

Monitoring waterkeringen met een RPAS

In opdracht van: STOWA

april 2018



Monitoring waterkeringen met een RPAS

In opdracht van: STOWA

april 2018

Begeleidingscommissie:

Ludoph Wentholt, STOWA
Jaap Bronsveld, STOWA
Andre Smeets, Waterschap Limburg
Yede Bruinsma, Waterschap Hollandse Delta
Leonard Post, Waterschap Rijn en IJssel
Peter Boone, Waterschap Vallei en Veluwe
Haroen Lemmers, Waternet

Auteurs: Rutger van Hogezaand en Ronald Loeve
Down2Earth Sensing B.V.
Mgr. Van de Weteringstraat 18
3581 EH Utrecht
info@d2e-sensing.com
www.d2e-sensing.com

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INLEIDING | 10 |
| 1.1 | Aanleiding | 10 |
| 1.2 | Doelstelling en onderzoeksvragen | 11 |
| 1.3 | Inspectieparameters | 11 |
| 1.4 | Werkwijze onderzoek | 12 |
| 1.5 | Sensoren | 12 |
| 1.6 | Leeswijzer | 13 |
| 2 | PILOTLOCATIES | 14 |
| 2.1 | Waterschap Vallei en Veluwe | 14 |
| 2.2 | Waterschap Limburg | 16 |
| 2.3 | Waterschap Rijn en IJssel | 18 |
| 2.4 | Waterschap Hollandse Delta | 19 |
| 2.5 | Waternet | 20 |
| 3 | HOOGTEN | 21 |
| 3.1 | Maaiveldhoogten | 21 |
| 3.2 | Hoogtebeelden (DSM) | 23 |
| 3.3 | Conclusies en aanbevelingen | 25 |
| 4 | SCHADES | 26 |
| 4.1 | Verzakking waterschap Limburg | 26 |
| 4.2 | Graverij en kale plekken | 27 |
| 4.3 | Spoorvorming | 28 |
| 4.4 | Scheuren | 29 |
| 4.5 | Conclusie en aanbevelingen | 30 |
| 5 | GRASBEDEKKINGSGRAAD | 31 |
| 5.1 | Classificering | 31 |
| 5.2 | Vegetatie-indices | 32 |
| 5.3 | Vegetatiesituatie | 34 |
| 5.4 | Algoritme | 35 |
| 5.5 | Vergelijking RPAS met veldwaarnemingen | 36 |
| 5.5.1 | Grebbeliniedijk, waterschap Vallei en Veluwe | 36 |
| 5.5.2 | Waterkeringen Waterschap Limburg | 38 |
| 5.5.3 | Rijndijk, waterschap Rijn en IJssel | 39 |
| 5.6 | Toepasbaarheid | 39 |
| 5.7 | Conclusies en aanbevelingen | 40 |
| 6 | ONGEWENSTE VEGETATIESOORTEN | 41 |
| 6.1 | Theorie | 41 |
| 6.2 | Praktijk | 43 |
| 6.3 | Toepasbaarheid | 45 |
| 6.4 | Conclusie en aanbevelingen | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 7 | INZET RPAS MONITORING | 47 |
| 7.1 | Toepassingen | 47 |
| 7.2 | Kosten RPAS monitoring | 47 |
| 7.3 | Randvoorwaarden inzet RPAS | 48 |
| 8 | CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN | 49 |
| | BIJLAGEN | 53 |
| | Bijlage I: Overzichtsbeelden zichtbaar licht opnamen | 54 |
| | Bijlage II: Detailopnamen | 60 |
| | Bijlage III: Hoogtebeelden | 64 |
| | Bijlage IV: NDVI beelden | 67 |
| | Bijlage V: Beoordeling graszode / Grasbedekkingsgraad | 74 |
| | Bijlage VI: Ongewenste vegetatiesoorten | 77 |
| | Bijlage VII: Vliegbare kilometers waterkering | 81 |

Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1. Voor en nadelen diverse inwinmethoden, inclusief Down2Earth Sensing RPAS. | 10 |
| Tabel 2. Vergelijking ingevlogen en terrestrisch ingemeten hoogten. | 22 |
| Tabel 3. WBI beoordeling graszode (Min. IenM, 2016). | 31 |
| Tabel 4. Classificering graszode met behulp van RPAS. | 32 |
| Tabel 5. Resultaten vergelijking RPAS monitoring (0,3 x 0,3 m) en veldinspectie Grebbeliniedijk. | 38 |
| Tabel 6. Resultaten vergelijking RPAS monitoring (5 x 5 m) en veldinspectie Grebbeliniedijk. | 38 |
| Tabel 7. Met RPAS te monitoren aantal km waterkering per waterschap. | 48 |
| Tabel 8. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Vallei en Veluwe. | 81 |
| Tabel 9. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Limburg. | 81 |
| Tabel 10. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Rijn en IJssel. | 81 |
| Tabel 11. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Hollandse Delta. | 81 |

Figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1. Ligging waterkeringstraject Grebbeliniedijk (WVV)..... | 14 |
| Figuur 2. Detailbeeld variatie in begroeiing en kazemat op waterkering (WVV, juni 2017)..... | 15 |
| Figuur 3. Ligging pilotlocaties Middelaar en Heijen (WL)..... | 16 |
| Figuur 4. Detailbeeld variatie in begroeiing waterkering Heijen (RGB) (WL, juni 2017)..... | 17 |
| Figuur 5. Detailbeeld begroeiing (o.a. Ridderzuring) waterkering Heijen (NIR) (WL, juni 2017)..... | 17 |
| Figuur 6. Ligging pilotlocatie Rijndijk - Pannerdense Waard, Pannerden (WRIJ)..... | 18 |
| Figuur 7. Detailbeeld gemaaide en ongemaaide waterkering (WRIJ, juni 2017)..... | 18 |
| Figuur 8. Ligging pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (WSHD)..... | 19 |
| Figuur 9. Detailbeeld kwelplekken met afwijkende begroeiing (WSHD, maart 2017)..... | 19 |
| Figuur 10. Ligging pilotlocatie Nieuweweg - Bethunepolder (Waternet)..... | 20 |
| Figuur 11. Detailbeeld nauwelijks begroeide waterkering (NIR) (Waternet, maart 2017)..... | 20 |
| Figuur 12. Locatie bepaling ongewenste vegetatiesoorten en hoogtebepaling (WRIJ)..... | 21 |
| Figuur 13. Vergelijking ingevlogen (AHN2 en RPAS-DSM) en terrestrisch ingemeten hoogten..... | 23 |
| Figuur 14. Detail AHN2 (boven) en Digital Surface Model (onder) Rijndijk (WRIJ)..... | 24 |
| Figuur 15. Verzakking binnentalud waterkering Middelaar (WL)..... | 26 |
| Figuur 16. Kale plekken, waterkering Middelaar (WL, maart 2017)..... | 27 |
| Figuur 17. Spoorvorming (tractor en loopsporen) Grebbeliniedijk (WVV, juni 2017)..... | 28 |
| Figuur 18. Scheuren in waterkering Middelaar (WL, september 2017)..... | 29 |
| Figuur 19. Diverse vegetatie op waterkering Heijen (WL, juni 2017)..... | 34 |
| Figuur 20. Detail van diverse vegetatie op de Grebbeliniedijk, (WVV, maart, juni, oktober 2017)..... | 35 |
| Figuur 21. Schematische weergave begroeide en onbegroeide plekken..... | 36 |
| Figuur 22. Vergelijking RPAS bepaalde grasbedekkingsgraad met veldwaarnemingen (WVV, maart 2017)..... | 37 |
| Figuur 23. Verschil tussen gefragmenteerde fractie op de waterkering in Middelaar, maart 2017 (links) en pas gemaaide kering in september 2017 (rechts) (WL)..... | 39 |
| Figuur 24. Grasmat waterkering in Middelaar net na maaien in september 2017 (WL)..... | 39 |
| Figuur 25. Reflectie van groengras in verschillende golflengten en sensorgolflengte..... | 42 |
| Figuur 26. Reflectie van gras en walnoot- en dennenbomen in verschillende golflengten..... | 42 |
| Figuur 27. Ridderzuring met divers "gezelschap" op de Grebbeliniedijk (WVV)..... | 43 |
| Figuur 28. Ridderzuring op de waterkering in Heijen (WL)..... | 44 |
| Figuur 29. Automatische herkenning Ridderzuring op de waterkering in Heijen (WL)..... | 45 |
| Figuur 30. Orthomozaiëk pilotlocatie Grebbeliniedijk (WVV)..... | 54 |
| Figuur 31. Orthomozaiëk pilotlocatie Heijen (WL)..... | 55 |
| Figuur 32. Orthomozaiëk pilotlocatie Middelaar (WL)..... | 56 |
| Figuur 33. Orthomozaiëk pilotlocatie Rijndijk - Pannerdense Waard, Pannerden (WRIJ)..... | 57 |
| Figuur 34. Orthomozaiëk pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (WSHD)..... | 58 |
| Figuur 35. Orthomozaiëk pilotlocatie Nieuweweg - Bethunepolder (Waternet)..... | 59 |
| Figuur 36. GPS-referentiemeetpunten (ground control points / GCP)..... | 60 |
| Figuur 37. GPS-referentiemeetpunten (ground control points / GCP) (WSHD)..... | 61 |
| Figuur 38. Detailbeeld Nieuweweg - Bethunepolder (Waternet, maart 2017)..... | 61 |
| Figuur 39. Detailbeelden langs de Grebbeliniedijk (WVV)..... | 62 |
| Figuur 40. Detailbeelden langs de Oostmolendijk (WSHD)..... | 63 |
| Figuur 41. Digital Surface Model (DSM) pilotlocatie Middelaar (WL)..... | 64 |
| Figuur 42. Digital Surface Model (DSM) pilotlocatie Rijndijk, Pannerden (WRIJ)..... | 65 |
| Figuur 43. Digital Surface Model (DSM) pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (WSHD)..... | 66 |
| Figuur 44. NDVI pilotlocatie Grebbeliniedijk (WVV, maart 2017)..... | 67 |
| Figuur 45. NDVI pilotlocatie Grebbeliniedijk (WVV, juni 2017)..... | 68 |
| Figuur 46. NDVI pilotlocatie Grebbeliniedijk (WVV, oktober 2017)..... | 69 |
| Figuur 47. NDVI pilotlocatie Middelaar (WL, maart 2017)..... | 70 |
| Figuur 48. NDVI pilotlocatie Middelaar (WL, juni 2017)..... | 71 |
| Figuur 49. NDVI pilotlocatie Middelaar (WL, Limburg, september 2017)..... | 72 |
| Figuur 50. NDVI pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (WSHD, maart 2017)..... | 73 |
| Figuur 51. Beoordeling graszode pilotlocatie Grebbeliniedijk (WVV, maart 2017)..... | 74 |
| Figuur 52. Beoordeling graszode pilotlocatie Heijen (WL, maart 2017)..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Figuur 53. Beoordeling graszode pilotlocatie Rijndijk, Pannerden (WRIJ, maart 2017)..... | 76 |
| Figuur 54. Locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (WL, maart 2018)..... | 77 |
| Figuur 55. Locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (WL, juni 2017)..... | 77 |
| Figuur 56. Locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (WL, september 2017)..... | 78 |
| Figuur 57. Details locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (WL)..... | 78 |
| Figuur 58. Detailbeelden ongewenste vegetatiesoorten op de Grebbeliniedijk (WVV)..... | 79 |
| Figuur 59. Details ongewenste vegetatiesoorten op de Rijndijk (WRIJ, september 2017)..... | 80 |
| Figuur 60. Details Ridderzuring en RPAS op waterkering Heijen (WL, juni 2017)..... | 80 |

Afkortingen

| | |
|-------|--|
| AHN | Actueel Hoogtebestand Nederland |
| CTR | Controlled Traffic Region (gebied rondom vliegveld waar meestal niet gevlogen mag worden met een RPAS) |
| DSM | Digital Surface Model |
| DTM | Digital Terrain Model |
| GCP | Ground Control Point (GPS referentiepunt) |
| GPS | Global positioning system |
| GSD | Ground Sampling Distance |
| LIDAR | Light Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging |
| NAP | Normaal Amsterdams Peil |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| NIR | nabij infrarood (Near InfraRed) |
| RGB | Zichtbaar licht (Rood-Groen-Blauw) |
| RPAS | Remotely Piloted Aircraft System |
| STOWA | Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer |
| VTV | Voorschrift toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen |
| WBI | Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium |
| WL | Waterschap Limburg |
| WRJ | Waterschap Rijn en IJssel |
| WSHD | Waterschap Hollandse Delta |
| WVV | Waterschap Vallei en Veluwe |

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Waterschappen inspecteren hun waterkeringen om de waterveiligheid te waarborgen. Bij deze inspectie kijken ze naar verschillende (inspectie)parameters om de zogenaamde faalmechanismen van waterkeringen vroegtijdig te detecteren. Op dit moment worden de meeste inspecties uitgevoerd met een visuele veldinspectie: lopend of rijdend over de waterkering. Ook worden wel in-situ metingen uitgevoerd. Nieuwe technologieën maken het nu mogelijk om ook andere methoden in te zetten. Veel wordt verwacht van sensoren in de waterkering, maar ook de inzet van Remotely Piloted Aircraft Systems (in de volksmond drones) die vliegend over de waterkering data verzamelen met behulp van verschillende sensoren is een veelbelovend innovatie.

Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) kunnen ingezet worden voor verschillende doeleinden. Informatievoorziening is hiervan een belangrijke. Redenen waarom een RPAS voor informatievoorziening wordt ingezet, zijn dat de data verzameld met een RPAS vlakdekkend en actueel (afhankelijk van het type data en analyse binnen 24 uur informatie beschikbaar). Ook heeft de data verzameld met een RPAS een ultrahoge resolutie. Door verschillende sensoren te koppelen aan een RPAS is het mogelijk om waarnemingen te doen die niet met het blote oog mogelijk zijn, wat nieuwe inzichten oplevert. Bovendien zie je van boven vaak meer dan van opzij. Een ander groot voordeel van de inzet van een RPAS voor informatievoorziening is dat de RPAS data kan inwinnen op een moment dat de opdrachtgever hier behoefte aan heeft (vraag gestuurd, in tegenstelling tot bijvoorbeeld satellietbeelden). In Tabel 1 worden enkele voor en nadelen van diverse data-inwinmethoden kort gepresenteerd.

Tabel 1. Voor en nadelen diverse inwinmethoden, inclusief Down2Earth Sensing RPAS.

| | Lopende inspectie meting | Down2Earth Sensing (RPAS) | Satelliet |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------|
| Detailniveau | ++ | ++ | - |
| Vlakdekkend | - | + | + |
| Vraag gestuurd | + | + | - |
| Vastgelegd | - | + | + |
| Direct ingrijpen | + | - | -- |
| Bewolking | + | + | -- |
| Ook niet visuele spectrum | - | + | + |
| Uniform (objectief) | - | + | + |
| Stedelijk gebied | + | - | + |
| Moeilijk bereikbaar gebied | - | + | + |
| Ondergronds | + | - | - |

Verschillende waterschappen zijn met de vraag gekomen of sensoren onder RPAS ingezet zouden kunnen worden voor de detectie van verschillende faalmechanismen van waterkeringen. Ook STOWA heeft in 2015 een verkenning naar "dijkinspectie met drones" uitgevoerd waarin deze vraag werd gesteld. Verondersteld wordt dat met de inzet van RPAS van meerdere te meten parameters, informatie kostenefficiënt, objectief, vlakdekking en uniform kan worden ingewonnen.

Vijf waterschappen (Waternet, Waterschap Hollandse Delta, Waterschap Limburg Waterschap Rijn en IJssel, en Waterschap Vallei en Veluwe) en STOWA hebben samen met Down2Earth Sensing onderzoeksvragen opgesteld gericht op de mogelijkheden voor RPAS voor inspectiedoeleinden van waterkeringen.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

Doel van dit project is om antwoord op de vraag te kunnen geven in hoeverre de inzet van RPAS kan bijdragen aan het beter en efficiënter monitoren van waterkeringen dan de reguliere manier van monitoren (door middel van visuele inspectie) en daarmee meerwaarde levert aan het waterkeringbeheer.

Om antwoord op bovenstaande hoofdvraag te kunnen geven zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld die gericht zijn op de RPAS monitoringstechniek voor waterkeringen:

- Is het mogelijk om, met behulp van sensoren bevestigd aan een RPAS, op betrouwbare wijze informatie in te winnen van inspectieparameters (kruinhoogte, schade, grasbedekkingsgraad, ongewenste vegetatiesoorten) van (enkele) faalmechanismen van waterkeringen?
- Kan de inzet van RPAS leiden tot betere of aanvullende relevante informatie voor de waterkeringbeheerder, dan de huidige reguliere manier van monitoring door visuele inspectie?
- Leidt monitoring van waterkeringen met behulp van RPAS tot verbeterde inzichten voor de uitvoering van de inspectie van de waterkering gericht op vervolghandelingen?

De antwoorden op bovenstaande vragen moeten leiden tot een uitspraak over de betrouwbaarheid, nauwkeurigheid en toepasbaarheid van de RPAS monitoringstechniek voor het uitvoeren van de inspectie van waterkeringen en de meerwaarde voor de waterkeringbeheerder: technisch, kosten, koppeling WBI gegevens, uniforme en objectieve informatie.

1.3 Inspectieparameters

Als een faalmechanisme van een waterkering daadwerkelijk plaatsvindt, is dit (op een of andere manier) waar te nemen. In veel gevallen zijn er indicatoren voor faalmechanismen die bij een inspectie kunnen worden gedetecteerd; de inspectieparameters¹. Op twee manieren kan de inzet van RPAS bijdragen om deze inspectieparameters van faalmechanismen in beeld te brengen:

- door de oorzaken waar te nemen (proactief, vooraf);
- door de gevolgen waar te nemen (reactief, tijdens of achteraf).

Op basis van eerder uitgevoerde onderzoeken zijn voor diverse faalmechanismen in beeld gebracht welke inspectieparameters gemeten moeten worden om een uitspraak over een faalmechanisme te kunnen doen^{2,3}. Deze metingen kunnen op diverse wijzen worden uitgevoerd. RPAS monitoring zou een nieuwe innovatieve manier kunnen zijn om data over waterkeringen te verzamelen. Naast de zogenaamde basisparameters van waterkeringeninspecties zoals hoogte, helling, bekleding, leveren aanvullende metingen een actueel beeld van de waterkering.

De informatie verzameld met een RPAS kan voor verschillende faalmechanisme inspectieparameters worden uitgewerkt. In dit project is, in overleg met de participerende waterschappen, voorgesteld om te focussen op de volgende specifieke inspectieparameters:

¹ Swart, L. M. Th. (2007) Remote Sensing voor inspectie van waterkeringen. In opdracht van Rijkswaterstaat.

² Deltares (2014) IV-Keten, Veiligheid als basis monitoringsfilosofie en proeftuinen.

³ STOWA (2012) Handreiking Inspectie waterkeringen 2012, technisch deel. Inspectiewijzer waterkeringen. Rapport 2012-14

- Kruinhoogte waterkering;
- Schades: verzakkingen, spoorvorming, scheuren, graverij, kale plekken;
- Bedekkingsgraad waterkering;
- Detectie ongewenste vegetatiesoorten.

Bovenstaande inspectieparameters worden ook met de huidige manier van monitoring (visuele inspectie (digispectie) en metingen) geanalyseerd, waardoor een goede vergelijking kan worden gemaakt. Specifieke vragen die door vergelijking met de visuele inspectie moeten worden beantwoord zijn onder andere:

- Komen de gevonden maaiveldhoogten (kruin, berm) overeen met terrestrische landmeetkundige metingen?
- Kan schade (verzakkingen, spoorvorming, kale plekken, scheuren, graverij) vanuit de lucht worden bepaald?
- Kan de bedekkingsgraad (mate van begroeiing of gesloten - open- gefragmenteerd) objectief vanuit de lucht worden bepaald en komt deze overeen met de (lokale) bedekkingsgraad zoals opgenomen tijdens de visuele inspectie op de grond eventueel aangevuld met steken van een plag?
- Zijn (clusters van) ongewenste vegetatiesoorten vanuit de lucht te detecteren? In dit project ligt de focus op de volgende ongewenste vegetatiesoorten: Japanse duizendknoop, Heermoes en Ridderzuring.

1.4 Werkwijze onderzoek

Van verschillende waterkeringstrajecten is gedurende een halfjaar drie keer data met een RPAS ingewonnen (maart, juni en september/oktober). Deze data is uitgewerkt naar de informatie voor de 4 inspectieparameters, zoals hiervoor beschreven.

De verzamelde data is uitgewerkt naar gebiedsdekkende informatie die gebruikt is voor dijkinspectie. Deze informatie is vergeleken met veldgegevens. Op basis van deze vergelijking worden uitspraken gedaan over de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid bij het gebruik van RPAS om waterkeringen te monitoren / inspecteren.

1.5 Sensoren

Voor deze pilot zijn drie type sensoren gebruikt:

1. Zichtbaar licht sensor (RGB);
2. Nabij infrarood sensor (NIR);
3. Multispectraal sensor.

De zichtbaar licht sensor maakt opnamen in het zichtbare licht (RGB: rood, groen en blauw). Het resultaat is een ultrahoge resolutie luchtfoto (resolutie tot 2 cm afhankelijk van de vlieghoogte). De verschillende RGB-opnamen zijn verwerkt tot een orthomosaïek van de verschillende dijktrajecten. Het resultaat wordt gebruikt om visueel te bekijken of schades zichtbaar zijn, afwijkingen in de vegetatie herkend kunnen worden, maar ook hoogten worden met deze sensor bepaald.

De nabij infrarood sensor (NIR) maakt opnamen in het nabij infrarood, rood en groene spectrum (resolutie tot 2 cm, afhankelijk van de vlieghoogte). De verschillende NIR-opnamen zijn verwerkt tot een orthomosaïek van de verschillende dijktrajecten. Het resultaat wordt gebruikt om afwijkingen in de vegetatie te herkennen, maar ook om vegetatie-indexen te berekenen. Voor deze pilot is de *Normalized*

Difference Vegetation Index (NDVI) bepaald die als basis dient voor de bepaling van de grasbedekkingsgraad. Zie paragraaf 5.2 voor meer informatie.

De multispectraal sensor is een geavanceerde sensor die opnamen maakt in vier spectrale banden: groen (550nm), rood (660nm), red edge (735nm) en nabij infrarood (790nm) met een ruimtelijke resolutie tot 7 cm, afhankelijk van de vlieghoogte. Tijdens de vlucht worden de opnamen gecorrigeerd voor de actuele intensiteit van het zonlicht door een extra irradiance sensor en voor elke vlucht wordt de sensor gekalibreerd. De verschillende multispectrale opnamen zijn gebruikt om vegetatie-indexen te berekenen en om de karakteristieken van de specifieke ongewenste vegetatiesoorten vast te stellen.

1.6 Leeswijzer

Na deze inleiding worden in hoofdstuk 2 de verschillende pilotlocaties van deze studie besproken. Daarna wordt in hoofdstuk 3 ingegaan op de maaiveldhoogtebeelden die zijn vervaardigd en de analyses die hiermee zijn uitgevoerd. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de RPAS monitoring gericht op schade aan de waterkeringen behandeld. Kale plekken, spoorvorming en scheuren komen hier aan bod. Vervolgens zal worden ingegaan op monitoring van de grasbedekkingsgraad vanuit de lucht. Hiervoor is een algoritme ontwikkeld en zijn veldgegevens gebruikt om de resultaten van het algoritme te valideren. De resultaten hiervan worden in hoofdstuk 5 besproken. In hoofdstuk 6 komen de resultaten van de monitoring gericht op ongewenste vegetatiesoorten aan bod. Hierbij wordt ook de achterliggende theorie om ongewenste vegetatiesoorten te detecteren behandeld. Vervolgens wordt in hoofdstuk 7 de toekomstige inzet van RPAS voor monitoring van waterkeringen besproken. Wat zijn randvoorwaarden en welke kosten zijn verbonden aan RPAS monitoring. Ten slotte zullen in hoofdstuk 8 de conclusies en aanbevelingen worden behandeld.

In de bijlagen van deze rapportage zijn verschillende kaartbeelden weergegeven. Hierin zijn onder andere opgenomen de maaiveldhoogtebeelden en beelden van de grasbedekkingsgraad.

2 Pilotlocaties

Samen met de vijf participerende waterschappen zijn zes pilotlocaties van verschillende waterkeringen van circa één kilometer geselecteerd die geschikt zijn voor dit onderzoek. Niet alle pilotlocaties zijn voor de monitoring van alle inspectieparameters gebruikt. Voor de selectie van de waterkeringen is gekeken naar verschillen in (gras)bekleding, bedekkingsgraad, aanwezigheid ongewenste vegetatiesoorten, onderhoudssituaties, maar ook de aanwezigheid van reeds bekende (meet)data.

In de volgende paragrafen worden de locaties van de geselecteerde waterkeringen en enkele opvallende detailbeelden weergegeven. In bijlage I zijn de overzichtsbeelden (orthomozaïeken) te vinden van de geselecteerde waterkeringen in het zichtbare licht spectrum. In bijlage II zijn nog enkele detailopnamen van de verschillende waterkeringstrajecten opgenomen.

2.1 Waterschap Vallei en Veluwe

De Grebbeliniedijk is als waterkeringstraject geselecteerd door waterschap Vallei en Veluwe. De ligging van het waterkeringstraject is weergegeven in Figuur 1. Er is gekozen voor dit traject omdat dit traject recent is versterkt en de grasmat zich dus nog aan het ontwikkelen is. Het traject heeft een lengte van circa 1200 m. In dit onderzoek worden de inspectieparameters schade, hoogte, grasbedekking en ongewenste vegetatiesoorten geanalyseerd.



Figuur 1. Ligging waterkeringstraject Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe).



Figuur 2. Detailbeeld variatie in begroeiing en kazemat op waterkering (waterschap Valleï en Veluwe, juni 2017).

2.2 Waterschap Limburg

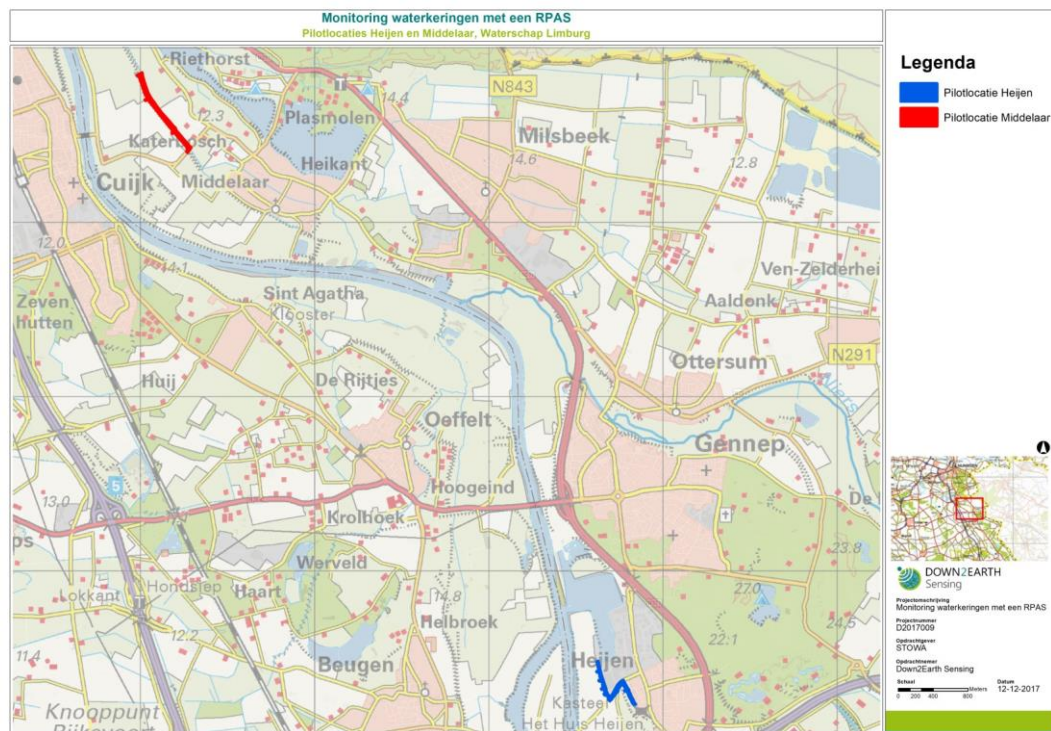
Voor waterschap Limburg zijn twee verschillende waterkeringstrajecten gemonitord. Een traject bij Heijen en een bij Middelaar.

Heijen

De ligging van het waterkeringstraject bij Heijen (54.057 - 55.048) is weergegeven in Figuur 3. Er is voor dit traject gekozen omdat op dit traject diverse ongewenste vegetatiesoorten (o.a. Ridderzuring en Japanse duizendknoop) aanwezig zijn. Het traject heeft een lengte van circa 900 m. In dit onderzoek worden de inspectieparameters schade, hoogte, grasbedekking en ongewenste vegetatiesoorten geanalyseerd.

Middelaar

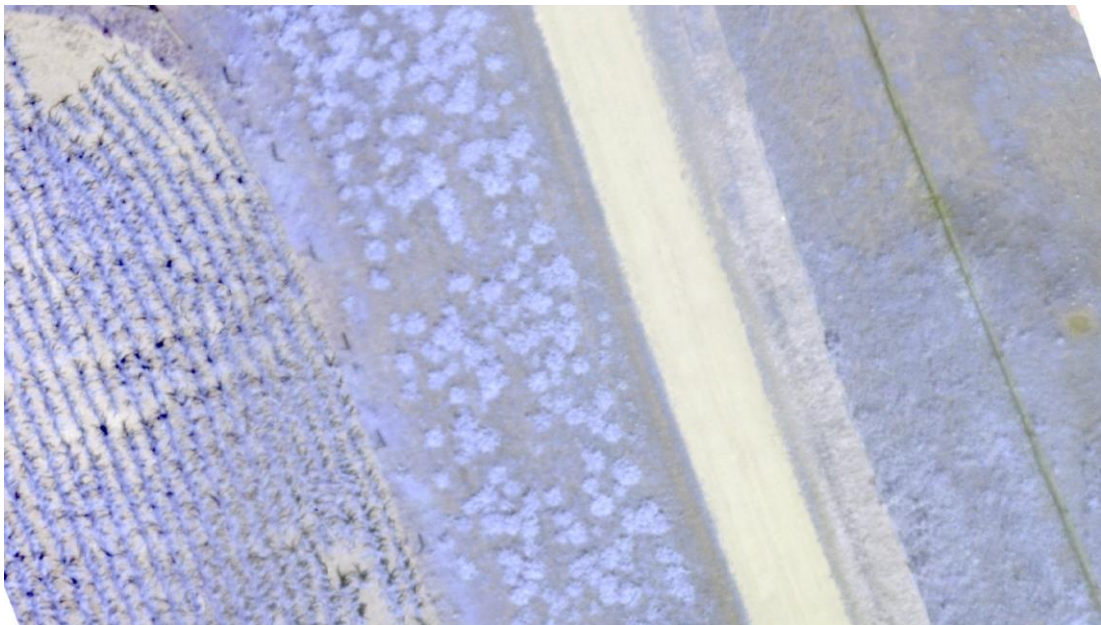
De ligging van het waterkeringstraject Middelaar (54.145 - 54.158) is weergegeven in Figuur 3. Dit traject is geselecteerd omdat het een goed voorbeeld van een standaard waterkering is in het beheergebied van Waterschap Limburg. Het traject heeft een lengte van circa 1500 m. De inspectieparameters schade, hoogte, grasbedekking en ongewenste vegetatiesoorten worden van dit traject geanalyseerd.



Figuur 3. Ligging pilotlocaties Middelaar en Heijen (waterschap Limburg).



Figuur 4. Detailbeeld variatie in begroeiing waterkering Heijen (RGB) (waterschap Limburg, juni 2017).



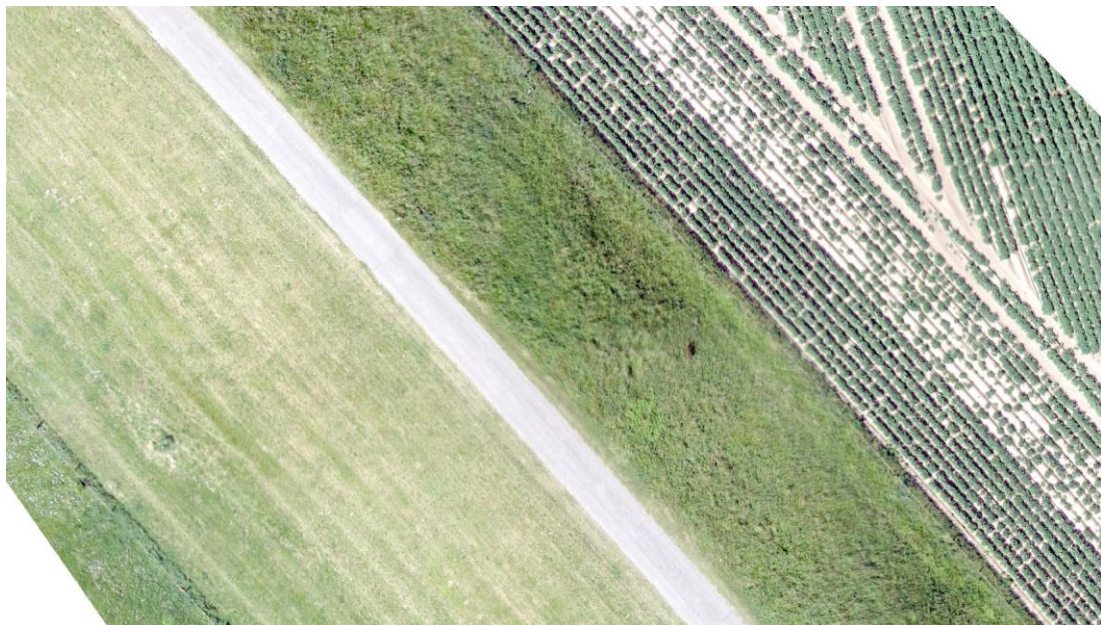
Figuur 5. Detailbeeld begroeiing (o.a. Ridderzuring) waterkering Heijen (nabij infrarood) (waterschap Limburg, juni 2017).

2.3 Waterschap Rijn en IJssel

De ligging van het waterkeringstraject van waterschap Rijn en IJssel is weergegeven in Figuur 6. Dit traject is geselecteerd omdat dit een gemiddelde waterkering van het waterschap is en er geen speciaal beheer en onderhoud op wordt uitgevoerd. De waterkering kan gezien worden als een standaard voorbeeld binnen het beheergebied. Het traject heeft een lengte van circa 1200 m. In dit onderzoek wordt voor dit dijktraject gekeken naar de inspectieparameters schade en hoogte, grasbedekking en ongewenste vegetatiesoorten.



Figuur 6. Ligging pilotlocatie Rijn-dijk - Pannerdense Waard, Pannerden (waterschap Rijn en IJssel).



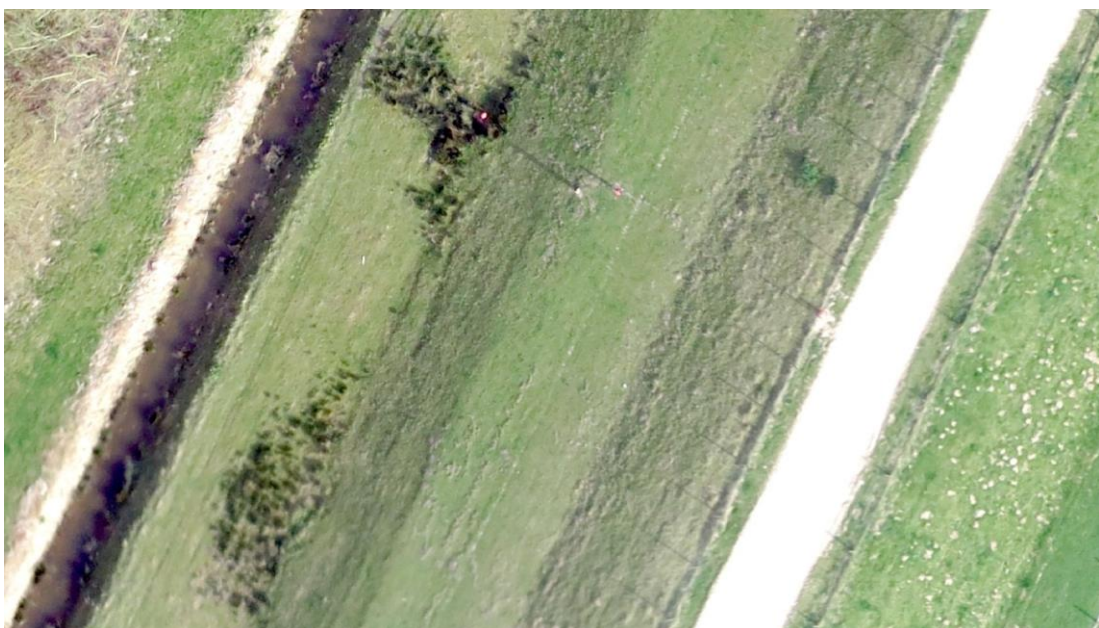
Figuur 7. Detailbeeld gemaaide en ongemaaide waterkering (waterschap Rijn en IJssel, juni 2017).

2.4 Waterschap Hollandse Delta

Figuur 8 toont de ligging van het waterkeringstraject van waterschap Hollandse Delta. Er is gekozen voor deze locatie, omdat de dijk recentelijk is versterkt en dat de kering nog sterk aan zetting onderhevig zou zijn. Daarnaast zijn enkele kwelplekken zichtbaar. De lengte van het dijktraject is circa 1300 m. In dit onderzoek wordt voor dit dijktraject gekeken naar de inspectieparameters schade en hoogte.



Figuur 8. Ligging pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (waterschap Hollandse Delta).



Figuur 9. Detailbeeld kwelplekken met afwijkende begroeiing (waterschap Hollandse Delta, maart 2017).

2.5 Waternet

Figuur 8Figuur 10 toont de ligging van het waterkeringstraject bij Waternet Gekozen is voor deze locatie, omdat de dijk recentelijk is versterkt. De vegetatie op de kering moet zich nog ontwikkelen. De lengte van het dijktraject is circa 1700 m. In dit onderzoek wordt voor dit dijktraject de aandacht gefocust op de inspectieparameters schade en hoogte.



Figuur 10. Ligging pilotlocatie Nieuweweg - Bethunepolder langs Loosdrechtse Plassen (Waternet).



Figuur 11. Detailbeeld nauwelijks begroeide waterkering (nabij infrarood) (Waternet, maart 2017).

3 Hoogten

De resultaten van de hoogteanalyses, uitgevoerd op basis van de RPAS monitoring worden in dit hoofdstuk behandeld.

3.1 Maaiveldhoogten

De zichtbaar licht opnamen zijn gebruikt om gedetailleerde hoogtebeelden te maken. Voor een exacte locatie en hoogte bepaling is het noodzakelijk om de gemeten (hoogte)data te corrigeren en te verifiëren op basis van GPS-referentiepunten (ground control points). Alle hoogtemetingen, uitgevoerd met data verzameld met sensoren onder een RPAS maar ook met LIDAR (zoals het AHN) moeten hierdoor worden gecorrigeerd. De door de waterschappen ingemeten referentiepunten zijn vanuit de lucht herkenbare kruizen of vlakken. Zie bijlage II, Figuur 36 voor enkele voorbeelden van gebruikte GPS-referentiepunten.

Hieronder wordt geanalyseerd in hoeverre de hoogte bepaald op basis van sensordata van sensoren onder een RPAS afwijken van bekende hoogtemetingen. Als vergelijking is het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN2) gebruikt en terrestrisch ingemeten (hoogte-)punten.

Alleen in de pilotlocatie van Waterschap Rijn en IJssel zijn extra terrestrische metingen uitgevoerd (buiten de GPS-referentiepunten) om de locatie van ongewenste vegetatiesoorten te bepalen. Tegelijkertijd is van deze locaties ook de hoogte gemeten (zie Figuur 12).



Figuur 12. Locatie bepaling ongewenste vegetatiesoorten⁴ en hoogtebepaling (waterschap Rijn en IJssel).

Zoals uit Figuur 12 blijkt zijn de terrestrische metingen niet ideaal om te gebruiken als validatie voor de ingemeten hoogten, omdat vanuit de lucht met behulp van fotogrammetrie slecht door dichte en hoge vegetatie kan worden gekeken om de maaiveldhoogte te bepalen. Daarom is bij de validatie onderscheid gemaakt in metingen op asfalt en metingen op het begroeide talud. In Tabel 2 zijn de resultaten weergegeven.

Uit Tabel 2 blijkt dat de ingevlogen hoogten op het asfalt goed overeenkomen met de terrestrisch ingemeten punten. Zowel het AHN2 als de hoogte bepaald met behulp van de RPAS data hebben een maximaal verschil met de terrestrisch ingemeten hoogte van 4 cm. De standaardafwijking is bij de RPAS-hoogte iets groter (3 cm)

⁴ Op de foto Boerenwormkruid. Dit is geen ongewenste soort.

Uit Tabel 2 blijkt ook dat de ingevlogen hoogten op het begroeide talud (september) flink afwijken met de terrestrisch ingemeten punten. Het AHN2 wijkt op het begroeide talud tot wel 35 cm af van de terrestrisch ingemeten hoogte. De hoogte bepaald met behulp van de RPAS data wijkt op het begroeide talud zelfs tot maximaal 69 cm af van de terrestrisch ingemeten hoogte. Als zeven metingen met grootste afwijking (outliers) uit de analyse worden weggelaten wordt het maximale verschil op het begroeide talud kleiner (56 cm), maar is nog steeds aanzienlijk.

De standaardafwijking van het AHN2 met terrestrisch ingemeten punten is 20 cm. Bij de RPAS-hoogte is dit 30 cm.

Tabel 2. Vergelijking ingevlogen en terrestrisch ingemeten hoogten.

| | Verschil met terrestrische meting [m] | | | | |
|--------------------|---------------------------------------|-------|------------------|-------|--------|
| | Asfalt* | | Begroeid (talud) | | |
| | AHN2 | RPAS | AHN2 | RPAS | RPAS** |
| Aantal (n) | 6 | 6 | 55 | 55 | 48 |
| Maximaal | 0,04 | 0,02 | 0,31 | 0,25 | 0,25 |
| Minimaal | 0,01 | -0,04 | -0,35 | -0,69 | -0,56 |
| Gemiddeld | 0,03 | 0,00 | -0,10 | -0,28 | -0,23 |
| Standaardafwijking | 0,01 | 0,03 | 0,20 | 0,31 | 0,30 |

Noot:

* De metingen op asfalt zijn niet de GPS=referentiemetingen.

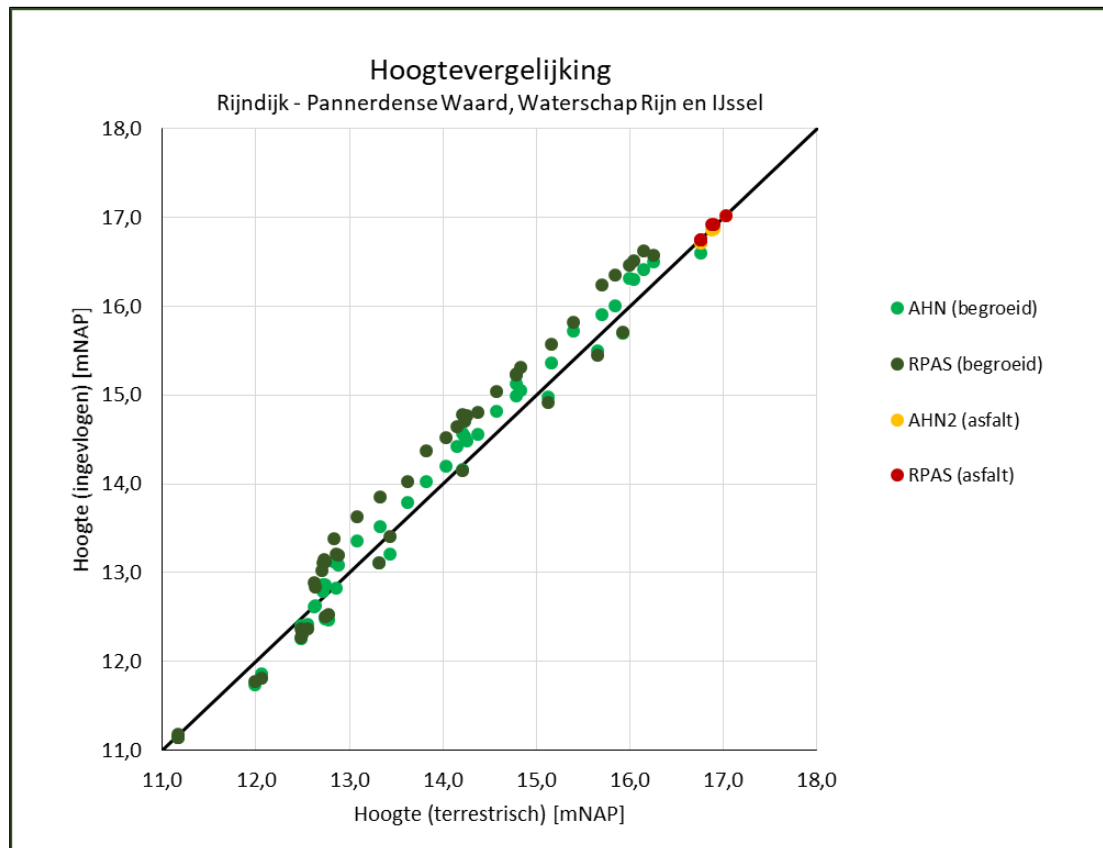
** Voor deze RPAS hoogtemeting zijn 7 outliers (metingen met grootste afwijking) uit de analyse weggelaten.

Negatieve waarde: terrestrische meting is lager dan de ingevlogen meting. Er is invloed van de vegetatie op ingevlogen hoogten.

Positieve waarde: terrestrische meting is hoger dan de ingevlogen meting.

In Figuur 13 is een vergelijking gemaakt tussen de ingevlogen en terrestrisch ingemeten hoogten. Duidelijk zichtbaar is dat voor het begroeide talud de ingevlogen hoogtemetingen (groen) voor zowel AHN2 als RPAS-DSM hoger liggen dan de terrestrische metingen. Voor het RPAS-DSM was dit enigszins verwacht, omdat de locatie van de terrestrische metingen niet ideaal was om te gebruiken als validatie voor de ingemeten hoogten. Voor het AHN2 is het verschil met de terrestrische metingen op het begroeide talud hoger dan verwacht, zeker omdat het AHN in de winter ingevlogen wordt, wanneer de vegetatie kort zou moeten zijn. Zeer waarschijnlijk speelt hier op een helling de minder hoge ruimtelijke resolutie (50 cm) van het AHN een rol. De ingevlogen hoogten op de harde kruin komen goed overeen met de terrestrische metingen.

Voor waterschap Hollandse Delta is het met de RPAS ingevlogen DSM (maart 2017) voor 20 willekeurig gekozen punten vergeleken met het AHN2 op het asfalt van de Oostmolendijk. De standaardafwijking tussen het AHN2 en het RPAS-DSM (maart 2017) is 4 cm, met een gemiddeld verschil van 5 cm. Welke ingevlogen hoogten het beste overeenkomen met de werkelijkheid is zonder terrestrische metingen niet te zeggen.



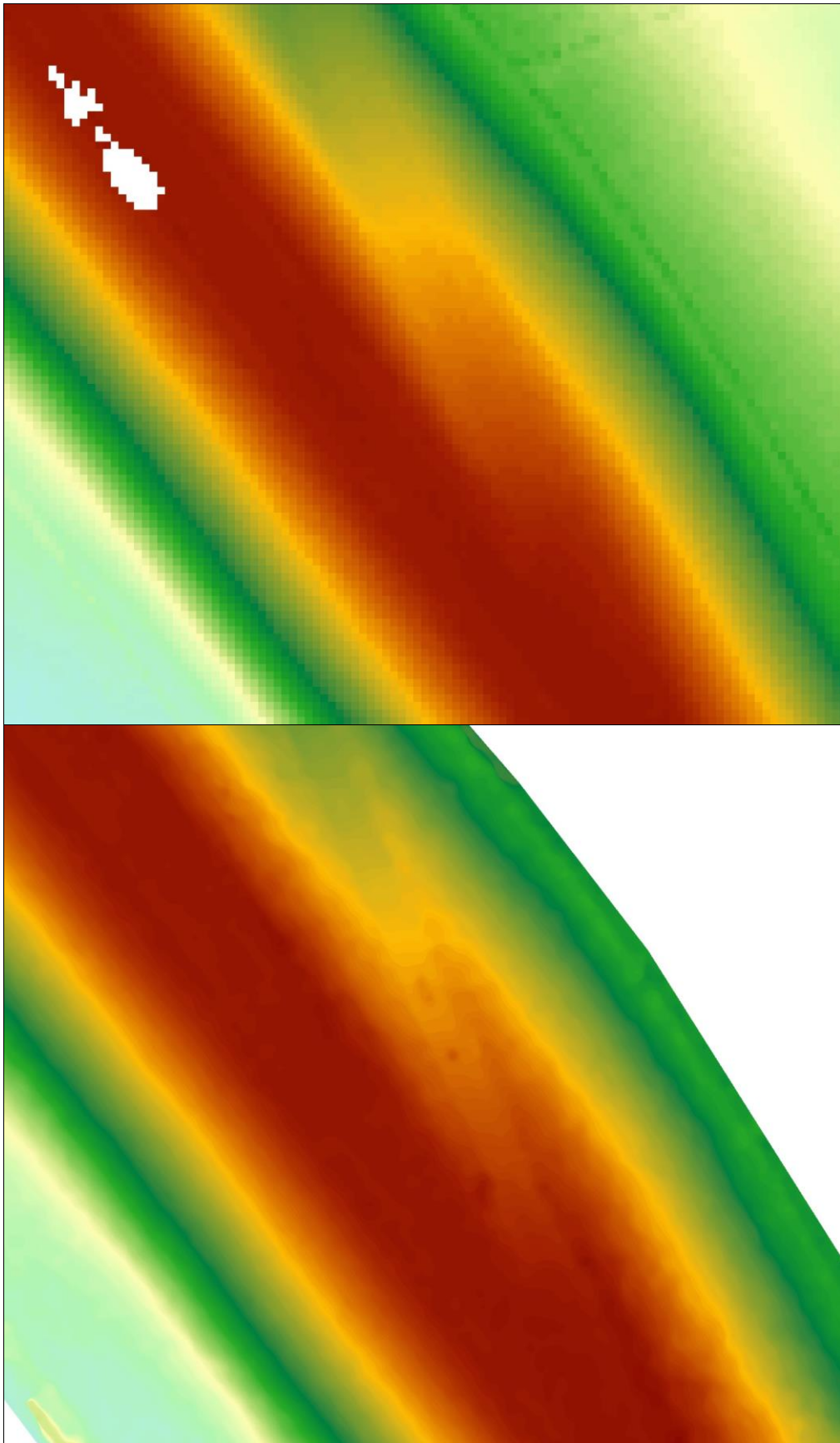
Figuur 13. Vergelijking ingevlogen (AHN2 en RPAS-DSM) en terrestrisch ingemeten hoogten.

3.2 Hoogtebeelden (DSM)

In de bijlage III zijn de hoogtebeelden (Digital Surface Model, DSM) van de verschillende waterkeringstrajecten opgenomen.

Het Digital Surface Model (DSM) van de waterkeringen gebaseerd op de met een RPAS ingevlogen data geeft hoogtewaarden met een horizontale resolutie van 3,5 cm. Het Actueel Hoogtebestand Nederland levert deze informatie na het vergrinden van de ruwe data met een resolutie van 50 cm. Het ingevlogen Digital Surface Model (DSM) heeft dus meer dan 200 keer zoveel hoogtewaarden (raster/cell-values) per oppervlakte eenheid. Dit is goed te zien op de taldhellingen van de kering waar het hoogteverloop van het AHN2 "blokkerig" verloopt. In onderstaande Figuur 14 is een detail van het AHN2 van de Rijndijk in Pannerden weergegeven (boven). Figuur 14 (onder) geeft exact hetzelfde stuk waterkering weer met de ingevlogen hoogten met een ultrahoge resolutie van 3,5 cm.

Het ultrahoge resolutie (3,5 cm) digitale hoogtemodel van de waterkering geeft ruimtelijk veel meer informatie dan het AHN2. Echter zoals in paragraaf 3.1 besproken de betrouwbaarheid van de hoogte op het begroeide talud kan worden verbeterd (zie ook paragraaf 3.3 aanbevelingen).



Figuur 14. Detail AHN2 (boven) en Digital Surface Model (onder) Rijndijk (waterschap Rijn en IJssel).

3.3 Conclusies en aanbevelingen

Om antwoord te geven op de verschillende onderzoeksvragen is voor het onderdeel hoogte de deelvraag gesteld of de gevonden maaiveldhoogten (kruin, berm) betrouwbaar overeenkomen met terrestrische landmeetkundige metingen?

Uit de analyse blijkt dat de maaiveldhoogten op de kruin (asfalt of verharding) van de keringen van het AHN2, met behulp van RPAS verzamelde hoogtedata en de terrestrische hoogtemetingen goed met elkaar overeenkomen. De geconstateerde afwijkingen op de kruin zijn zowel in het AHN als in de met RPAS verzamelde hoogtedata van dezelfde orde van grootte. De ruimtelijke resolutie (horizontaal) van het RPAS-DSM is vele malen groter dan de resolutie van het AHN, daarnaast is het RPAS-DSM actueel.

Op het talud van de waterkering, waar veel vegetatie aanwezig is, zijn grotere afwijkingen geconstateerd. Reden hiervan is de mate van begroeiing. Door filtering van vegetatie uit het digitale hoogtemodel kunnen de verschillen tussen de terrestrische metingen en de RPAS metingen op de begroeide taluds van de kering worden verkleind. Filtering van vegetatie heeft in deze studie niet plaatsgevonden, omdat de aandacht gericht is op de kruinhoogte van de kering.

Ook op de harde kruin is het waarschijnlijk mogelijk om nog nauwkeurigere data te leveren. Uit een vergelijking van twee hoogtemetingen (maart en december 2017⁵) voor waterschap Hollandse Delta bleek dat de nauwkeurigheid van de ingevlogen data niet voldoende was om kleine verzakkingen automatisch te detecteren. De ingevlogen data zou kunnen worden verbeterd door:

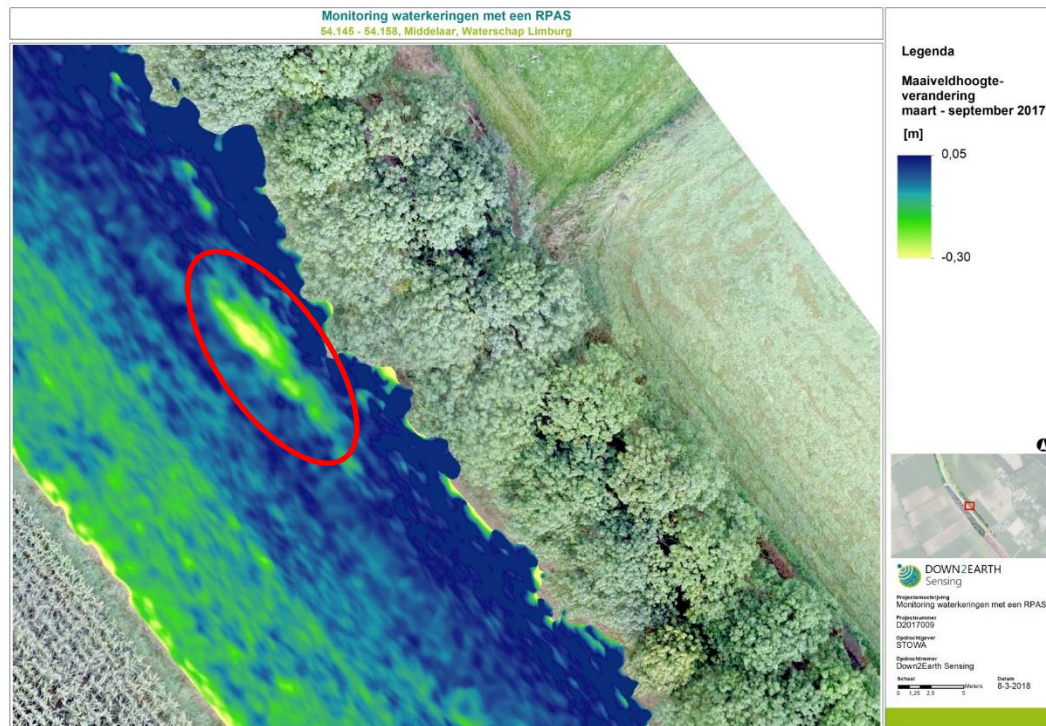
- i) Toepassen van de nieuwste sensoren
Recent zijn er nieuwe sensoren op de markt gekomen waarvan de specificaties doen vermoeden dat er betere resultaten mee kunnen worden bereikt;
- ii) Aanpassen inwinmethode
Door het aanpassen van de inwinmethode: vliegbanen met meer overlap en eventueel zelfs kruiselings vliegen is het mogelijk om nog wat aan nauwkeurigheid te winnen. Echter de vliegtijd neemt bij het toepassen van deze methoden flink toe per oppervlakte eenheid.
- iii) Toepassen van RTK of PPK
Recent zijn er RPAS op de markt gekomen met RTK (Real Time Kinematic) / PPK (Post Processed Kinematic) GPS mogelijkheden. Deze RPAS zijn op dit moment nog aanzienlijk duurder dan een RPAS zonder RTK mogelijkheid. Echter met name voor het buitengebied, waar een goede ontvangst gewaarborgd is, zou een RPAS met RTK mogelijkheid nauwkeurigere hoogtedata kunnen leveren. Leveranciers beloven een nauwkeurigheid in z-waarde (hoogte) van 3 cm. Voordeel is ook dat het niet noodzakelijk is om GPS-referentiepunten (ground control points) te maken. Met namen het niet goed plaatsen (distributie) van referentiepunten kan leiden tot onnauwkeurigheden.

⁵ De vergelijking van de twee hoogtemetingen bij waterschap Hollandse Delta heeft niet plaatsgevonden als onderdeel van deze studie.

4 Schades

4.1 Verzakking waterschap Limburg

Uit veldinspectie bleek dat een gedeelte van het talud van de waterkering bij Middelaar over een lengte van circa 25m was verzakt. De verzakking was circa 20 cm. Later in het jaar (2017) is het talud lokaal hersteld (opgehoogd) en is nieuwe bekleding aangelegd.



Figuur 15. Verzakking binnentalud waterkering Middelaar op basis van verschil in hoogtebeelden tussen maart 2017 en september 2017 (waterschap Limburg).

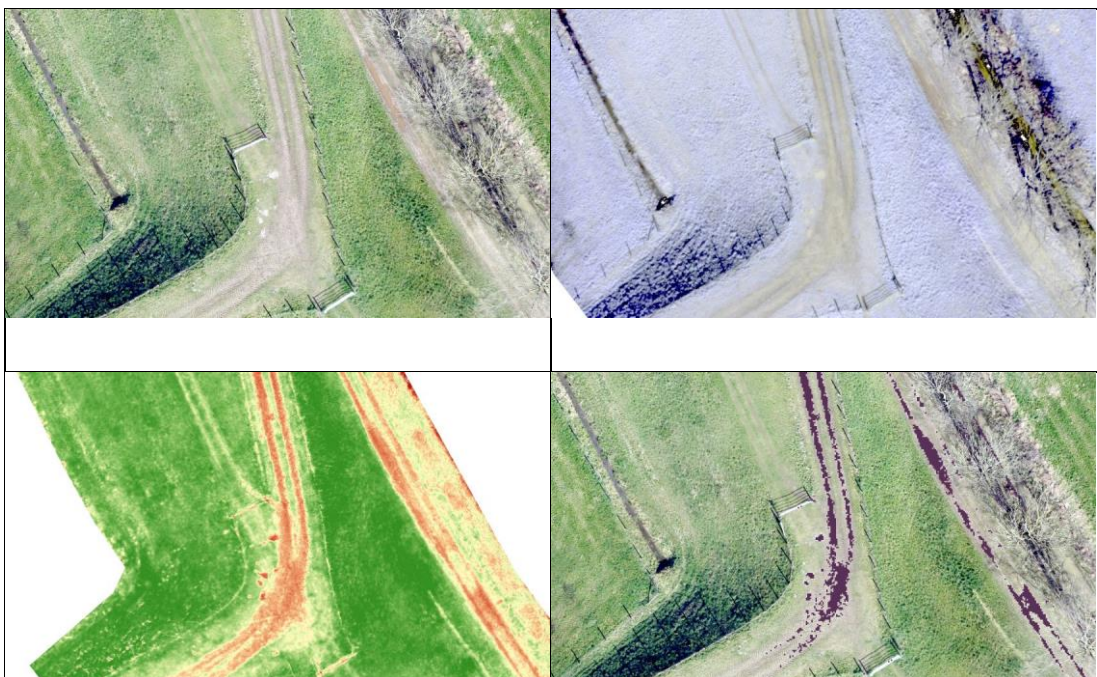
In het hoogtebeeld van maart 2017 is gekeken of deze verzakking terug te vinden was. Immers hoogteverschillen van 20 cm moeten goed te detecteren zijn. Met alleen het hoogtebeeld (DSM) van maart was het niet mogelijk om automatisch de door de verzakking veroorzaakte depressie in het talud te detecteren. De contourlijnen (lijnen met gelijke hoogte) op een waterkering lopen nu eenmaal niet exact evenwijdig aan de kruin, waardoor een depressie, waar de contourlijnen met een bocht omheen zouden moeten lopen, niet eenduidig opvalt. Echter door het verschil tussen de hoogtebeelden van maart 2017 en september 2017 te analyseren is de lokale verzakking wel goed te detecteren (Figuur 15 rode ovaal). Ter plaatse van de verzakking is het maaiveld in maart tot 20-30 cm (Figuur 15 geel) lager dan na het herstel (opvullen van depressie) van het talud.

De onderste helft van het buitentalud (westelijk) in september lijkt (structureel) iets hoger te liggen (groene kleuren) dan in maart. Dit is niet te verklaren door de begroeiing, aangezien in september net was gemaaid. Het hoogteverschil is meestal minder dan 5 cm, met een paar plekken tot 15 cm. De afwijking lijkt veroorzaakt door een minieme kanteling (0,2-0,4 graden) van het hoogtebeeld met de kruin van de waterkering als as. Deze onverwachte hoekverdraaiing is alleen mogelijk geweest doordat alle grondcontrolepunten op één rechte lijn op de kering liggen. De hoogte van de kruin is juist en vergelijkbaar met de grondcontrolepunten, maar hoe verder van de kruin hoe groter de afwijking. Deze

afwijking is eenvoudig te voorkomen door: i) een betere ruimtelijke distributie van de grondcontrolepunten, dus ook enkele op de teen of naast de waterkering of ii) door gebruik te maken RTK (zie hoofdstuk 3.3)

4.2 Graverij en kale plekken

Kale plekken zijn visueel deels zichtbaar, maar vooral in het nabij infrarode spectrum zijn kale plekken van verschillende omvang goed te detecteren. Voor inspectie is het noodzakelijk om te weten waar zich kale plekken bevinden groter dan 0,15 m x 0,15 m en of dit er meer of minder zijn dan 5 per 25 m². Na een GIS analyse (zie ook paragraaf 5.4) kan op basis van de ingevlogen beelden bepaald worden welke kale plekken groter zijn dan 0,15 m x 0,15 m. In onderstaande figuur zijn de kale plekken weergegeven in zichtbaar licht, nabij infrarood, na omzetting tot een gewasindex en als resultaat de plekken groter dan 0,15 m x 0,15 m.



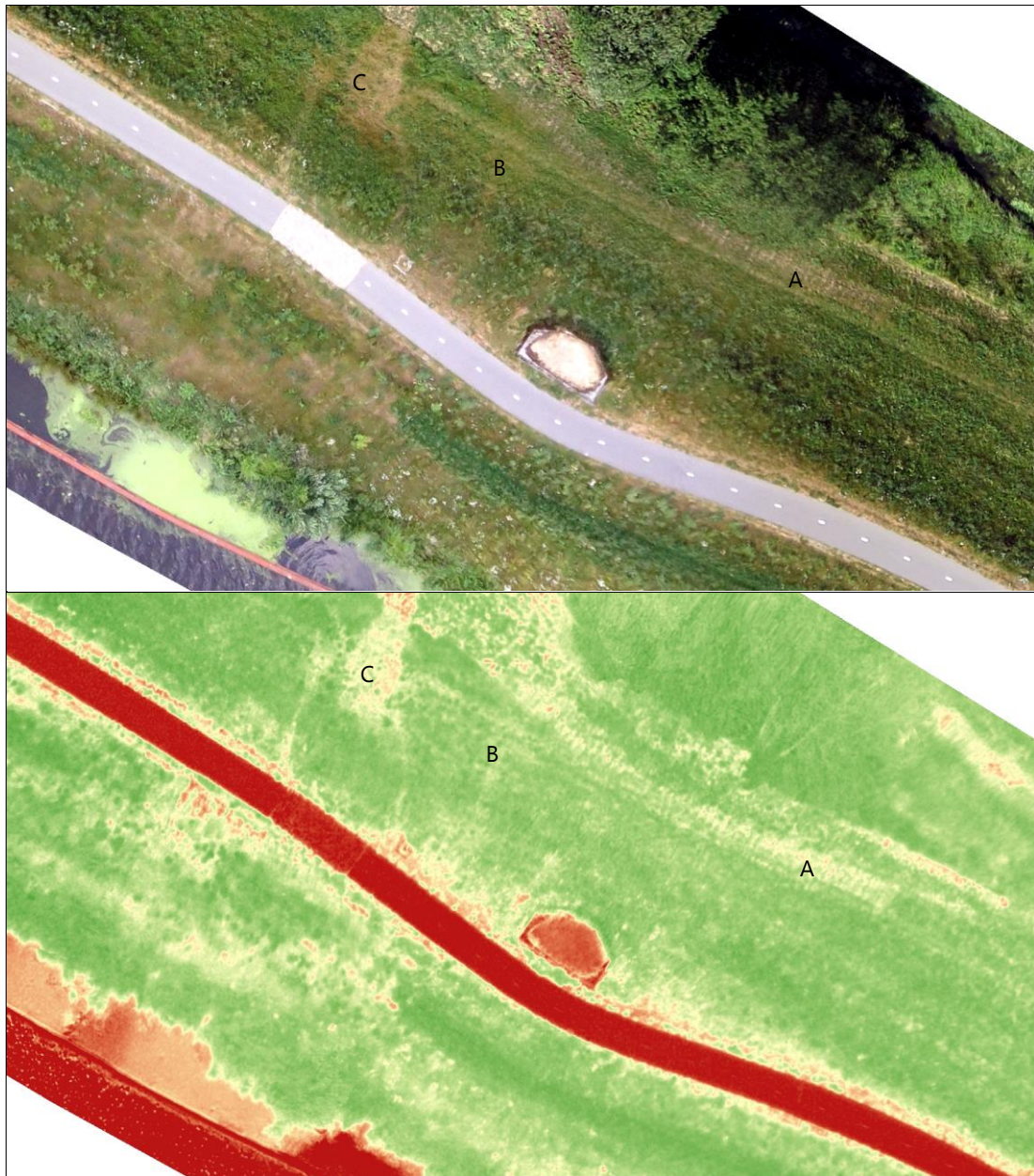
Figuur 16. Kale plekken in zichtbaar licht (aarde kleur plekken in beeld linksboven), nabij infrarood (grijze plekken in beeld rechtsboven), NDVI (rode plekken in beeld linksonder) en analyse naar plekken groter dan 0,15 x 0,15 m (zwarte plekken in beeld rechtsonder), waterkering Middelaar (waterschap Limburg, maart 2017).

Uit de analyse naar kale plekken, zoals in bovenstaande figuur is te zien, blijkt dat kale plekken met RPAS goed te detecteren zijn. Wanneer de vegetatie kort is, kunnen door gebruik te maken van nabij infraroodsensoren gevolgd door een GIS bewerking, kale plekken met een minimale omvang van 0,15 m x 0,15 m worden geïdentificeerd.

4.3 Spoorvorming

Bij dijkinspectie wordt onder andere gekeken naar spoorvorming op de kering om te controleren of de graszode niet beschadigd is. Vanuit de lucht zijn de lijnvormige sporen goed te detecteren. In Figuur 17 zijn enkele voorbeelden gegeven van spoorvorming door tractoren, wandelaars of dieren.

Wanneer de informatie uit de visuele beelden gecombineerd wordt met een vegetatieindex, waarmee goed onderscheid kan worden gemaakt tussen begroeide en onbegroeide delen, kan een uitspraak worden gedaan of de graszode beschadigd is.



Figuur 17. Spoorvorming (tractor en loopsporen) in zichtbaar licht opnamen en met vegetatieindex (groen is begroeid, rood-geel is onbegroeid), Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe, juni 2017).

Figuur 17 laat de Grebbeliniedijk zien waarop enkele grote sporen van rupsbanden (A) zijn te zien. Deze hebben geleid tot een kale ondergrond. Uit de vegetatieindex blijkt dat de grond hier onbegroeid is. De graszode is hier beschadigd. Ook zijn in dit beeld looppaden (B) van wandelaars te zien. Deze hebben echter niet geleid tot een kale ondergrond. De vegetatieindex laat hier niet zien dat het hier onbegroeid is. Op locatie C is in 2015 een persleiding uit de kering verwijderd. Nog steeds is dit aan de vegetatie te zien, zowel op het binnen- (C) als buitentalud.

4.4 Scheuren

Bij dijkinspectie wordt gekeken naar de aanwezigheid van scheuren in de waterkering. Scheuren groter dan 1 – 3 cm breedte moeten worden geconstateerd, omdat deze mogelijk de stabiliteit van een kering ondermijnen. Tijdens de RPAS monitoring van de verschillende waterkeringen zijn scheuren met deze breedte niet geconstateerd, terwijl ze wel aanwezig waren (zie Figuur 18). Reden dat deze scheurbreedten niet gedetecteerd konden worden, is de resolutie van de gebruikte sensoren. De resolutie van de sensoren is van dezelfde orde grootte als de breedte van scheur. De inzet van sensoren (visueel maar ook thermische infrarood) met een nog hogere resolutie zou er mogelijk toe kunnen leiden dat scheuren met kleine breedte kunnen worden gedetecteerd.



Figuur 18. Scheuren in waterkering Middelaar. Rechtsonder RPAS opname waarin geen duidelijke scheuren zijn te herkennen, (waterschap Limburg, september 2017).

4.5 Conclusie en aanbevelingen

Om antwoord te geven op de verschillende onderzoeksvragen is voor het onderdeel schade de deelvraag gesteld of verzakkingen, kale plekken, scheuren, spoorvorming en graverij vanuit de lucht kunnen worden bepaald?

Verzakkingen kunnen met behulp van RPAS hoogtedata worden gelokaliseerd door het verschil tussen twee hoogtemetingen te bepalen. De omvang en locatie kunnen hiermee worden bepaald. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat verzakkingen kleiner dan 5 cm binnen de meetonnauwkeurigheid vallen van hoogtemetingen (RPAS of AHN) en daardoor niet met zekerheid kunnen worden vastgesteld. Eenmalige hoogtemetingen kunnen geen verzakkingen of opbollingen automatisch detecteren. Een tweede hoogtemeting is nodig voor een verschilanalyse, waarbij de meetonnauwkeurigheid doorslaggevend is bij de interpretatie van de verzakking of opbolling.

Naar voren gekomen is dat diverse schades met behulp van RPAS monitoring kunnen worden gedetecteerd. Kale plekken, graverij en spoorvorming zijn het hele jaar door zeer goed waar te nemen. Deze schades zijn deels met visuele opnamen te herkennen, maar zeker wanneer gebruik gemaakt wordt van GIS bewerkingen, gebaseerd op nabij infrarood opnamen. In nabij infrarood opnamen kan levende vegetatie worden onderscheiden van niet levende vegetatie zoals kale grond. Aandachtspunt hierbij is wel dat de vegetatie niet te lang moet zijn, omdat vegetatie dan over kale grond heen kan liggen.

Uit de uitgevoerde analyses bleken scheuren in de waterkeringen niet te kunnen worden aangetoond. Met verschillende sensoren (visueel licht, nabij infrarood en multispectraal) is naar scheuren gekeken, maar deze bleken niet in de gemaakte opnamen terug te zien. Scheuren met een grootte kleiner of gelijk aan de resolutie van de gebruikte sensoren (2 cm) zijn niet te detecteren. Met de huidige beschikbare sensoren is de noodzakelijke ruimtelijke resolutie om scheuren, maar ook muizengaten te detecteren nog niet beschikbaar. De resolutie van sensoren zal in de toekomst toenemen. Het is, ook nu al, mogelijk om lager te vliegen, waardoor de ruimtelijke resolutie van de opnamen toeneemt. Echter de benodigde vliegtijd en de tijd om de ingewonnen data te verwerken (postprocessing) wordt aanzienlijk groter, waardoor detecteren duurder wordt.

5 Grasbedekkingsgraad

In dit hoofdstuk worden de analyses die uitgevoerd zijn om de grasbedekkingsgraad te bepalen en de resultaten toegelicht. Eerst zal worden ingegaan op de theorie hoe RPAS monitoring ingezet kan worden om de grasbedekkingsgraad te bepalen. Hiertoe wordt eerst uitleg gegeven over het gebruik van vegetatie-indices om vegetatieontwikkeling te monitoren. Vanuit deze theorie is een algoritme vervaardigd om met behulp van RPAS de grasbedekkingsgraad te beoordelen. Het algoritme is vervolgens tijdens verschillende monitoringsronden getest en geoptimaliseerd. De resultaten van de monitoringsronden worden besproken en deze worden vergeleken met veldbeoordelingen. Ten slotte zal worden ingegaan op de toepasbaarheid van het algoritme.

5.1 Classificering

Voor de WBI2017 beoordeling wordt de kwaliteit van de bovengrondse delen van de graszode visueel bekeken en bij twijfel aangevuld met een zodeproef waarbij de ondergrondse doorworteling wordt bekeken. Voor de bovengrondse beoordeling van de graszode worden plantafstand en beschadigingen (aanwezigheid en omvang van kale plekken) als criteria gebruikt (zie Tabel 3). Kale plekken worden hierbij op grootte en aantal beoordeeld. Begroeiingsdichtheid, zoals opgenomen in het VTV2006⁶, wordt hierbij niet meer genoemd als criteria maar wordt in de praktijk nog wel gebruikt.

Tabel 3. WBI beoordeling graszode (Min. IenM, 2016)⁷.

| Zode | Aanzicht vegetatie Representatief: | Plantafstand Representatief: | Beschadigingen |
|-----------------------------|--|---|---|
| Gesloten graszode | continue grasmat gedomineerd door grasblad | <ul style="list-style-type: none"> Minder dan ongeveer 0,1 m, niet meer dan 10 % van het oppervlak tot 0,2 m | <ul style="list-style-type: none"> ondiepe beschadigingen van maximaal 0,10 m x 0,15 m x 0,15 m (DxLxB): maximaal 2 per 1 m² en gemiddeld maximaal over 25 m² niet meer dan 5 van zulke gaten microreliëf niet groter dan 0,1 meter (hoogte) per 0,1 m² (oppervlak) |
| Open graszode | continue grasmat gedomineerd door grasblad | <ul style="list-style-type: none"> Minder dan ongeveer 0,1 m, niet meer dan 25 % van het oppervlak tot 0,25 m | <ul style="list-style-type: none"> ondiepe beschadigingen van maximaal 0,10 m x 0,15 m x 0,15 m (DxLxB): maximaal 2 per 1 m² en gemiddeld maximaal over 25 m² niet meer dan 5 van zulke gaten |
| Fragmentarische zode | <ul style="list-style-type: none"> Taludbegroeiing slechts individuele, losstaande planten, of pollen waartussen eventueel bodembedekkende kleinere planten die geen gesloten grasmat vormen | >25 % van het oppervlak plantafstanden groter dan 0,25 m | |

Met behulp van de ingewonnen RPAS data, is op basis van bovenstaande theorie gekeken of de criteria plantafstand en kale plekken kunnen worden geanalyseerd. Hieruit kwam naar voren dat plantafstand als criterium niet te bepalen was. De omvang van de grassprietten en andere vegetatie op de kering is te beperkt voor de resolutie van de gebruikte sensoren. Daarnaast is bij een begroeid maaiveld van boven niet te detecteren welke blad bij welke stengel hoort of welke grasbladeren tot één pol behoren. Om deze reden is de plantafstand uiteindelijk niet meegenomen als criterium om de bedekkingsgraad met RPAS te bepalen. De begroeiingsdichtheid, zoals in de praktijk gebruikt, wordt hiervoor in de plaats

⁶ Voorschrift toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen.

⁷ Min. IenM (2016) Schematiseringshandleiding grasbekleding WBI 2017. Versie 1 december 2016. Status: Definitief. 106p. inclusief bijlagen.

gebruikt. Zowel de begroeiingsdichtheid als de kale plekken zijn vanuit de lucht met behulp van zogenaamde vegetatie-indices goed in beeld te brengen.

Tabel 4. Classificering graszode met behulp van RPAS.

| Classificering | Criteria begroeiingsdichtheid | Criteria kale plekken |
|-------------------------|--|--|
| Gesloten graszode | minder dan 15% onbegroeid per tegel van 0,3 x 0,3 m | onbegroeide plekken minder dan 0,15 x 0,15 m (LxB) aanwezig, niet meer dan 5 per 25 m ² |
| Open graszode: | meer dan 15% onbegroeid tot max. 30% per tegel van 0,3 x 0,3 m | onbegroeide plekken minder dan 0,15 x 0,15 m (LxB) aanwezig, niet meer dan 5 per 25 m ² |
| Fragmentarisch graszode | meer dan 15% onbegroeid tot max. 30% per tegel van 0,3 x 0,3 m | onbegroeide plekken van meer dan 0,15 x 0,15 m (LxB) aanwezig per tegel 0,3 x 0,3 m, bij 25 m ² meer dan 5 open plekken per 25 m ² |

Conform het WBI2017 blijkt dat bij de bepaling van de grasbedekkingsgraad niet meer uitgegaan wordt van de doorworteling zoals die werd gehanteerd in de VTV2006. Het is echter duidelijk dat een goed doorwortelde zode met diverse wortels een grotere sterkte heeft dan een graszode met beperkte of monotone wortels. In de handreiking grasbekleding⁸ wordt zodoende gesproken over "een positieve relatie tussen bedekkingsgraad (begroeiingsdichtheid) en de doorworteling van de toplaag." Een grotere begroeiingsdichtheid van de vegetatie leidt tot een betere doorworteling. Dit pleit er ook voor om vanuit de lucht de begroeiingsdichtheid te detecteren.

5.2 Vegetatie-indices

Voor uitspraken over begroeiingsdichtheid en kale plekken kan gebruikt gemaakt worden van zogenaamde vegetatie-indices. In dit onderzoek is naar verschillende vegetatie-indices gekeken om te kijken welke voor de grasbedekkingsgraad de beste resultaten oplevert. Achtergrond bij vele vegetatie-indices is dat geïventariseerd kan worden of geobserveerde plekken levende vegetatie bevatten en in hoeverre deze plekken stress ondervinden.

Basis van het gebruik van alle vegetatie-indices is, dat vegetatie ervoor zorgt dat het inkomend zonlicht wordt geabsorbeerd, gereflecteerd, of getransmitteerd. In het zichtbare gedeelte van het spectrum (golflengte: 308-740 nm) is de reflectie van het licht relatief laag. Dit betekent dat het grootste gedeelte van het licht wordt geabsorbeerd. Deze absorptie vindt voornamelijk plaats in kleurstoffen (voornamelijk chlorofyl / bladgroen) die in het blad aanwezig zijn. Dit licht wordt gebruikt voor fotosynthese. Omdat deze kleurstoffen voornamelijk het licht in het blauwe en rode gedeelte van het zichtbare spectrum (VIS) absorberen, hebben planten de voor ons zichtbare groene kleur. In het nabij infrarode deel van het spectrum (NIR) wordt licht gereflecteerd. Deze reflectie wordt veroorzaakt door lichtverstrooiing in het blad door de daar aanwezige celstructuren. Het overige deel van het invallende licht wordt getransmitteerd naar onderliggende vegetatielagen.

⁸ <https://handreikinggrasbekleding.nl>

Uiteindelijk is in deze studie is uiteindelijk gebruik gemaakt van twee vegetatie-indices:

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Waarin:

NIR = nabij infrarode spectrum (golflengte circa 800 nm)

Red = rode spectrum (golflengte circa 700 nm)

Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index (TCARI)

$$TCARI = 3 (RedEdge - Red) - 0,2 (RedEdge - Green) \frac{(RedEdge)}{(Red)}$$

waarin

Red = rode spectrum (golflengte circa 670 nm)

RedEdge = red edge spectrum (golflengte circa 700 nm)

Green = groene spectrum (golflengte circa 550 nm)

Met beide vegetatie-indices kan op basis van de berekende waarden uitspraken worden gedaan over de mate van begroeiing. Zo kan goed gedijende vegetatie met veel bladgroen worden gedetecteerd of juist begroeiing die het minder goed doet. In het laatste geval ondervindt de vegetatie stress, doordat er te weinig water of voedingstoffen zijn, of er sprake is van een ziekte of plaag. Met de indices kunnen daarnaast onbegroeide delen van het maaiveld worden gedetecteerd, omdat kale grond ook geen bladgroen bevat.

Figuur 19 laat een deel van de waterkering bij Heijen (waterschap Limburg) zien waarbij de NDVI index is berekend. Des te groener de waarden van de vegetatieindex des te meer bladgroen de vegetatie heeft oftewel hoe beter de vegetatie het doet. Daarnaast zijn op de kering een rood-gele band en enkele rood-gele plekken te zien. Dit zijn onbegroeide delen op kering

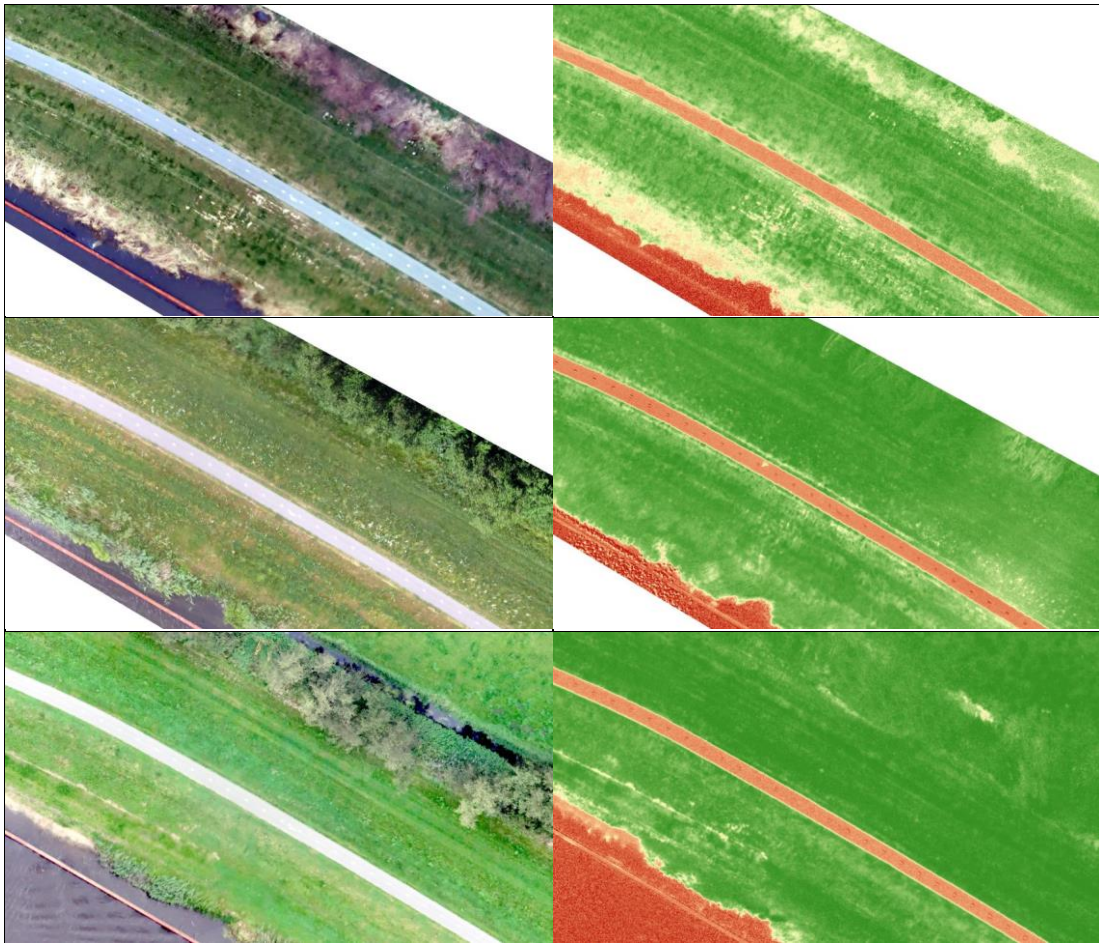


Figuur 19. Diverse vegetatie op waterkering Heijen in visueel licht en NDVI. Donker groen = veel bladgroen, rood = dode vegetatie (gedroogd graan) of onbegroeid (waterschap Limburg, juni 2017).

5.3 Vegetatiesituatie

In bijlage IV is voor de Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe), de waterkering bij Middelaar (waterschap Limburg) en de Oostmolendijk (waterschap Hollandse Delta) een NDVI beeld weergegeven. In Figuur 20 zijn enkele detailopnamen van de berekende NDVI van de Grebbeliniedijk weergegeven. Hoge NDVI waarden (begroeid) zijn groen, lage NDVI zijn rood (weinig tot niet begroeid) weergegeven.

Uit het verloop van de NDVI waarden kan een uitspraak over de vegetatieontwikkeling tussen maart en oktober 2017 worden gedaan. Ter verificatie kan ook naar de opnamen in het zichtbaar licht (RGB) worden gekeken, waarin ook vegetatieontwikkeling is te zien.



Figuur 20. Detail van diverse vegetatie, water en fietspad op de Grebbeliniedijk, in visueel licht en NDVI. Donker groen = veel bladgroen, rood = dode vegetatie of onbegroeid (waterschap Vallei en Veluwe, maart, juni en oktober 2017).

Uit de vegetatieontwikkeling op de Grebbeliniedijk (zie ook bijlage IV voor een overzicht van de hele waterkering) komt naar voren dat in maart 2017 de vegetatie op de waterkering nog beperkt was gaan groeien. De oeverplanten waren nog niet actief en ook het aantal kale / onbegroeide plekken is goed te zien (geel-rode plekken). In juni bleek de vegetatie een stuk verder ontwikkeld, maar nog steeds lijkt veel vegetatie niet goed te groeien. Veel vegetatie had in deze periode te maken met vegetatiestress. Dit had met de (zeer) droge omstandigheden⁹ in juni 2017 moment te maken. Het voorjaar was erg droog. Het opgebouwde neerslagtekort bedroeg in juni 2017 lokaal meer dan 120 mm. Wanneer naar het beeld van de vegetatie-index in oktober wordt gekeken valt op dat de vegetatie het goed doet. Nagenoeg alle vegetatie produceert bladgroen. De nazomer was dan ook erg nat, wat meteen tot uitdrukking komt in een goede vegetatieontwikkeling van de waterkering.

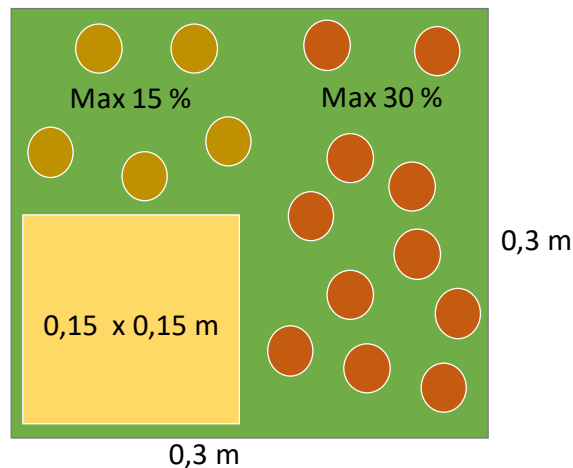
5.4 Algoritme

Zoals hiervoor (zie ook paragraaf 5.1: Tabel 4) beschreven, is het ontwikkelde algoritme om met RPAS de bedekkingsgraad in beeld te brengen een combinatie tussen kale plekken en begroeiingsdichtheid. Gekeken wordt of er wel of geen vegetatie aanwezig is met behulp van sensoren. Deze methode is

⁹ Volgens het KNMI behoorde het voorjaar van 2017 tot de 5% droogste jaren ooit gemeten.

vergelijkbaar met de methode van dijksinspectie van de bedekkingsgraad in de VTV2006, maar hierbij is aansluiting gezocht bij WBI2017 door het detecteren van de aanwezigheid van kale plekken van 0,15 x 0,15 m.

Het ontwikkelde algoritme bepaalt op basis van vegetatie-indexwaarden waar begroeide en onbegroeide plekken aanwezig zijn op de waterkering. Op basis van de grootte van de onbegroeide plekken en het aantal plekken per tegel van 0,09 m² (0,3 x 0,3 m) en 25 m² (5 x 5 m) wordt de graszode geclassificeerd als gesloten, open of gefragmenteerd. Schematisch is de classificering van de bedekkingsgraad in Figuur 21 weergegeven. De bruin en oranje vlakken stellen de onbegroeide delen op de graszode voor.



Figuur 21. Schematische weergave begroeide en onbegroeide plekken zoals in algoritme opgenomen.

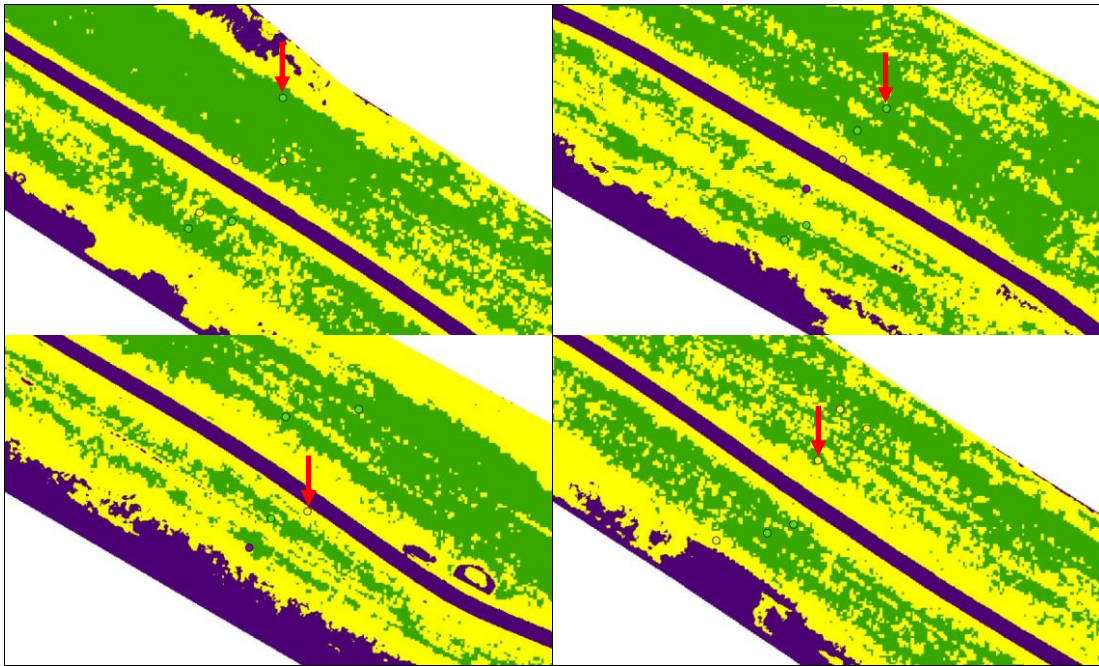
Voor zowel het dagelijks beheer als de WBI beoordeling wordt een uitspraak over de grasbedekking gedaan. Voor het dagelijks beheer is een uitspraak over de graszode op kleine schaal (tegels van 0,09 m²) van belang, terwijl voor de WBI beoordeling een uitspraak over een tegel van 25 m² voldoende is. Met het algoritme kunnen beiden worden bepaald.

5.5 Vergelijking RPAS met veldwaarnemingen

Met de ingewonnen RPAS data, zoals hiervoor beschreven, is de grasbedekkingsgraad met behulp van het algoritme bepaald. Deze, op basis van RPAS data, bepaalde grasbedekkingsgraad is vervolgens vergeleken met veldwaarnemingen. Voor deze veldwaarnemingen is gebruik gemaakt van bestaande en nieuw verzamelde veldgegevens.

5.5.1 Grebbeliniedijk, waterschap Vallei en Veluwe

Voor de Grebbeliniedijk zijn om de 50 m aanvullende beoordelingsgegevens verzameld door twee beoordelaars. Een aantal beoordelingen zijn voorzien van vegetatietype omschrijving. In Figuur 22 is in kleuren vlakdekkend de beoordeling van de grasbedekkingsgraad weergegeven die met RPAS data is bepaald en is met behulp van gekleurde punten de veldbeoordeling weergegeven. In bijlage V: Figuur 51 is voor de gehele Grebbeliniedijk het resultaat weergegeven.



Figuur 22. Vergelijking van met RPAS bepaalde grasbedekkingsgraad (vlakken) met veldwaarnemingen (gekleurde punten¹⁰) op de Grebbeliniedijk (groen = gesloten, geel = open, paars = gefragmenteerd) (waterschap Vallei en Veluwe, maart 2017).

Uit de vergelijking tussen de met RPAS bepaalde grasbedekkingsgraad op tegelniveau van 0,3 x 0,3 m en de veldwaarnemingen komt naar voren dat beide methoden voor 89% van de punten op de Grebbeliniedijk dezelfde resultaten laten zien (zie Tabel 5). Opvallend is dat het percentage overeenkomstig tussen RPAS beoordeling en veldbeoordeling voor de fractie open en gesloten hoog is (gemiddeld 95%). De fractie gefragmenteerd komt procentueel minder overeen, maar hierbij moet worden opgemerkt dat de fractie gefragmenteerd slechts een beperkt aantal keren in het veld is waargenomen (n=11).

Wanneer gekeken wordt naar de RPAS beoordeling op 5 x 5 m niveau (zie Tabel 6) valt op dat de overeenkomsten tussen veldinspectie en de met RPAS bepaalde grasbedekkingsgraad van de gesloten fractie zijn gedaald en de gefragmenteerde fractie is gestegen. Met name aan de teen van de kering komt de gefragmenteerde fractie sterk naar voren terwijl dit in het 0,3 x 0,3 m grid nog een gesloten fractie was. De automatische vergridding van de kering in combinatie met het criterium van minstens vijf kale plekken op 25 m² is hier de reden van. Hierdoor zijn het aantal overeenkomsten met de gesloten fractie verminderd en is het aandeel gefragmenteerd toegenomen.

Ook blijkt uit de resultaten (zie Tabel 5) dat er verschillen zijn tussen de veldbeoordelingen door verschillende beoordelaars. De ene beoordelaar lijkt strenger (meer gefragmenteerde fractie) dan de andere te beoordelen, wat wellicht mede veroorzaakt wordt doordat beoordeling conform WBI relatief nieuw is. De verschillen kunnen vragen oproepen over de objectiviteit van de veldbeoordeling. Bij beoordeling met behulp van RPAS speelt dit niet.

¹⁰ Zie rode pijlen voor een aantal gekleurde punten: veldwaarnemingen.

Tabel 5. Resultaten vergelijking RPAS monitoring (0,3 x 0,3 m) en veldinspectie Grebbeliniedijk.

| Validatie graszode (0,3 x 0,3 m) Grebbeliniedijk | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|
| Beoordeling | 11 oktober 2017 | | 7 december 2017 | | Totaal | |
| | Aantal | Gelijk aan RPAS | Aantal | Gelijk aan RPAS | Aantal | Gelijk aan RPAS |
| | [#] | [%] | [#] | [%] | [#] | [%] |
| Fragmentarisch | 7 | 29 | 4 | 50 | 11 | 36 |
| Open | 8 | 88 | 19 | 100 | 27 | 96 |
| Gesloten | 4 | 100 | 42 | 98 | 46 | 98 |
| Totaal | 19 | 68 | 65 | 95 | 84 | 89 |

Tabel 6. Resultaten vergelijking RPAS monitoring (5 x 5 m) en veldinspectie Grebbeliniedijk.

| Validatie graszode (5 x 5 m) Grebbeliniedijk | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|
| Beoordeling | 11 oktober 2017 | | 7 december 2017 | | Totaal | |
| | Aantal | Gelijk aan RPAS | Aantal | Gelijk aan RPAS | Aantal | Gelijk aan RPAS |
| | [#] | [%] | [#] | [%] | [#] | [%] |
| Fragmentarisch | 7 | 43 | 4 | 75 | 11 | 55 |
| Open | 8 | 88 | 19 | 100 | 27 | 96 |
| Gesloten | 4 | 75 | 42 | 81 | 46 | 80 |
| Totaal | 19 | 68 | 65 | 86 | 84 | 82 |

Afwijkingen tussen RPAS monitoring en veldbeoordeling op de Grebbeliniedijk zijn vooral terug te vinden op de plekken die gefragmenteerd uit de veldinspectie naar voren zijn gekomen. Als reden bij de veldbeoordeling werd hierbij opgegeven dat de doorworteling matig tot slecht was en niet het aantal kale plekken, zoals conform WBI zou moeten. RPAS monitoring kan geen doorworteling detecteren waardoor de verschillen zijn te verklaren. Aangezien het aantal veldwaarnemingen van gefragmenteerde fracties op de onderzochte keringen in deze studie beperkt is, is het wenselijk meer gefragmenteerde graszode met behulp van RPAS monitoring te beschouwen.

Voor de uiteindelijke RPAS beoordeling zijn alleen de RPAS metingen uit maart 2017 gebruikt, omdat deze als representatief wordt gezien. De veldinspectie en beoordeling heeft plaatsgevonden in oktober en december 2017. Aangezien de Grebbeliniedijk recentelijk is versterkt en de vegetatie op de kering zich nog moet ontwikkelen is variatie door het jaar heen te verwachten.

5.5.2 Waterkeringen Waterschap Limburg

In bijlage V: Figuur 52 zijn de resultaten van de grasbedekkingsgraad van de kering bij Heijen te zien. De beoordeling van de keringen van Waterschap Limburg is in het veld gedaan om de kilometer. Hierdoor zijn slechts twee punten per waterkering voor de vergelijking beschikbaar. De veldbeoordeling wordt representatief geacht voor een groot gedeelte van waterkering, maar een betrouwbare vlakdekkende validatie van de RPAS grasbeoordeling is hierdoor niet te geven. Wanneer de RPAS beoordeling en veldbeoordeling met elkaar worden vergeleken, blijkt dat de veldbeoordeling wel goed overeenkomt. Het gegenereerde beeld komt ook goed overeen met de beleving van de waterkeringinspecteur, dat de graszode grotendeels gesloten is, maar het binnentalud als open kan worden beoordeeld.

Voor de grasbeoordeling met behulp van RPAS is het noodzakelijk om een representatieve periode te gebruiken voor het invliegen van de gegevens. Uit een analyse tussen de verschillende beoordelingen van de waterkering in Middelaar (zie Figuur 23) bleek dat de grasbeoordeling in september 2017 veel negatiever is (meer gefragmenteerd) dan in maart 2017. Reden hiervan is dat de RPAS monitoring toen is uitgevoerd direct na het maaien. Hierdoor vertoonde de kering veel meer onbegroeide plekken dan in

de representatieve periode in maart. De doorworteling van de grasmat bleek in september wel degelijk goed, waardoor de beoordeling veel negatiever is dan de werkelijkheid.



Figuur 23. Verschil tussen gefragmenteerde fractie, aangegeven in paarse kleur op de waterkering in Middelaar, maart 2017 (links) en pas gemaaide kering in september 2017 (rechts) (waterschap Limburg).



Figuur 24. Grasmat waterkering in Middelaar net na maaien in september 2017 (waterschap Limburg).

5.5.3 Rijndijk, waterschap Rijn en IJssel

Wanneer gekeken wordt naar de resultaten van de grasbedekkingsgraad van de Rijndijk (waterschap Rijn en IJssel) blijkt dat de RPAS monitoring voor 100% overeenkomt (10 locaties) met de veldbeoordeling. De vegetatie op de Rijndijk is goed ontwikkeld en dit is terug te zien in de beoordeling van graszode (zie bijlage V: Figuur 53).

5.6 Toepasbaarheid

Uit de vergelijking van veldwaarnemingen en de resultaten van RPAS monitoring kan geconcludeerd worden dat RPAS monitoring goed toepasbaar is als methode om de grasbeoordeling mee uit te voeren om een vlakdekkend en objectief beeld van de grasmat te verkrijgen. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met de aanbevelingen zoals in het volgende paragraaf (5.7) verwoord.

RPAS monitoring kan voor de beheerder worden toegepast om een voorselectie te maken voor de locaties waar nog een nadere analyse voor de beoordeling (open en gefragmenteerd) nodig is. Deze locaties kunnen dan nog door het steken van een plag nader worden bekeken. Daarnaast wordt gesteld dat het voor het reguliere beheer bij de fractie open en gefragmenteerd al wenselijk is onderhoudsmaatregelen te nemen om de grasbekleding verder te ontwikkelen. RPAS monitoring is geschikt om een overzicht van de graszode op een vlakdekkende wijze in beeld te brengen.

Belangrijke randvoorwaarde is dat de RPAS monitoring moet plaatsvinden in een periode die representatief is voor de beoordeling van de waterkering. Uit ervaring van dijkbeheerders is gebleken dat eind van de winterperiode hiervoor het meest geschikt is.

5.7 Conclusies en aanbevelingen

Kan de bedekkingsgraad (mate van begroeiing of gesloten - open- gefragmenteerd) objectief vanuit de lucht worden bepaald en komt deze overeen met de (lokale) bedekkingsgraad zoals opgenomen tijdens de visuele inspectie op de grond eventueel aangevuld met steken van een plag? Op deze deel onderzoeksvraag kan na dit onderzoek een antwoord worden gegeven.

Geconcludeerd kan worden dat de veldbeoordeling en RPAS monitoring voor 90 tot 95% met elkaar overeenkomt tijdens een representatieve monitoringsperiode voor de fracties open en gesloten. De gefragmenteerde fractie is tijdens deze studie weinig aangetroffen waardoor de validatie van deze gefragmenteerde fractie nog kan worden verbeterd. Harde gevalideerde conclusies over de betrouwbaarheid van de RPAS beoordeling van de gefragmenteerde fractie zijn op dit moment daarom nog niet goed te geven. Een extra validatie van de gefragmenteerde graszode fractie zal de betrouwbaarheid vergroten. Het is daarom aan te bevelen, voor een waterkering met (deels) gefragmenteerde grasmat, gelijktijdig een gedetailleerde veldbeoordeling als RPAS beoordeling uit te voeren. Op deze waterkering moet een groot aantal locaties met gefragmenteerde fractie door middel van GPS worden vastgelegd, zodat de met RPAS uitgevoerde beoordeling kan worden gevalideerd. Daarbij moet gekeken naar aanzicht van de grasmat, maar ook doorworteling.

Een representatieve periode om de RPAS monitoring uit te voeren is noodzakelijk om een goede beoordeling van de waterkering te kunnen geven. Uit veldervaring wordt hiervoor vaak eind van de winterperiode genomen. Het is aan te bevelen nader te onderzoeken welk vegetatieniveau (bijvoorbeeld gemiddelde graslengte of tijd na maaien) daadwerkelijk representatief is voor de WBI beoordeling wanneer gebruik gemaakt wordt RPAS monitoring.

Tijdens veldinspectie wordt naast veiligheid ook naar andere belangen zoals ecologie gekeken. Hierbij bleek vaak een koppeling te worden gelegd tussen het aanwezige vegetatietype (pionier, H1, H2, etcetera) en de grasmat. Dit is conform de oude beoordelingsmethodiek van de VTV2006. Een rechtstreekse koppeling tussen de beoordelingsmethodiek van de VTV2006, inclusief vegetatietype, en die van WBI2017 is echter nog niet voorhanden, ondanks de ervaringen uit het veld. Het verdient daarom aanbeveling om te analyseren in hoeverre de beoordelingsmethodiek van de VTV2006 overeenkomt met de WBI beoordelingsmethodiek. Is het daarbij mogelijk om indicatorsoorten van aanwezige vegetatietypen vanuit de lucht te herkennen (zie ook hoofdstuk 6, waarin een verkenning naar mogelijkheden van detectie van ongewenste vegetatiesoorten is uitgevoerd)?

6 Ongewenste vegetatiesoorten

In dit hoofdstuk worden de analyses die uitgevoerd zijn om de aanwezigheid van de ongewenste vegetatiesoorten op de waterkering te detecteren en de resultaten toegelicht. Eerst wordt ingegaan op de theorie hoe RPAS monitoring ingezet kan worden om de aanwezigheid van ongewenste vegetatiesoorten te bepalen. Vanuit deze theorie is een algoritme vervaardigd om met behulp van RPAS enkele ongewenste vegetatiesoorten te detecteren.

Initieel is, in samenwerking met de waterschappen, ambitieus gekozen voor de ongewenste vegetatiesoorten uit de Digigids (2016) die ook voorkomen op de waterkeringen in dit onderzoek:

- Akkerdistel;
- Brandnetel;
- Jacobskruiskruid;
- Japanse duizendknoop (waterkering Heijen, waterschap Limburg);
- Heermoes en
- Ridderzuring.

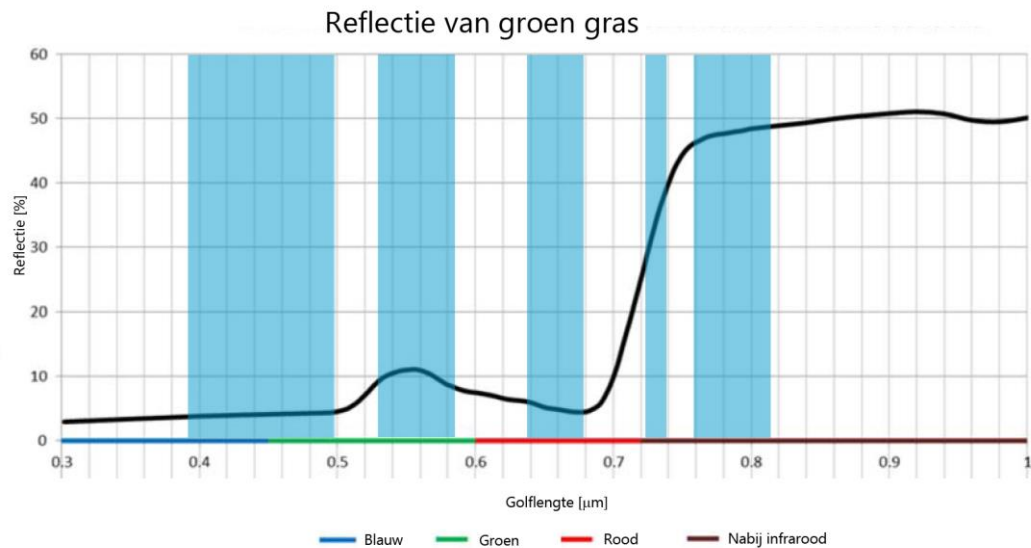
De focus is later verlegd naar Ridderzuring, aangezien deze in het veld en ook vanuit de lucht eenvoudiger is te herkennen. De uitdaging ligt er dan ook vooral in, om de herkenning (semi-)geautomatiseerd te laten uitvoeren in gevarieerde vegetatiesamenstellingen zoals op een waterkering te vinden.

In bijlage VI zijn foto's opgenomen van de waterkeringen in dit onderzoek met de ongewenste vegetatiesoorten.

6.1 Theorie

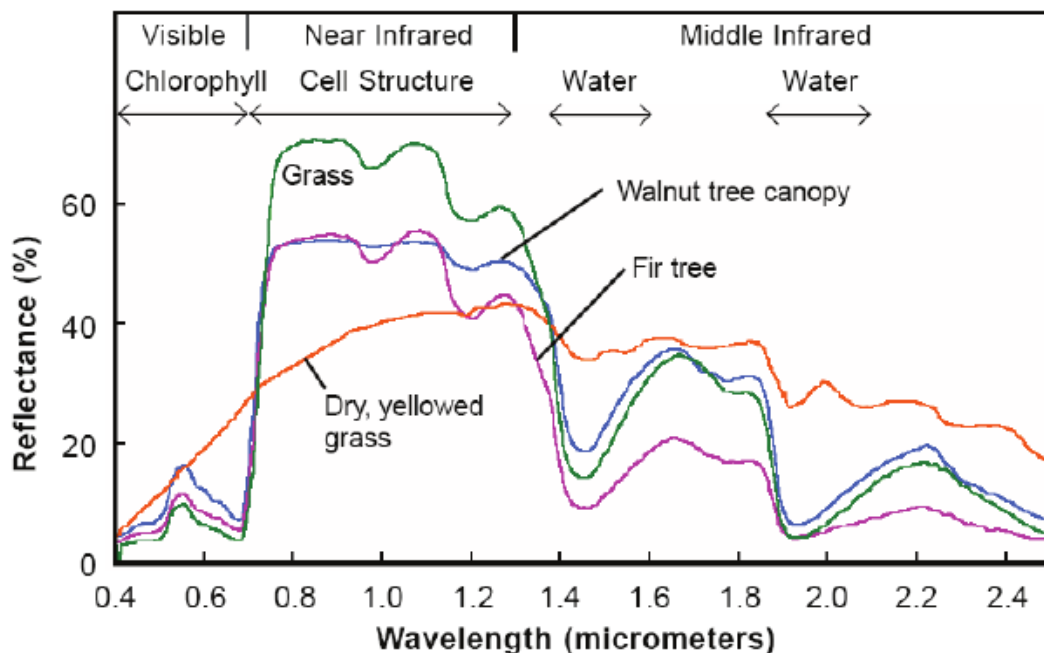
De optische eigenschappen van vegetatie beïnvloeden de manier waarop straling reageert als deze vegetatie of het aardoppervlak raakt. Elke plant heeft zo zijn eigen specifieke spectrale handtekening door de mate van reflectie, absorptie en transmissie op verschillende golflengten van de ontvangen straling. Zo is de combinatie van lage zichtbare licht (rood, groen, blauw) reflectie en hoge reflectie van het nabij-infrarood uniek voor de meeste typen vegetatie.

In Figuur 25 is als voorbeeld de spectrale handtekening van groen gras weergegeven. Door op verschillende golflengten de reflectie te meten kan de spectrale handtekening worden bepaald. In Figuur 25 in blauwe blokken is ook de golflengte weergegeven waarin de voor dit onderzoek gebruikte sensoren de reflectie meten. De reflectiemetingen vinden plaats in het blauwe, groene, rode, red edge en nabij infrarode spectrum.



Figuur 25. Reflectie van groen gras in verschillende golflengten en sensorgolflengte (aangepast van UAS in Ag: Sensors & Data, 2014¹¹).

Figuur 26 laat de spectrale handtekening zien van gras (groen en droog+geel) en walnoot- en denneboom. De figuur laat meteen ook de uitdaging zien. Een dennenboom en gras lijken op het blote oog behoorlijk verschillend en er zijn ook duidelijk verschillen in reflectie in bepaalde golflengten, de truc is om juist in de golflengten waar de verschillen zijn metingen uit te voeren met de sensoren.



Figuur 26. Reflectie van gras (groen+geel) en walnoot- en dennenbomen in verschillende golflengten.

¹¹ www.agmapsonline.com

6.2 Praktijk

Als eerste proeflocatie hebben we de waterkering in Heijen gekozen. Op deze kering staat onder andere Ridderzuring (zie Figuur 28). De eerste proef is om de kijken of de Ridderzuring ook vanuit de lucht kan worden gezien. Zoals verwacht levert dit geen problemen op (zie Figuur 28: onder), zowel in het zichtbare licht als in andere golflengten is de Ridderzuring te herkennen. De tweede stap is om van een door de mens te herkennen Ridderzuring naar een automatisch door de computer te herkennen Ridderzuring te komen. Deze stap viel tegen. Hierbij hebben we diverse algoritmes en methoden onderzocht. Ondanks dat er wel degelijk een verschil zit in de spectrale handtekening van Ridderzuring en gras is er ook sprake van overlap in bepaalde golflengten: de uniciteit van de handtekening is niet volledig. Hierdoor is het moeilijker om Ridderzuring automatisch te detecteren zonder ook andere vegetatie per abuis als Ridderzuring te classificeren. Dit wordt nog verergerd doordat de vegetatie op een waterkering rondom de Ridderzuring divers is (zie bijlage VI en Figuur 27 **Error! Reference source not found.**).



Figuur 27. Ridderzuring met divers "gezelschap" op de Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe).



Figuur 28. Ridderzuring op de waterkering in Heijen (waterschap Limburg).

Uiteindelijk bleek het mogelijk om Ridderzuring automatisch te laten herkennen op de proeflocatie in Heijen (zie Figuur 29). Niet elke bladpixel van de Ridderzuring wordt als zodanig geïdentificeerd, waardoor het nu nog niet goed mogelijk is om het oppervlakte Ridderzuring op een waterkering exact te bepalen. De deelnemende waterschappen hebben aangegeven dat hier ook (nog) geen behoefte aan is. Wij kunnen ons echter voorstellen dat in de toekomst een bepaald percentage oppervlakte Ridderzuring een

signaalfunctie zou kunnen hebben voor het nemen van bestrijdingsmaatregelen. Ook zijn er met het nu gebruikte algoritme nog enkele vals-positieve classificaties: andere vegetatie die als Ridderzuring wordt aangemerkt.



Figuur 29. Automatische herkenning Ridderzuring op de waterkering in Heijen (waterschap Limburg).

6.3 Toepasbaarheid

De eerste resultaten van de automatische herkenning van Ridderzuring op een waterkering zijn hoopgevend. De automatische herkenning kan nog worden verbeterd. Er is nog niet getest of de automatische herkenning ook werkt onder andere omstandigheden: ander seizoen, droogte, etcetera wanneer de spectrale handtekening van de Ridderzuring zelf, maar ook van de andere vegetatie op de waterkering anders is en er mogelijk meer of minder overlap is in bepaalde golflengten.

Ook is duidelijk geworden uit deze eerste resultaten dat het ook in de toekomst lastig of zelfs onmogelijk zal zijn om op een waterkering met een gevarieerde vegetatie (zie Figuur 27) alle ongewenste vegetatiesoorten te detecteren: de spectrale handtekeningen zijn niet onderscheidend genoeg. Ook is duidelijk geworden dat sommige ongewenste vegetatiesoorten, bijvoorbeeld Heermoes, mogelijk alleen te detecteren zijn in het voorjaar. Heermoes was op de Rijndijk (waterschap Rijn en IJssel) in juni 2017 zelfs als je er bijna met je voeten opstond slecht te zien. In zo'n situatie is het uitgesloten dat er vanaf een RPAS wel een goede herkenning kan plaatsvinden.

Op dit moment hebben de deelnemende waterschappen aangegeven dat de meerwaarde van het automatisch herkennen van alleen Ridderzuring, of een beperkt aantal ongewenste vegetatiesoorten niet groot is. Voor de andere ongewenste vegetatiesoorten, moet dan toch nog het veld in worden gegaan.

Toch is de interesse nog steeds groot. Vooral als het mogelijk blijkt om in de toekomst bepaalde ongewenste vegetatiesoorten in een vroeg stadium te kunnen herkennen. Van boven zie je meer dan van opzij.

6.4 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de deelvraag of (clusters van) ongewenste vegetatiesoorten vanuit de lucht te detecteren zijn? Gebleken is dat automatische herkenning en detectie van Ridderzuring binnen een gevarieerde vegetatiesamenstelling op een waterkering mogelijk is, maar dat de automatische herkenning nog verbeterd kan worden. Zo is de spectrale handtekening van zowel Ridderzuring als gras in beeld gebracht, maar blijkt ook dat er sprake van overlap in bepaalde golflengten is. Hierdoor is het moeilijker om Ridderzuring automatisch te detecteren zonder ook andere vegetatie per abuis als Ridderzuring te classificeren. Dit wordt nog verergerd doordat de vegetatie op een waterkering rondom de Ridderzuring divers is.

Voor de automatische computerherkenning van Ridderzuring is gebruik gemaakt van beelden opgenomen met een multispectraal camera. Nu het gewicht en de prijs van hyperspectrale camera's daalt, is het ook mogelijk om hiermee data te verzamelen. Met een hyperspectrale camera is het misschien mogelijk om de spectrale handtekening nauwkeuriger vast te leggen. Hierdoor wordt het onderscheidend vermogen groter en kan de ongewenste vegetatiesoort beter (minder vals-positief en –negatief) worden herkend, en kunnen er mogelijk meer ongewenste vegetatiesoorten worden herkend.

Een andere ontwikkeling in de wetenschap is naast het gebruik van de spectrale handtekening ook te kijken naar de structuur van de vegetatie (hoogte, bladgrootte, etcetera). Het combineren van deze twee kenmerken van de vegetatie biedt weer nieuwe mogelijkheden.

Recente wetenschappelijke publicaties praten ook over *machine learning* en *Artificial Intelligence* (AI) in de context van vegetatieherkenning. De technologie op het vlak van AI gaat razend snel en kan in de toekomst zeker worden toegepast bij vegetatieherkenning.

7 Inzet RPAS monitoring

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de toekomstige inzet van RPAS voor waterkering monitoring, de kosten die daaraan zijn verbonden, maar wordt ook ingegaan op randvoorwaarden voor inzet van RPAS.

7.1 Toepassingen

Data inwinning met behulp van sensoren onder een RPAS blijkt voor het monitoren van waterkeringen goed mogelijk en kan invulling geven aan de reguliere inspectie, maar ook calamiteitsituaties, na bijvoorbeeld hoogwater, droogte of na stormen. Het controleren van de grasmat, vaststellen van schades op de kering of bepalen van hoogten, is met RPAS objectief en uniform vast te stellen.

Als aanvulling op de reguliere inspectie zou jaarlijks, na het stormseizoen, monitoring met behulp van RPAS kunnen plaatsvinden om schades te detecteren, mate en ontwikkeling van de grasbedekking te analyseren en de hoogteligging vast te stellen. Zo kan gericht schadeherstel en onderhoud plaatsvinden.

Ook het regulier monitoren van de ontwikkeling van de vegetatie op de waterkering en controleren van de grasbedekking voor beheer en onderhoud is met behulp van RPAS op zeer groot detailniveau uit te voeren. Uit de RPAS monitoring kan een selectie van locaties naar voren die vanuit beheer en onderhoud extra aandacht behoeven.

Een toekomstige toepassing is het met behulp van RPAS monitoren van de ontwikkeling van de vegetatie op de waterkering op zeer groot detailniveau. Hiervoor dienen eerst nog een aantal onderzoeken te worden uitgevoerd:

- i) De vaak genoemde, maar nog niet wetenschappelijk aangetoonde, relatie tussen het aanwezige vegetatietype (pionier, H1, H2, etcetera) en de grasmatkwaliteit (gesloten, open, gefragmenteerd) moet nader worden onderzocht.
- ii) Onderzocht moet worden of het mogelijk is om met behulp van RPAS indicatorsoorten voor vegetatietype automatisch te classificeren.

Het direct inzetbaar zijn, de mogelijkheid om met verschillende sensoren gedetailleerde informatie te verzamelen, en de inzet in moeilijk bereikbare gebieden, maken RPAS monitoring zeer geschikt voor het inspecteren van waterkeringen. Daarnaast kan, door het gelijktijdig verzamelen van informatie voor verschillende analysedoelen, een kostenbesparing op de huidige manier van monitoring worden gerealiseerd.

7.2 Kosten RPAS monitoring

De kosten die gemoeid zijn met het uitvoeren van de RPAS monitoring en doen van analyses is afhankelijk van het aantal kilometers te monitoren waterkering en de complexiteit van de uit te voeren analyses. Voor de in deze studie uitgevoerde toepassingen hoogte en grasbedekkingsgraad wordt hieronder een eerste aanzet gegeven.

Hoogten

De kosten van het uitvoeren van RPAS monitoring gericht op het vlakdekkend in beeld brengen van de maaiveldhoogte, inclusief visuele beeldopname bedragen circa € 500 / km op basis van 10 km (aaneengesloten) te analyseren waterkering (de gehele breedte van de waterkering wordt hierbij beschouwd, circa 150 m). Met de sensoren die gebruikt worden voor de hoogtebepaling wordt tijdens het invliegen van de hoogte ook een zeer gedetailleerde luchtfoto gemaakt, die uiteraard beschikbaar is.

Grasbedekkingsgraad

Wanneer de grasbedekkingsgraad van een waterkering wordt geanalyseerd, bedragen de kosten circa € 400 / km op basis van 10 km (aaneengesloten) te analyseren waterkering. Hiermee wordt een gedetailleerd vlakdekkend beeld gegeven van de grasmat zoals besproken in deze studie. Ter vergelijking; de kosten voor (externe) veldinspectie van de grasmat bedragen circa € 250 / km. Wanneer naast de grasbedekkingsgraad ook andere analyses of opnamen tegelijkertijd kunnen worden uitgevoerd zullen de analysekosten per kilometer dalen.

7.3 Randvoorwaarden inzet RPAS

RPAS kunnen niet overal en altijd worden ingezet. De voornaamste beperking zitten in de wetgeving rondom het gebruik. Zo mogen RPAS niet worden ingezet boven aaneengesloten bebouwing, in no fly zones van luchthavens, boven mensenmenigten of wegen waar je harder dan 80 km/uur mag rijden. Met deze locatierandvoorwaarden is gekeken naar het aantal met RPAS te monitoren kilometer waterkering voor de aan deze studie deelnemende waterschappen¹². Hierbij is rekening gehouden met de huidige wet- en regelgeving rondom het inzetten van RPAS voor professioneel gebruik. In onderstaande tabel zijn de resultaten hiervan samengevat weergegeven. In bijlage VII is een uitsplitsing per type waterkering gegeven.

Tabel 7. Met RPAS te monitoren aantal km waterkering per waterschap.

| | Lengte (totaal) [km] | in CTR [%] | Bebouwing / snelweg [%] | Vliegbaar [%] | Vliegbaar [km] |
|-----------------------------|----------------------------|---------------|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Waterschap Vallei en Veluwe | 245 | 7% | 9% | 85% | 208 |
| Waterschap Limburg | 294 | 18% | 18% | 64% | 188 |
| Waterschap Rijn en IJssel | 247 | 7% | 22% | 71% | 176 |
| Waterschap Hollandse Delta | 790 | 29% | 10% | 60% | 476 |

Het percentage te monitoren waterkering blijkt, voor de deelnemende waterschappen gemiddeld bijna 70% te zijn. In totaal is voor deze waterschappen ruim 1000 km waterkering met een RPAS te monitoren.

Naast de locatierandvoorwaarden gelden er nog veel regels en zijn er eisen verbonden aan hoe een RPAS kan worden ingezet. De wetgeving rondom het toepassen van RPAS is sterk aan verandering onderhevig. Alleen gecertificeerde bedrijven, die zich bewezen houden aan de wet- en regelgeving, is het toegestaan om monitoringsvluchten, zoals uitgevoerd in deze studie uit te voeren. Deze bedrijven moeten altijd op de hoogte zijn van de laatste wet- en regelgeving, zodat geen onveilige situaties in de lucht of op de grond ontstaan. Voor actuele details over de regels rondom RPAS vluchten en certificering van bedrijven wordt verwezen naar de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT)¹³.

Naast de wetgeving speelt de weersituatie ook een rol in de toepasbaarheid van RPAS monitoring. Bij te veel wind en regen is vliegen met een RPAS niet goed mogelijk. De door Down2Earth Sensing ingezette RPAS kan veilig vliegen tot en met windkracht 6, echter voor het verkrijgen van de beste kwaliteit data is het beter om met minder harde wind te vliegen. Vliegen in lichte regen is ook mogelijk.

¹² Van Waternet zijn geen gegevens over de waterkeringen ontvangen.

¹³ Zie www.ilent.nl/onderwerpen/drones.

8 Conclusie en aanbevelingen

In deze studie heeft STOWA samen met vijf waterschappen en Down2Earth Sensing onderzocht in hoeverre de inzet van RPAS kan bijdragen aan het beter en efficiënter monitoren van waterkeringen dan de reguliere manier van monitoren (door middel van visuele inspectie). De vraag daarbij was of RPAS monitoring daarmee een meerwaarde kan leveren aan het waterkeringbeheer.

Om antwoord op bovenstaande te kunnen geven zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld die gericht zijn op de RPAS monitoringstechniek voor waterkeringen:

- Is het mogelijk om, met behulp van sensoren bevestigd aan een RPAS, op betrouwbare wijze informatie in te winnen van enkele inspectieparameters van (enkele) faalmechanismen van waterkeringen?
- Kan de inzet van RPAS leiden tot betere of aanvullende relevante informatie voor de waterkeringbeheerder, dan de huidige reguliere manier van monitoring door visuele inspectie?
- Leidt monitoring van waterkeringen met behulp van RPAS tot verbeterde inzichten voor de uitvoering van de inspectie van de waterkering gericht op vervolghandelingen?

In deze studie ligt, in overleg met de participerende waterschappen, de focus op de volgende specifieke inspectieparameters:

- Kruinhoogte waterkering;
- Schades: kale plekken, verzakking, scheuren, spoorvorming, graverij;
- Bedekkingsgraad waterkering;
- Ongewenste vegetatiesoorten.

Hoogte waterkering

De met RPAS ingewonnen hoogtegegevens zijn zeer gedetailleerd; tot 2 cm resolutie (circa 2500 punten per vierkante meter). Het hoogtebeeld (DSM) is hierdoor van een veel hoger detailniveau dan bijvoorbeeld het AHN2 of AHN3 (resolutie 50 cm) dat met behulp van LIDAR wordt verkregen. Voor zowel het AHN als de RPAS hoogtemetingen geldt, dat deze een absolute nauwkeurigheid hebben van circa 5 cm in de hoogterichting. Uit de betrouwbaarheidsanalyse bleek dat de maaiveldhoogten op de kruin (asfalt of verharding) van de keringen van het AHN2, door RPAS verzamelde hoogtedata en de terrestrische hoogtemetingen goed met elkaar overeenkwamen. De geconstateerde afwijkingen op de kruin zijn zowel in het AHN als in de met RPAS verzamelde hoogtedata van dezelfde orde grootte (3 cm).

Op het talud van de waterkering, waar veel vegetatie aanwezig is, zijn grotere afwijkingen geconstateerd. Reden hiervan is de mate van begroeiing. Door filtering van vegetatie uit het digitale hoogtemodel kunnen de afwijkingen tussen AHN, terrestrische metingen en de RPAS metingen op de begroeide taluds van de kering worden verkleind. Filtering van vegetatie heeft in deze studie niet plaatsgevonden, omdat de aandacht gericht is op de kruinhoogte van de kering.

Hoge vegetatie (bomen) zorgt voor een verstoring van het hoogtebeeld. Dit type vegetatie komt echter vooral voor op grotere afstand van de kruinhoogte, waardoor een eventuele verstoring van het hoogtebeeld geen negatieve effecten heeft op de hoogte van de kruin.

Meerwaarde van het toepassen RPAS om hoogtedata te verzamelen is dat deze data snel te leveren is in tegenstelling tot levering van LIDAR data (AHN). Binnen een tijdspanne van twee weken zijn alle RPAS analyseresultaten op te leveren. Daarnaast kan RPAS monitoring zeer flexibel worden uitgevoerd. Zodra er behoefte is aan informatie kan een RPAS, afhankelijk van het weer, vrijwel direct worden ingezet.

Schades

Uit deze studie is naar voren gekomen dat diverse schades met behulp van RPAS monitoring kunnen worden gedetecteerd. Graverij, kale plekken en spoorvorming is zeer goed waar te nemen. Deze schades zijn deels met visuele opnamen te herkennen, maar zeker wanneer gebruik gemaakt wordt van vegetatie-indices, gebaseerd op nabij infrarood opnamen. Wanneer vegetatie-indices worden gebruikt, kan de omvang en locatie van kale plekken gedetailleerd worden vastgesteld. Voor de WBI beoordeling is het noodzakelijk om kale plekken met een omvang van 0,15 x 0,15 m te detecteren. Uit deze studie blijkt dat met RPAS monitoring deze kale plekken automatisch zijn te lokaliseren. Ook kleinere plekken tot circa 0,03 x 0,03 m zijn te detecteren.

Een herstelde verzakking in een waterkering van waterschap Limburg is met behulp van RPAS hoogtedata gelokaliseerd. Door het verschil tussen de herstelde waterkering en verzakte waterkering in beeld te brengen kon de omvang en locatie worden bepaald. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat verzakkingen kleiner dan 5 cm binnen de meetonauwkeurigheid vallen van hoogtemetingen (RPAS of AHN) en daardoor niet met zekerheid kunnen worden vastgesteld. Ook kan geconcludeerd worden dat met behulp van een eenmalige hoogtemeting geen verzakkingen of opbollingen automatisch kunnen worden aangetoond. Een tweede hoogtemeting is nodig voor een verschillen analyse, waarbij de meetonauwkeurigheid doorslaggevend is bij de interpretatie van de verzakking of opbolling.

Scheuren in de waterkeringen konden in deze studie niet worden aangetoond. Bij waterschap Limburg waren enkele langsscheuren in het veld geconstateerd. Met verschillende sensoren (visueel licht, nabij infrarood en multispectraal) is naar deze scheuren gekeken, maar deze bleken niet in de gemaakte opnamen terug te zien. Scheuren met een grootte kleiner of gelijk aan de resolutie van de gebruikte sensoren (2 cm) zijn niet te detecteren. Wanneer (in de toekomst) de resolutie van de sensoren hoger wordt, zijn scheuren wellicht wel te detecteren.

Bedekkingsgraad waterkering

In deze studie is een algoritme ontwikkeld waarmee vanuit de lucht de bedekkingsgraad van een waterkering kan worden bepaald. Hierbij is een koppeling gemaakt met de manier waarop de WBI beoordeling in het veld wordt uitgevoerd zodat de beoordeling *gesloten - open - gefragmenteerd* kan worden gemaakt. Het algoritme maakt gebruik van vegetatie-indices waarbij gekeken wordt naar begroeiingsdichtheid en de aanwezigheid van kale plekken. Begroeiingsdichtheid is hierbij als criterium gebruikt in plaats van plantafstand, omdat individuele grassprietten niet onderscheidend genoeg vanuit de lucht te detecteren zijn.

Voor validatie van het algoritme zijn veldwaarnemingen vergeleken met de resultaten van RPAS monitoring. Geconcludeerd kan worden dat RPAS monitoring goed toepasbaar is als methode om de grasbeoordeling mee uit te voeren om een vlakdekkend, uniform en objectief beeld van de grasmat te verkrijgen. Uit de vergelijking blijkt dat open en gesloten fractie betrouwbaar in beeld zijn te brengen met het algoritme voor verschillende waterkeringen. De gefragmenteerde fractie is tijdens deze studie weinig aangetroffen waardoor de validatie van deze gefragmenteerde fractie nog kan worden verbeterd. Harde gevalideerde conclusies over de betrouwbaarheid van de RPAS beoordeling van de gefragmenteerde fractie zijn op dit moment daarom nog niet goed te geven. Een extra validatie van de gefragmenteerde graszode fractie zal de betrouwbaarheid vergroten. Het is daarom aan te bevelen, voor een waterkering met (deels) gefragmenteerde grasmat, gelijktijdig een gedetailleerde veldbeoordeling en met RPAS uitgevoerde beoordeling uit te voeren om deze fractie te kunnen valideren.

Vanuit ecologische beleidsdoelstellingen wordt bij veldinspectie, naast de grasbedekkingsgraad ook vaak gekeken naar het voorkomende vegetatietype (pionier, H1, H2, etcetera). De vraag die hierbij opkomt, is of er een eenduidige relatie gelegd kan worden tussen de aanwezige grasbedekkingsgraad, doorworteling en het aanwezig vegetatietype (indicatorsoorten), zoals door sommige (veld)beoordelaars wordt aangegeven. Het herkennen van indicatorsoorten vanuit de lucht kan hierbij wenselijk zijn. Nader onderzoek naar de relatie en eventuele herkenning van indicatorsoorten vanuit de lucht is hier nog nodig om een eenduidig maar ook automatisch te genereren vegetatiebeeld te kunnen vaststellen. Hierdoor kunnen in de toekomst mogelijk kosten worden bespaard op het handmatig karteren van vegetatie.

Uit deze studie is naar voren gekomen dat RPAS monitoring moet plaatsvinden in een periode die representatief is voor de beoordeling van de grasmat op de waterkering. Een opname direct na het maaien levert een negatievere (meer gefragmenteerde fractie) beoordeling van de graszode op, doordat er vanuit de lucht meer open plekken en "slecht groeiend" gras wordt gezien. Uit ervaring van dijkbeheerders is gebleken dat het einde van de winterperiode het meest geschikt is als representatieve periode. Het is aan te bevelen nader te onderzoeken welk vegetatieniveau (bijvoorbeeld gemiddelde graslengte of tijd na maaien) representatief is voor WBI beoordeling met behulp van RPAS.

Een voordeel van het inzetten van RPAS voor de WBI beoordeling is dat objectiviteit is gegarandeerd en dat vlakdekkend een beeld van de waterkering wordt gegeven. Alle verzamelde data kan bovendien op uniforme wijze worden aangeleverd en ontsloten.

Ongewenste vegetatiesoorten

De eerste resultaten van de automatische herkenning van Ridderzuring op een waterkering zijn hoopgevend, echter de automatische herkenning kan nog worden verbeterd. Met behulp van multispectrale RPAS opnamen is de spectrale handtekening van Ridderzuring in beeld gebracht. Ondanks dat er wel degelijk een verschil zit tussen de spectrale handtekening van Ridderzuring en gras is er ook sprake van overlap in bepaalde golflengten. Hierdoor is het moeilijker om Ridderzuring automatisch te detecteren zonder ook andere vegetatie per abuis als Ridderzuring te classificeren. Dit wordt nog verergerd doordat de vegetatie op een waterkering rondom de Ridderzuring divers is.

Het zal ook in de toekomst lastig of zelfs onmogelijk zal zijn om op een waterkering met een gevarieerde vegetatie **alle** ongewenste vegetatiesoorten te detecteren: de spectrale handtekeningen zijn niet onderscheidend genoeg.

Voor de automatische computerherkenning van Ridderzuring hebben wij gebruik gemaakt van beelden opgenomen met een multispectraal camera. Nu de prijs en het gewicht van hyperspectrale camera's daalt, is het ook mogelijk om hiermee data te verzamelen. Met een hyperspectrale camera is het misschien mogelijk om de spectrale handtekening nauwkeuriger vast te leggen. Hierdoor wordt het onderscheidend vermogen groter en kan de ongewenste soort beter (minder vals-positief en -negatief) worden herkend en kunnen er mogelijk meer ongewenste vegetatiesoorten worden herkend. Aanbevolen wordt om een proef met hyperspectrale sensoren gekoppeld aan RPAS uit te voeren om ongewenste vegetatiesoorten te detecteren.

De studie heeft aangetoond dat het mogelijk is om via remote sensing technieken spectrale eigenschappen van ongewenste vegetatiesoorten te bepalen. Het heeft echter ook nieuwe onderzoeksvragen opgeroepen zoals: Vertonen ongewenste vegetatiesoorten een andere spectrale handtekening op een ander tijdstip in het jaar? Wordt het onderscheidend vermogen dan juist groter of kleiner? En voor welke vegetatiesoorten?

Toepasbaarheid

Data inwinning met behulp van sensoren onder een RPAS is voor het monitoren van waterkeringen goed mogelijk en kan een (gedeeltelijke) invulling geven aan de reguliere inspectie van waterkering maar eventueel ook voor calamiteitsituaties¹⁴, zoals droogte of hoogwater. Het levert aanvullende gedetailleerde informatie op over bijvoorbeeld de grasbedekkingsgraad, vegetatietoestand, kale plekken en hoogten over de gehele waterkering. Uiteraard moet hierbij rekening worden gehouden met de wettelijke beperkingen die zijn gesteld aan RPAS gebruik (bijvoorbeeld niet vliegen over snelwegen, aangesloten bebouwing etcetera)

Door gebruik te maken van RPAS kan op een efficiënte wijze inspectie van enkele inspectieparameters van waterkeringen plaatsvinden. Zo kan tijdens een monitoringsvlucht meerdere data tegelijkertijd worden ingewonnen, die voor verschillende doeleinden kan worden gebruikt. Om verschillen in beeld te brengen, zoals verzakkingen of ontwikkeling van de grasmatten, is het echter wel noodzakelijk om meerdere monitoringsvluchten op dezelfde locatie uit te voeren. Op basis van de ingewonnen informatie uit de RPAS monitoring kan gericht het veld worden ingegaan, omdat specifieke locaties als aandachtspunt naar voren kunnen komen. Hiermee levert RPAS monitoring een aanvulling op de bestaande (visuele) manier van monitoring van waterkeringen.

¹⁴ Calamiteitsituaties zijn niet onderzocht in deze studie die over reguliere inspecties van waterkeringen gaat.

Bijlagen

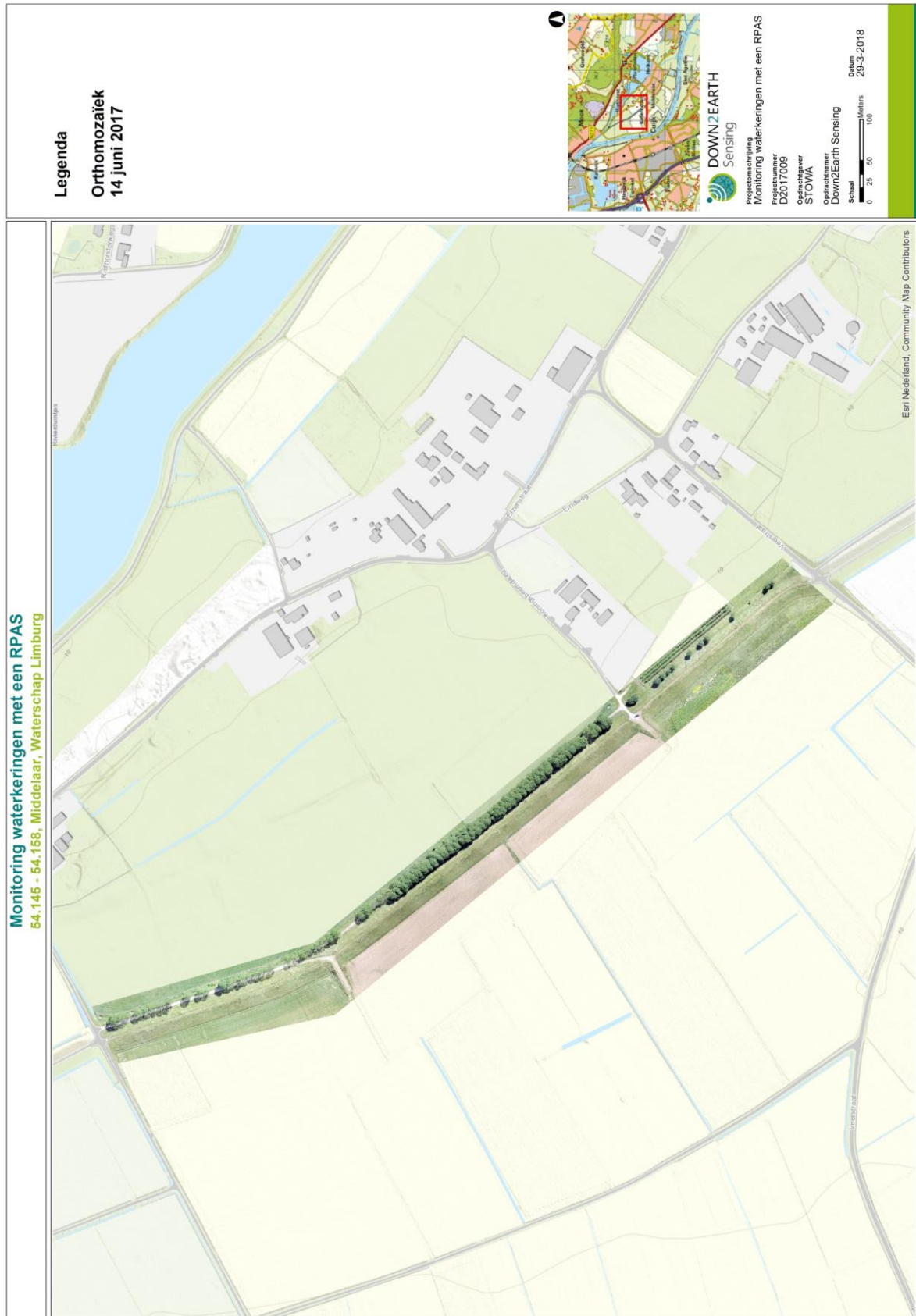
Bijlage I: Overzichtsbeelden zichtbaar licht opnamen



Figuur 30. Orthomozaïek pilotlocatie Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe).



Figuur 31. Orthomozaïek pilotlocatie Heijen (waterschap Limburg).



Figuur 32. Orthomosaïek pilotlocatie Middelaar (waterschap Limburg).



Figuur 33. Orthomozaïek pilotlocatie Rijndijk - Pannerdense Waard, Pannerden (waterschap Rijn en IJssel).



Figuur 34. Orthomozaïek pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (waterschap Hollandse Delta).



Figuur 35. Orthomozaïek pilotlocatie Nieuweweg - Bethunepolder (Waternet).

Bijlage II: Detailopnamen

Referentiemeetpunten (Ground Control Points)



Figuur 36. GPS-referentiemeetpunten (ground control points / GCP). Van boven naar beneden: grondcontrolepunten van Waterschap Rijn en IJssel, Waterschap Vallei en Veluwe en Waterschap Limburg.



Figuur 37. GPS-referentiemeetpunten (ground control points / GCP) Waterschap Hollandse Delta.



Figuur 38. Detailbeeld Nieuweweg - Bethunepolder langs Loosdrechtse Plassen (Waternet, maart 2017).

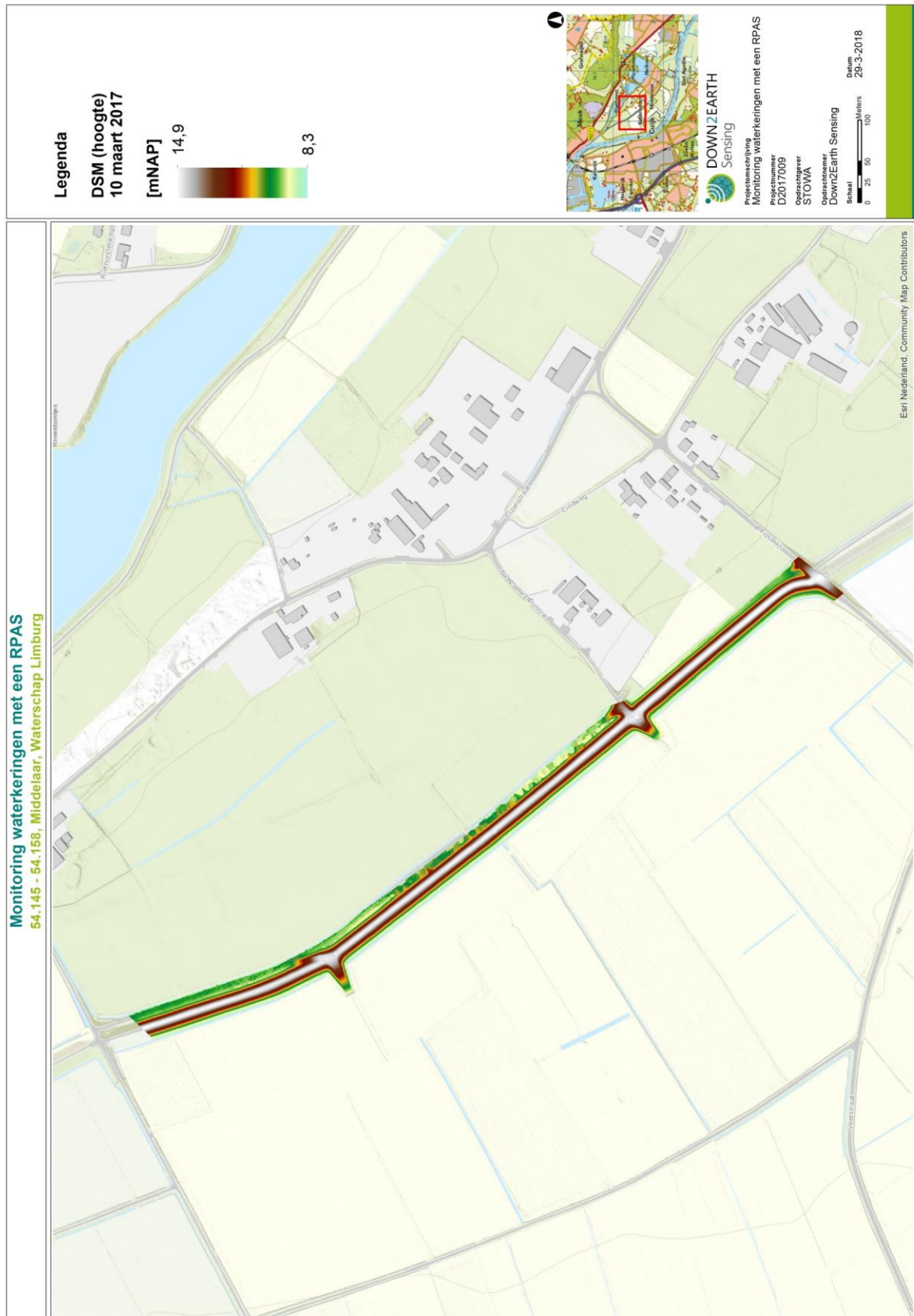


Figuur 39. Detailbeelden langs de Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe).

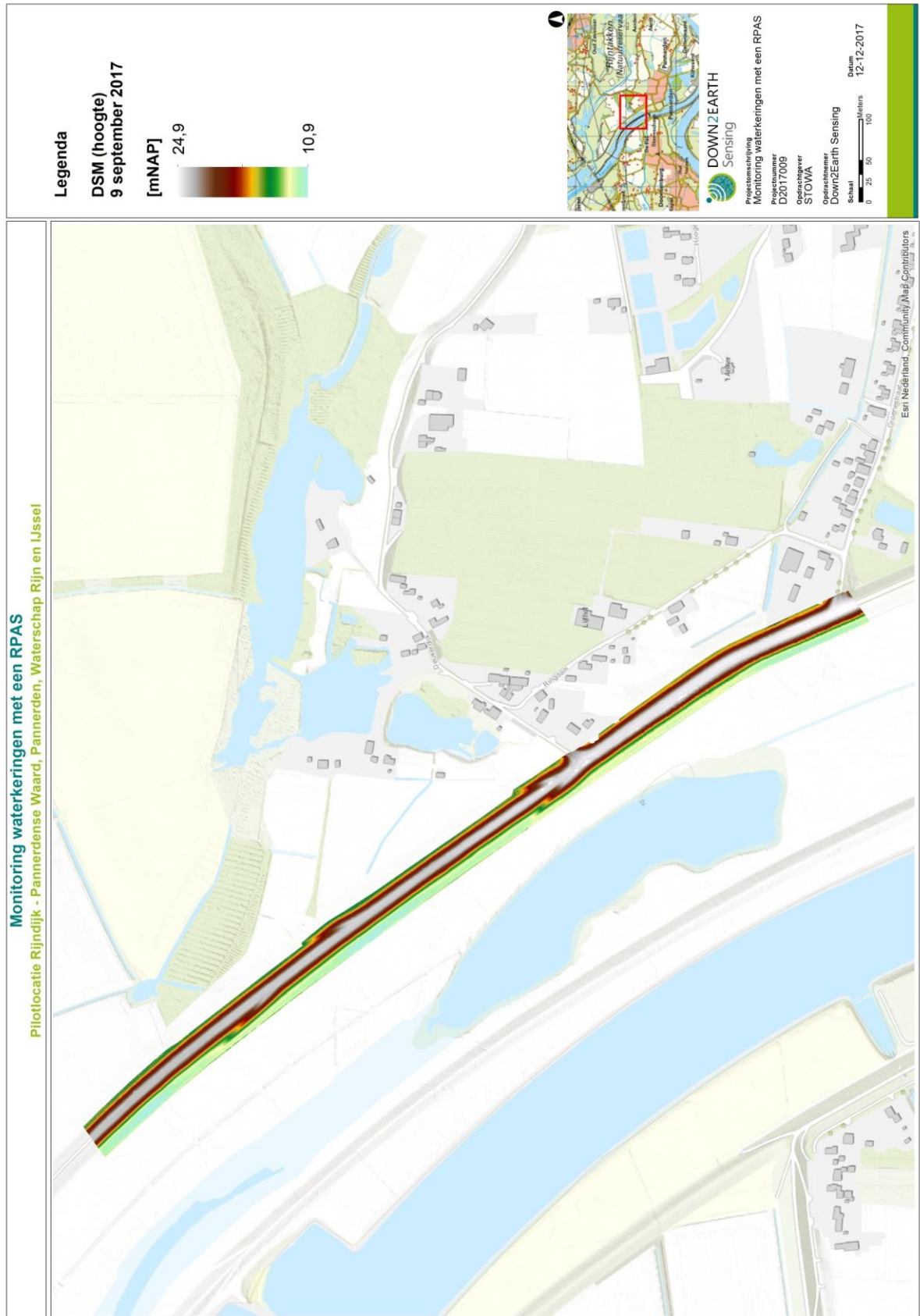


Figuur 40. Detailbeelden langs de Oostmolendijk (waterschap Hollandse Delta).

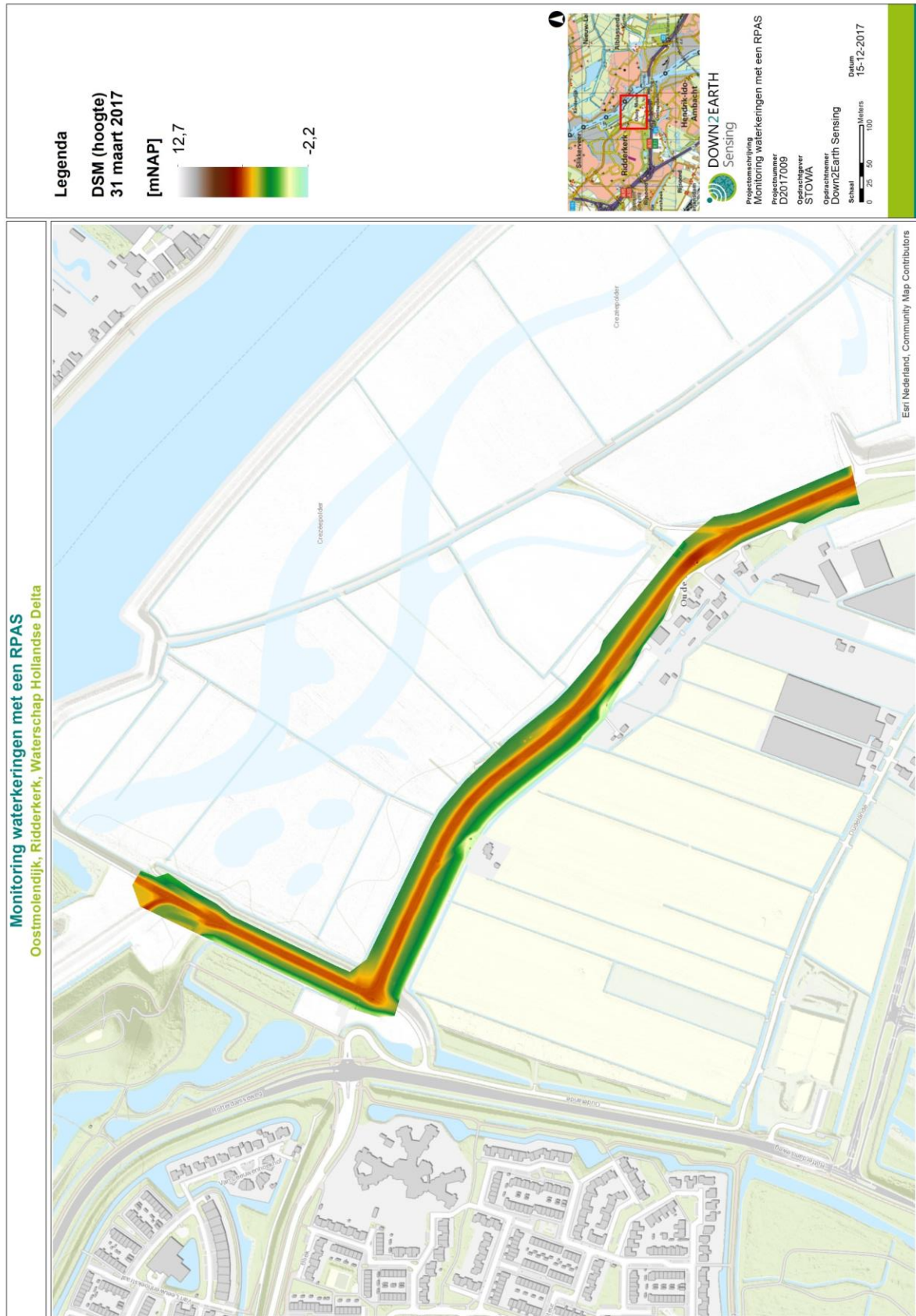
Bijlage III: Hoogtebeelden



Figuur 4.1. Digital Surface Model (DSM) pilotlocatie Middelaar (waterschap Limburg).



Figuur 42. Digital Surface Model (DSM) pilotlocatie Rijndijk - Pannerdense Waard, Pannerden (waterschap Rijn en IJssel).



Figuur 43. Digital Surface Model (DSM) pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (waterschap Hollandse Delta).

Bijlage IV: NDVI beelden



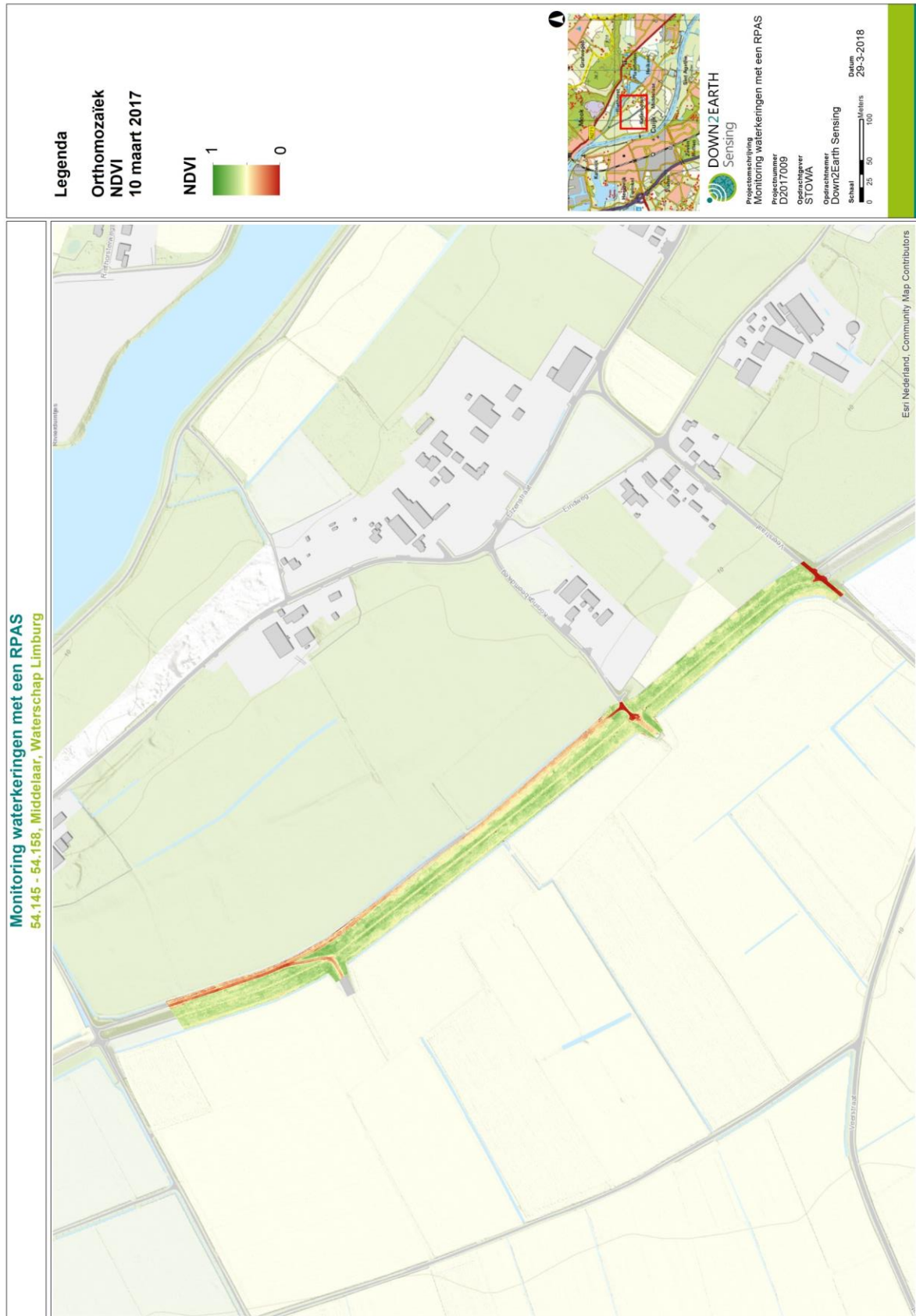
Figuur 44. NDVI pilotlocatie Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe, maart 2017).



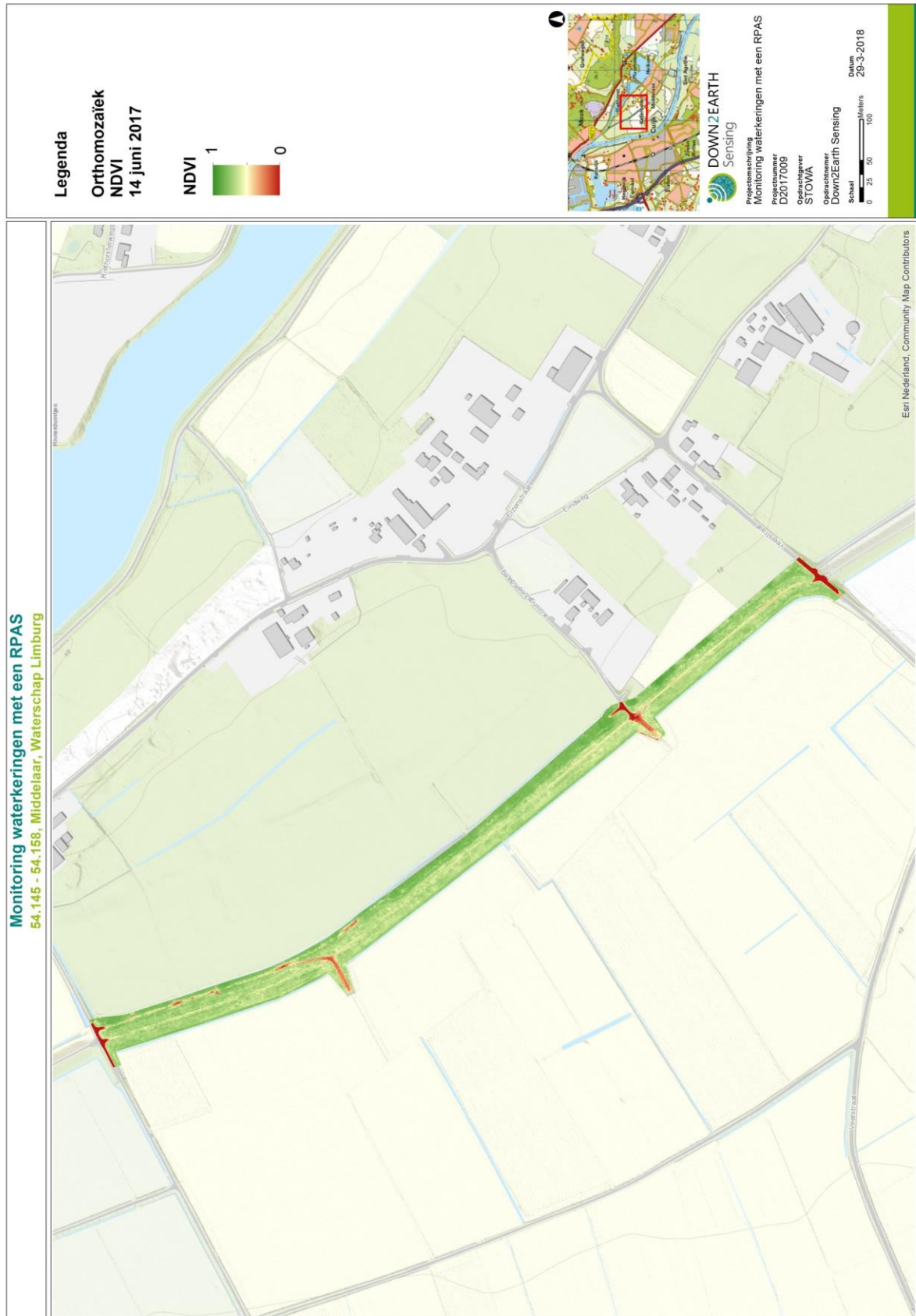
Figuur 45. NDVI pilotlocatie Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe, juni 2017).



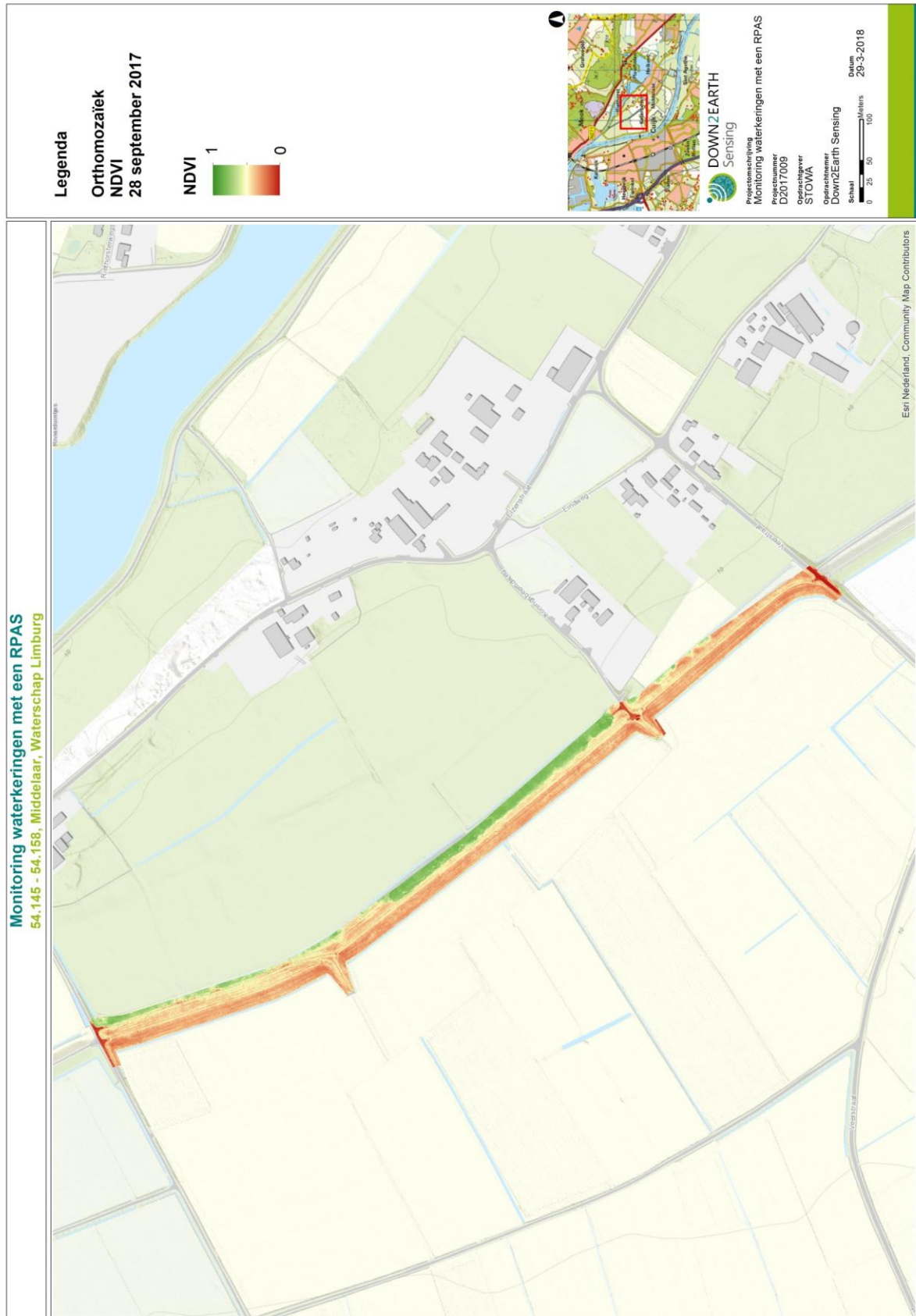
Figuur 46. NDVI pilotlocatie Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe, oktober 2017).



Figuur 47. NDVI pilotlocatie Middelaar (waterschap Limburg, maart 2017).



Figuur 48. NDVI pilotlocatie Middelaar (waterschap Limburg, juni 2017).



Figuur 49. NDVI pilotlocatie Middelaar (waterschap Limburg, september 2017).



Figuur 50. NDVI pilotlocatie Oostmolendijk, Ridderkerk (waterschap Hollandse Delta, maart 2017).

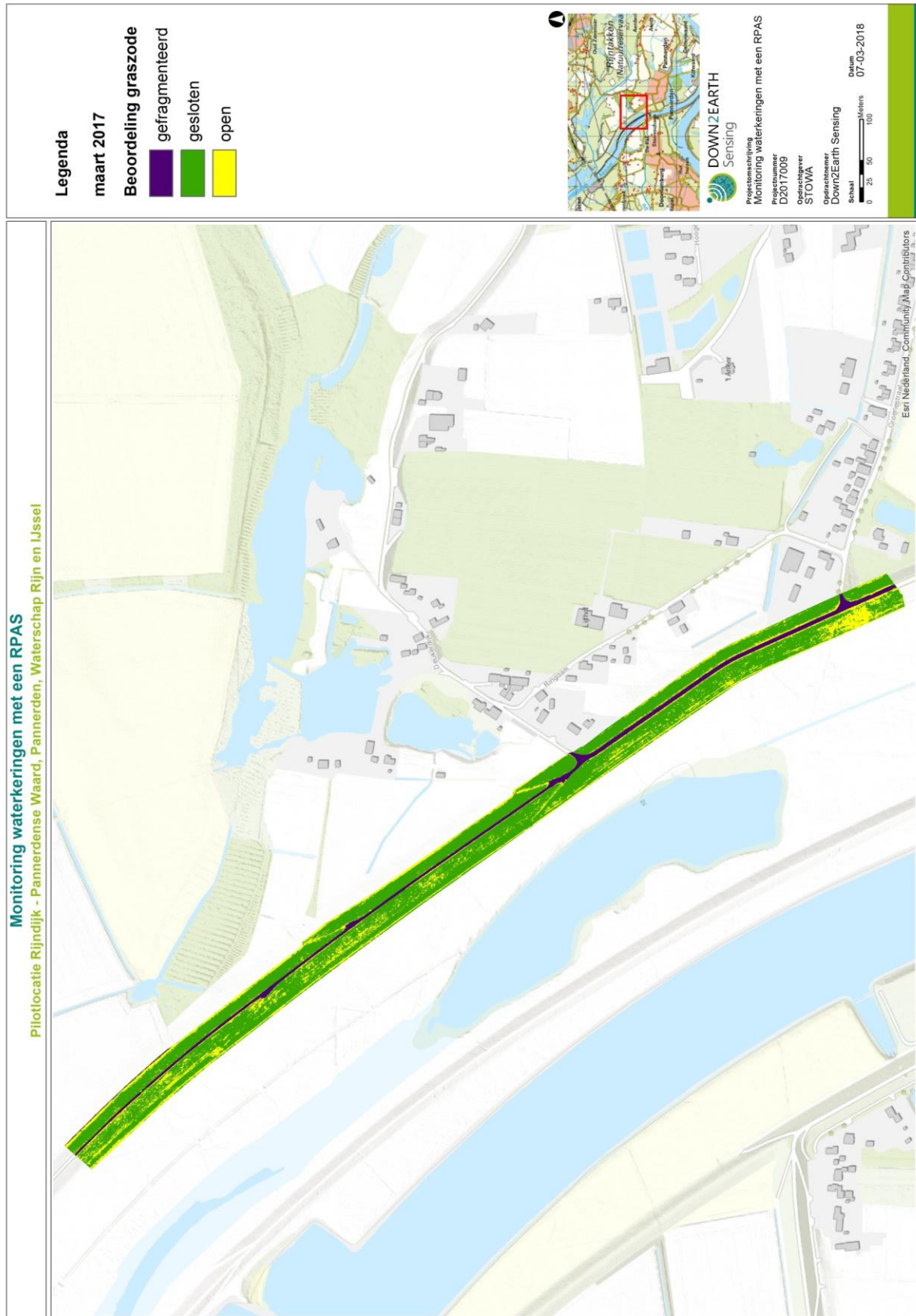
Bijlage V: Beoordeling graszode / Grasbedekkingsgraad



Figuur 51. Beoordeling graszode pilotlocatie Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe, maart 2017).



Figuur 52. Beoordeling graszode pilotlocatie Heijen (waterschap Limburg, maart 2017).



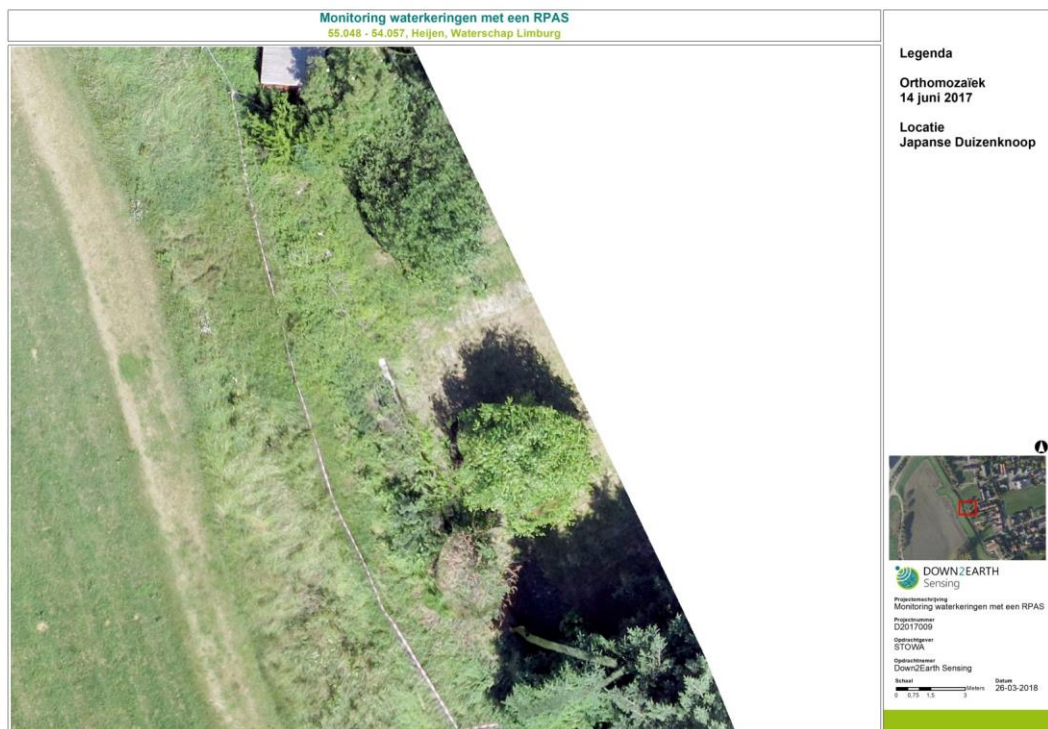
Figuur 53. Beoordeling graszode pilotlocatie Rijndijk - Pannerdense Waard, Pannerden (waterschap Rijn en IJssel, maart 2017).

Bijlage VI: Ongewenste vegetatiesoorten

Japanse duizenknoop, waterkering Heijen



Figuur 54. Locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (waterschap Limburg, maart 2018).



Figuur 55. Locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (waterschap Limburg, juni 2017).



Figuur 56. Locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (waterschap Limburg, september 2017).



Figuur 57. Details locatie Japanse duizenknoop op waterkering Heijen (waterschap Limburg, links: maart 2017, rechts: juni 2017).

Grebbeliniedijk (waterschap Vallei en Veluwe)



Figuur 58. Detailbeelden ongewenste vegetatiesoorten op de Grebbeliniedijk, midden: distel, onder: Ridderzuring (waterschap Vallei en Veluwe).

Rijndijk, Pannerdense Waard, Pannerden (waterschap Rijn en IJssel,

Figuur 59. Details ongewenste vegetatiesoorten op de Rijndijk, Pannerdense Waard, Pannerden (waterschap Rijn en IJssel, september 2017).



Figuur 60. Details Ridderzuring en RPAS op waterkering Heijen (waterschap Limburg, juni 2017).

Bijlage VII: Vliegbare kilometers waterkering

In deze bijlage is een uitsplitsing per type waterkering gegeven van het percentage waterkering dat met een RPAS is te monitoren (wettelijke beperkingen).

Met RPAS te monitoren aantal km waterkering per waterschap.

Tabel 8. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Vallei en Veluwe.

| Soort kering | Lengte [km] | in CTR [%] | Bebouwing / snelweg [%] | Vliegbaar [%] |
|---------------|----------------|---------------|-------------------------------|------------------|
| Primair | 142 | 0 | 12 | 88 |
| Regionaal | 38 | 0 | 11 | 89 |
| Overig | 66 | 25 | 0 | 75 |
| Totaal | 245 | 7 | 9 | 85 |

Tabel 9. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Limburg.

| Soort kering | Code | Lengte [km] | in CTR [%] | Bebouwing / snelweg [%] | Vliegbaar [%] |
|---------------|------|----------------|---------------|-------------------------------|------------------|
| Regionaal | 1 | 238 | 21 | 10 | 69 |
| Regionaal 2 | 2 | 0,5 | 0 | 40 | 60 |
| Primair | 5 | 56 | 6 | 49 | 45 |
| Totaal | | 294 | 18 | 18 | 64 |

Tabel 10. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Rijn en IJssel.

| Soort kering | Lengte [km] | in CTR [%] | Bebouwing / snelweg [%] | Vliegbaar [%] |
|---------------|----------------|---------------|-------------------------------|------------------|
| Kering | 247 | 7 | 22 | 71 |
| Totaal | 247 | 7 | 22 | 71 |

Tabel 11. Met RPAS te monitoren aantal kilometers waterkering van waterschap Hollandse Delta.

| Soort kering | Lengte [km] | in CTR [%] | Bebouwing / snelweg [%] | Vliegbaar [%] |
|----------------------|----------------|---------------|-------------------------------|------------------|
| Primair | 364 | 30 | 5 | 65 |
| Primair RWS | 41 | 0 | 100 | 0 |
| Compart. / boezem | 71 | 62 | 7 | 31 |
| Regionaal / boezem | 96 | 32 | 9 | 59 |
| Regionaal / compart. | 208 | 20 | 2 | 78 |
| Regionaal / voorland | 11 | 17 | 16 | 67 |
| Totaal | 790 | 29 | 10 | 60 |

