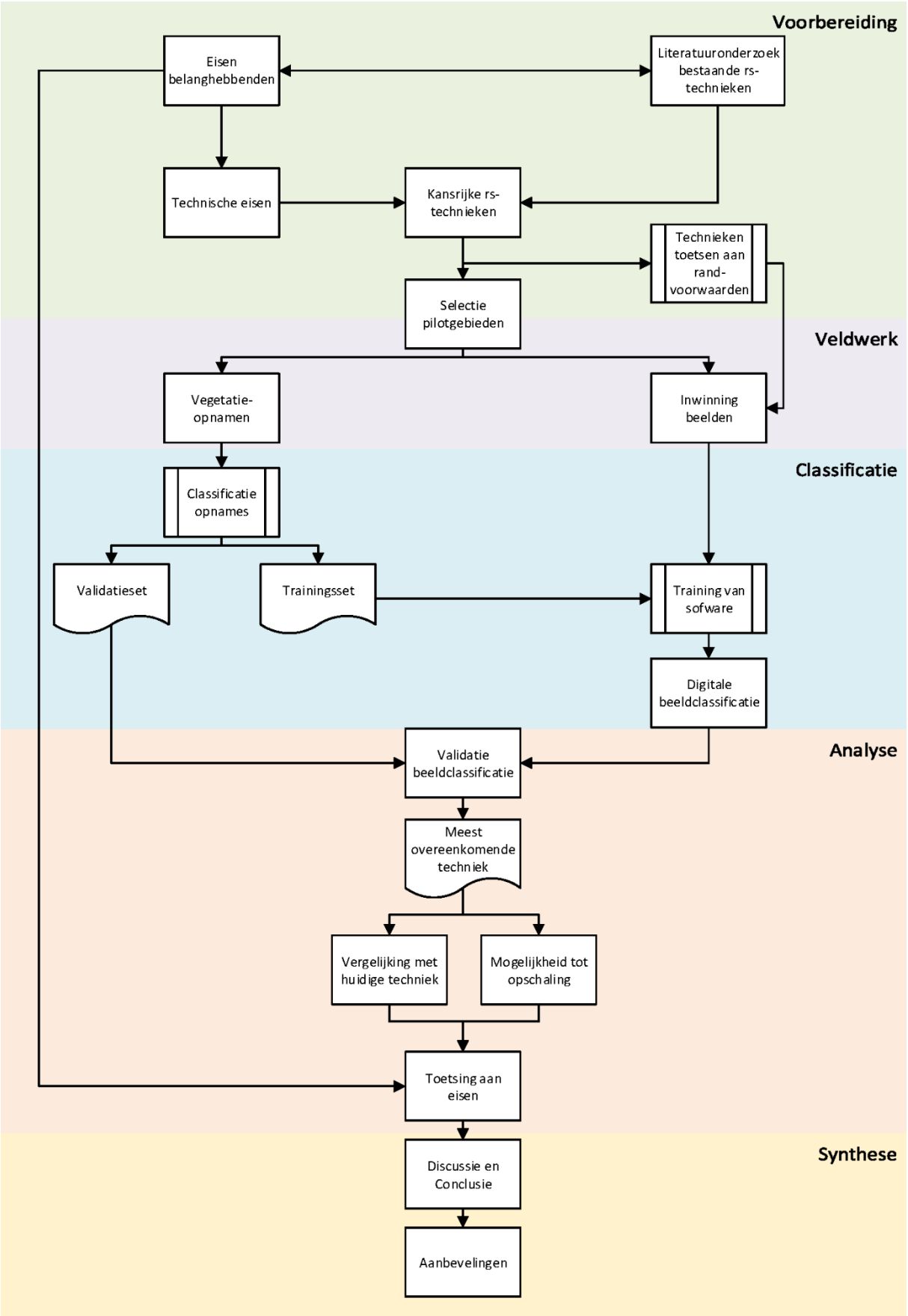
Zarco-Tejada, P. J., & Miller, J. R. (1999). Land cover mapping at BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery. *Journal of geophysical research, 104*, 27.921-27.933. doi: 10.1029/1999JD900161

Zhang, X., Wu, S., Yan, X., & Chen, Z. (2016). A global classification of vegetation based on NDVI, rainfall and temperature. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.4847

Zhou, X., Chang, N.-B., & Li, S. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research . *Sensors, 9*, 1876-1912. doi:10.3390/s90301876

BIJLAGEN

Bijlage A Methodeschema



Bijlage B Beslisregels vegetatiestructuuropnames

De kartering is uitgevoerd binnen de begrenzing van drie pilotgebieden in het studiegebied in de Noordwaard.

Het karteergebied is ingedeeld in de volgende klassen:

0 buiten beeld
1 water
2 slik
3 kale grond
4 pioniervegetatie
5 grasland
6 kruidige vegetatie
7 ruigte
8 riet
9 lisdodde
10 struweel
11 bos
12 verharding

De volgende beslisregels zijn gebruikt om onderscheid te maken tussen de klassen:

- Alle structuurtypen zijn opgenomen in een plot met een straal van 20 centimeter.
- Water bestaat uit duidelijk te herkennen waterlichamen.
- Slik is vochtige of oppervlakkig onderwater staande onbegroeide bodem.
- De grens tussen slik en kale grond is het kleurverschil door zichtbaar hoog vochtgehalte.
- De grens tussen kale grond en pioniervegetatie is een vegetatiebedekking van 5%.
- De grens tussen pioniervegetatie en kruidige vegetatie, grasland, lisdodde of riet is een vegetatiebedekking van 25%
- Grasland en kruidige vegetatie zijn gebieden met vegetatiehoogte van <50cm, maar een bedekking boven de 25%
- Grens tussen grasland en kruidige vegetatie is een bedekking van minimaal 90% grassoorten voor grasland en minder dan 90% graslandsoorten voor kruidige vegetatie.
- Ruigte is (kruidige) vegetatie met een hoogte tussen 50cm en 200cm of bestaande uit de ruigtesoorten ridderzuring of smeerwortel.
- Struweel zijn houtige gewassen met een vegetatiehoogte tussen 2 en 6 meter.
- Bos zijn houtige gewassen met een hoogte boven de 6 meter.

Bijlage C Vertaaltabel vegetatiestructuurtypen

Mei 2016*		Augustus 2016*		huidig onderzoek		huidig aangepast**	
buiten beeld	0	buiten beeld	0	Buiten beeld	0	Buiten beeld	0
water	1	water	1	Water	1	Water	1
ondergelopen land	2	ondergelopen land	20	Slik	2	Onontwikkeld	2
ondergelopen land	2	slik	30	Slik	2	Onontwikkeld	2
kale grond	3	kale grond	35	Kale grond	3	Onontwikkeld	2
pionier vegetatie	4	pionier vegetatie	31	Pioniervegetatie	4	Onontwikkeld	2
pionier vegetatie	4	pionier moerasvegetatie	21	Pioniervegetatie	4	Onontwikkeld	2
lage kruidige vegetatie	5	grasland	33	Grasland	5	Grasland/kruidig	3
lage kruidige vegetatie	5	lage kruidige vegetatie	32	Lage kruidige vegetatie	6	Grasland/kruidig	3
lage kruidige vegetatie	5	moerasvegetatie	22	Lage kruidige vegetatie	6	Grasland/kruidig	3
hoge kruidige vegetatie / ruigte	6	hoge kruidige vegetatie / ruigte	34	Ruigte	7	Ruigte	4
riet / helofyten	7	riet / helofyten	23	Riet	8	Riet	5
riet / helofyten	7	riet / helofyten	23	Lisdodde	9	-	-
struweel	8	struweel	4	Struweel	10	-	-
bos	9	bos	5	Bos	11	-	-
verharding	10	verharding	6	Verharding	12	Verharding	6
buiten beschouwing	99	buiten beschouwing	99	Buiten beeld	0	Buiten beeld	0

*De vegetatiestructuurkaarten van mei 2016 & augustus 2016

** Herklassificatie waarbij klassen met veel overlap samengevoegd zijn

Bijlage D Volledige tabel technische eisen

Belanghebbende	Eisen	Technische eisen			
		resolutie	frequentie	classificatie	hoogte
Bureau Waardenburg	De Vegetatiestructuur, talrijke soorten en de vegetatiehoogte dient opgenomen te worden. Daarnaast ook de terreinhoogte omdat op basis hiervan de vegetatiehoogte wordt berekend.			structuur, talrijke soorten	ja
	Op basis van de vegetatiestructuurkaart van mei moet een voorspelling gedaan kunnen worden van de vegetatie in augustus om zo het beheer te kunnen sturen.				
	De huidig toegepaste vegetatiestructuurindeling aanhouden die gebaseerd is op zowel de droge als natte successiereeks.			bestaande classificatie	
	De nauwkeurigheid van de kartering moet 1x1 tot 2x2 meter zijn, een schaal op centimeters is overbodig maar 5 x 5 meter is te grof.	max 2 m			
	Er moet minimaal 4 keer per jaar gevlogen worden.		4 x per jaar		
	De huidige techniek moet een grote verbetering zijn t.o.v. de huidig toegepaste methode als hij duurder is. Eventueel kan dan het aantal vluchten worden gereduceerd van 4 naar 2.				
Gebr. van Kessel	Vegetatiestructuur in combinatie met dominante soorten waarvan de ruwheid bekend is dient opgenomen te worden.		1 X per jaar		nee
	De resolutie nauwkeurigheid mag grootschalig zijn maar in ieder geval niet groter dan 20 meter.	5-20 m			
	De vegetatiestructuurtypen van de kaart dienen vertaald te kunnen worden naar de vegetatieklassen waar de ruwheid van is bepaald.			RWS classificatie (ruwheid)	

FREE Nature	Vaker dan twee keer per jaar een vegetatiestructuurkaart produceren om ontwikkeling door het jaar heen te monitoren.		>2 x per jaar		
	Zowel vegetatiestructuur als dominante soorten dienen opgenomen te worden.Daarnaast ook de grove vegetatiehoogte om de biomassaproductie te kunnen schatten.				Ja
	Ook de kwaliteit van de vegetatie opnemen (groene- of bruine vegetatie).			biomassa-kwaliteit	
	Het inwinnen van beeldgegevens mag geen onnodige verstoring van de aanwezige grazers veroorzaken.				
	De vegetatiestructuurkaart bevat naast de vegetatiestructuur ook de dominante soort zodat i.c.m. de vegetatiehoogte de biomassaproductie berekend kan worden.			structuur, talrijke soorten	
	nauwkeurigheid van maximaal 1 meter voor ruwe data en 5 meter voor vegetatiestructuurkaart	max 1 m			
Rijkswaterstaat	maximaal 1 keer per jaar een kaart produceren. Vaker is niet nodig om ruwheid in winter te bepalen.		1 x per jaar		
	Vegetatiehoogte en ruwheid icm de structuur dienen opgenomen te worden				ja
	Resolutie van circa 12 centimeter gebruiken	12 cm			
	Legenda moet overeenkomen met de legenda van de vegetatielegger			RWS Classificatie	
	Foutmarge tussen riet en ruigte verkleinen				
	Braamstruiken onderscheiden				
	Verschillende watertypen onderscheiden				

Bijlage E Accuracy en kappa per pilotgebied

	Pilot 1		**Pilot 2**		**Pilot 3**	
rs-techniek	**Accuracy**	**Kappa**	**Accuracy**	**Kappa**	**Accuracy**	**Kappa**
A010m	X	X	0,51	0,42	0,57	0,48
A010o	X	X	0,52	0,41	0,57	0,47
A010s	X	X	0,45	0,36	0,57	0,48
B010m	0,51	0,43	0,61	0,54	0,61	0,54
B010o	0,53	0,39	0,49	0,39	0,61	0,53
B010s	0,49	0,39	0,65	0,58	0,60	0,52
C010m	0,47	0,38	0,66	0,60	0,53	0,44
C010o	0,55	0,42	0,49	0,38	0,59	0,50
C010s	0,49	0,40	0,62	0,55	0,61	0,53
D010m	0,49	0,40	0,63	0,56	0,62	0,55
D010o	0,56	0,43	0,50	0,40	0,61	0,53
D010s	0,50	0,40	0,70	0,64	0,61	0,53
D025m	0,49	0,41	0,65	0,58	0,66	0,59
D025o	0,56	0,43	0,50	0,40	0,61	0,52
D025s	0,49	0,39	0,64	0,57	0,61	0,54
D050m	0,46	0,37	0,64	0,57	0,61	0,54
D050o	0,56	0,43	0,51	0,41	0,61	0,53
D050s	0,49	0,39	0,65	0,58	0,57	0,48
D100m	0,44	0,35	0,61	0,53	0,60	0,53
D100o	0,53	0,40	0,49	0,40	0,61	0,52
D100s	0,47	0,36	0,64	0,57	0,55	0,46
E010m	0,37	0,29	0,60	0,52	0,58	0,50
E010o	0,55	0,42	0,51	0,41	0,61	0,52
E010s	0,44	0,34	0,66	0,59	0,56	0,47
	Accuracy	**Kappa**	**Accuracy**	**Kappa**	**Accuracy**	**Kappa**
Gemiddeld:	0,50	0,39	0,58	0,50	0,60	0,51

Bijlage F Accuracy en kappa per klasse

rs-techniek	water	slik	kale grond	pionier	grasland	kruidig	ruigte	riet	lisdodde	verharding	Accuracy	Kappa
A010m	83%	52%	50%	25%	58%	53%	50%	38%	34%	0%	54%	47%
A010s	74%	57%	100%	18%	42%	41%	57%	25%	37%	0%	51%	43%
A010o	94%	88%	50%	11%	45%	29%	11%	0%	17%	0%	53%	43%
B010m	98%	50%	63%	31%	53%	31%	53%	28%	68%	96%	56%	50%
B010s	99%	39%	63%	39%	56%	24%	55%	21%	49%	81%	54%	47%
B010o	92%	59%	37%	22%	89%	12%	15%	7%	5%	88%	53%	44%
C010m	99%	40%	71%	21%	51%	25%	44%	38%	70%	96%	53%	47%
C010s	95%	36%	58%	36%	57%	20%	65%	38%	49%	85%	54%	47%
C010o	95%	70%	37%	12%	92%	10%	9%	3%	0%	88%	54%	44%
D010m	98%	47%	66%	32%	49%	24%	60%	34%	62%	96%	55%	49%
D010s	99%	35%	53%	39%	62%	24%	60%	28%	62%	92%	56%	49%
D010o	96%	68%	37%	21%	93%	8%	9%	3%	0%	88%	55%	46%
D025m	98%	49%	68%	34%	47%	29%	60%	38%	59%	96%	56%	50%
D025s	100%	35%	53%	40%	57%	16%	60%	14%	59%	92%	54%	47%
D025o	96%	66%	37%	22%	93%	10%	9%	7%	0%	92%	55%	46%
D050m	99%	41%	61%	40%	38%	22%	53%	31%	57%	96%	51%	45%
D050s	100%	35%	47%	34%	58%	25%	53%	21%	49%	92%	53%	46%
D050o	96%	65%	34%	25%	93%	10%	13%	0%	0%	88%	55%	46%
D100m	98%	42%	47%	39%	36%	25%	42%	34%	59%	96%	50%	43%
D100s	100%	38%	47%	27%	59%	25%	47%	34%	43%	88%	52%	45%
D100o	94%	60%	34%	25%	91%	10%	11%	7%	0%	88%	54%	44%
E010m	96%	50%	61%	27%	20%	22%	53%	28%	62%	92%	47%	40%
E010s	99%	37%	55%	34%	47%	16%	55%	24%	59%	92%	51%	44%
E010o	97%	68%	37%	21%	93%	8%	9%	0%	0%	88%	55%	45%
Gemiddelde producers accuracy:	96%	51%	53%	28%	62%	22%	40%	21%	38%	80%		

Bijlage G Verslag interview Skeye BV

Aanwezig: Amoun, Joost, Pieter Franken

Locatie: Kantoor Skeye te Alphen a/d Rijn

Datum & Tijd: 4 mei 2017 10:40

1 beschrijven onderzoeksopdracht

Er is kort verteld wat de aanleiding, onderzoeksvraag en de gehanteerde methodiek is van het onderzoek naar een geschikte techniek om met behulp van remote sensing de vegetatiestructuur in de Noordwaard te monitoren.

Pieter Franken: Hoe hoog hebben jullie gevlogen?

Amoun: we hebben op 50 meter hoogte gevlogen. Hierbij is gebruik gemaakt van een Parrot Sequoia Multi spectraal camera die op een drone van het type 'DJI Phantom 4 Pro' bevestigd is. Deze camera heeft voor de single band foto's op 50 meter hoogte een resolutie van 5 centimeter.

2 Eerste resultaten

False-colour beelden geven een beter resultaat dan rgb. De bandcombinaties groen-rood-infrarood met resolutie van 10 cm & groen-rood-infrarood-rededge met een resolutie van 25 cm geven de beste classificatieresultaten. De beste resultaten zijn echter nog steeds vrij slecht (accuracy 0.56 & kappa van 0,50). Het is wel duidelijk dat de lage accuracy grotendeels komt door slechte weersomstandigheden tijdens het maken van de luchtfoto's en door een aantal klassen als ruigte en riet die veel overlap in de classificatie vertonen. De verwachting is dat wanneer de overlappende klassen worden samengevoegd en er met goed weer gevlogen wordt, de resultaten beter zullen zijn.

Verder blijkt dat de bandcombinatie groen-rood-NIR betere resultaten heeft dan RGB beelden. Daarnaast lijkt er weinig verschil in resultaat te zijn als een resolutie van 25 centimeter in plaats van 1 centimeter gehanteerd wordt. Wanneer de resolutie nog lager wordt lijkt het resultaat wel achteruit te gaan.

3 Werkwijze Skeye

Joost: Hoe gaat skeye te werk met het maken van de orthofoto's?

Pieter: 5 keer per jaar wordt het met behulp van een Canon spiegelreflexcamera onder een Cessna 172 vliegtuig een RGB orthofoto gemaakt van de Noordwaard.

Daarvan wordt 1 keer per jaar op 1200 voet gevlogen en wordt een 50 mm lens gebruikt om een orthofoto met een resolutie van 3 centimeter te verkrijgen.

4 keer per jaar wordt op 2000 voet gevlogen en wordt een 35 mm lens gebruikt om een orthofoto met een resolutie van circa 10 centimeter te verkrijgen.

De minimale vlieghoogte in de Noordwaard is 660 voet met een minimale snelheid van 70 knopen.

Skeye bv bevind zich in het goedkopere segment van 'aerial surveying'. Dit houdt in dat de foto's met behulp van kleine vliegtuigjes of drones met relatief goedkope (spiegelreflex-) camera's worden gemaakt en niet met grote vliegtuigen en dure sensoren.

4 Mogelijkheid tot opschalen?
Amoun: wat zijn vanuit Skeye de mogelijkheden om bijvoorbeeld met behulp van een multispectraalcamera de bandcombinatie groen-rood-NIR op te nemen in de Noordwaard?

Pieter: Skeye heeft geen beschikking tot een multispectraalcamera. Dit komt omdat de markt hiervoor zeer beperkt is. Skeye heeft daarom ook niet veel kennis over multispectraalbeelden. Het is eventueel wel mogelijk om een zogenaamde Xcam te leasen. Deze camera is een gemodificeerde spiegelreflex die nabij-infrarood op kan nemen in combinatie met reguliere RGB beelden.

Een andere optie is om te onderzoeken of het mogelijk is om de Parrot Sequoia op het vliegtuig te monteren als deze camera te huur zou zijn. Hiervoor moet wel bekend zijn wat de maximale vlieghoogte is om een resolutie van 25cm te behouden, wat de sluitertijd is om de juiste overlap te garanderen en wat de afstand tussen de vliegbanen moet zijn. Zodra dit bekend is kan er door Skeye berekend worden of het verkrijgen van een groen-rood-nabij infrarood orthofoto met behulp van de X-cam en de sequoia duurder, goedkoper of een vergelijkbare prijs is als de luchtfoto's zoals die nu worden ingewonnen.

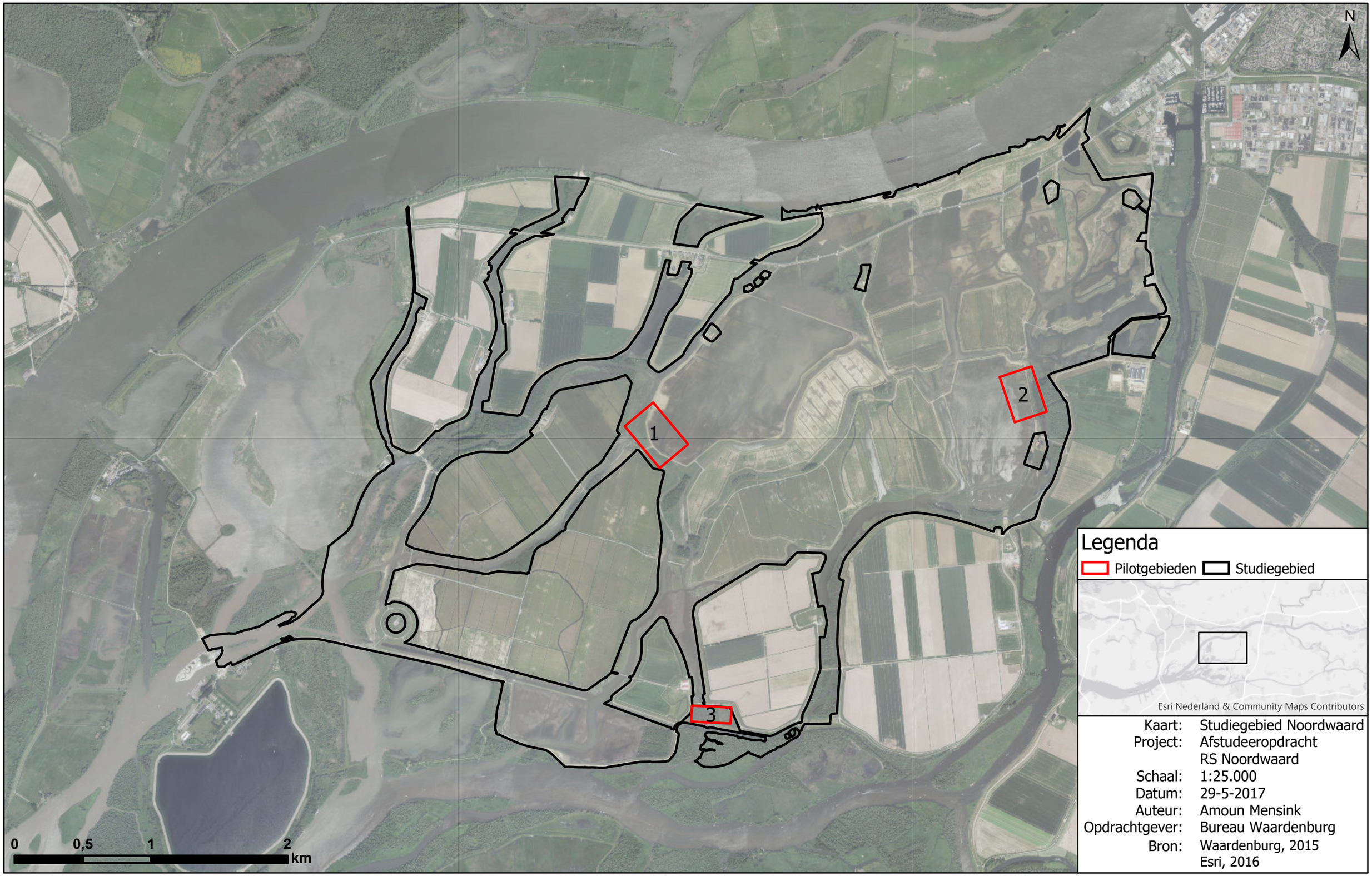
5 Afspraken
Amoun en Joost berekenen de specificaties van de Parrot Sequoia en mailen deze naar Pieter Franken. Pieter Franken zal dan namens Skeye bv berekenen wat de kosten van het maken van een luchtfoto met de Parrot sequoia en de Xcam zijn en of dit meer, minder of vergelijkbaar is met de huidige opnames.

Bijlage H Toetsing van eisen belanghebbenden

Belanghebbenden	Eisen	behaald
Bureau Waardenburg (in opdracht van Gebr. Van Kessel)	- De Vegetatiestructuur, talrijke soorten en de vegetatiehoogte opnemen . - A.h.v de vegetatiestructuurkaart in mei de vegetatiestructuur in augustus voorspellen. - De huidig toegepaste vegetatiestructuurindeling aanhouden. - Nauwkeurigheid van 1 tot 2 meter. - Minimaal 2 keer kaart maken - De nieuwe rs-techniek moet een grote verbetering zijn als hij duurder is dan de huidige methode.	**Ja** **Deels** **Deels** **Ja** **N.v.t** **Ja**
Gebr. van Kessel (afstudeer-opdracht hydrologisch modeleren)	- Vegetatiestructuur in combinatie met dominante soorten waarvan de ruwheid bekend is dient opgenomen te worden. - Nauwkeurigheid van max 2 meter - De vegetatiestructuurtypen van de kaart dienen vertaald te kunnen worden naar de vegetatieklassen waar de ruwheid van is bepaald.	**Ja** **Ja** **Ja**
FREE Nature	- Vaker dan twee keer per jaar een vegetatiestructuurkaart produceren. - vegetatiestructuur & dominante soorten en de geschatte vegetatiehoogte opnemen. - Kwaliteit van de vegetatie opnemen (groene- of bruine vegetatie). - Het inwinnen van beeldgegevens mag geen onnodige verstoring van de aanwezige grazers veroorzaken. - De vegetatiestructuurkaart bevat naast de vegetatiestructuur ook de dominante soort. - nauwkeurigheid van maximaal 1 meter voor ruwe data en 5 meter voor vegetatiestructuurkaart	**N.v.t.** **Deels** **Deels** **Ja** **Deels** **Ja**
Rijkswaterstaat	- maximaal 1 keer per jaar een kaart produceren. - Vegetatiehoogte en ruwheid icm de structuur opnemen - Resolutie van circa 12 centimeter gebruiken - Legenda moet overeenkomen met de legenda van de vegetatielegger - Foutmarge tussen riet en ruigte verkleinen - Braamstruiken onderscheiden - Verschillende watertypen onderscheiden	**N.v.t** **Deels** **Deels** **Ja** **Nee** **Nee** **Nee**

Bijlage I: Studiegebied Noordwaard

Opnamejaar: 2016; Resolutie 25 cm



Bijlage J: Detail Pilotgebieden

Opnamedatum: 22 april 2017; Resolutie 1,3 cm; Van pilotgebied 1 is geen rgb-orthofoto beschikbaar

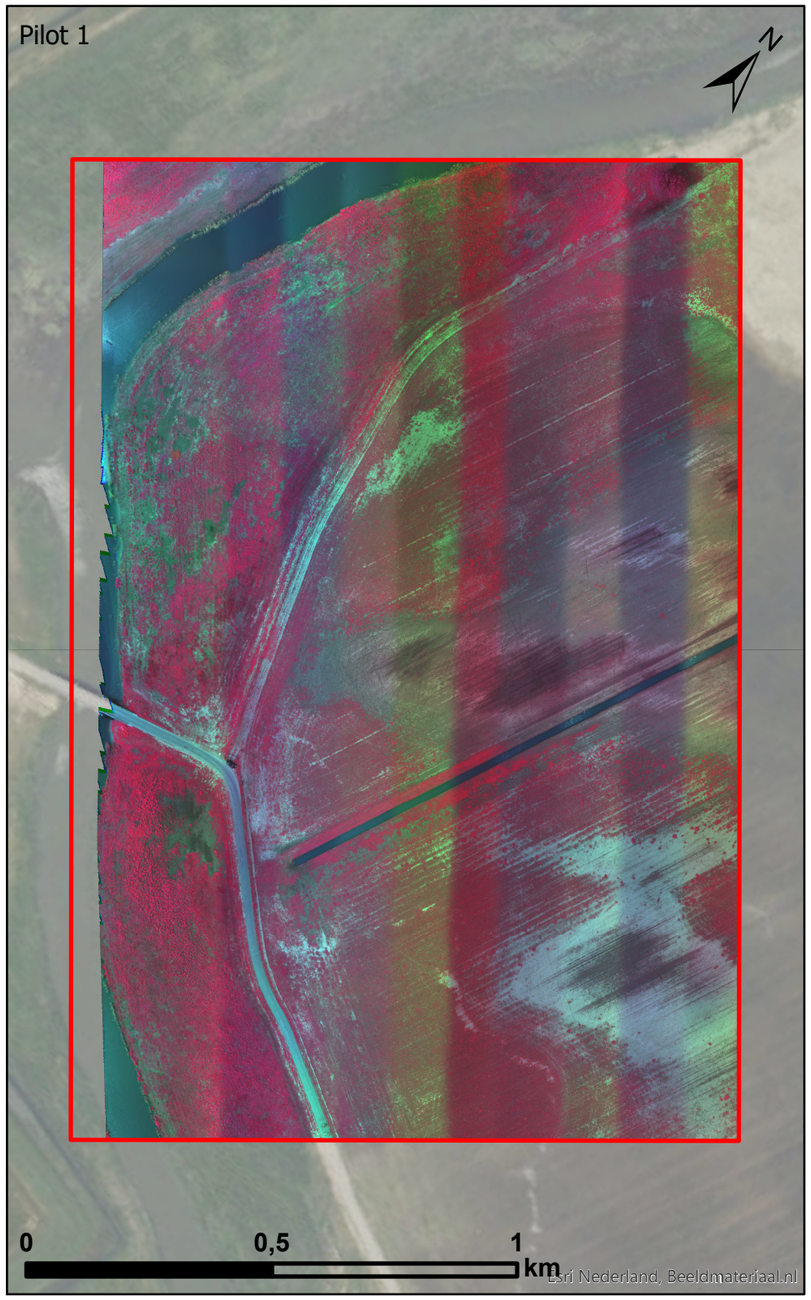
Legenda

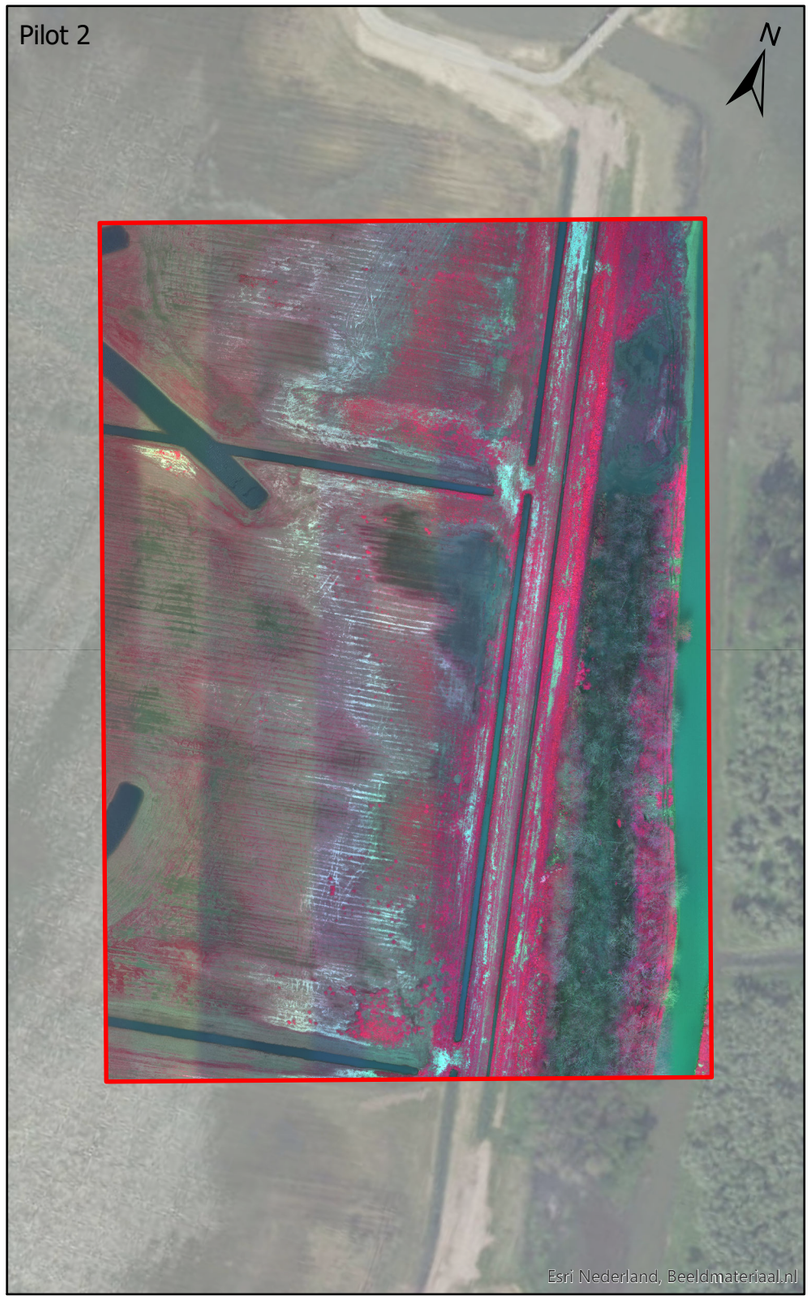
Pilotgebieden

Kaart:	Detail Pilotgebieden
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:2.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016

Bijlage K: Detail Pilotgebieden False Colour

Opnamedatum: 22 april 2017; Resolutie 4,9 cm; Getoonde bandcombinatie: IR, R, G





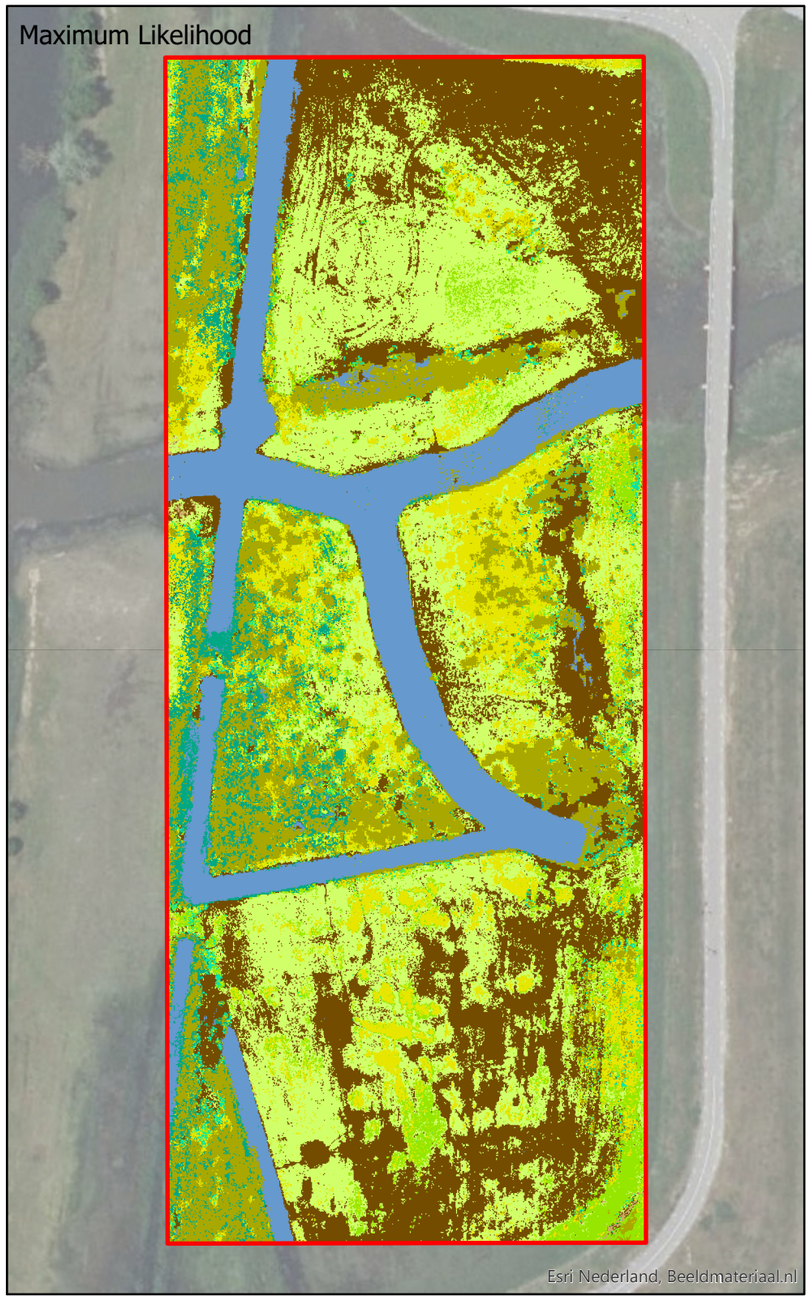
Legenda

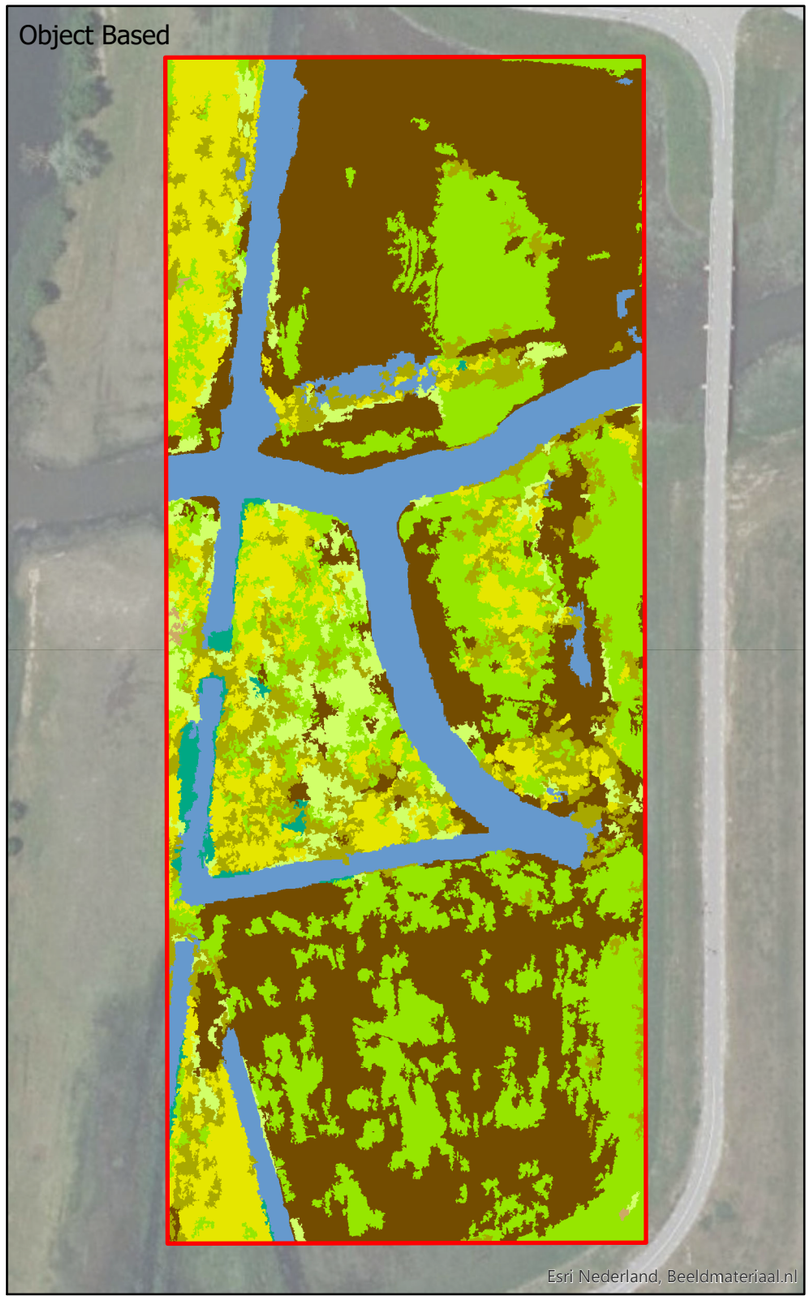
Pilotgebieden

Kaart:	Detail Pilotgebieden False Colour
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:2.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016

Bijlage L: Voorbeeld Classificaties D025

Banden: G, R, Red Edge, NIR, CHM; Resolutie: 25 cm





0 0,5 1 km

Legenda

Pilotgebieden

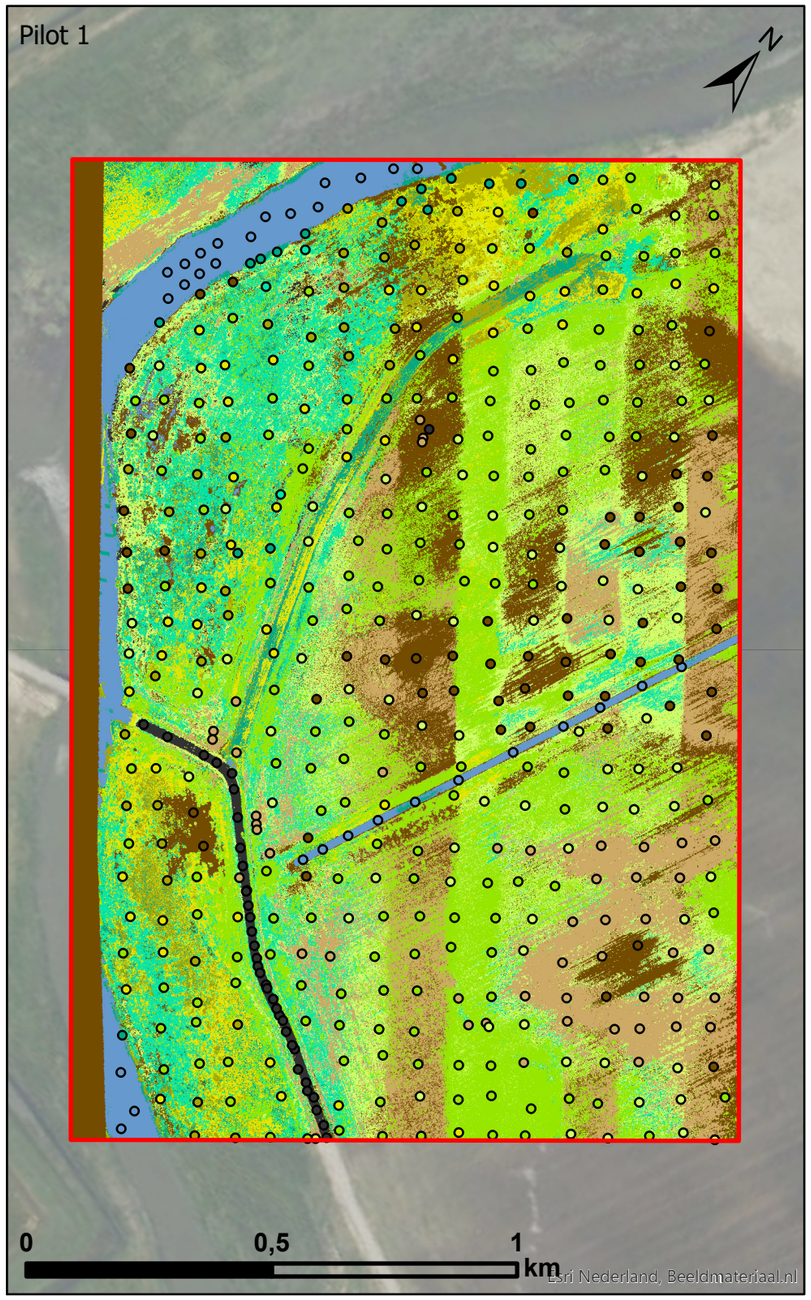
Vegetatiestructuurtype

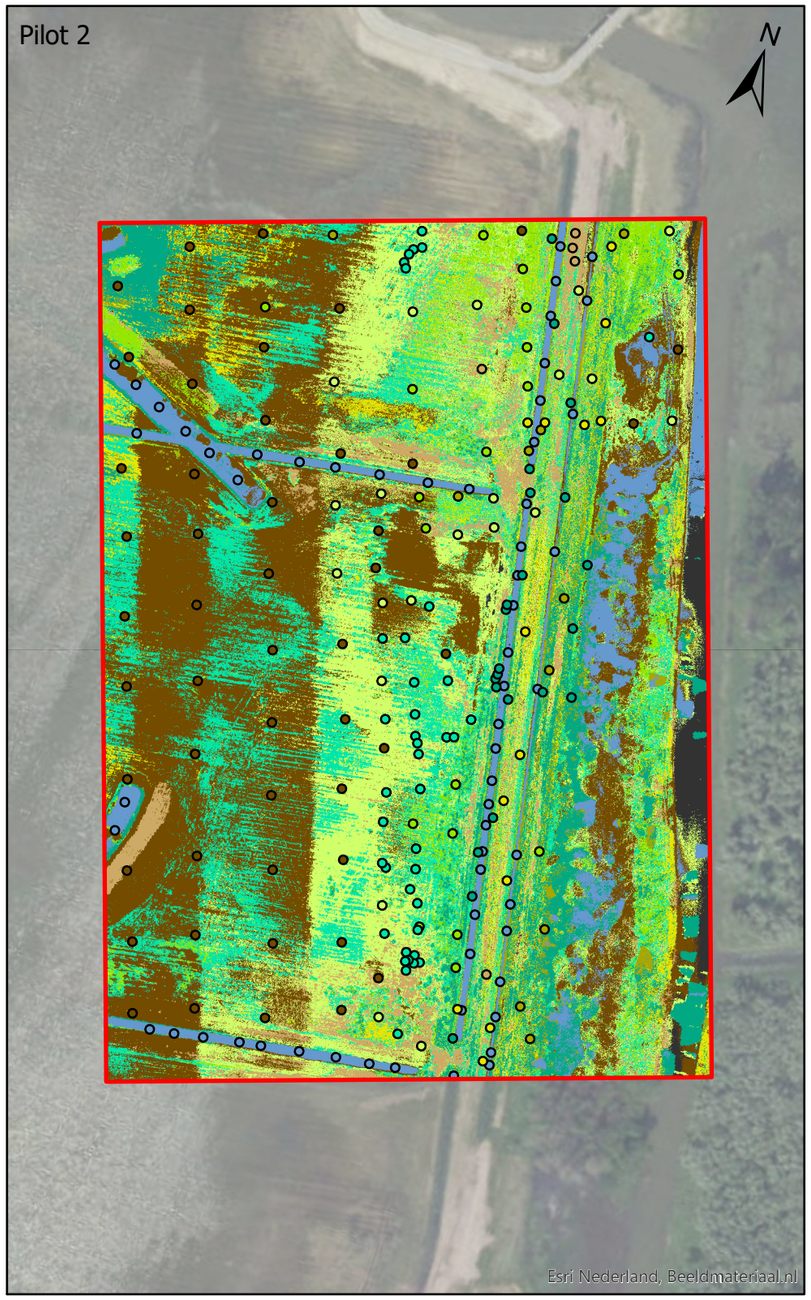
- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

Kaart:	Voorbeeld Classificaties D025
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:1.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016

Bijlage M: Classificatie met hoogste accuracy, B010m

Banden: G, R, NIR, CHM; Resolutie: 10 cm; Classificatie: Maximum Likelihood





Legenda

Pilotgebieden

Structuuropnames

- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

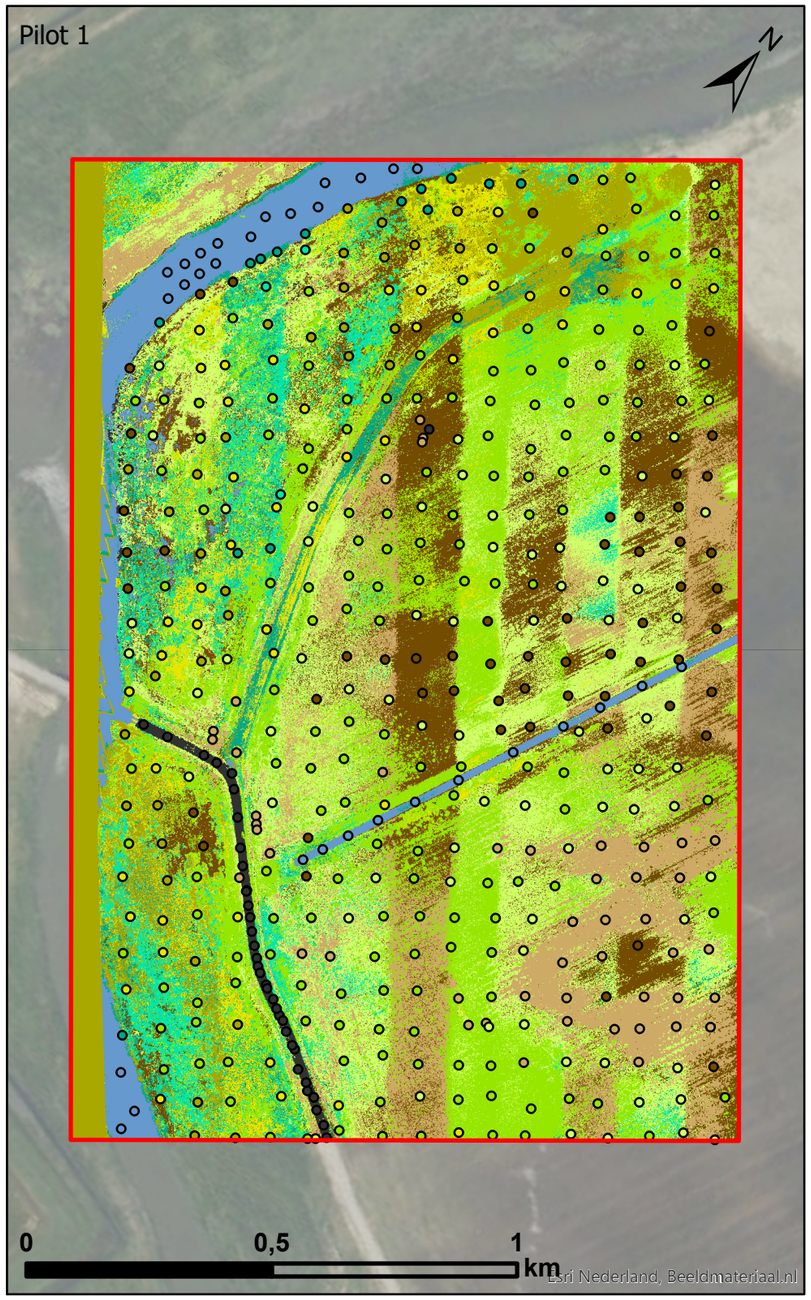
Kaart: B010m

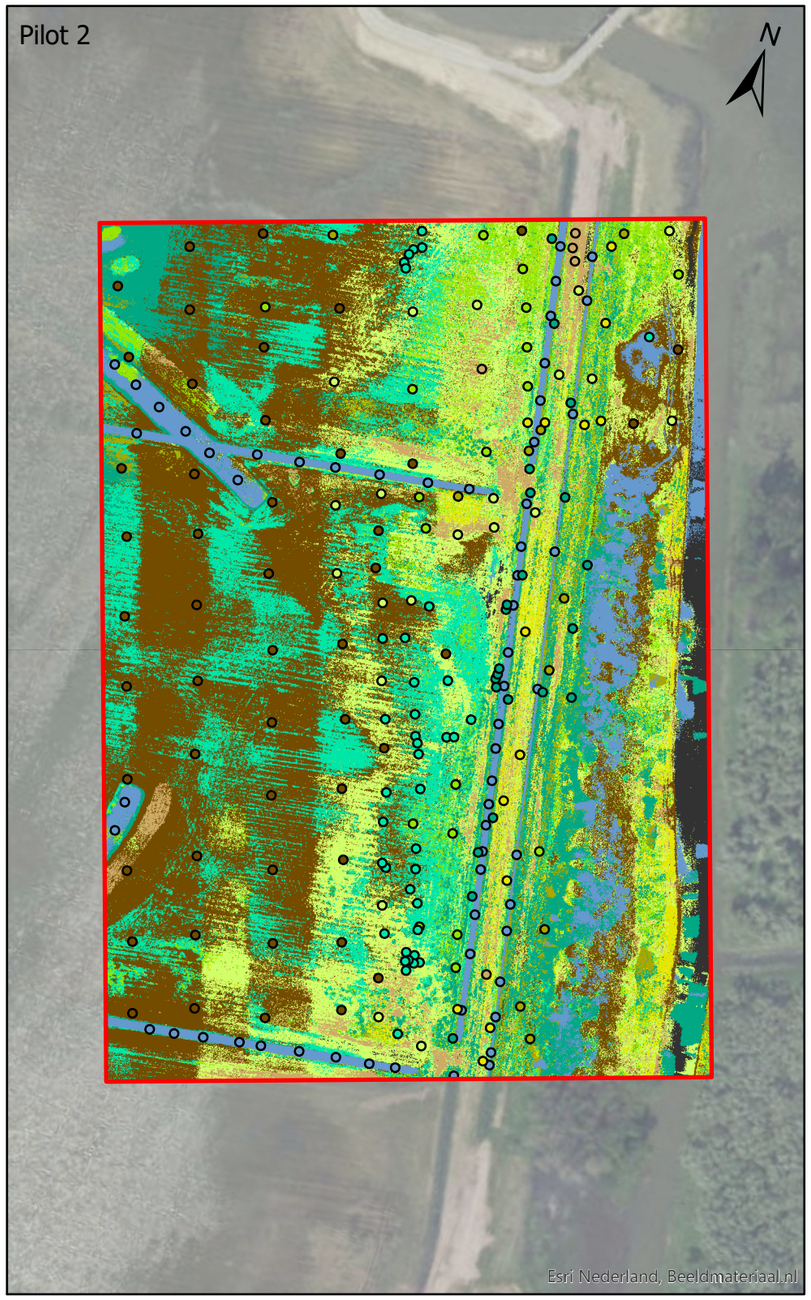
- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

Kaart:	Classificatie met hoogste accuracy, B010m
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:2.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016

Bijlage N: Classificatie met hoogste accuracy, D025m

Banden: G, R, Red Edge, NIR, CHM; Resolutie: 25 cm; Classificatie: Maximum Likelihood





Legenda

Pilotgebieden

Structuuropnames

- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

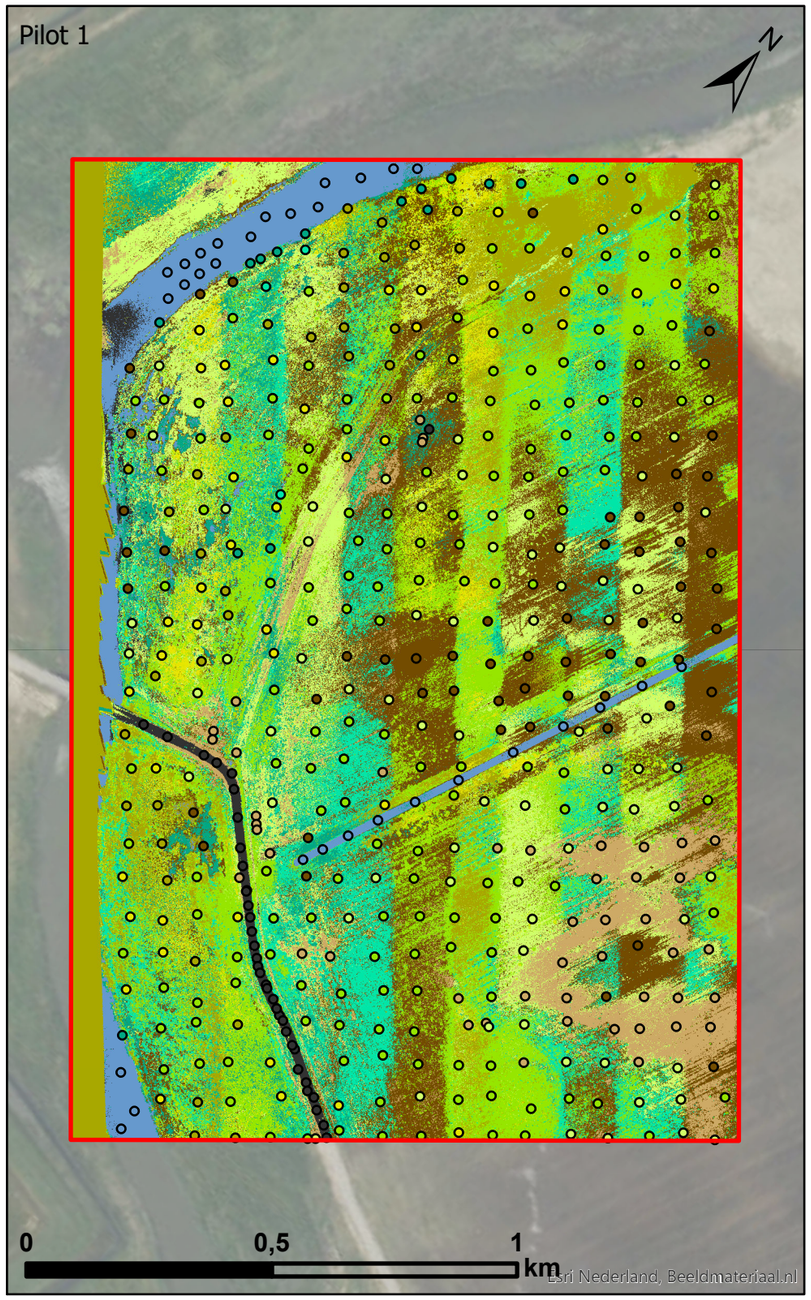
Kaart: D025m

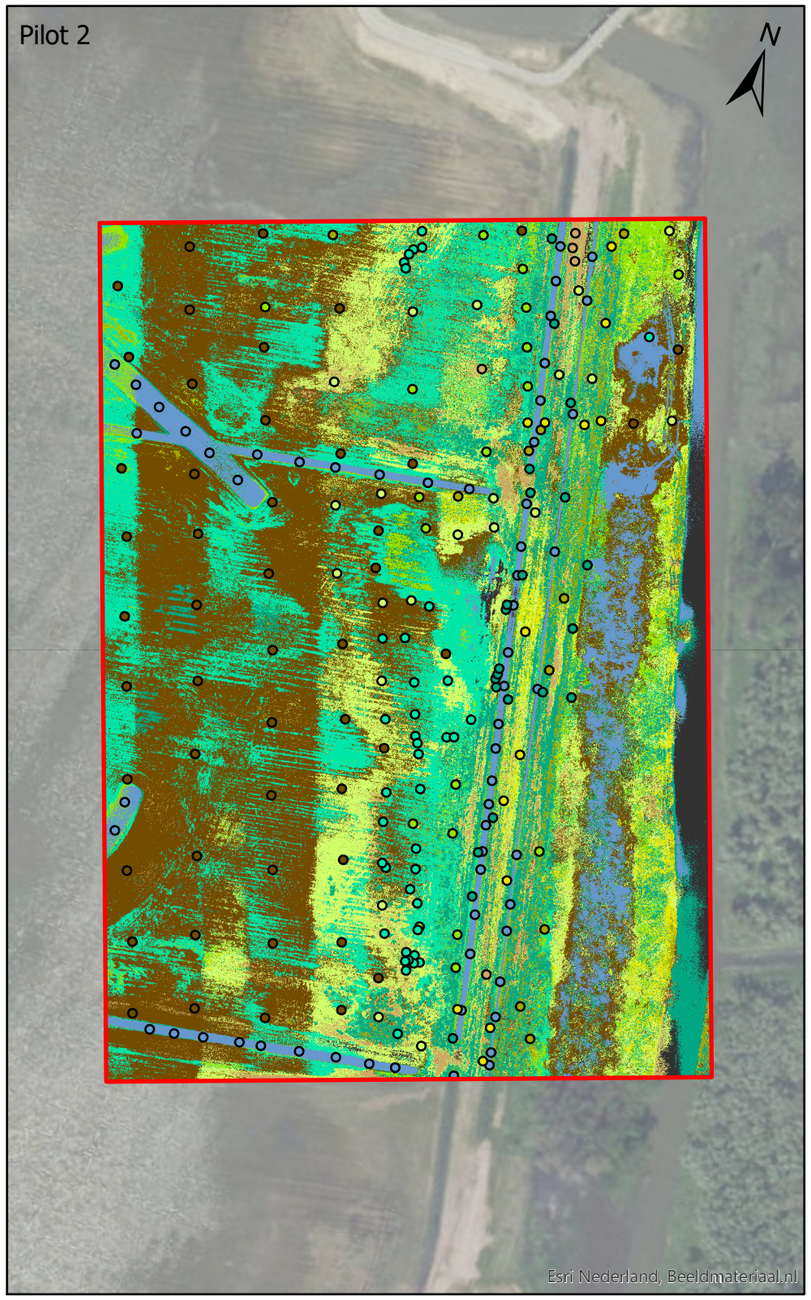
- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

Kaart:	Classificatie met hoogste accuracy, D025m
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:2.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016

Bijlage O: Classificatie met laagste accuracy, E010m

Banden: G, R, Red Edge, NIR; Resolutie: 10 cm; Classificatie: Maximum Likelihood





Legenda

Pilotgebieden

Structuuropnames

- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

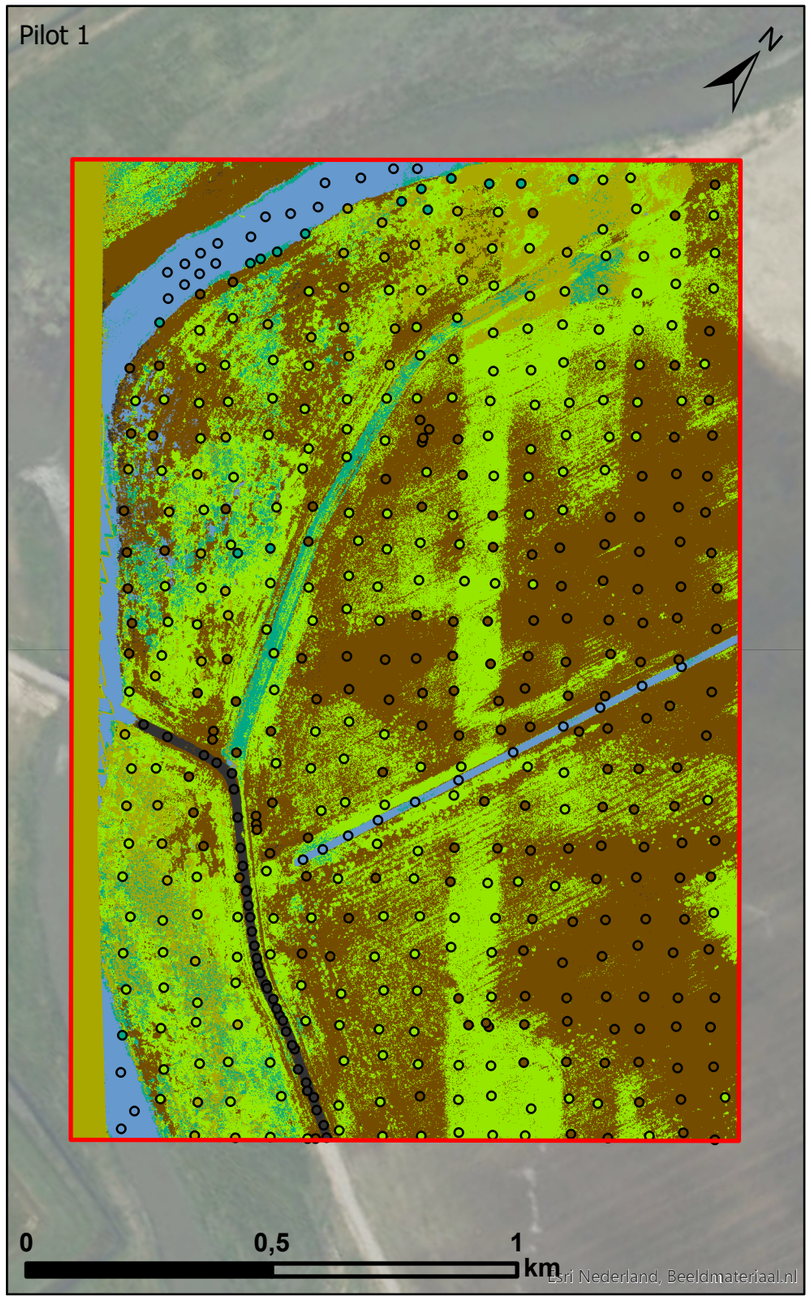
Kaart: E010m

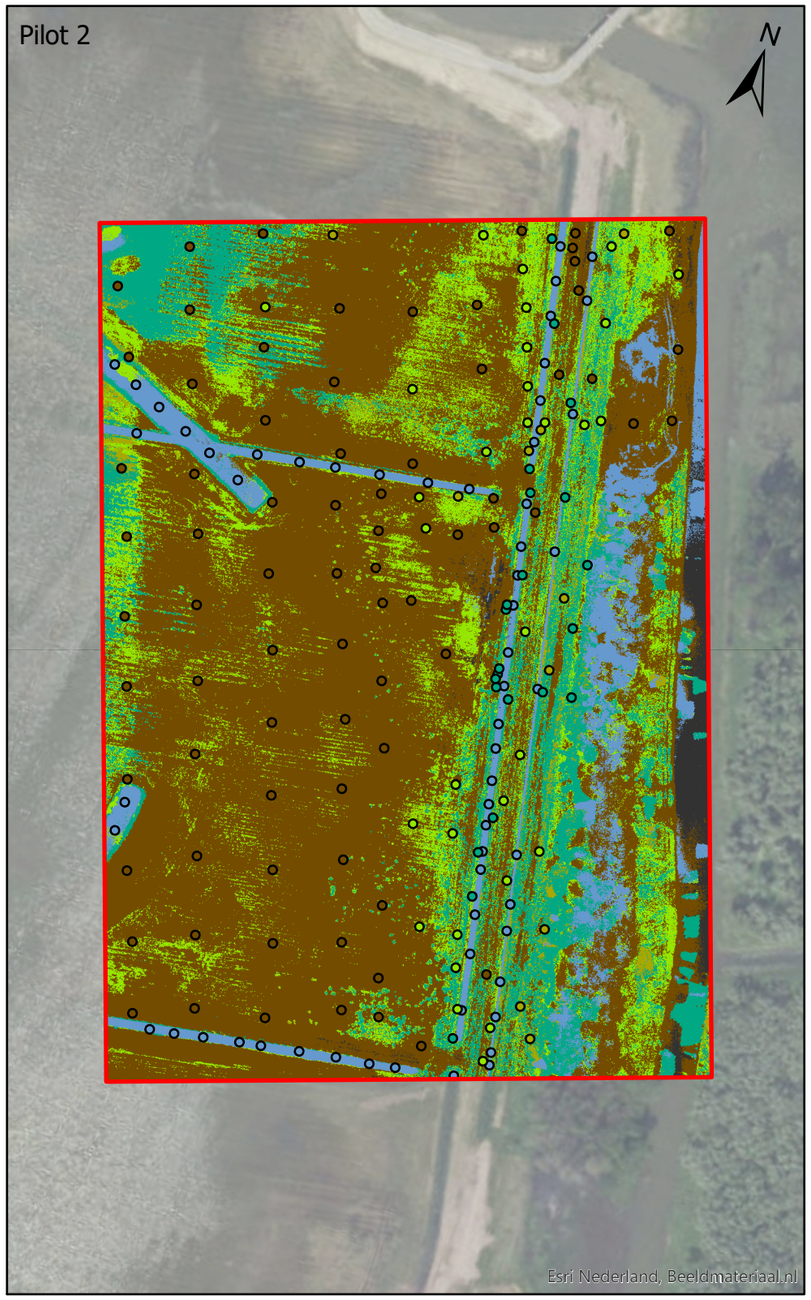
- Water
- Slik
- Kale grond
- Pioniervegetatie
- Grasland
- Kruidige vegetatie
- Ruigte
- Riet
- Lisdodde
- Verharding

Kaart:	Classificatie met laagste accuracy, E010m
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:2.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016

Bijlage P: Klassificatie met gereduceerd aantal klassen, D025m

Banden: G, R, Red Edge, NIR, CHM; Resolutie: 25 cm; Classificatie: Maximum Likelihood





Legenda

- Pilotgebieden

Structuuropnames

- Water
- Onontwikkeld
- Gras/Kruidig
- Ruigte
- Riet
- Verharding

Kaart: D025m

- Water
- Onontwikkeld
- Gras/Kruidig
- Ruigte
- Riet
- Verharding

Kaart:	Klassificatie met gereduceerd aantal klassen, D025m
Project:	Afstudeeropdracht RS Noordwaard
Schaal:	1:2.500
Datum:	29-5-2017
Auteur:	Amoun Mensink
Opdrachtgever:	Bureau Waardenburg
Bron:	Esri, 2016