

Inspectie van waterkeringen met behulp van Flying Sensors en lasertechnieken

Datum:
januari 2016

Opdrachtgever:
Wetterskip Fryslân
Provinsje Fryslân

Report FutureWater: 150
Report HiView: 58

 **HiView**

 **FutureWater**

 **Kavel 10** .NL
Landmeters



Inspectie van waterkeringen met behulp van Flying Sensors en lasertechnieken

Auteurs:

Froukje de Boer (HiView/FutureWater)
Jan van Til (HiView/FutureWater)
Peter Droogers (HiView/FutureWater)
Walter Immerzeel (HiView/FutureWater)

met bijdrage van:

Rahul Westerhoff (Droneview)
Frank Staal (Kavel10)
Daniël Schaap (Wetterskip Fryslân)
Pier Schaper (Wetterskip Fryslân)

HiView

Costerweg 1V
6702AA Wageningen

0317 460050

www.hiview.nl
info@hiview.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting	13
1. Introductie	15
1.1. Huidige dijkmonitoringpraktijk	15
1.2. Dijkmonitoring met nieuwe technologie	15
2. Pilotgebieden	17
3. Flying Sensors	19
3.1. Aardobservatie	19
3.2. Toepassing Flying Sensors	20
3.3. Van waarneming tot product	20
4. 3D-Laserscanning	23
4.1. Introductie	23
4.2. Toepassingsgebieden laserscanning	23
5. Beeldverwerking Flying Sensor luchtfoto's	25
5.1. Ruwe beelden	25
5.2. Grondreferentiepunten	25
5.3. Orthomosaïek en digitaal hoogtemodel	27
6. Kostenoverzicht	30
6.1. Fixed Wing Flying Sensor	30
6.2. Multirotor Flying Sensor	30
6.3. 3D-Laserscanning	31
7. Bepalen kadehoogte	32
7.1. Resolutie en nauwkeurigheid	32
7.2. Vastleggen kadehoogte na revisietraject	33
7.3. Hoogtetoets	33
8. Kadeschouw	40
9. Inspectie bij calamiteiten	49
9.1. Muizenplaag	49
9.2. Droogte	51
9.3. Overige calamiteiten	59
10. Kweldetectie	60
11. Validatie	69
11.1. Vergelijking AHN met Flying Sensor hoogtemodellen	69
11.2. Vergelijking met resultaat 3D-laserscanner en multirotor	71
11.2.1. 3D-laserscanner	71
11.2.2. Vergelijking met resultaat multirotor	75
12. Aanbevelingen	78
12.1. Algemeen	78
12.2. Technische verbeterpunten	78
12.3. Inspectieproces	79
12.4. GIS-systeem	79
12.5. Ontwikkelingspunten	79

13. Conclusies	82
13.1. Geschiktheid Flying Sensors voor uitvoeren hoogtetoets	82
13.2. Mogelijke toepassingen van de hoogtebeelden	82
13.3. Geschiktheid Flying Sensors voor uitvoeren kadeschouw	82
13.4. Mogelijke toepassingen van de orthomozaiëken en NDVI-beelden	83
13.5. Geschiktheid Flying Sensors voor uitvoeren droogteschouw	83
1. Appendix: Technische specificaties en details	84
1.1. Informatie over de uitvoerende bedrijven	84
1.1.1. HiView	84
1.1.2. Kavel10	84
1.1.3. Droneview	85
1.2. Praktijkbevindingen	85
1.2.1. Invloed van weersomstandigheden	85
1.2.2. Vastleggen Ground Control Points met behulp van Bing maps en AHN	88
1.2.3. Vastleggen Ground Control Points met behulp van dGPS	90
1.2.4. Wegfilteren wateroppervlakte uit de hoogtemodellen	91
1.3. Nauwkeurigheid beelden in de x-, y- en z-richting	92
1.3.1. Inschatting verbetering nauwkeurigheid x-, y-, z-coördinaten door gebruik vaste dGPS-grondreferentiepunten	92
1.3.2. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in de pilotgebieden Allingawier, Baard, Jutrijp, Nijhuizum en Oldelamer.	93
1.3.3. Inschatting nauwkeurigheid x-, y-, z-coördinaten van de NIR-beelden van 22 juli 2015 gemaakt in pilotgebied Goingarip.	95
1.3.4. Inschatting afwijking xy-richting in pilotgebied Oldelamer	96
1.4. Kwalitatieve vergelijking van de hoogtemodellen met AHN en Bing-maps als referentiepunten en de hoogtemodellen met dGPS ingemeten referentiepunten	97
1.4.1. Studiegebied Oldelamer	97
1.4.2. Studiegebied Jutrijp	99
1.4.3. Studiegebied Nijhuizum	101
1.4.4. Studiegebied Allingawier	104
1.4.5. Studiegebied Baard	105
1.5. Volledige beelden multicopter in het pilotgebied bij Haskerdijken	106
1.6. NDVI-verandering boomvegetatie en niet-gemaaide kadevegetatie	110
1.7. NDVI-beelden van Allingawier, Baard, Jutrijp, Nijhuizum en Oldelamer	116

Lijst van Figuren

FIGUUR 1. OVERZICHT VAN DE STUDIEGEBIEDEN IN HET ZUIDWESTEN EN MIDDEN VAN FRIESLAND. IN DE GEEL GEARCEERDE GEBIEDEN IS OP VIER MOMENTEN GEVLOGEN VOOR HET WETTERSKIP FRYSLÂN. IN DE ROZE GEARCEERDE GEBIEDEN IS OP TWEE MOMENTEN GEVLOGEN VOOR DE PROVINCIE FRYSLÂN. COÖRDINAATSTELSEL IS AMERSFOORT RD NIEUW. BIJ FIGUREN WAAROP GEEN NOORDPIJL IS AFGEBEELD, LIGT HET NOORDEN BOVEN.....	17
FIGUUR 2. ONTWIKKELING VAN AARDOBSERVATIE.....	19
FIGUUR 3. POINT CLOUD VAN DE KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.....	23
FIGUUR 4. VOORBEELD VAN 3D-LASERSCANNING.....	24
FIGUUR 5. VOORBEEDEN VAN VOLLEDIGE, ONBEWERKTE LUCHTFOTO'S, GEMAAKT VANUIT DE FLYING SENSOR. BOVEN LUCHTFOTO'S IN NIR (LINKS OLDELAMER, RECHTS ALLINGAWIER), BENEDEN LUCHTFOTO'S IN RGB (GOINGARIJP).....	25
FIGUUR 6. VOORBEEDEN VAN UITSNEDEN VAN DE ONBEWERKTE FOTO'S OM DE MATE VAN DETAIL AAN TE GEVEN, MET DE KLOK MEE: KOEIEN IN DE WEI, VISFUIK, AANGEMEERDE BOTEN, FIETSERS DIE DE PONT VERLATEN.	26
FIGUUR 7. VOORBEEDEN VAN HET INMETEN VAN EEN GRONDREFERENTIEPUNT MET DGPS.....	26
FIGUUR 8. GEMOZAÏEK BEELD VAN HET PILOTGEBIED BIJ OLDELAMER. IN TOTAAL ZIJN VOOR HET VERKRIJGEN VAN DEZE ORTHOMOZAÏEK 108 RGB LUCHTFOTO'S GENOMEN OP 16 SEPTEMBER 2014.....	28
FIGUUR 9. GEMOZAÏEK BEELD VAN HET STUDIEGEBIED BIJ OLDELAMER. IN TOTAAL ZIJN VOOR HET VERKRIJGEN VAN DEZE ORTHOMOZAÏEK 186 NIR LUCHTFOTO'S GENOMEN OP 16 SEPTEMBER 2014.....	28
FIGUUR 10. DEM VAN HET STUDIEGEBIED BIJ OLDELAMER. IN TOTAAL ZIJN VOOR HET VERKRIJGEN VAN DIT HOOGTEBEELD 186 NIR LUCHTFOTO'S GENOMEN OP 16 SEPTEMBER 2014. COÖRDINAATSTELSEL: AMERSFOORT RD NIEUW.	29
FIGUUR 11. DEM VAN HET STUDIEGEBIED BIJ GOINGARIJP. IN TOTAAL ZIJN VOOR HET VERKRIJGEN VAN DIT HOOGTEBEELD 151 LUCHTFOTO'S GENOMEN OP 2 OKTOBER 2015.....	32
FIGUUR 12. HOOGTETOETS OLDELAMER OP BASIS VAN HET FLYING SENSOR HOOGTEMODEL.....	35
FIGUUR 13. DETAIL VAN DE HOOGTETOETS VAN DE ZUIDELIJKE KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ OLDELAMER OP BASIS VAN DE FLYING SENSOR HOOGTEMODELLEN. HET BOVENSTE BEELD GEEFT DE HOOGTETOETS WEER, HET ONDERSTE BEELD DE ORTHOMOZAÏEK VAN 21 MEI 2015. DE GESTREEPTE LIJN GEEFT DE VEREISTE KRUINBREEDTE AAN.	36
FIGUUR 14. HOOGTETOETS NOORDELIJKE KADE JUTRIJP. BOVEN VOLGENS HET AHN, ONDER VOLGENS HET FLYING SENSORS HOOGTEMODEL.	37
FIGUUR 15. HOOGTETOETS ZUIDKADE JUTRIJP. BOVEN VOLGENS HET AHN, ONDER VOLGENS DE FLYING SENSOR HOOGTEMODELLEN.....	38
FIGUUR 16. VOORBEELD VAN EEN DWARSPROFIEL VAN EEN KADESEGMENT IN OLDELAMER OP BASIS VAN DE FLYING SENSOR HOOGTEMODELLEN.....	39
FIGUUR 17. VOORBEELD VAN ZICHTBARE STORTSTENEN IN HET PILOTGEBIED BIJ HOMMERTS.....	42
FIGUUR 18. VOORBEELD VAN HOUTOPSTAND IN DE OEVERZONE IN PILOTGEBIED NIJHUIZUM. DE BEEDEN ZIJN GEMAAKT OP 16 SEPTEMBER 2014. BOVEN HET HOOGTEMODEL EN ONDER HET NIR-ORTHOMOZAÏEK.....	43
FIGUUR 19. VOORBEELD VAN HEKKELSPECIE OP DE GRASMAT (BINNEN ZWARTE RECHTHOEK) IN NIJHUIZUM.	44
FIGUUR 20. VOORBEELD VAN BOMEN DIE ONTGRONDINGSGEVAAR KUNNEN VEROORZAKEN IN PILOTGEBIED BAARD.	45
FIGUUR 21. VOORBEELD VAN RIJSPOORSCHADE AAN DE GRASMAT (BINNEN ZWARTE RECHTHOEK) EN BLOEI VAN KROOS/WATERPLANTEN IN DE SLOOT IN HET PILOTGEBIED BIJ UILESPRONG.....	46

FIGUUR 22. VOORBEELD VAN INTENSIEVE GRAVERIJ DOOR MOLLEN IN DE KADE IN PILOTGEBIED UILENSPRONG. HET BOVENSTE BEELD LAAT DE NDVI ZIEN. DE MOLSHOPEN ZIJ TE HERKENNEN AAN DE LAGE NDVI. HET MIDDELSTE BEELD IS EEN UITSNEDE UIT DE NIR-ORTHOMOZAÏEK EN HET ONDERSTE BEELD EEN UITSNEDE UIT DE RGB-ORTHOMOZAÏEK OP DEZELFDE LOCATIE.	47
FIGUUR 23. AFWIJKING VAN DE GEMIDDELDE NDVI PER PERCEEL IN HET GEBIED TUSSEN JUTRIJP EN HOMMERTS.	49
FIGUUR 24. VOORBEELD VAN DE MUIZENSCHADE IN HET GEBIED BIJ JUTRIJP/HOMMERTS. ZOWEL AAN HET NIR-BEELD (BOVENSTE) ALS HET NDVI-ANOMALIE-BEELD OP DE CORRESPONDERENDE LOCATIE (MIDDELSTE) ZIJN DE MUIZENKRAAMKAMERS GOED TE HERKENNEN. HET ONDERSTE BEELD GEEFT DE NDVI-ANOMALIE VAN EEN MUIZENKRAAMKAMER IN NOG MEER DETAIL WEER.....	50
FIGUUR 25. DOORLOPEND POTENTIEEL NEERSLAGTEKORT NEDERLAND OP 9 JULI 2015.....	51
FIGUUR 26. VOORBEELD VAN DROOGTESCHADE IN HET PILOTGEBIED BIJ JUTRIJP TE ZIEN OP HET NDVI- BEELD (BOVENSTE) EN HET ORTHOMOZAÏEK (ONDERSTE) VAN 21 JULI 2015.....	52
FIGUUR 27. DETAILS VAN DE LOCATIES BINNEN DE CIRKELS IN FIGUUR 26. HET DETAIL LINKSBOVEN KOMT OVEREEN MET LOCATIE 1 IN FIGUUR 26. MET DE KLOK MEE KOMEN DE OVERIGE BEELDEN OVEREEN MET RESPECTIEVELIJK LOCATIES 2, 3 EN 4.	53
FIGUUR 28. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ GOINGARIJP OP 22 JULI 2015, NDVI-BEELD VAN KADE OP 22 JULI 2015, RGB-ORTHOMOZAÏEK VAN DE KADE OP 22 JULI 2015.	55
FIGUUR 29. VOORBEELD VAN DE AFNAME VAN DE NDVI ALS GEVOLG VAN MAAIWERKZAAMHEDEN IN HET PILOTGEBIED BIJ OLDELAMER OP 21 JULI 2015. BOVENSTE BEELD GEEFT DE NIR- ORTHOMOZAÏEK WEER, HET ONDERSTE BEELD DE NDVI. OP DE BEELDEN IS ZOWEL GEMAAIDE ALS ONGEMAAIDE VEGETATIE TE ZIEN.	56
FIGUUR 30. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ ALLINGAWIER OP 21 MEI 2015, NDVI-BEELD VAN KADE OP 21 MEI 2015, NDVI-BEELD VAN DE KADE OP 21 JULI 2015, NIR- ORTHOMOZAÏEK VAN KADE OP 21 JULI 2015.....	57
FIGUUR 31. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ BAARD OP 21 MEI 2015, NDVI-BEELD VAN KADE OP 21 MEI 2015, NDVI-BEELD VAN DE KADE OP 21 JULI 2015, NIR- ORTHOMOZAÏEK VAN KADE OP 21 JULI 2015.....	58
FIGUUR 32. GEBIEDEN WAAR GEVLOGEN IS MET EEN THERMISCHE CAMERA. COÖRDINAATSTELSEL IS AMERSFOORT RD NIEUW.	60
FIGUUR 33. THERMISCH BEELD (BOVENSTE) EN NABIJ-INFRAROOD BEELD (ONDERSTE) VAN HET GEBIED BIJ ALLINGAWIER.....	61
FIGUUR 34. DETAIL VAN THERMISCH BEELD (BOVENSTE) EN NABIJ-INFRAROOD BEELD (ONDERSTE) WAAROP HET VERSCHIL IN OPPERVLAKTETEMPERATUUR TUSSEN KALE GROND (WARM, ROOD) EN BEGROEIDE GROND (RELATIEF KOUD, GROEN/BLAUW) TE ZIEN IS.	62
FIGUUR 35. KWELPLEKKEN IN HET GEBIED BIJ ALLINGAWIER.	63
FIGUUR 36. THERMISCH BEELD (BOVENSTE) EN NABIJ-INFRAROOD BEELD (ONDERSTE) VAN KWELPLEKKEN ONDERAAN DE KADE IN HET GEBIED BIJ ALLINGAWIER. MOGELIJK ZIJN ER BINNEN DE CIRKELS KWELPLEKKEN TE ZIEN.	63
FIGUUR 37. DETAIL VAN THERMISCH BEELD (BOVENSTE) EN NABIJ-INFRAROOD BEELD VAN KWELPLEKKEN ONDERAAN DE KADE IN HET GEBIED BIJ ALLINGAWIER.	64
FIGUUR 38. THERMISCH BEELD (BOVENSTE) EN BING MAPS SATELLIETBEELD (ONDERSTE) VAN HET GEBIED BIJ PIETERSBIERUM.....	65
FIGUUR 39. THERMISCH BEELD (BOVENSTE) EN BING MAPS SATELLIETBEELD (ONDERSTE) VAN HET GEBIED BIJ ROPTAZIJL.....	66
FIGUUR 40. DETAIL VAN HET THERMISCHE BEELD VAN HET GEBIED BIJ ROPTAZIJL WAAROP SCHAPEN TE ZIEN ZIJN.	67
FIGUUR 41. DETAIL VAN HET THERMISCHE BEELD VAN HET GEBIED BIJ ROPTAZIJL.	68

FIGUUR 42. VERGELIJKING RESOLUTIE AHN (BOVEN) MET RESOLUTIE FLYING SENSOR HOOGTEMODEL (ONDER) VOOR EEN KADESEGMENT IN NIJHUIZUM.	69
FIGUUR 43. WERKLOCATIE KAVEL10 IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.	72
FIGUUR 44. FOTO IN NAP, GENOMEN IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.	73
FIGUUR 45. HOOGTEMODEL VAN EEN KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.	73
FIGUUR 46. FLYING SENSOR HOOGTEMODEL (HIVIEW) VAN HET STUDIEGEBIED BIJ HASKERDIJKEN OP 22 JULI 2015.	74
FIGUUR 47. DIGITAAL TERREIN MODEL VAN EEN KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.	74
FIGUUR 48. VOORBEELD VAN EEN DWARSPROFIEL VAN DE KADE IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.	75
FIGUUR 49. VOORBEELD VAN DE VERSCHILLEN IN RESOLUTIE TUSSEN DE ORTHOMOZAÏEK UIT DE FOTO'S DIE ZIJN GEMAAKT VANUIT DE MULTICOPTER EN DE ORTHOMOZAÏEK UIT DE FOTO'S DIE ZIJN GEMAAKT VANUIT DE FIXED WING. LINKSBOVEN DETAIL VAN DE MULTICOPTER-ORTHOMOZAÏEK VAN 22 JULI 2015. RECHTSBOVEN DETAIL VAN DE FIXED-WING-ORTHOMOZAÏEK OP 22 JULI 2015. LINKSONDER DETAIL VAN DE MULTICOPTER-ORTHOMOZAÏEK VAN 2 OKTOBER 2015. RECHTSONDER DETAIL VAN DE FIXED-WING-ORTHOMOZAÏEK VAN 2 OKTOBER 2015.	76
FIGUUR 50. VOORBEELD VAN DE MEETAPPARATUUR WAAROVER KAVEL10 LANDMETERS BESCHIKT. ...	84
FIGUUR 51. VOORBEELD VAN DRONEMETING ZANDEPOT DOOR KAVEL10. LINKS DE ORTHOMOZAÏEK, RECHTS HET HOOGTEMODEL.	85
FIGUUR 52. UITSNEDEN UIT TWEE OPEENVOLGENDE FOTO'S, GENOMEN OP 21 JULI 2015 IN HET STUDIEGEBIED BIJ OLDELAMER.	86
FIGUUR 53. ORTHOMOZAÏEKEN VAN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN. BOVENSTE BEELD IS EEN DETAIL VAN DE NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN 22 JULI 2015, MIDDELSTE BEELD EEN DETAIL VAN DE RGB-ORTHOMOZAÏEK VAN 22 JULI 2015 EN HET ONDERSTE BEELD EEN DETAIL VAN DE NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN 2 OKTOBER 2015.	87
FIGUUR 54. REFLECTIE OP HET WATEROPPERVLAK OP EEN NIR-LUCHTFOTO VAN 22 JULI 2015 (BOVENSTE BEELD) EN OP EEN NIR-LUCHTFOTO VAN 2 OKTOBER 2015 (ONDERSTE BEELD) IN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN.	88
FIGUUR 55. LINKS EEN UITSNEDE UIT DE ORTHOMOZAÏEK WAAROP HET EINDE VAN HET BETONNEN PAD IN HET WEILAND DUIDELIJK ZICHTBAAR IS. RECHTS EEN UITSNEDE UIT DE REFERENTIEKAART, WAAROP HET CORRESPONDERENDE PUNT NIET ZICHTBAAR IS.	89
FIGUUR 56. LINKS EEN UITSNEDE UIT DE ORTHOMOZAÏEK WAAROP HET DAMMETJE EN DE SCHEIDING TUSSEN LAND EN WATER DUIDELIJK ZICHTBAAR ZIJN. RECHTS EEN UITSNEDE UIT DE REFERENTIEKAART, WAAROP HET CORRESPONDERENDE PUNT NIET DUIDELIJK ZICHTBAAR IS.	89
FIGUUR 57. LINKS EEN UITSNEDE UIT DE ORTHOMOZAÏEK, IN HET MIDDEN EEN UITSNEDE VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIE UIT DE REFERENTIEKAART, RECHTS DE OVERLAY VAN DE TWEE VOORGAANDE UITSNEDEN, WAAROP EEN VERSCHUIVING VAN HET OBJECT IN ZUIDELIJKE RICHTING TE ZIEN IS.	89
FIGUUR 58. LINKS EEN UITSNEDE UIT DE ORTHOMOZAÏEK, IN HET MIDDEN EEN UITSNEDE VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIE UIT DE REFERENTIEKAART, RECHTS DE OVERLAY VAN DE TWEE VOORGAANDE UITSNEDEN, WAAROP EEN VERSCHUIVING VAN HET OBJECT IN ZUIDWESTELIJKE RICHTING TE ZIEN IS.	90
FIGUUR 59. OVERLAY VAN DE BING-MAPS KAART MET HET ACTUEEL HOOGTEBESTAND NEDERLAND (AHN).	90
FIGUUR 60. UITSNEDEN VAN EEN OVERLAY VAN ORTHOFOTO'S GEMAAKT OP 16 SEPTEMBER 2014 (GROEN GEKLEURD) EN 21 MEI 2015 (ROZEROOD GEKLEURD).	96
FIGUUR 61. DETAIL-UIITSNEDE VAN EEN OVERLAY VAN ORTHOFOTO'S GEMAAKT OP 16 SEPTEMBER 2014 (GROEN GEKLEURD) EN 21 MEI 2015 (ROZEROOD GEKLEURD).	97

FIGUUR 62. VOORBEELD VAN EEN ONREALISTISCH HOOGTEPATROON (VLEKKEN IN MIDDEN VAN BEELD) IN HET HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ OLDELAMER.....	97
FIGUUR 63. OORSPRONKELIJK (BOVENSTE BEELD) EN VERBETERD (ONDERSTE BEELD) DIGITAAL HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ OLDELAMER. VERKREGEN DOOR HET TOEPASSEN VAN FOTOGRAMMETRIE: HET REKENEN MET DE VERSCHILLENDE KIJKHOEKEN EN OVERLAP VAN DE VELE FOTO'S GENOMEN MET DE FLYING SENSOR.	98
FIGUUR 64. OORSPRONKELIJK (BOVENSTE BEELD) EN VERBETERD (ONDERSTE BEELD) DIGITAAL HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ JUTRIJP.	100
FIGUUR 65. OORSPRONKELIJK (BOVENSTE BEELD) EN VERBETERD (ONDERSTE BEELD) DIGITAAL HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ NIJHUIZUM.	101
FIGUUR 66. UITSNEDEN VAN HET VERBETERDE DIGITALE HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ NIJHUIZUM.	102
FIGUUR 67. VERSCHIL TUSSEN TWEE HOOGTEMODELLEN VOOR HET STUDIEGEBIED BIJ NIJHUIZUM (BOVENSTE BEELD) EN UITSNEDE VAN DE ORTHOMOZAÏEK VOOR HET NOORDELIJKE GEDEELTE VAN HET STUDIEGEBIED (ONDERSTE BEELD).	103
FIGUUR 68. OORSPRONKELIJK (BOVENSTE BEELD) EN VERBETERD (ONDERSTE BEELD) DIGITAAL HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ ALLINGAWIER.	104
FIGUUR 69. OORSPRONKELIJK (BOVENSTE BEELD) EN VERBETERD (ONDERSTE BEELD) DIGITAAL HOOGTEMODEL VAN HET STUDIEGEBIED BIJ BAARD.	105
FIGUUR 70. RGB ORTHOMOZAÏEK VAN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN. VOOR DEZE ORTHOMOZAÏEK ZIJN OP 22 JULI 2015 LUCHTFOTO'S GEMAAKT VANUIT EEN MULTICOPTER (BRON: DRONEVIEW).	106
FIGUUR 71. RGB ORTHOMOZAÏEK VAN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN. VOOR DEZE ORTHOMOZAÏEK ZIJN OP 22 JULI 2015 LUCHTFOTO'S GEMAAKT VANUIT EEN MULTICOPTER (BRON: DRONEVIEW).	107
FIGUUR 72. RGB ORTHOMOZAÏEK VAN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN. VOOR DEZE ORTHOMOZAÏEK ZIJN OP 2 OKTOBER 2015 LUCHTFOTO'S GEMAAKT VANUIT EEN MULTICOPTER (BRON: DRONEVIEW).	108
FIGUUR 73. RGB ORTHOMOZAÏEK VAN HET PILOTGEBIED BIJ HASKERDIJKEN. VOOR DEZE ORTHOMOZAÏEK ZIJN OP 2 OKTOBER 2015 LUCHTFOTO'S GEMAAKT VANUIT EEN MULTICOPTER (BRON: DRONEVIEW).	109
FIGUUR 74. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN BOOMVEGETATIE IN HET PILOTGEBIED BIJ ALLINGAWIER OP 21 MEI 2015, NDVI-VERANDERING VAN DE BOOMVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NDVI-VERANDERING VAN DE KADEVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADEVEGETATIE OP 21 MEI 2015.....	110
FIGUUR 75. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN BOOMVEGETATIE IN HET PILOTGEBIED BIJ BAARD OP 21 MEI 2015, NDVI-VERANDERING VAN DE BOOMVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NDVI-VERANDERING VAN DE KADEVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADEVEGETATIE OP 21 MEI 2015.....	111
FIGUUR 76. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN BOOMVEGETATIE IN HET PILOTGEBIED BIJ JUTRIJP OP 21 MEI 2015, NDVI-VERANDERING VAN DE BOOMVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NDVI-VERANDERING VAN DE KADEVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADEVEGETATIE OP 21 MEI 2015.....	112
FIGUUR 77. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN BOOMVEGETATIE IN HET PILOTGEBIED BIJ NIJHUIZUM OP 21 MEI 2015, NDVI-VERANDERING VAN DE BOOMVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NDVI-VERANDERING VAN DE KADEVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADEVEGETATIE OP 21 MEI 2015.....	113
FIGUUR 78. MET DE KLOK MEE: NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN BOOMVEGETATIE IN HET PILOTGEBIED BIJ OLDELAMER OP 21 MEI 2015, NDVI-VERANDERING VAN DE BOOMVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN	

21 JULI, NDVI-VERANDERING VAN DE KADEVEGETATIE TUSSEN 21 MEI EN 21 JULI, NIR-ORTHOMOZAÏEK VAN KADEVEGETATIE OP 21 MEI 2015.....	114
FIGUUR 79. NDVI-BEELDEN VAN ALLINGAWIER. BOVEN OP 16 SEPTEMBER 2014, ONDER OP 21 MEI 2015.....	116
FIGUUR 80. NDVI-BEELDEN VAN ALLINGAWIER. BOVEN OP 21 JULI 2015, ONDER OP 1 OKTOBER 2015.	117
FIGUUR 81. NDVI-BEELDEN VAN BAARD. BOVEN OP 16 SEPTEMBER 2014, ONDER OP 21 MEI 2015.....	118
FIGUUR 82. NDVI-BEELDEN VAN BAARD. BOVEN OP 21 JULI 2015, ONDER OP 1 OKTOBER 2015.	119
FIGUUR 83. NDVI-BEELDEN VAN JUTRIJP. BOVEN OP 16 SEPTEMBER 2014, ONDER OP 21 MEI 2015....	120
FIGUUR 84. NDVI-BEELDEN VAN JUTRIJP. BOVEN OP 21 JULI 2015, ONDER OP 1 OKTOBER 2015.	121
FIGUUR 85. NDVI-BEELDEN VAN NIJHUIZUM. BOVEN OP 16 SEPTEMBER 2014, ONDER OP 21 MEI 2015.	122
FIGUUR 86. NDVI-BEELDEN VAN NIJHUIZUM. BOVEN OP 21 JULI 2015, ONDER OP 1 OKTOBER 2015... ..	123
FIGUUR 87. NDVI-BEELDEN VAN OLDELAMER. BOVEN OP 16 SEPTEMBER 2014, ONDER OP 21 MEI 2015.	124
FIGUUR 88. NDVI-BEELDEN VAN OLDELAMER. BOVEN OP 21 JULI 2015, ONDER OP 1 OKTOBER 2015..	125

Lijst van Tabellen

TABEL 1. OVERZICHT VAN UITGEVOERDE WERKZAAMHEDEN PER PILOTGEBIED	18
TABEL 2. INSCHATTING VAN VERBETERING NAUWKEURIGHEID DOOR GEBRUIK VAN VASTE DGPS-GRONDREFERENTIEPUNTEN VOOR HET GEOREFEREREN VAN DE BEELDEN VAN 16 SEPTEMBER 2014 IN HET PILOTGEBIED BIJ ALLINGAWIER	27
TABEL 3. KOSTEN-BATEN ANALYSE VAN DE INZET VAN FLYING SENSORS TEN OPZICHTE VAN INDIVIDUELE VISUELE KADESCHOUW	30
TABEL 4. KOSTENOVERZICHT BEELDOPNAME HASKERDIJKEN MET EEN MULTIROTOR (BRON: DRONEVIEW)	31
TABEL 5. KOSTENOVERZICHT 3D-LASERSCANNING OP MEERDERE LOCATIES (BRON: KAVEL10)	31
TABEL 6. CLASSIFICATIECRITERIA VAN DE OVERHOOGTE VOOR DE HOOGTETOETS	34
TABEL 7. SCHADEBEELDEN DIE WAARGENOMEN KUNNEN WORDEN TIJDENS DE KADESCHOUW	40
TABEL 8. OVERTREDINGEN DIE WAARGENOMEN KUNNEN WORDEN TIJDENS DE KADESCHOUW	40
TABEL 9. DIVERSE SITUATIES DIE WAARGENOMEN KUNNEN WORDEN TIJDENS DE KADESCHOUW, MAAR GEEN DIRECTE ACTIE VEREISEN	41
TABEL 10. OVERZICHT PER PILOTGEBIED VAN DE PROBLEMEN DIE ZIJN VASTGESTELD TIJDENS DE KADESCHOUW 2015	41
TABEL 11. OVERZICHT VAN DE VOOR EEN FLYING SENSOR WAARNEEMBARE EN NIET-WAARNEEMBARE SCHADEBEELDEN	48
TABEL 12. VERANDERING VAN DE GEMIDDELDE NDVI-WAARDE TUSSEN JULI EN MEI VOOR VERSCHILLENDE VEGETATIES. BIJ NEGATIEVE WAARDES WAS DE NDVI IN JULI LAGER DAN IN MEI.54	
TABEL 13. VERSCHIL TUSSEN DE GEMETEN HOOGTE VAN DE GRONDREFERENTIEPUNTEN (IN METER +NAP) EN DE HOOGTE VAN HET FLYING SENSOR HOOGTEMODEL OP DE CORRESPONDERENDE LOCATIES OP 21 MEI 2015	70
TABEL 14. GEMIDDELDE HOOGTE VAN EEN VERHARD WEGVLAK (IN METER +NAP) VOOR DE DIGITALE HOOGTEMODELLEN OP VERSCHILLENDE MOMENTEN. IN JUTRIJP IS GEEN VERHARD WEGDEK AANWEZIG BINNEN HET PILOTGEBIED	71
TABEL 15. VERSCHILLEN TUSSEN DE EINDPRODUCTEN VAN DE FLYING SENSORS EN DE LASERSCANNER	77
TABEL 16. COÖRDINATEN (AMERSFOORT RD NIEUW) VAN GRONDREFERENTIEPUNTEN IN HET PILOTGEBIED BIJ ALLINGAWIER EN DE COÖRDINATEN VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIES IN DE ORTHOMOZAÏEK/DEM VAN 16 SEPTEMBER 2014 DIE WERD GEGEOREFEREERD MET BING-MAPS EN HET AHN	92
TABEL 17. VERSCHIL (IN METERS) TUSSEN DE COÖRDINATEN VAN DE GRONDREFERENTIEPUNTEN EN DE COÖRDINATEN VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIES IN DE ORTHOMOZAÏEK/DEM VAN 16 SEPTEMBER 2014 DIE WERD GEGEOREFEREERD MET BING-MAPS EN HET AHN	92
TABEL 18. COÖRDINATEN (AMERSFOORT RD NIEUW) VAN GRONDREFERENTIEPUNTEN IN HET PILOTGEBIED BIJ ALLINGAWIER EN DE COÖRDINATEN VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIES IN DE ORTHOMOZAÏEK/DEM VAN 16 SEPTEMBER 2014 DIE WERD GEGEOREFEREERD MET DGPS-PUNTEN	92
TABEL 19. VERSCHIL (IN METERS) TUSSEN DE COÖRDINATEN VAN DE GRONDREFERENTIEPUNTEN EN DE COÖRDINATEN VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIES IN DE ORTHOMOZAÏEK/DEM VAN 16 SEPTEMBER 2014 DIE WERD GEGEOREFEREERD MET DGPS-PUNTEN	93
TABEL 20. INSCHATTING NAUWKEURIGHEID Z-COÖRDINATEN VAN DE BEELDEN VAN 21 MEI 2015 GEMAAKT IN HET PILOTGEBIEDEN BIJ ALLINGAWIER. DE EENHEID IS IN METERS	93
TABEL 21. INSCHATTING NAUWKEURIGHEID Z-COÖRDINATEN VAN DE BEELDEN VAN 21 MEI 2015 GEMAAKT IN HET PILOTGEBIEDEN BIJ BAARD. DE EENHEID IS IN METERS	93
TABEL 22. INSCHATTING NAUWKEURIGHEID Z-COÖRDINATEN VAN DE BEELDEN VAN 21 MEI 2015 GEMAAKT IN HET PILOTGEBIEDEN BIJ JUTRIJP. DE EENHEID IS IN METERS	94

TABEL 23. INSCHATTING NAUWKEURIGHEID Z-COÖRDINATEN VAN DE BEELDEN VAN 21 MEI 2015 GEMAAKT IN HET PILOTGEBIEDEN BIJ NIJHUIZUM. DE EENHEID IS IN METERS	94
TABEL 24. INSCHATTING NAUWKEURIGHEID Z-COÖRDINATEN VAN DE BEELDEN VAN 21 MEI 2015 GEMAAKT IN HET PILOTGEBIEDEN BIJ OLDELAMER. DE EENHEID IS IN METERS	95
TABEL 25. COÖRDINATEN (AMERSFOORT RD NIEUW) VAN GRONDREFERENTIEPUNTEN IN HET PILOTGEBIED BIJ GOINGARIJP EN DE COÖRDINATEN VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIES IN DE ORTHOMOZAÏEK/DEM VAN 22 JULI 2015	95
TABEL 26. VERSCHIL (IN METERS) TUSSEN DE COÖRDINATEN VAN DE GRONDREFERENTIEPUNTEN EN DE COÖRDINATEN VAN DE CORRESPONDERENDE LOCATIES IN DE ORTHOMOZAÏEK/DEM VAN 22 JULI 2015	95

Voorwoord

Dit rapport beschrijft de opzet, resultaten en conclusies van een verkennend onderzoek naar de toepassing van Flying Sensors (drones) voor monitoring van regionale waterkeringen. Dit onderzoek is uitgevoerd in de periode september 2014 tot en met december 2015. Hiervoor zijn negen pilotgebieden bekeken en in totaal meer dan 25 Flying Sensor vluchten gemaakt. Ruwe gegevens zijn verder uitgewerkt tot hoogtekaarten, vegetatiekaarten en warmtekaarten.

Het onderzoek is mogelijk gemaakt door intensieve samenwerking tussen het Wetterskip Fryslân en de Provincie Fryslân. Daarnaast zijn er dwarsverbanden met het RAAK Smart Vision for UAV's project van de NHL (Noordelijke Hogeschool Leeuwarden).

De uitvoerder van dit project is HiView met FutureWater als core partner. Twee andere componenten van het onderzoek zijn uitgevoerd door Kavel10 (laseraltimetrie) en DroneView (videoverslag). Meer informatie over de bedrijven HiView, Kavel10 en Droneview is te vinden in Appendix 1.1.

De opdrachtnemer wil bij dezen de opdrachtgever danken voor de prettige en nuttige samenwerking. Met name de inzet, support en overleggen met dhr. Schaper, dhr. Bosma, dhr. Zijlstra, dhr. Visser en dhr. Ros van Wetterskip Fryslân en dhr. Van Buren van de Provincie Fryslân hebben geleid tot dit eindresultaat.

Samenvatting

In dit onderzoek is gekeken naar de mogelijkheden die Flying Sensors (drones) bieden bij kade-inspecties, zowel onder normale omstandigheden als onder zogenoemde calamiteiten. Onder de inspectie tijdens normale situaties valt de jaarlijkse kadeschouw, de hoogtetoets (die op dit moment eens in de zeven jaar wordt uitgevoerd op basis van het AHN) en de stabiliteitstoets. Onder inspectie bij calamiteiten valt de droogteschouw en bijvoorbeeld de muizenplaag.

Uit het onderzoek kwam naar voren dat de huidige generatie Flying Sensors niet de volledige kadeschouw kunnen vervangen omdat het totale inspectiegebied te groot is ten opzichte van de - op dit moment wettelijk toegestane - actieradius. De kracht van de huidige generatie Flying Sensors bij kadeschouw is vooral aanvullend en in beperkte mate vervangend voor huidige technieken. Toepassingen zijn vooral: (i) een gerichte inzet in specifieke gebieden waar er vermoedens bestaan van problemen, (ii) in gebieden waar er een noodzaak is tot zeer frequent monitoren, of (iii) in moeilijk toegankelijke gebieden. Indien wet- en regelgeving de actieradius-restrictie verruimt, kunnen Flying Sensors ook een gedeeltelijke vervanging van de huidige inspectiemethodes gaan vormen.

Dit project heeft aangetoond dat Flying Sensors de potentie hebben voor het uitvoeren van de hoogtetoets. De hoge resolutie en de flexibiliteit om de Flying Sensors op elk gewenst moment in te zetten, zijn grote verbeteringen ten opzichte van bestaande technieken gebaseerd op het AHN. Daarnaast geeft de Flying Sensor niet alleen de hoogte, maar integraal ook de vegetatietoestand en een hoge-resolutie zichtbaar beeld. De huidige wettelijke restrictie dat er maximaal 500 meter van een waarnemer gevlogen mag worden (dus actieradius van 1 kilometer), maakt wel dat de inzet van Flying Sensors economisch nog niet volledig kan concurreren met andere methoden.

Een toepassing die op dit moment al wel mogelijk is, is het in beeld brengen van de dalingssnelheid van kades. Dit kan gedaan worden door de kade gelijk na een revisietraject in te vliegen met een Flying Sensors of in te meten met een 3D-laserscanner. De nauwkeurigheid van de Flying Sensor hoogtebeelden valt nu gemiddeld nog net buiten de vereiste nauwkeurigheid van 5 cm (bij de hoogte waarop in dit project gevlogen is). De nauwkeurigheid van de 3D-laserscanner voldoet wel aan deze specificatie. Beide technieken hebben last van de vegetatie, maar dit kan ondervangen worden door in de winter te vliegen of wanneer er net gemaaid is.

De totale lengte van de kaden die bij droogte geïnspecteerd moeten worden beslaat, afhankelijk van de droogtesituatie, 40 tot 200 km. Door de wettelijk beperkte actieradius, ligt het monitoren van het gehele droogtegevoelige gebied tijdens droge periodes nog niet binnen de huidige mogelijkheden van Flying Sensors. Flying Sensors kunnen echter wel aanvullende informatie bieden op locaties waar door de rayonbeheerders tijdens de droogteschouw problemen zijn geconstateerd.

In het geval van een calamiteit, zoals (kans op) dijkdoorbraak en muizenplaag, kan ter plekke de schade in kaart gebracht worden met Flying Sensors. Het direct inzetbaar zijn, de mogelijkheid om in zichtbaar en in niet-zichtbaar licht beelden te verzamelen, en de inzet in moeilijk bereikbare gebieden, maken Flying Sensors uitermate geschikt voor inzet tijdens calamiteiten.

Naast de genoemde toepassingen is monitoring van vegetatiegroei in natuuroevers een toepassing die al mogelijk is met Flying Sensors. Daarnaast liggen er kansen voor de ontwikkeling van methodes voor kweldetectie met behulp van een thermische sensor, monitoring van

algenbloei, monstername met Flying Sensors en puntinspectie i.v.m. het vastleggen van milieudelicten.

1. Introductie

1.1. Huidige dijkmonitoringpraktijk

Wetterskip Fryslân beheert ongeveer 3.300 km aan regionale waterkeringen. Om de toestand hiervan te monitoren worden deze tijdens de jaarlijkse kadeschouw gedurende de maanden januari en februari te voet gecontroleerd door de rayonbeheerders¹. Naast de jaarlijkse kadeschouw vindt er tijdens droge periodes, bij een neerslagtekort groter dan 150 mm, een extra kadeschouw plaats waarbij de zeer droogtegevoelige kades worden geïnspecteerd op droogtescheuren en verzakkingen. Bij een neerslagtekort van meer dan 200 mm worden alle droogtegevoelige kades geïnspecteerd.

De regionale kades worden niet alleen visueel in het veld geïnspecteerd, maar ook op basis van digitale informatie. Zo heeft Wetterskip Fryslân eind 2014 de hoogtetoets afgerond. Dit houdt in dat de kadehoogtes volgens het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) uit 2008 zijn vergeleken met de toetshoogte (hoogte waaraan de kades moeten voldoen) en dat ongeveer dertigduizend dwarsprofielen beschreven zijn in termen van kruinbreedte, taludhoogte, etc. Naar verwachting wordt in najaar 2015 ook de stabiliteitstoets afgerond. Voor de stabiliteitstoets worden de kades beschreven aan de hand van informatie over de ondergrond en maatgevende boezemwaterstanden.

1.2. Dijkmonitoring met nieuwe technologie

Het uitvoeren van de jaarlijkse kadeschouw is arbeidsintensief werk en resulteert slechts in momentopnamen. Daarom is Wetterskip Fryslân op zoek naar methodes om kades systematisch te inspecteren met nieuwe technologie. Ook is het Wetterskip Fryslân geïnteresseerd in methodes waarmee in het geval van calamiteiten, zoals droogtesituaties, snel informatie beschikbaar gemaakt kan worden die dient ter aanvulling van de visuele kade-inspectie. Eén van die methodes is het inzetten van Flying Sensors. Met behulp van Flying Sensors is het mogelijk om met een verhoogde frequentie de toestand van de kades meer gedetailleerd vast te leggen dan wanneer dit met de hand zou gebeuren. Dit maakt ook de vergelijking tussen de toestand van de kades op verschillende momenten van het jaar mogelijk. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om bepaalde aspecten van de kade in beeld te brengen die met het blote oog niet te zien zijn, maar die wel iets zeggen over de toestand van de kade. Beelden in het nabije infrarood (NIR) zeggen bijvoorbeeld iets over de vegetatietoestand en met thermische sensoren kan het watergehalte van de kades in kaart worden gebracht om te kijken of een kade plaatselijk te droog of te nat is. Een andere methode die in dit onderzoek toegepast is om de kades te inspecteren is laseraltimetrie.

Wetterskip Fryslân en de Provincie Fryslân hebben nog geen ervaring met kade-inspectie met behulp van Flying Sensors of laseraltimetrie. Daarom is dit project een pilot met als doel om ervaring op te doen met het inspecteren van kades met behulp van Flying Sensors en laseraltimetrie tijdens normale situaties en calamiteiten. Daarnaast is het doel om de verkregen data zoveel mogelijk geautomatiseerd te verwerken. Door de kades gedetailleerd in kaart te brengen, kan worden geanalyseerd welke kades kwetsbaar en welke kades stabiel zijn. Op die manier kan er door de rayonbeheerder besloten worden of en waar er gericht of juist minder

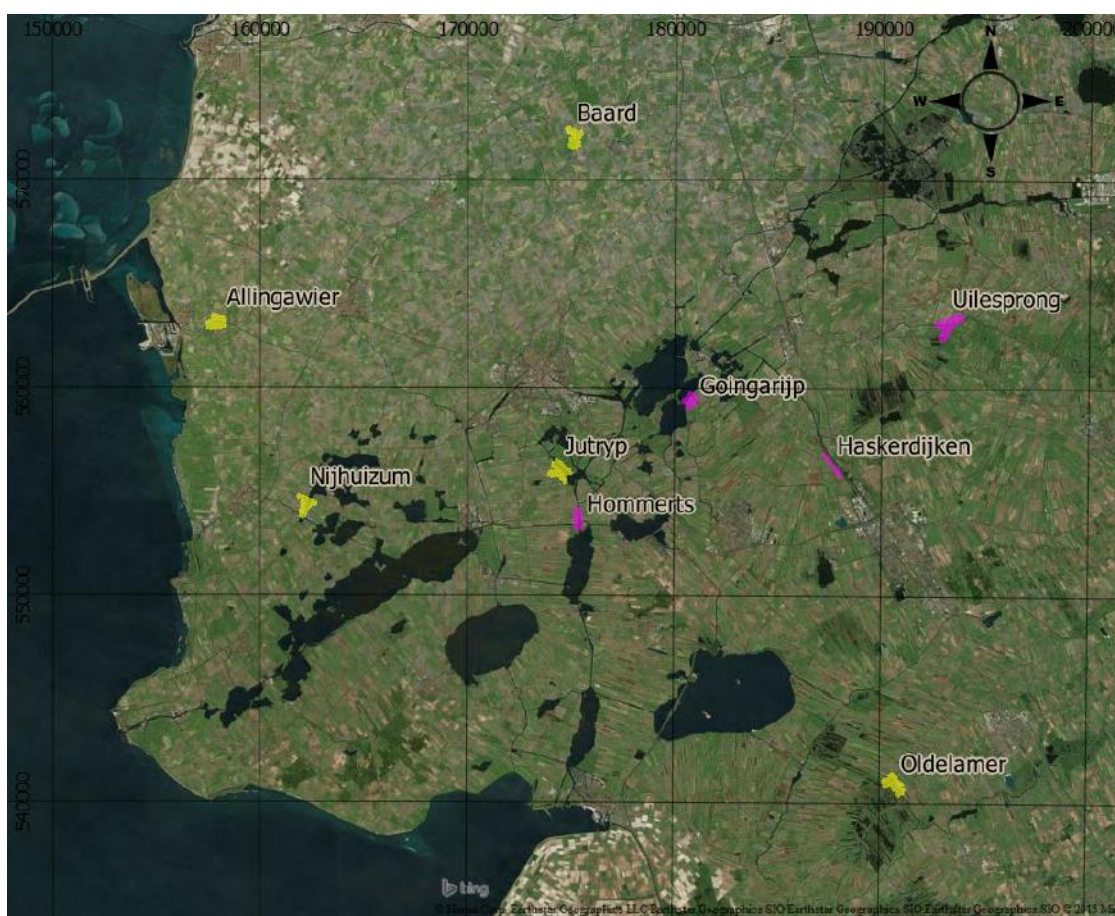
¹ <http://www.fryslanleefmetwater.nl/sjablonen/39/infotype/news/newsitem/view.asp?objectID=32660&rid=26699&page=3>

frequent moet worden geïnspecteerd. Deze informatie helpt daarom de rayonbeheerders bij het beheer en onderhoud van de kades.

In dit rapport wordt beschreven hoe voor de verschillende studiegebieden beelden voor kademonitoring verkregen zijn met behulp van een Flying Sensor en 3D-laserscanner.

2. Pilotgebieden

In totaal zijn er negen pilotgebieden geselecteerd waar onderzocht is hoe Flying Sensors kunnen worden ingezet bij kade-inspectie. Door Wetterskip Fryslân zijn vijf pilotgebieden geselecteerd (zie geel gearceerde gebieden Figuur 1). De pilotgebieden bij Oldelamer (veen op zand), Jutryp (veen), Nijhuizum (klei op veen) en Allingawier (scheiding veen/klei) liggen allen in veengebieden. Het monitoren van deze gebieden is van belang, omdat veenkades in droge periodes gevoeliger zijn voor schade dan kades in kleigebieden. Ter referentie is er nabij Baard ook een pilotgebied gekozen dat in een kleigebied ligt. De vier pilotgebieden die door de Provincie Fryslân zijn geselecteerd (zie roze gearceerde gebieden Figuur 1), liggen ook allen in veengebied en zijn kritische locaties. Zo is de kade bij Goingarijp een steile kade die een diepe polder beschermt en is de kade bij Haskerdijken een cruciale kade voor de bescherming van het achterliggende industriegebied. Tabel 1 geeft een overzicht van de metingen die door HiView, Droneview en Kavel10 in de verschillende pilotgebieden uitgevoerd zijn.



Figuur 1. Overzicht van de studiegebieden in het zuidwesten en midden van Friesland. In de geel gearceerde gebieden is op vier momenten gevlogen voor het Wetterskip Fryslân. In de roze gearceerde gebieden is op twee momenten gevlogen voor de Provincie Fryslân. Coördinaatstelsel is Amersfoort RD Nieuw. Bij figuren waarop geen noordpijl is afgebeeld, ligt het noorden boven.

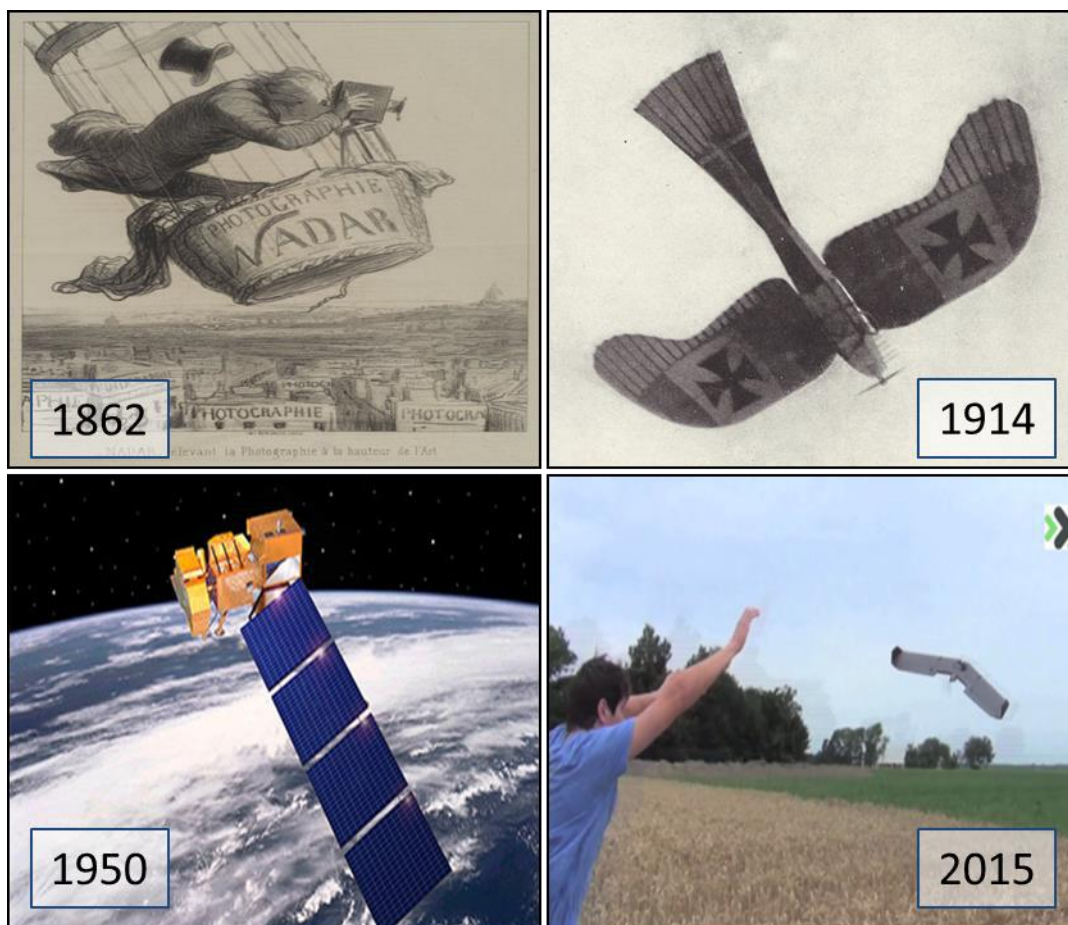
Tabel 1. Overzicht van uitgevoerde werkzaamheden per pilotgebied

Opdrachtgever	Locatie	Datum	Uitvoerder & Werkzaamheden
Wetterskip Fryslân	Allingawier Baard Jutrijp Nijhuizum Oldelamer	16 september 2014 21 mei 2015 21 juli 2015 1 oktober 2015	HiView: NIR luchtfoto's
Provincie Fryslân	Goingarjip Haskerdijken Hommerts Uilesprong	22 juli 2015	HiView: - NIR en RGB luchtfoto's Kavel10: - Inmeten grondreferentiepunten - Laserscan kadelichaam Droneview - Luchtvideo-opnames - Haskerdijken: RGB luchtfoto's
		2 oktober 2015	HiView: - NIR Luchtfoto's Kavel10: - Inmeten grondreferentiepunten - Laserscan kadelichaam Droneview - Luchtvideo-opnames - Haskerdijken: RGB luchtfoto's

3. Flying Sensors

3.1. Aardobservatie

Flying Sensors worden wel gezien als de derde generatie aardobservatiemethoden. Flying Sensors worden soms ook aangeduid als drones, UAV's (Unmanned Aerial Vehicles) of RPA's (Remotely Piloted Aircrafts). Tot 1990 werd de meeste aardobservatie uitgevoerd met bemande vliegtuigen. Door de extreem hoge kosten werd dit maar beperkt toegepast. Als de tweede generatie monitoring wordt verwezen naar satellieten. Hoewel nog steeds uitermate nuttig in gebruik en hoewel er talloze toepassingen zijn, bestaan er twee grote nadelen aan satelliet-aardobservatie. Ten eerste is het moment van overvliegen bij satellieten niet te bepalen en ontbreekt er dus vaak informatie die op een bepaald moment nodig is. Tweede grote nadeel van satellieten is de beperking door wolken waardoor het aantal beschikbare beelden te laag kan zijn. Het gebruik van Flying Sensors neemt daardoor een zeer grote vlucht sinds ongeveer 2010.



Figuur 2. Ontwikkeling van aardobservatie.

Flying Sensors kunnen worden gebruikt om het aardoppervlak te monitoren op een ultrahoge resolutie (tot 1 cm), op elk gewenst moment en ook buiten het zichtbare licht. Een Flying Sensor bestaat uit een sensor die in de lucht gehouden wordt door een platform met een elektromotor. Een Flying Sensor vliegt volledig autonoom binnen het door de piloot opgegeven gebied, hoogte, overlap van beelden en resolutie. Een Flying Sensor onderscheidt zich van multicopters die vooral ingezet worden voor het waarnemen van een enkel object (windmolen, gebouw, festival, demonstratie). Flying Sensors monitoren het land- of wateroppervlak en zijn flexibel in tijdstip van

beeldopnamen, de waarnemingen binnen of buiten het zichtbare licht en de hoogte en gebiedsoppervlakte.

3.2. Toepassing Flying Sensors

Flying Sensors zijn geschikt voor verschillende toepassingen die gebaseerd zijn op twee technieken: (i) reflectiemonitoring en (ii) detail hoogtekaarten. De kracht van Flying Sensors bij reflectiemonitoring is dat er niet alleen in het zichtbare licht opnames gemaakt kunnen worden, maar ook in het voor vegetatie kenmerkende infrarood. Detail hoogtekaarten kunnen gegenereerd worden uit overlappende luchtfoto's en resoluties van 1 cm kunnen worden behaald. Meest gangbaar zijn resoluties tussen 3-10 cm.

Enkele voorbeelden van praktische toepassingen van Flying Sensors zijn:

- Gewasmonitoring voor vroegtijdige opsporing van droogte, nutriëntentekorten of ziekten en plagen
- Monitoren van natuurgebieden voor vegetatie-inventarisatie
- Bosgebied-monitoring voor opsporen van zieke of zwakke bomen
- Bos- en natuurbranddetectie en preventie
- Aardverschuivingen en snelheid van de verschuiving
- Dijkmonitoring
- Oever- en taludmonitoring
- Beweging van gletsjers

3.3. Van waarneming tot product

Sinds enkele jaren zijn Flying Sensors op de markt verkrijgbaar in prijsklassen van honderd tot tienduizenden euro's. De uitdaging is daarom verschoven van het verkrijgen van wat "mooie plaatjes", naar het omzetten van deze beelden tot nuttige eindproducten. Een tweede belangrijke component van Flying Sensors is het veilig vliegen en het voldoen aan de wettelijke regelgeving. Momenteel is de regelgeving zeer streng en is er een veelheid aan certificaten, examens en zelfs medische keuringen nodig om aan de wettelijke normen te voldoen, zoals vastgesteld door de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT).

Om te komen tot eindproducten van Flying Sensors kunnen de volgende fases worden onderscheiden:

- Vluchtvoorbereiding
- Voorbereiding in veld
- Uitvoeren vluchten
- Georefereren en mozaïeken
- Genereren eindresultaat
- Advies op basis van product

<p>Vluchtvoorbereiding</p> <p>Er moet besloten worden waar welke vluchten worden uitgevoerd. Technische details, zoals welke sensor, resolutie, hoogte, en aantal vluchten, worden vastgesteld. Er wordt gekeken naar benodigde veiligheidsmaatregelen en naar aanwezigheid van obstakels, zoals mensen, etc. Ook moeten vergunningen aangevraagd worden en de geplande vluchten aangemeld worden (notams).</p>	
<p>Vorbereiding in veld</p> <p>Veiligheid ter plekke wordt gecontroleerd. Vluchtplan wordt gemaakt. Base station wordt opgezet. Laatste check tussen piloot en waarnemer.</p>	
<p>Uitvoeren vluchten</p> <p>De Flying Sensor wordt gelanceerd. De auto-pilot voert de vlucht uit. Piloot en waarnemer blijven zicht houden op Flying Sensor en kunnen elk moment ingrijpen en de vlucht afbreken indien nodig. Na landing worden de gegevens direct overgezet op de computer.</p>	
<p>Georefereren en mozaïeken</p> <p>De beelden worden aan elkaar gemozaïeëkt (gestitched) en ge-georeferereerd zodat er één GIS-beeld ontstaat.</p>	
<p>Genereren eindresultaat</p> <p>Eindresultaten kunnen bestaan uit "basis"-gegevens zoals orthomozaïek, Digital Elevation Model (DEM), en Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Ook meer geavanceerde resultaten kunnen berekend worden: hoogtetoets, dijksterkte, vegetatietype, beregeningsbehoefte, gletsjersmelt, bos- en natuurbrandgevoeligheid, etc.</p>	

Advies op basis van product

De eindresultaten worden gebruikt voor advies over een veelheid van toepassingen. Een kleine greep: natuurmonitoring, dijkmonitoring, gletsjersmelt, natuurbrandgevaar, irrigatie-advies, oogstadadvies.

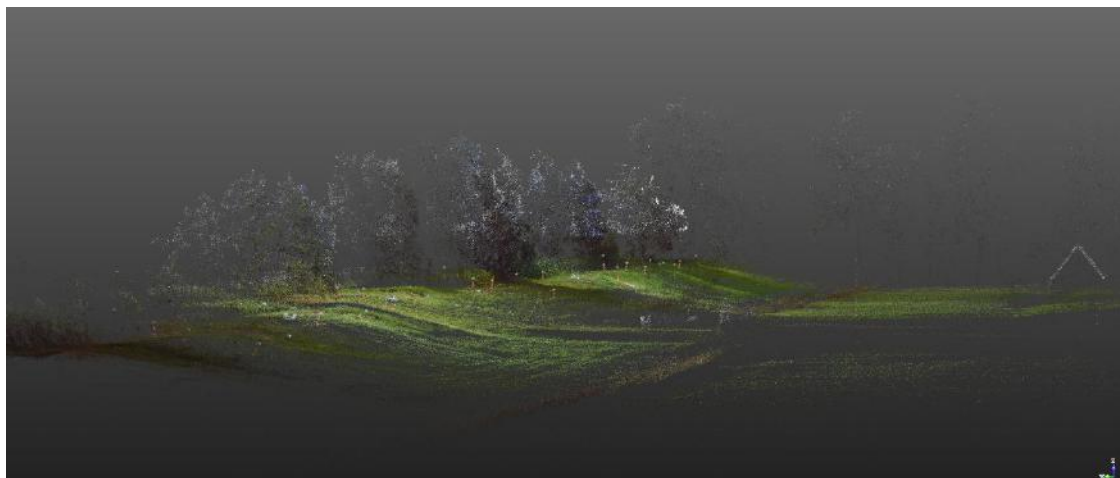


4.3D-Laserscanning²

4.1. Introductie

Met een laserscanner wordt een point cloud (puntenwolk) gemaakt van de oppervlakte van een object, bijvoorbeeld een kade (zie Figuur 3). Het meten met een laserscanner en de scandata die hieruit komen hebben meerdere voordelen ten opzichte van het traditioneel landmeten:

- Een point cloud kan direct tot 3d-model verwerkt worden
- De point cloud kan worden geëxporteerd naar verschillende teken- en verwerkingsprogramma's. Hierdoor is het mogelijk om objectvolumes en andere gegevens uit de point cloud te halen.
- Met behulp van de point cloud kunnen achteraf metingen aan het object worden gedaan zonder dat naar de betreffende locatie hoeft worden teruggekeerd



Figuur 3. Point cloud van de kade in het pilotgebied bij Haskerdijken.

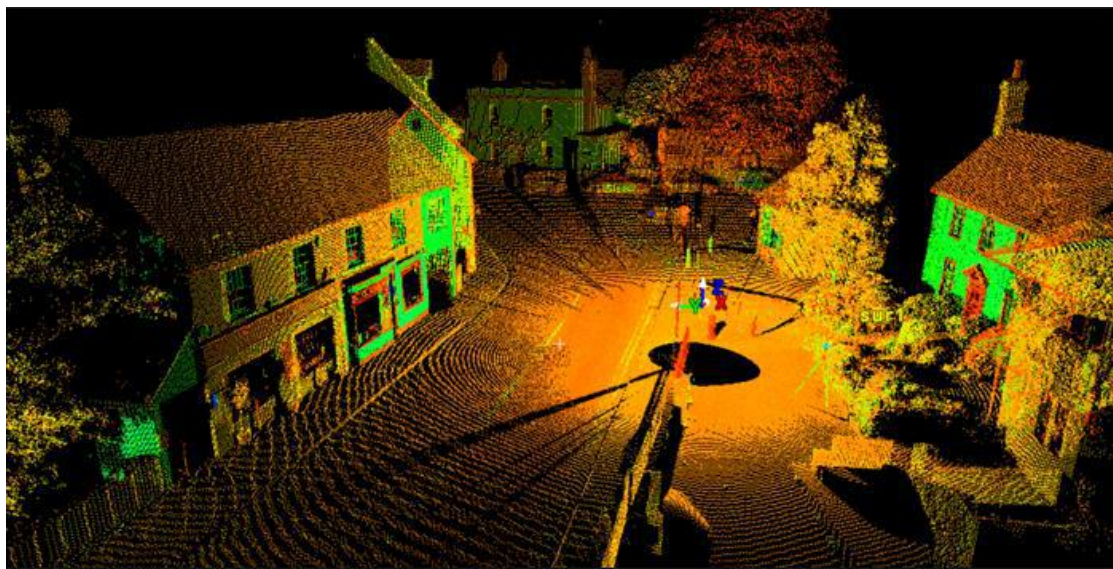
4.2. Toepassingsgebieden laserscanning

Laserscanning is uitermate geschikt om metingen uit te voeren op locaties waarvoor een grote behoefte aan gedetailleerde informatie bestaat. Tevens zijn de gegevens goed te gebruiken voor onderzoek naar bijvoorbeeld verzakkingen of veranderingen die op het oog niet te onderscheiden zijn.

Enkele voorbeelden van mogelijke toepassingen van laserscanning zijn (zie Figuur 4):

- Aardbeving-schade
- Renovaties van complexe structuren
- Detailonderzoeken kunstwerken (bruggen, waterkeringen)
- Deformatiemetingen
- Gedetailleerde hoogte- en volumemetingen

² Dit hoofdstuk is geschreven door Kavel10.



Figuur 4. Voorbeeld van 3D-laserscanning.

5. Beeldverwerking Flying Sensor luchtfoto's

5.1. Ruwe beelden

Per pilotgebied en per vlucht zijn er tussen de 100 en 270 opnames gemaakt met de Flying Sensor. De hoogte waarop werd gevlogen was standaard 130 m. Dit levert een grondresolutie van 5 cm op. In Haskerdijken is er op 100 m hoogte gevlogen. Dit resulteerde in een grondresolutie van 3 cm. Om een idee te krijgen van het detailniveau van de foto's zijn in Figuur 5 en Figuur 6 een aantal voorbeelden weergegeven.



Figuur 5. Voorbeelden van volledige, onbewerkte luchtfoto's, gemaakt vanuit de Flying Sensor. Boven luchtfoto's in NIR (links Oldelamer, rechts Allingawier), beneden luchtfoto's in RGB (Goingarip).

5.2. Grondreferentiepunten

Met behulp van de locatiegegevens die zijn opgeslagen tijdens de vlucht kunnen alle individuele foto's geometrisch gecorrigeerd (orthorectificatie) en over elkaar heen gelegd worden. Dit kan in principe zonder het gebruik van grondreferentiepunten (ook wel Ground Control Points genoemd). In eerste instantie zijn Bing maps (vergelijkbaar met Google maps) en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) uit 2008 gebruikt om grondreferentiepunten te verkrijgen. De gekozen grondreferentiepunten moeten op de luchtfoto's te herkennen zijn (zie Appendix 1.2.2). Om de nauwkeurigheid van de beelden te verhogen, zijn er in februari 2015 in de pilotgebieden bij Allingawier, Baard, Jutrijp, Nijhuizum en Oldelamer met behulp van een dGPS vaste grondreferentiepunten ingemeten door een landmeter van Wetterskip Fryslân (zie Appendix 1.2.3). In de pilotgebieden bij Goingarip, Haskerdijken, Hommerts en Uilesprong zijn op de vluchtdagen grondreferentiepunten (ook wel targets of vliegschijven) neergelegd. Het inmeten

van de GCP's is door Kavel10 uitgevoerd met dGPS apparatuur die tot op de centimeter nauwkeurig de grondreferentiepunten in het Nederlandse Rijksdriehoekstelsel inmeet (zie Figuur 7).



Figuur 6. Voorbeelden van uitsneden van de onbewerkte foto's om de mate van detail aan te geven, met de klok mee: koeien in de wei, visfuis, aangemeerde boten, fietsers die de pont verlaten.



Figuur 7. Voorbeelden van het inmeten van een grondreferentiepunt met dGPS.

Voor het pilotgebied bij Allingawier werd een schatting gemaakt van de mate waarin de nauwkeurigheid van de beelden van 16 september 2014 verbeterde door het gebruik van vaste dGPS-grondreferentiepunten. Voor het georefereren van de beelden met behulp van Bing-maps en het AHN, werden 10 grondreferentiepunten gebruikt. Voor het georefereren van de beelden met behulp van de dGPS-punten, werden 7 grondreferentiepunten gebruikt.

De nauwkeurigheid werd geschat met behulp van 6 dGPS-grondreferentiepunten en is gegeven in Tabel 2. Hoewel het aantal grondreferentiepunten dat werd gebruikt om de beelden te georefereren verminderde van 10 naar 7, is in de tabel te zien dat de nauwkeurigheid in de x-richting in dit pilotgebied verbetert van 1,11 m naar 0,06 m door het gebruik van dGPS-grondreferentiepunten. In de y-richting verbetert de nauwkeurigheid van 0,64 m naar 0,06 m en in de z-richting verbetert de nauwkeurigheid van 0,28 m naar 0,08 m. Deze steekproef laat zien dat de nauwkeurigheid van de beelden aanzienlijk verbetert bij het gebruik van dGPS-grondreferentiepunten. Voor de gedetailleerde berekeningen, zie Appendix 1.3. Een kwalitatieve beschrijving van de verschillen tussen de hoogtebeelden met Bing-maps en AHN als referentie en de hoogtebeelden met dGPS-punten als referentie staat in Appendix 1.4.

Tabel 2. Inschatting van verbetering nauwkeurigheid door gebruik van vaste dGPS-grondreferentiepunten voor het georefereren van de beelden van 16 september 2014 in het pilotgebied bij Allingawier

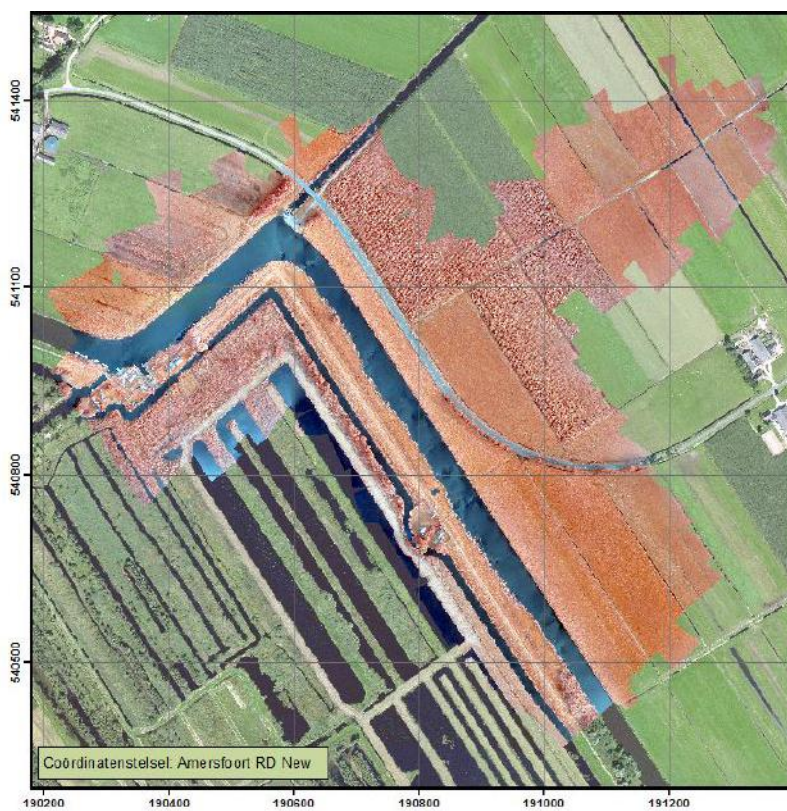
	Gemiddeld absoluut verschil x-richting (m)	Gemiddeld absoluut verschil y-richting (m)	Gemiddeld absoluut verschil z-richting (m)
Referentie: Bing maps + AHN	1,11	0,64	0,28
Referentie: dGPS	0,06	0,06	0,08

5.3. Orthomozaïek en digitaal hoogtemodel

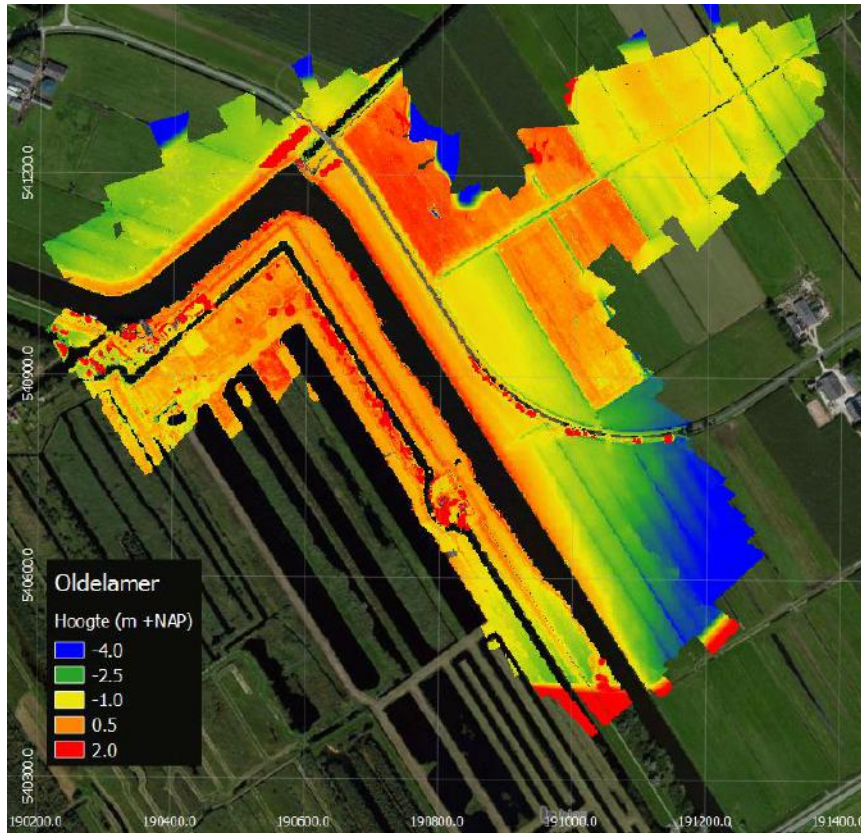
Het proces van het over elkaar heen leggen en orthorectificeren van de luchtfoto's noemt men ook wel 'stitchen'. Door de foto's te stitchen ontstaat een gegeorefeerd totaalbeeld, dat ook wel orthomozaïek wordt genoemd (zie Figuur 8 en Figuur 9). Het woord 'ortho' staat voor 'orthogonaal' of 'loodrecht naar beneden' en 'mozaïek' staat voor 'samenstelling van meerdere beelden tot één beeld'. Door de overlap van de luchtfoto's, zowel in de lengte- als in de breedterichting, ontstaat een stereobeeld, waaruit een hoogtebeeld berekend kan worden. In theorie zijn twee beelden hiervoor genoeg, maar om de nauwkeurigheid te vergoten is er een overlap van minstens vier beelden gebruikt. Dit hoogtebeeld wordt ook wel een Digital Elevation Model (afkorting DEM) genoemd (zie Figuur 10).



Figuur 8. Gemozaïekt beeld van het pilotgebied bij Oldelamer. In totaal zijn voor het verkrijgen van deze orthomosaïek 108 RGB luchtfoto's genomen op 16 september 2014.



Figuur 9. Gemozaïekt beeld van het studiegebied bij Oldelamer. In totaal zijn voor het verkrijgen van deze orthomosaïek 186 NIR luchtfoto's genomen op 16 september 2014.



Figuur 10. DEM van het studiegebied bij Oldelamer. In totaal zijn voor het verkrijgen van dit hoogtebeeld 186 NIR luchtfoto's genomen op 16 september 2014. Coördinaatstelsel: Amersfoort RD Nieuw.

6. Kostenoverzicht

6.1. Fixed Wing Flying Sensor

Een inschatting van de economische kosten en baten van de inzet van Flying Sensors ten opzichte van visuele inspectie tijdens de jaarlijkse kadeschouw is te zien in Tabel 3. De Flying Sensor (toekomst) gaat uit van de huidige stand van de techniek, maar zonder de wettelijke restrictie van maximaal 500 meter afstand tot de waarnemer (dus actieradius van 1 kilometer).

Uitgangspunten van de kosten-baten analyse zijn:

- Een inspecteur kan 6 uur per dag over kade lopen (2 uur voor reizen)
- Snelheid inspecteur 3 km/uur
- Flying Sensor mag wettelijk maximaal 500 meter van waarnemer af. Dus twee richtingen is 1 km.
- Flying Sensor brengt de kade aan beide kanten van het water in beeld. Dus per vlucht 0,5*2*2 is 2 km
- Maximaal 8 vluchten per dag
- Kosten GCPs (Ground Control Point, zie Hoofdstuk 5.2) niet meegenomen; hoeft maar éénmalig.
- Flying Sensor toekomst gaat ervan uit dat de wettelijke beperking van 500 meter wordt afgeschaft. De huidige technische mogelijkheid is rond de 40 km per vlucht en 4 vluchten per dag.

Tabel 3. Kosten-baten analyse van de inzet van Flying Sensors ten opzichte van individuele visuele kadeschouw

	Visueel	Flying Sensor (nu)	Flying Sensor (toekomst)
OPNAMEN			
kade per dag (km)	18	16	160
kosten per dag (€)	600	1000	1000
kosten per km kade (€)	33.33	62.50	6.25
VERWERKEN			
per dag opname (€)	300	3000	6000
per km kade (€)	16.67	187.50	37.50
TOTALE KOSTEN (€/km)	50.00	250.00	43.75
RESULTAAT			
nauwkeurigheid	kwalitatieve info	kwantitatief	kwantitatief
vastlegging	GIS, aantekeningen	GIS	GIS

6.2. Multirotor Flying Sensor

De kosten van de beeldopnamen met de multirotor zijn aangeleverd door Droneview en zijn gespecificeerd in Tabel 4. Kosten zijn voor een beperkte lengte van een kadetraject.

Tabel 4. Kostenoverzicht beeldopname Haskerdijken met een multirotor (bron: Droneview)

Hoeveelheid	Beschrijving	Prijs per eenheid	BTW	Bedrag
2	luchtkarten inclusief vliegplan etc.	4 uur x € 289	21%	€ 1156,00
6	2 luchtkarten verwerken tot orthofotomozaïeken	6 uur x € 70	21%	€ 420,00
Subtotaal				€ 1576
BTW (21%)				€ 330,96
Totaal				€ 1906,00

Bovenstaande prijs is exclusief reiskosten en verwerken tot een adviesrapport.

6.3. 3D-Laserscanning

De kosten van de 3D-laserscan zijn aangeleverd door Kavel10 en zijn gespecificeerd in Tabel 5. De hoogte van de kosten is onderhevig aan verschillende variabelen.

Tabel 5. Kostenoverzicht 3D-laserscanning op meerdere locaties (bron: Kavel10)

3D-Laserscanning

SCANDAG 1					
Datum	Uren	Kosten uren	Actie	Materieel	Opmerkingen
	4 €	200,00	Vorbereiding		
22-7-2015	16 €	1.040,00	Metten op locatie	GPS, TS, Laserscanner	2 man 8 uur
23-7-2015	16 €	1.040,00	Metten op locatie	GPS, TS, Laserscanner	2 man 8 uur
	4 €	200,00	Nabewerking ruwe data		
	4 €	200,00	Nabewerking gegevens		
	44 €	2.680,00			
SCANDAG 2					
Datum	Uren	Kosten uren	Actie	Materieel	Opmerkingen
	4 €	200,00	Vorbereiding		
2-10-2015	16 €	1.040,00	Metten op locatie	GPS, TS, Laserscanner	2 man 8 uur
3-10-2015	16 €	1.040,00	Metten op locatie	GPS, TS, Laserscanner	2 man 8 uur
	4 €	200,00	Nabewerking ruwe data		
	4 €	200,00	Nabewerking gegevens		
	44 €	2.680,00			
Totaal:	88 Uren	€ 5.360,00	Kosten		

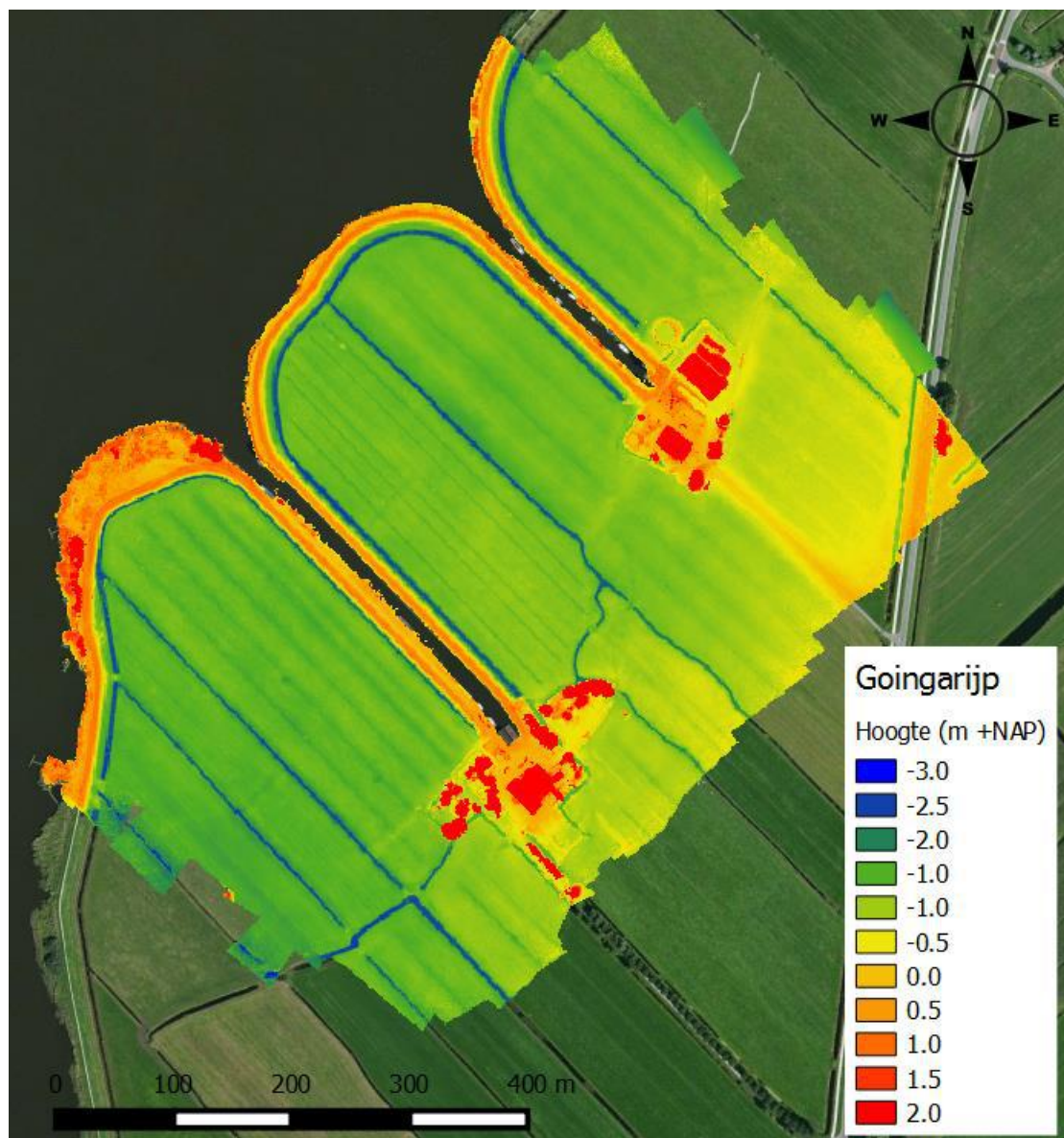
GPS coördinaten uitzetten

VLUCHTDAG 1					
Datum	Uren	Kosten uren	Actie	Materiaal	Opmerkingen
22-7-2015	8 €	520,00	Inmeten GPS coördinaten voor Drone	GPS, targets	
VLUCHTDAG 2					
Datum	Uren	Kosten uren	Actie	Materiaal	Opmerkingen
2-10-2015	8 €	520,00	Inmeten GPS coördinaten voor Drone	GPS, targets	
Totaal:	8 Uren	€ 1.040,00	Kosten		

7. Bepalen kadehoogte

7.1. Resolutie en nauwkeurigheid

De Flying Sensor hoogtemodellen kunnen gebruikt worden voor het bepalen van de huidige kadehoogte ten opzichte van het NAP. De resolutie van de hoogtemodellen verkregen uit de Flying Sensors is geschaald naar 10 bij 10 cm voor alle pilotgebieden, behalve voor Haskerdijken waar de resolutie 6 bij 6 cm is. De hoogtenauwkeurigheid is ongeveer 6-8 cm (zie Hoofdstuk 5.2, Appendix 1.3.1, Appendix 1.3.2 en Appendix 1.3.3). In Figuur 11 is in één oogopslag te zien dat de kades hoger liggen dan het achterliggende land.



Figuur 11. DEM van het studiegebied bij Goingarijp. In totaal zijn voor het verkrijgen van dit hoogtebeeld 151 luchtfoto's genomen op 2 oktober 2015.

7.2. Vastleggen kadehoogte na revisietraject

Op dit moment kunnen de eigenschappen van een opgehoogde kade pas ingemeten worden wanneer er een nieuwe versie van het AHN beschikbaar is. Dit wordt door het Wetterskip Fryslân niet als een probleem ervaren en er worden daarom geen landmeters ingezet om de kade al eerder manueel in te meten. Voor het inmeten van een kadetraject nemen de landmeters om de zoveel meter een dwarsprofiel en een lengteprofiel (uit het DEM) en leveren dit aan bij de afdeling gegevensbeheer.

Om de dalingssnelheid van kades in beeld te brengen, zou de kade gelijk na een revisietraject ingevlogen kunnen worden met een Flying Sensors of ingemeten worden met een 3D-laserscanner. Bij revisieprojecten van een kade wil je de aanleghoogte met een nauwkeurigheid van 5 cm kennen, of eigenlijk net zo nauwkeurig als met manueel meten. De nauwkeurigheid van de Flying Sensor hoogtebeelden valt – bij een vlieghoogte > 100 m - gemiddeld nu nog net buiten deze range. De nauwkeurigheid van de 3D-laserscanner voldoet wel aan deze specificatie.

7.3. Hoogtetoets

De hoogtetoets, zoals beschreven in de inleiding, is eind 2014 door het Wetterskip Fryslân afgerond. Deze hoogtetoets is gebaseerd op de hoogte-informatie uit het AHN, een landelijk dekkend hoogtemodel dat eens in de 7 jaar vernieuwd wordt. De hoogte wordt gemeten met laseraltimetrie; een techniek waarbij een vliegtuig of helikopter met een laserstraal het aardoppervlak aftast. De meting van de looptijd van de laserreflectie en van de stand en positie van het vliegtuig resulteren samen in een heel nauwkeurige meting van de hoogte. Voor heel Nederland bevat het AHN gemiddeld 8 hoogtemetingen per vierkante meter (dus gemiddeld 2 metingen per 0,5 m²)³. Het Wetterskip Fryslân heeft ervoor gekozen om de gemiddelde waarde van de puntenwolk te gebruiken. De hoogtetoets op basis van de AHN is dus ook gebaseerd op de gemiddelde hoogte van een 0,5 x 0,5 m gridcel. Er kan ook gekozen worden voor de minimumwaarde van de puntenwolk, maar dat zou voor het talud van de kade te lage waarden opleveren. Voor de kruin is een gemiddelde waarde voor een grid van 0,5 x 0,5 m als acceptabel beschouwd. Voor het talud zou een resolutie van 10 bij 10 cm wel toegevoegde waarde kunnen hebben. Het voordeel van het AHN is dat het voor de waterschappen gratis beschikbaar is (de kosten worden gedragen door de rijksoverheid). Een alternatief product zou dus een betere resolutie en minstens dezelfde nauwkeurigheid moeten leveren als het AHN.

Wanneer gedetailleerde informatie over een bepaald kadetraject nodig is, kan door het Wetterskip Fryslân ook de eigen landmeetploeg op pad gestuurd worden om bijvoorbeeld dwarsprofielen in te meten. De informatie is dan binnen een week beschikbaar en de metingen kunnen ook bij vorst en harde wind gedaan worden. Het regelen van zo'n interne opdracht met bewezen techniek is (in ieder geval voor het gevoel) directer dan wanneer er eerst een offerte uitgeschreven moet worden, een geschikt moment gevonden moet worden om te vliegen en te wachten op de bewerking van de beelden. Dit werd door het Wetterskip Fryslân genoemd als een belangrijk bezwaar/drempel voor het inzetten van Flying Sensors (onbekend maakt onbemind).

Om de meerwaarde van Flying Sensors bij kade-inspectie te onderzoeken, is de belangrijkste component van de hoogtetoets voor de pilotgebieden opnieuw uitgevoerd met de Flying Sensor informatie. Er zijn op vier verschillende momenten hoogtemodellen verkregen met een Flying Sensor (zie Tabel 1). In de zomermaanden is er op veel locaties hoge vegetatie op de kades

³ <http://www.ahn.nl/pagina/het-ahn/het-ahn.html>

aanwezig, waardoor de maaiveldhoogte mogelijk overschat wordt. Een correctiefactor aan de hand van de vegetatiebeelden kan mogelijk in de toekomst gebruikt worden voor een correctie hiervan. Een andere optie zou zijn om in de wintermaanden te vliegen (het seizoen met de minste vegetatiebedekking) of na een maaibeurt. Voor het huidige onderzoek is ervoor gekozen om per pilotgebied de minimale waarde te nemen van alle Flying Sensor hoogtemodellen (verkregen in september 2014, mei 2015, juli 2015 en oktober 2015) en het resulterende hoogtemodel te gebruiken voor het uitvoeren van de hoogtetoets.

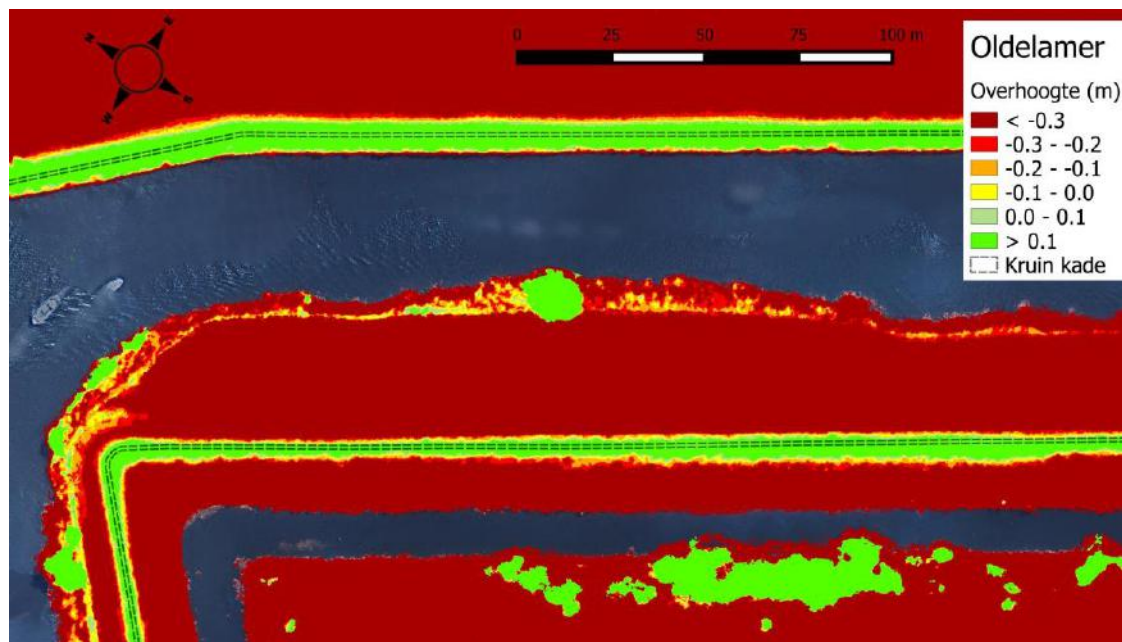
De belangrijkste component van de hoogtetoets is het vergelijken van de hoogte van een kade met de toetshoogte (hoogte waaraan de kade moet voldoen). Het verschil tussen de toetshoogte en de hoogte van de kade wordt de overhoogte genoemd. Bij het uitvoeren van deze vergelijking wordt de overhoogte ingedeeld in acht verschillende klassen (zie Tabel 6). Voor twee pilotgebieden (Oldelamer en Jutrijp) is de classificatie van de overhoogte op basis van het AHN vergeleken met de classificatie van de overhoogte op basis van de digitale hoogtemodellen die zijn verkregen met de Flying Sensor. In het pilotgebied bij Oldelamer voldoet de kade op basis van het AHN aan de toetshoogte, terwijl de kade in het pilotgebied bij Jutrijp op basis van het AHN niet aan de toetshoogte voldoet.

Tabel 6. Classificatiecriteria van de overhoogte voor de hoogtetoets

Classificatie	Betekenis
NOK $\leq -0,3$	Niet Oké, kade meer dan 30 cm lager dan de toetshoogte
NOK $> -0,3 \leq -0,2$	Niet Oké, kade tussen 20 en 30 cm lager dan de toetshoogte
NOK $> -0,2 \leq -0,1$	Niet Oké, kade tussen 10 en 20 cm lager dan de toetshoogte
NOK $> -0,1 \leq -0,0$	Niet Oké, kade tussen 0 en 10 cm lager dan de toetshoogte
OK $> 0,0 \leq 0,1$	Oké, kade tussen 0 en 10 cm hoger dan de toetshoogte
OK $> 0,1$	Oké, kade meer dan 10 cm hoger dan de toetshoogte
Revisieproject	Kade zal op korte termijn opgehoogd/verbeterd worden
Nader onderzoek	Overhoogte is niet vast te stellen aan de hand van het AHN. Nader onderzoek is nodig.

In Figuur 12 is het resultaat voor Oldelamer weergegeven. Op basis van het AHN voldoet de kade aan de noordkant van het water aan de hoogtetoets (OK $> 0,1$; overhoogte meer dan 10 cm). De vereiste kruinbreedte van de noordelijke kade is 1 m en de toetshoogte is 26 cm boven NAP. De vereiste kruinbreedte wordt aangegeven door de gestreepte lijn in het midden van het groene vlak. Op basis van het Flying Sensor hoogtemodel, voldoet deze kade dus ook ruimschoots aan de hoogtetoets en aan de vereiste kruinbreedte.

De kade aan de zuidkant van het water is geclassificeerd als 'revisieproject'. Dit betekent dat de overhoogte hier niet geanalyseerd is bij het uitvoeren van de hoogtetoets door Wetterskip Fryslân. Daarnaast zijn de toetshoogte en de vereiste kruinhoogte voor dit stuk kade niet aangegeven in het gegevensbestand van het Wetterskip Fryslân. Als we de hoogte van de zuidelijke kade toetsen volgens de zelfde normen als voor de noordelijke kade (toetshoogte 26 cm +NAP), voldoet de kade overal aan de toetshoogte, behalve daar waar geen vegetatie staat (de kade kruist daar een schelpenpaadje, zie Figuur 13). De kade is daar op het laagste punt meer dan 30 cm lager dan de toetshoogte. Vermoedelijk is de kade hier gladgestreken bij aanleg van het fietspad. Op AHN3 is de kade wel gewoon aanwezig.



Figuur 12. Hoogtetoets Oldelamer op basis van het Flying Sensor hoogtemodel.

Aangezien de herziening van de kade waarschijnlijk dateert van net voor AHN3, is deze locatie uitermate geschikt om daling in beeld te brengen. Hiervoor zijn metingen zonder vegetatie nodig. Direct langs het fietspad wordt de vegetatie kort gehouden, maar deze strook aan weerszijden van het fietspad ligt onderaan het talud van de kade en niet op de kade of het talud zelf.

Voor het pilotgebied bij Jutrijp, is het minimum berekend van de hoogtemodellen van mei, juli en oktober 2015. Het hoogtemodel van 16 september 2014 kon niet meegenomen worden in de berekening, omdat er toen niet over het geselecteerde gedeelte van dit pilotgebied gevlogen is. In het bovenste beeld van Figuur 14 is de hoogtetoets op basis van het AHN weergegeven voor een gedeelte van de noordelijke kade in Jutrijp. Het onderste beeld geeft de hoogtetoets op basis van de Flying Sensor informatie weer.

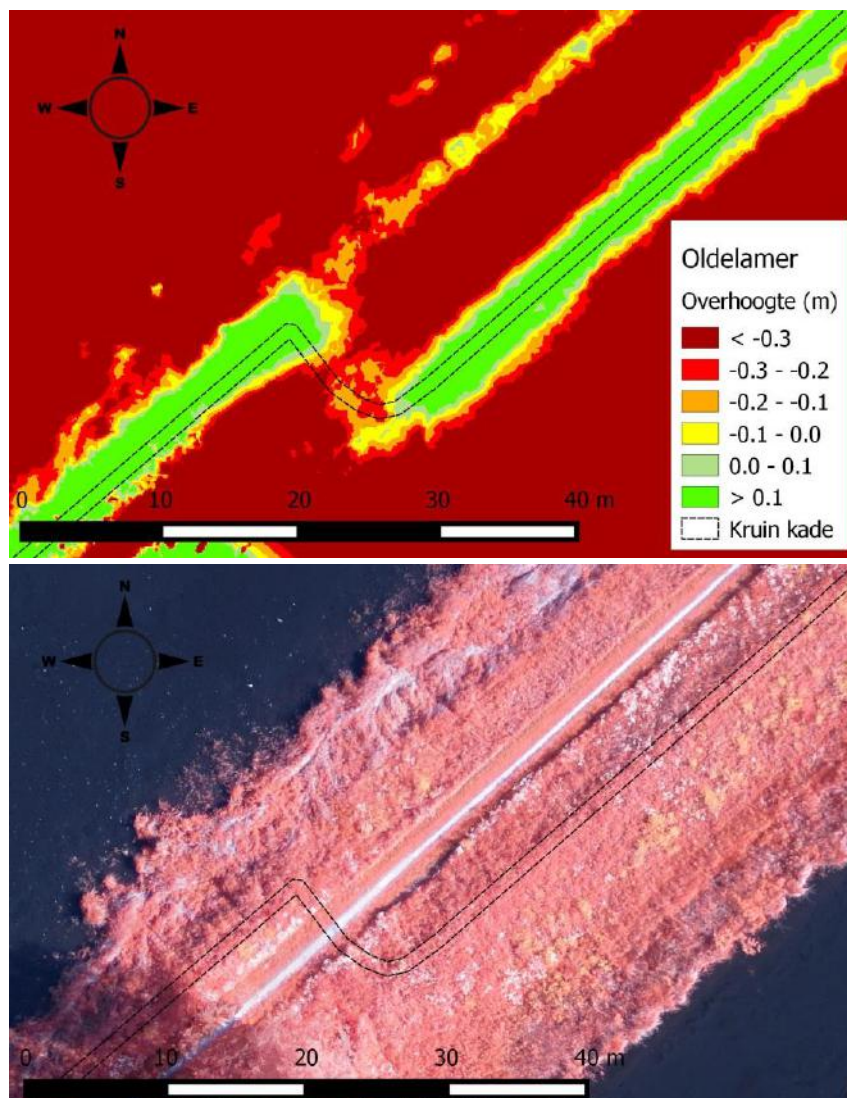
Volgens de analyse van het AHN (bovenste beeld in Figuur 14) is de kruinhoogte van de kade tussen 0 en 20 cm beneden de toetshoogte (NOK $-0,09 - 0,0$ en NOK $-0,19 - -0,1$). Volgens de informatie verzameld met de Flying Sensors (onderste beeld in Figuur 14) is bijna de gehele kade op toetshoogte (OK $> 0,1$).

Het verschil tussen de Flying Sensor resultaten en het AHN kan verschillende oorzaken hebben. Zoals eerder genoemd, is het mogelijk dat de Flying Sensor resultaten een overschatting laten zien van de hoogte door de aanwezige vegetatie. Door gebruik te maken van de minimale hoogte van drie beelden zou dit beperkt moeten zijn. Tweede mogelijkheid is dat het AHN afwijkingen vertoont. Het is bekend dat bij het bepalen van informatie over zeer grote gebieden (in dit geval heel Nederland) er lokale afwijkingen kunnen optreden. Uit een steekproef met veertien controlegrids verspreid over Friesland, blijkt echter dat het gemiddelde absolute verschil in z-richting 1,5 cm is, waarbij 68% van de controlegrids een afwijking heeft van minder dan 1,3 cm, 90% een afwijking van minder dan 3,6 cm en 99.6% een afwijking van minder dan 4,5 cm⁴. De conclusie luidt dan ook: "Ondanks dat het slechts een beperkte steekproef is kan geconcludeerd worden dat de controlevelden samen met de gevalideerde overlopen, ruim voldoende vertrouwen geven dat de gehele survey in absolute zin verticaal goed aansluit op het NAP." Er is

⁴ BKS. 2009. Inmeting AHN-2 2008. Perceel 2 – Friesland Samenvatting definitief.

dus geen reden om aan te nemen dat het AHN in het pilotgebied bij Jutrijp zover afwijkt van de werkelijke waarde, dat dit het totale verschil met de Flying Sensor uitkomsten kan verklaren. Wel zou het een deel van het verschil kunnen verklaren.

Tenslotte is duidelijk te zien dat de resolutie van de Flying Sensors vele malen hoger is in vergelijking met het AHN.

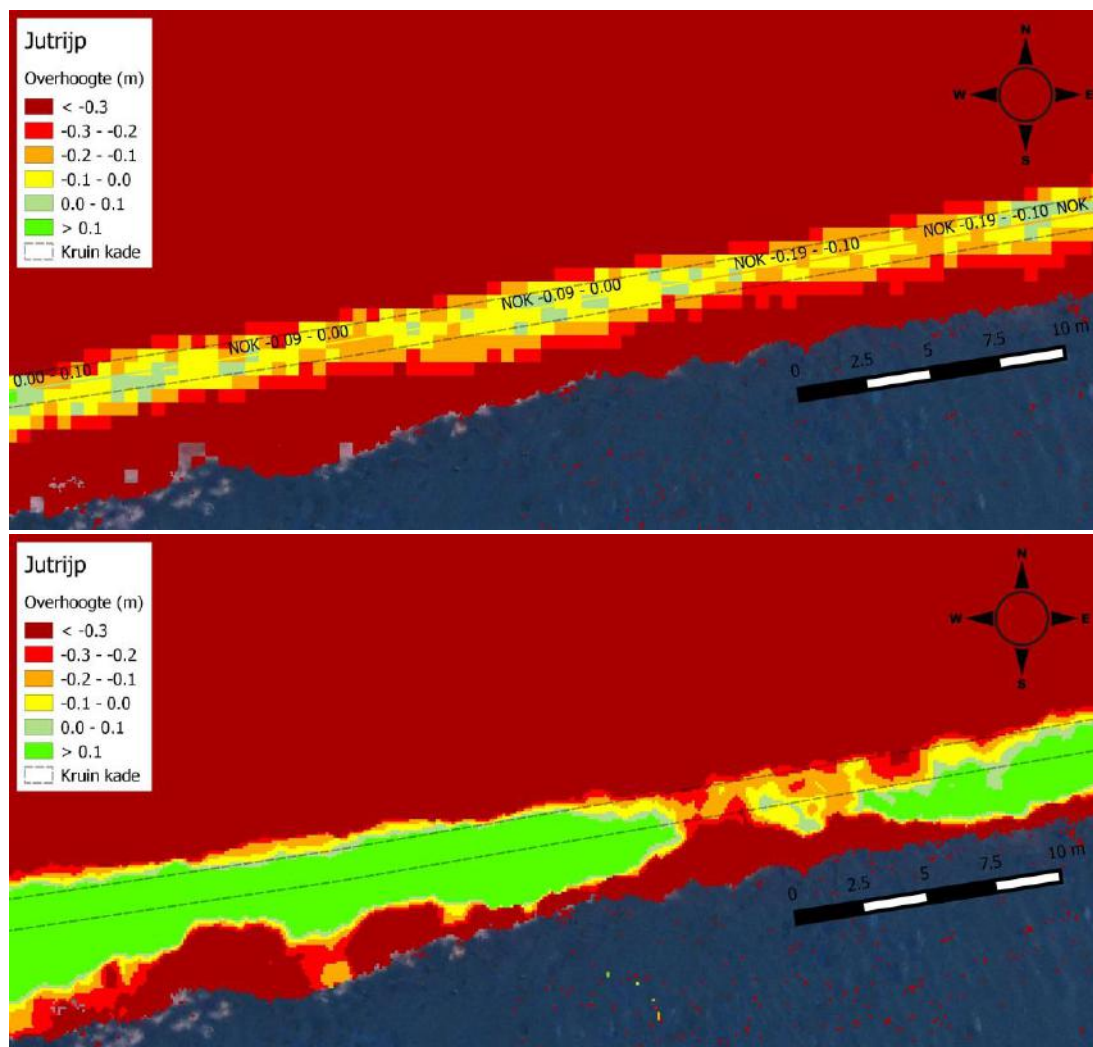


Figuur 13. Detail van de hoogtetoets van de zuidelijke kade in het pilotgebied bij Oldelamer op basis van de Flying Sensor hoogtemodellen. Het bovenste beeld geeft de hoogtetoets weer, het onderste beeld de orthozaïek van 21 mei 2015. De gestreepte lijn geeft de vereiste kruinbreedte aan.

Dit voorbeeld laat duidelijk zien wat de potentiële inzet van Flying Sensors is. Op basis van een grootschalige aanpak met het AHN blijkt er een zwakke kade te zijn. Met behulp van Flying Sensors kan vervolgens op deze zwakke plekken worden ingezoomd. Het resultaat is een hogere resolutie hoogtekaart en een actueel beeld van de huidige situatie. Eventueel kan een beeld van NDVI en/of zichtbaar licht nog meer verduidelijking opleveren over de situatie van de kade. In de praktijk wordt een kade aangepakt als deze over een groter traject (honderden meters) echt niet voldoet. Detailinformatie waar de kade dan net wel/net niet voldoet is dan niet relevant, want het hele tracé wordt robuust aangelegd. Wellicht zou Flying Sensorinformatie hierbij een

kostenbesparing op kunnen leveren als uit detailbeelden blijkt dat er maar enkele plekken zijn die echt slecht zijn en alleen deze plekken aangepakt hoeven te worden.

Als nieuwe kaden na aanleg systematisch ingevlogen of met een 3D-laserscanner ingemeten worden, kunnen verzakkingen later zichtbaar worden door de “referentiebeelden” te vergelijken met de beelden van de huidige situatie. Het voordeel ten opzichte van landmeten is dat alle informatie direct digitaal als gedetailleerd hoogtebeeld opgeslagen is.



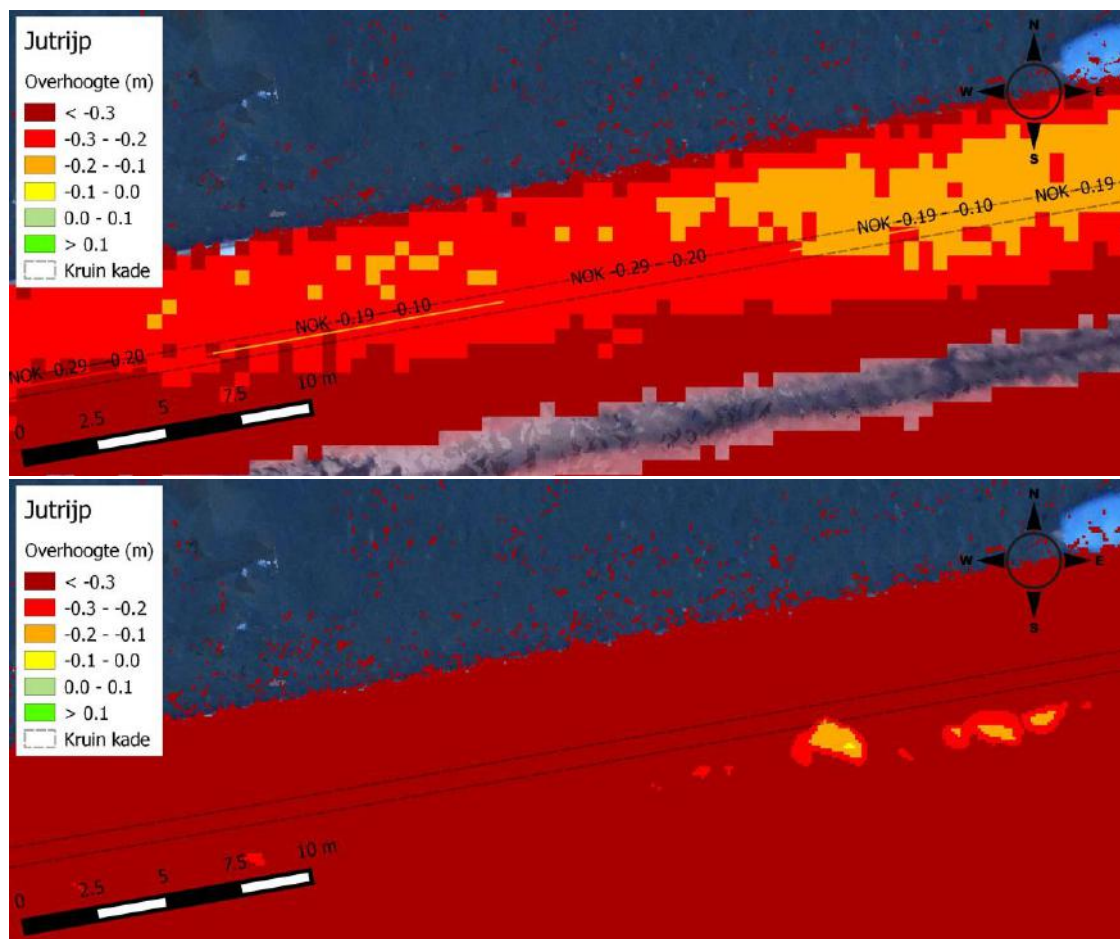
Figuur 14. Hoogtetoets noordelijke kade Jutrijp. Boven volgens het AHN, onder volgens het Flying Sensors hoogtemodel.

In het bovenste beeld van Figuur 15 is de hoogtetoets op basis van het AHN weergegeven voor een gedeelte van de zuidelijke kade in Jutrijp. Het onderste beeld geeft de hoogtetoets op basis van de Flying Sensor informatie weer.

Het verschil tussen deze twee beelden laat zien dat de hoogtetoets op basis van het Flying Sensor hoogtemodel negatiever uitpakt dan voor het AHN. Dit zou te verklaren kunnen zijn doordat het AHN in 2008 is uitgekomen en de kade in de tussenliggende jaren verder gezakt kan zijn. Aan de rechterzijde van het beeld zijn enkele plekken te zien die zowel volgens het AHN als volgens het Flying Sensor hoogtemodel hoger zijn dan de rest van de omgeving. De beelden

komen in die zin dus wel overeen. Omdat de kade aan de zuidkant wel gemaaid wordt, is het beeld van de Flying Sensor niet verstoord en is een eventuele correctie met de NDVI niet nodig⁵.

Dit voorbeeld laat zien dat de informatie uit het AHN mogelijk verouderd kan zijn bij kades die aan het verzakken zijn. Een vergelijking van Flying Sensor beelden over een tijdsbestek van één, twee of meerdere jaren kan laten zien hoe snel de verzakking verloopt en op welke termijn ingrepen noodzakelijk zijn. Door het Wetterskip Fryslân wordt een updatecyclus van het AHN van eens in de 7 jaar op dit moment echter als voldoende ervaren, omdat de bodemdaling hooguit 1 cm per jaar bedraagt.

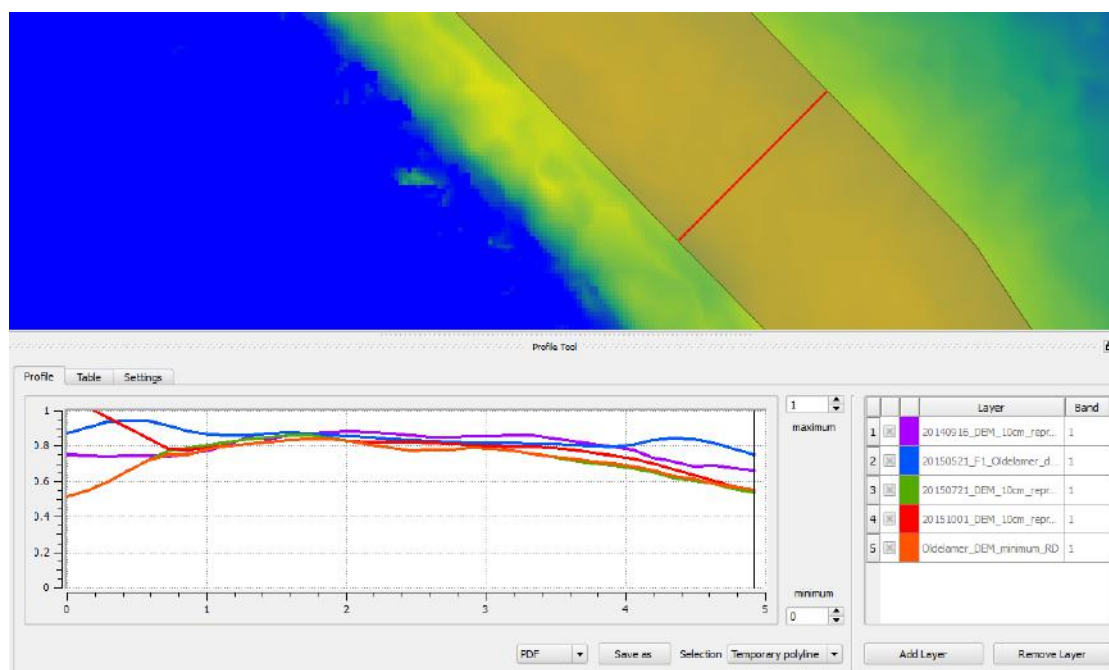


Figuur 15. Hoogtetoets zuidkade Jutrijp. Boven volgens het AHN, onder volgens de Flying Sensor hoogtemodellen.

Bij het uitvoeren van de hoogtetoets door Wetterskip Fryslân zijn er dwarsprofielen gemaakt van de kades, om de vorm van de kade te analyseren. Deze dwarsprofielen kunnen ook worden gemaakt op basis van de Flying Sensor hoogtemodellen die op verschillende momenten verkregen zijn. Hiermee kunnen plaatselijke veranderingen in de vorm van de kade goed in beeld worden gebracht. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 16. Hier is over 5 m een dwarsprofiel gemaakt van een kadeselement in Oldelamer voor de Flying Sensor hoogtemodellen van 16 september 2014 (paarse profiel), 21 mei 2015 (blauwe profiel), 21 juli 2015 (groene profiel)

⁵ De AHN werkt met de filtering van een puntenwolk van 8 punten per vierkante meter waardoor de hoogte van vegetatie minder een probleem is. In het kwaliteitsdocument van het AHN2 (Van der Zon, N. 2013. Kwaliteitsdocument AHN2 versie 1.3. www.ahn.nl) wordt dit als volgt uitgelegd: "Door de hoge puntichtheid en de mogelijkheid om vaak meerdere returns van een laserstraal te registreren worden ook in vegetatierijk gebied nog voldoende maaiveldpunten gemeten."

profiel), 1 oktober 2015 (rode profiel) en het minimum van deze hoogtemodellen (oranje profiel). Het minimum van de hoogtemodellen is bijna over het gehele profiel gelijk aan de hoogte op 21 juli 2015, doordat de kade toen pas gemaaid was. De hoogteverschillen tussen de profielen geven in dit geval dus een beeld van hoe de hoogte van de vegetatie op de kade verandert gedurende de tijd. Wanneer zulke profielen gemaakt zouden worden van hoogtemodellen met een gelijke vegetatiehoogte, zouden hoogteverschillen een indicatie kunnen zijn van een verzakking of opbolling van de kade.



Figuur 16. Voorbeeld van een dwarsprofiel van een kadesegment in Oldelamer op basis van de Flying Sensor hoogtemodellen.

Belangrijk bij deze dwarsprofielen is dat de resolutie voldoende hoog is. Het AHN, met een resolutie van 50 cm, kan mogelijk kleine zwakke punten (laagtes) niet zien. Zulke lokale verzakkingen zijn vaak een goede aanduiding van zwakke plekken en kunnen snel uitgroeien tot grotere gaten en/of kadebreuk of verzakking. De AHN handleiding (ARCADIS, 2012⁶) waarschuwt dan ook dat “vooral kleine objecten in de gridbestanden moeilijk of niet te identificeren zijn”. De Flying Sensors bieden resoluties van 10 cm. In de toekomst, bij verbeterde reken capaciteit, kan dit zelfs naar 3 cm worden gebracht.

⁶ http://www.ahn.nl/binaries/content/assets/hwh---ahn/nieuws/2012/07/ahn_bgt_rapport.pdf

8. Kadeschouw

Jaarlijks vindt er in januari en februari een visuele inspectie (kadeschouw) plaats van alle regionale waterkeringen die bij het Wetterskip Fryslân in beheer zijn (met uitzondering van de secundaire keringen). Het moment van de kadeschouw, in januari en februari, is zo gekozen omdat dit de maanden zijn met een minimale hoeveelheid riet- en vegetatiegroei. Hierdoor zijn de zwakke plekken van de vooroevers en kades beter zichtbaar. In het “Inspectieplan Waterkeringen” (Schaap, 2012⁷) van het Wetterskip Fryslân wordt het doel van de kadeschouw als volgt omschreven: “De inspectie heeft als doel om te voorzien in de informatiebehoefte voor het structureel beheer van de kering. De inspectieresultaten geven daarbij sturing aan de prioritering van onderhoud en het houden van toezicht op Keurbepalingen en onderhoudsplicht. Daarnaast verschaft het inzicht in het actuele veiligheidsniveau.” Tijdens de kadeschouw wordt de kade en de nabije omgeving daarvan gecontroleerd op schadebeelden, illegale situaties en onderhoudsplicht (Schaap, 2012⁷).

De diverse schadebeelden die waargenomen kunnen worden tijdens de kadeschouw zijn omschreven in Tabel 7.

Tabel 7. Schadebeelden die waargenomen kunnen worden tijdens de kadeschouw

Code	Schadebeeld
O1	Afkalving van het buitentalud
O2	Rietoever is beschadigd
O3	Beschoeiing is afwezig/beschadigd
O4	Stortsteen is afwezig/verzakt
O5	Afschuiving van het talud
O6	Dwarsscheuren in het kadelichaam
O7	Langsscheuren in het kadelichaam
O8	Verzakking of opbolling van het kadelichaam
O9	Houtopstand in de oeverzone
O10	Kwel/Verweking binnentalud en/of achterland
O11	Wellen (zandmeevoerend)
O12	Muskusrattenschade
O13	Dam is verzakt/beschadigd
O14	Diverse schadebeelden kadelichaam: projectwerk (geen Maximobon)

Tijdens de kadeschouw letten de inspecteurs op de overtredingen van de onderhoudsplicht of verbodsbepalingen die staan omschreven in Tabel 8.

Tabel 8. Overtredingen die waargenomen kunnen worden tijdens de kadeschouw

Code	Keurovertreding (brief eigenaar)	Hersteltermijn
G1	Op de grasmat ligt afval, maaisel of hekkelspecie	3 weken
G2	In de kade is geploegd, gespuit of gegraven	3 weken
G3	Het grondwerk van de dam is beschadigd door vee	1-jun
G4	De grasmat is vertrapt/beschadigd door vee	1-jun
G5	De grasmat bevat open plekken	1-jun
G6	De grasmat heeft rijspoorschade	1-jun
G7	De grasmat is niet gemaaid of begraaasd	1-aug

⁷ Schaap, D. 2012. Inspectieplan Waterkeringen versie 1.0. Wetterskip Fryslân.

G8	Aanwezigheid van jonge houtopstand (bomen/struiken) op de kade	1-aug
G9	Intensieve graverij door mollen in de kade	1-aug
K1	Aanwezigheid van tenten, caravans, woonwagens e.d. op de kade	3 weken
K2	Aanwezigheid van nieuwe werken (bijvoorbeeld bebouwing) op de kade	1-jun

Naast het vaststellen van schadebeelden en overtredingen die actie vereisen registreren de inspecteurs diverse situaties die problematisch zouden kunnen zijn, maar geen directe actie vereisen (zie Tabel 9). De informatie over deze situaties wordt door de beheerder gebruikt om zicht te krijgen op plaats en omvang van een specifieke problematiek. Dit inzicht kan worden gebruikt om beleid te formuleren wat de beheerder handvaten geeft in de omgang met de betreffende problematiek (Schaap, 2012⁷).

Tabel 9. Diverse situaties die waargenomen kunnen worden tijdens de kadeschouw, maar geen directe actie vereisen

Code	Thema (geen actie)
i1	Bomen: ontgrondingsgevaar
i2	Afkalving van vooroever
i3	Beweiding: bestaande afrastering niet demontabel
i4	Aanwezigheid van bestaande werken (bebouwing, hekwerk etc.)
i5	Grasmat is slecht door onkruid (distels, mos, berenklaauw e.d.)
i6	Steil talud (niet machinaal bewerkbaar)

Om de toepassing van Flying Sensors bij kade-inspectie te onderzoeken, zijn voor elk pilotgebied de kadeschouwgegevens van 2015 vergeleken met de Flying Sensor beelden. De kadeschouw is uitgevoerd gedurende januari en februari. Aan de hand van verschillende Flying Sensor beelden is gekeken of de waarnemingen uit het veld zichtbaar waren op deze beelden. Ook is gekeken of eventuele waarnemingen die in het veld niet gezien waren, wel zichtbaar zijn op de Flying Sensor beelden. De belangrijkste bevindingen worden hieronder samengevat (zie Tabel 10).

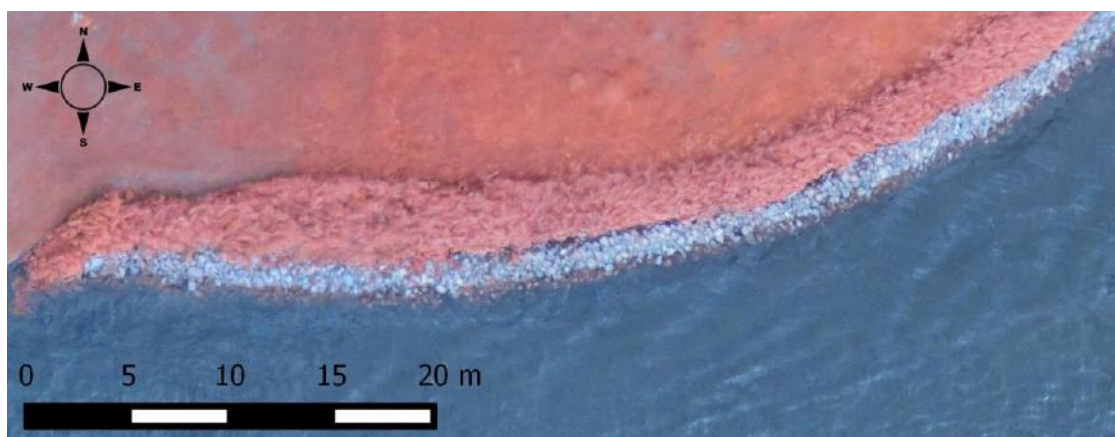
Tabel 10. Overzicht per pilotgebied van de problemen die zijn vastgesteld tijdens de kadeschouw 2015

	Vastgestelde problemen (in het veld)	Zichtbaar op Flying Sensorbeelden
Oldelamer	O3 Beschoeiing is afwezig/beschadigd	Nee
Jutrijp	Geen	Ja
Nijhuizum	O4 Stortsteen is afwezig/verzakt	Nee
	O9 Houtopstand in de oeverzone (winteronderhoud)	Ja (Figuur 18)
	G1 Op de grasmat ligt afval/maaisel of hekkelspecie	Nee
Allingawier	Geen	Nee
Baard	I1 Bomen: ontgrondingsgevaar	Ja (Figuur 20)
Goingarip	Geen	Ja
Hommerts	Geen	Ja
Haskerdijken	Geen	Ja
Uilesprong	O9 Houtopstand in de oeverzone (winteronderhoud)	Nee

	G9 Intensieve graverij door mollen in de kade	Ja (Figuur 22)
	I3 Beweiding: bestaande afrastering niet demontabel	Nee
	I5 Grasmat is slecht door onkruid (distels, mos, bereklauw, e.d.)	Nee

In het pilotgebied bij Oldelamer werd tijdens de kadeschouw geconstateerd dat de beschoeiing afwezig of beschadig was. Dit is echter niet duidelijk terug te zien op de orthomozaïek, omdat de beschoeiing van bovenaf gezien te smal is (smaller dan de resolutie van 5 cm van de orthomozaïek).

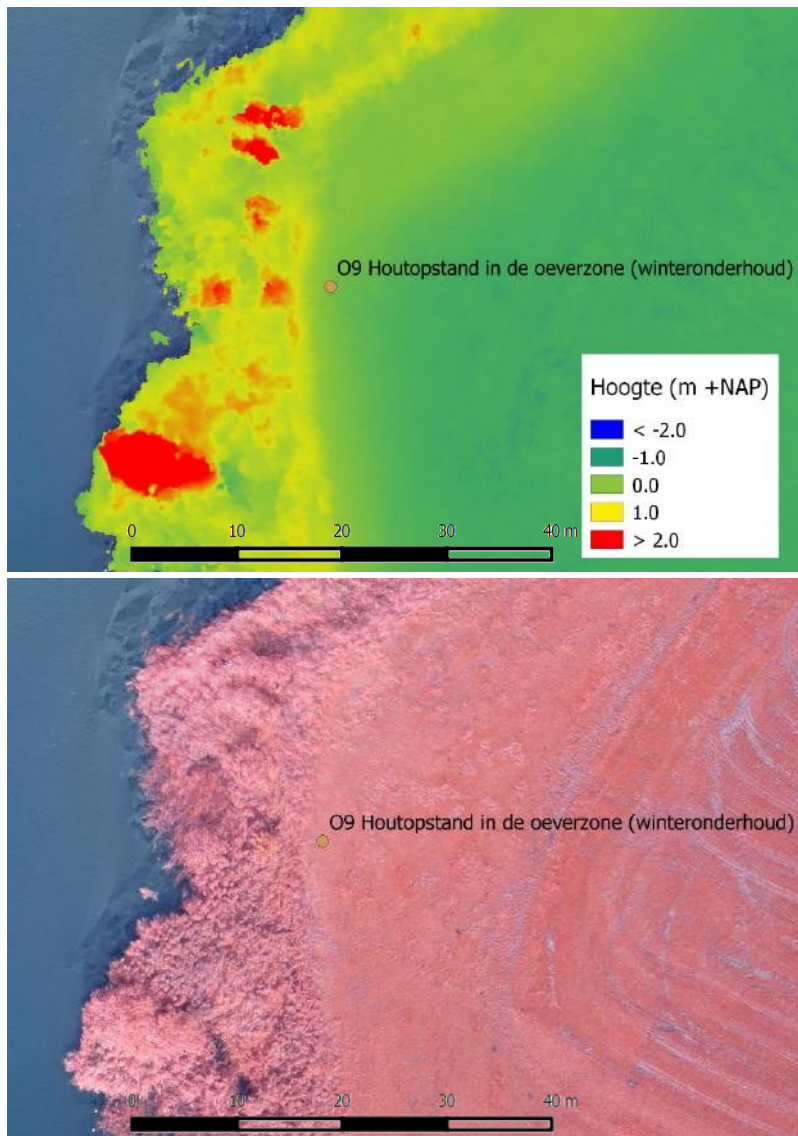
In het pilotgebied bij Nijhuizum werden verschillende problemen geconstateerd. Eén van de problemen was de afwezigheid/verzakking van de stortsteen. Dit was niet terug te zien op de orthomozaïek van 16 september 2014 of 21 mei 2015, doordat de oever op de betreffende plek met riet begroeid was. In het pilotgebied bij Hommerts, waar op 22 juli 2015 werd gevlogen, was wel stortsteen te herkennen (zie Figuur 17). Het is dus wel mogelijk om stortsteen te zien op de orthomozaïek, als de stenen niet met riet overgroeid zijn. Het voordeel van Flying Sensors in dit geval is dat de stortsteen in één keer te zien is en ook de breedte goed ingeschat kan worden. Vanuit het veld is dit niet goed in te schatten en wordt er tijdens de kadeschouw dus steekproefsgewijs even gekeken.



Figuur 17. Voorbeeld van zichtbare stortstenen in het pilotgebied bij Hommerts.

Een ander probleem dat geconstateerd werd in het pilotgebied bij Nijhuizum was houtopstand in de oeverzone. Dit probleem was duidelijk terug te zien, zowel aan het digitale hoogtemodel als op de orthomozaïek van 16 september 2014 (zie Figuur 18) en 21 mei 2015.

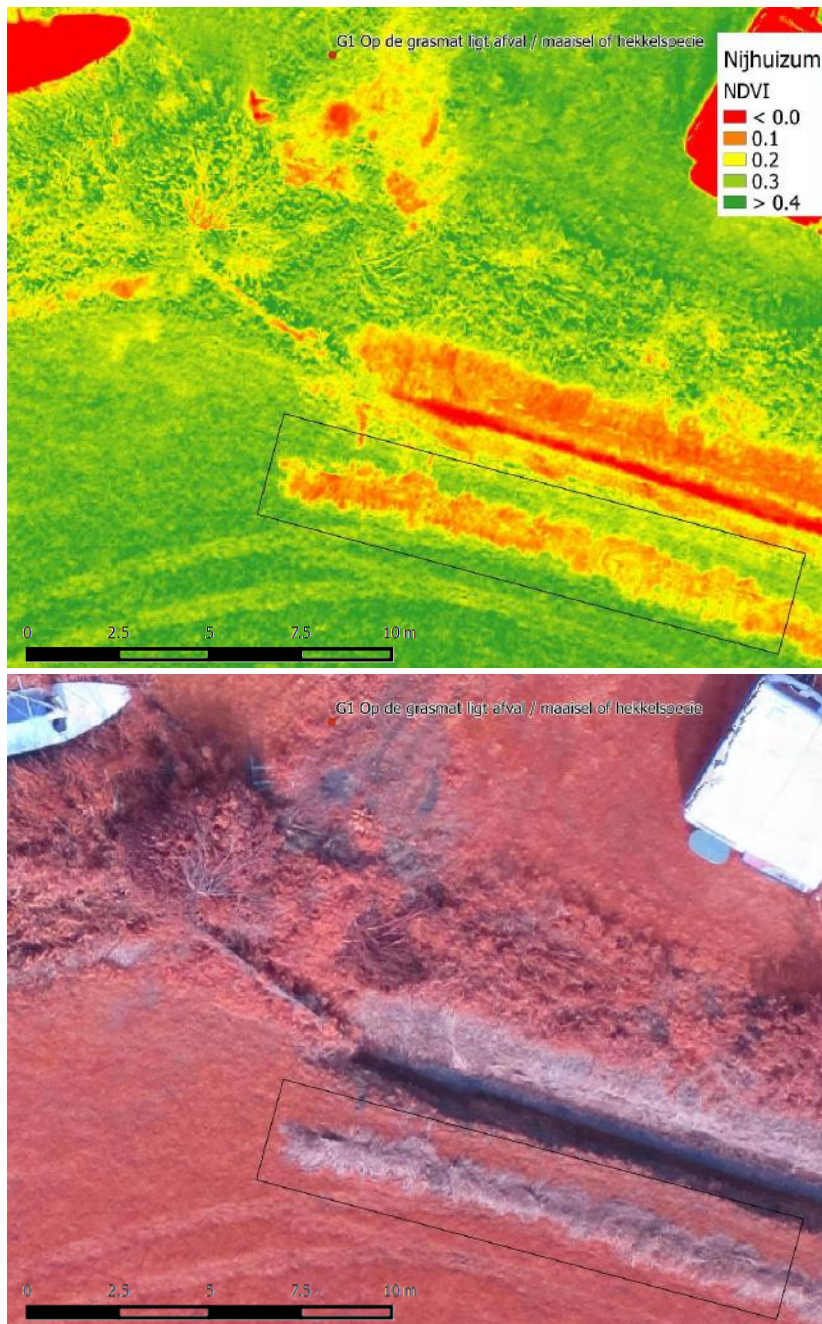
Wederom geven de Flying Sensor beelden een zeer duidelijk beeld van de toestand van de houtopstand. De breedte van de opstand is duidelijk zichtbaar en ook de verschillen in hoogte laat duidelijk zien dat het om één grote boom gaat, wat kleinere boompjes en voor de rest opslag van ongeveer 1 meter hoog. Hierbij moet worden opgemerkt dat bomen ook te zien zijn op normale luchtfoto's die jaarlijks worden genomen en ook zijn af te leiden uit ongefilterde AHN data.



Figuur 18. Voorbeeld van houtopstand in de oeverzone in pilotgebied Nijhuizum. De beelden zijn gemaakt op 16 september 2014. Boven het hoogtemodel en onder het NIR-orthomozaïek.

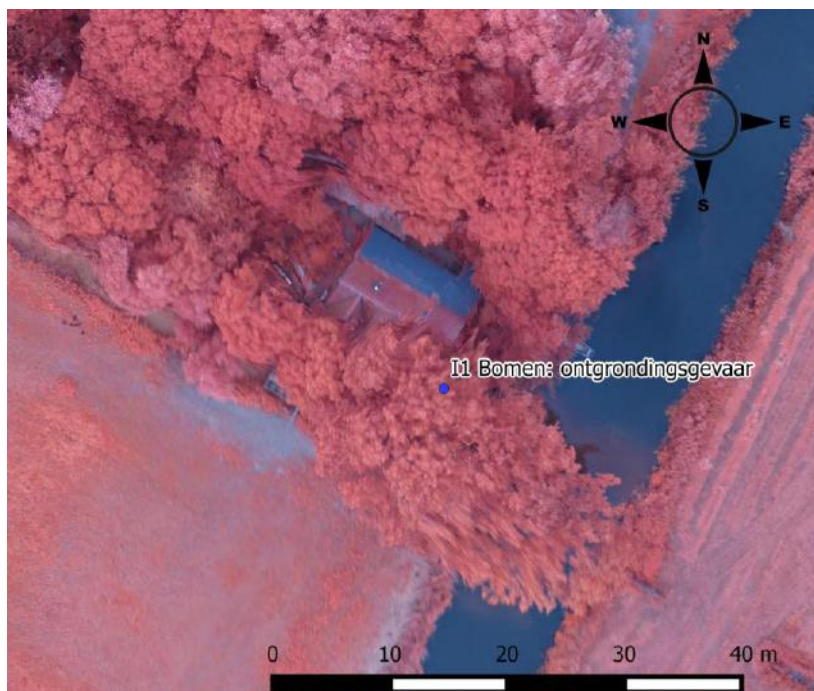
Het derde probleem dat werd geconstateerd in het pilotgebied bij Nijhuizum was de aanwezigheid van afval/maaisel of hekkelspecie op de grasmat. Dit probleem was wel te zien op de orthomozaïek en het NDVI-beeld van 16 september 2014, maar niet op de exacte locatie waar dit tijdens de kadeschouw geconstateerd werd (zie Figuur 19). Op het moment van de beeldopname op 16 september 2014 was de hekkelspecie waarschijnlijk nog niet aanwezig op de betreffende locatie en op het moment van de beeldopname op 21 mei 2015 was het waarschijnlijk al opgeruimd. De hekkelspecie die te zien is in Figuur 19 ligt naast een sloot en niet op de kade. De kade bevindt zich aan de linkerkant van het beeld.

Duidelijk is dat Flying Sensor beelden die tijdens verschillende perioden worden gemaakt heel goed laten zien welke dynamiek er in een gebied speelt. Het zou te kostbaar zijn om visuele inspectie op de grond regelmatig uit te voeren, maar Flying Sensors geven de mogelijkheid om enkele malen per jaar dit soort waarnemingen uit te voeren.



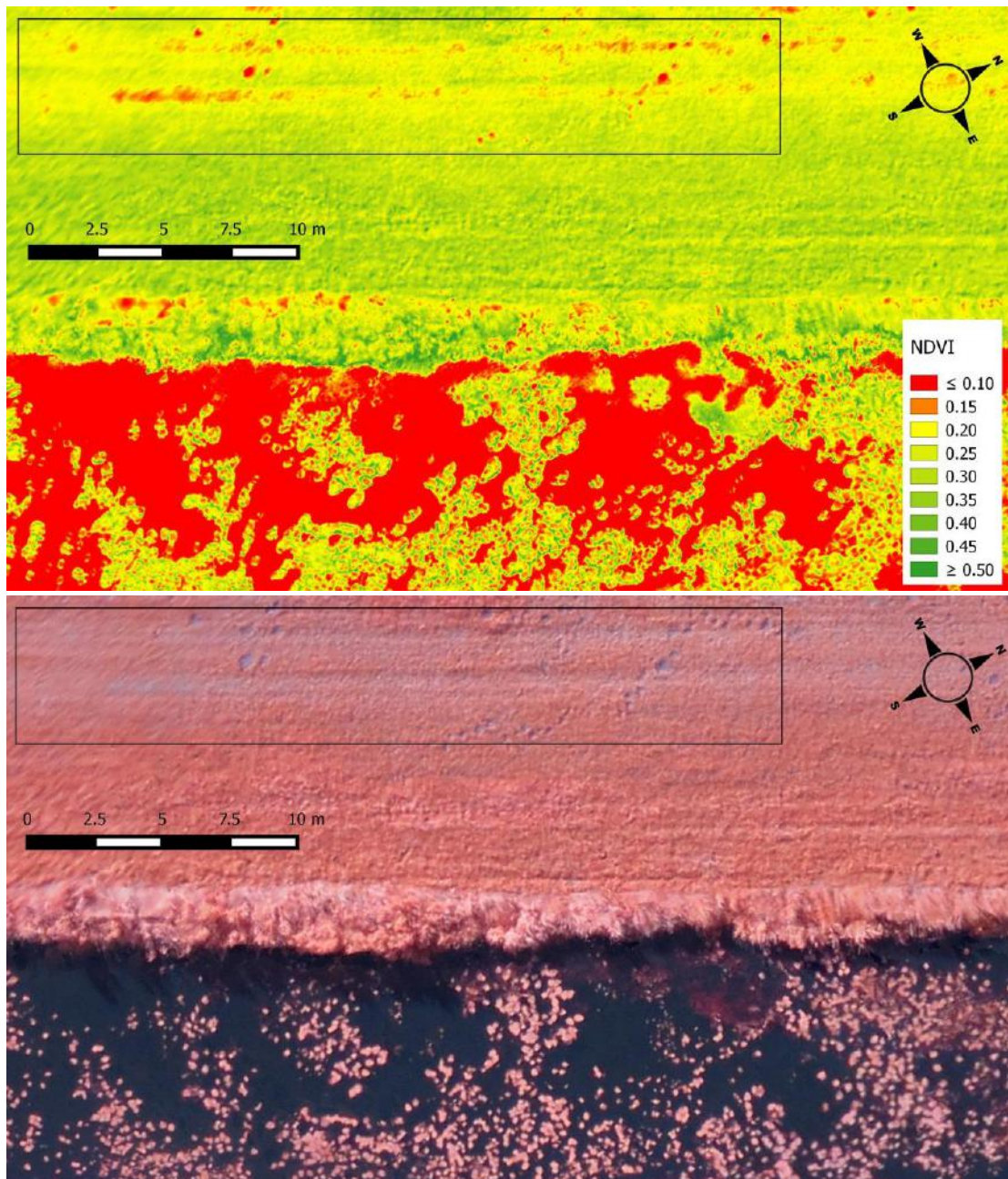
Figuur 19. Voorbeeld van hekkelspecie op de grasmat (binnen zwarte rechthoek) in Nijhuizum.

In het pilotgebied bij Baard werd tijdens de kadeschouw geconstateerd dat er bomen langs de kade aanwezig waren die ontgrondingsgevaar kunnen veroorzaken. Dit probleem was duidelijk terug te zien op de orthomozaïek van 16 september 2014 (zie Figuur 20). Het beeld van bovenaf geeft duidelijk de omvang van het probleem aan. Bovendien kan met behulp van een Flying Sensor hoogtemodel ook zichtbaar worden gemaakt of het om lage of hoge bomen gaat. In Baard is het maaiveld over het algemeen relatief hoog en is er dus veel reststerkte.



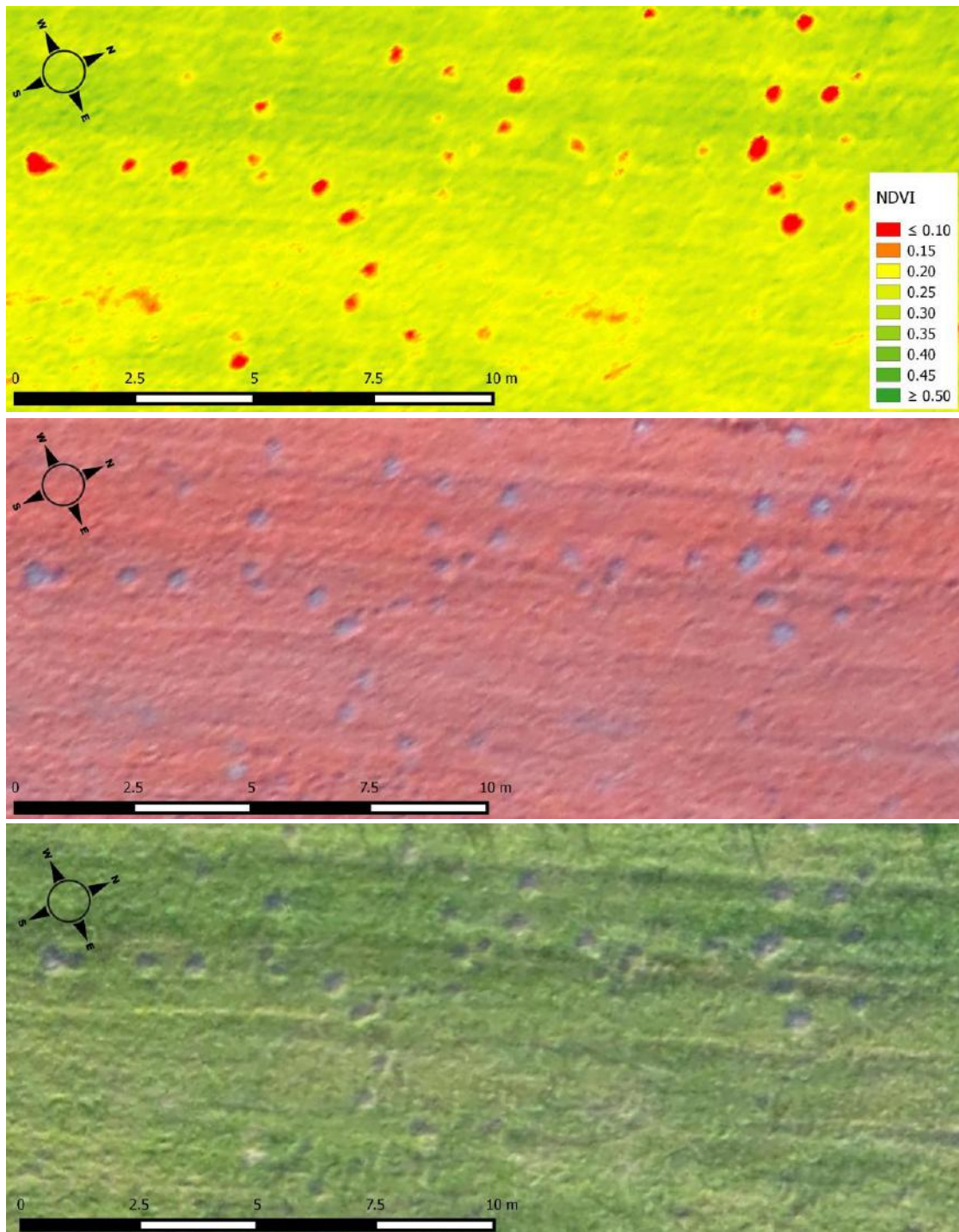
Figuur 20. Voorbeeld van bomen die ontgrondingsgevaar kunnen veroorzaken in pilotgebied Baard.

In het merendeel van de pilotgebieden waar op twee momenten is gevlogen, werden geen problemen geconstateerd tijdens de kadeschouw (Tabel 10). In Uilesprong werden wel verschillende problemen geconstateerd, maar deze waren niet allemaal terug te zien op de Flying Sensor beelden. In tegenstelling tot Nijhuizum was de houtopstand in de oeverzone niet terug te zien op het digitale hoogtemodel of de orthomozaïek van 22 juli 2015. Mogelijk was de houtopstand op het moment van de beeldopname al verwijderd. Ook het soort afrastering is op de orthomozaïek niet terug te zien, door de loodrechte kijkrichting. Naast deze twee problemen was ook het probleem van de slechte staat van de grasmat door de aanwezigheid van onkruid, zoals distels, mos en berenklauw niet te zien aan de NDVI en niet te onderscheiden op de orthomozaïek. Het is mogelijk dat de distelrozetten in de winter wel duidelijk te zien zijn, maar in de zomer overgroeid raken door gras. Op de beelden van juli was er wel rijspoorschade aan de grasmat en bloei van kroos/alg/waterplanten in de sloot te zien (zie Figuur 21).



Figuur 21. Voorbeeld van rijspoorschade aan de grasmat (binnen zwarte rechthoek) en bloei van kroos/waterplanten in de sloot in het pilotgebied bij Uilesprong.

Een probleem dat zeer goed te herkennen was op het NDVI-beeld en de orthomozaïeken van 22 juli 2015 was de intensieve graafwerkzaamheden door mollen in de kade (zie Figuur 22). Hoewel dit probleem al in januari of februari geconstateerd werd, waren hier in juli blijkbaar nog veel mollen aanwezig.



Figuur 22. Voorbeeld van intensieve graverij door molten in de kade in pilotgebied Uilensprong. Het bovenste beeld laat de NDVI zien. De molshopen zij te herkennen aan de lage NDVI. Het middelste beeld is een uitsnede uit de NIR-orthomozaïek en het onderste beeld een uitsnede uit de RGB-orthomozaïek op dezelfde locatie.

Tabel 11 geeft een overzicht van de shadebeelden die voor een Flying Sensor waarneembaar zijn en welke shadebeelden niet waarneembaar zijn. In de eerste kolom zijn de shadebeelden gegeven die waargenomen zijn op de beelden die voor deze studie gemaakt zijn. In de tweede kolom zijn de shadebeelden gegeven die, wanneer zij zich voordoen, waarschijnlijk waarneembaar zijn op Flying Sensor beelden, maar die op de beelden voor deze studie niet zijn waargenomen. In de derde kolom zijn de shadebeelden gegeven die (naar verwachting) niet waarneembaar zijn op Flying Sensorbeelden.

Tabel 11. Overzicht van de voor een Flying Sensor waarneembare en niet-waarneembare schadebeelden

Waarneembaar op Flying Sensor DEM en/of NIR-beeld (bewezen)	Waarschijnlijk waarneembaar op Flying Sensor DEM en/of NIR-beeld (geen voorbeeld)	Niet waarneembaar
O4 (Figuur 17, niet bij dichte begroeiing met riet) O9 (Figuur 18)	O1, O2, O5, O6, O7, O8, O11, O12, O13, O14	O3 (bij een resolutie van 5x5 cm), O10
G1 (Figuur 19), G3 (Figuur 49), G4 (Figuur 49), G5 (Figuur 27), G6 (Figuur 21), G7 (onderste beeld Figuur 76), G8 (Figuur 18), G9 (Figuur 22)	G2	
K1 (Figuur 19, Figuur 85, Figuur 86)	K2	
i1 (Figuur 20)	i2, i4, i6	i3, i5

Als aanvulling op de jaarlijkse kadeschouw kunnen ook de luchtfoto's, die jaarlijks door het Wetterskip Fryslân afgenomen worden van het landelijk samenwerkingsverband beeldmateriaal⁸, geanalyseerd worden. Ook bij oplevering van het AHN worden luchtfoto's meegeleverd. Met deze luchtfoto's kunnen topografische objecten geïdentificeerd en geïnterpreteerd worden. De foto's die met het AHN meegeleverd worden hebben ongeveer een grondresolutie die tussen de 7 cm en de 50 cm ligt⁹. De hoge resolutie luchtfoto's van het landelijk samenwerkingsverband beeldmateriaal hebben een resolutie van 10 bij 10 cm. Deze resolutie wordt door het Wetterskip Fryslân als goed genoeg ervaren. De luchtfoto's die worden meegeleverd met het AHN worden over het algemeen tussen 1 december en 31 maart genomen (eens in de 7 jaar). Tijdens deze periode staat er weinig vegetatie. De luchtfoto's van het landelijk samenwerkingsverband beeldmateriaal worden in het voorjaar gevlogen in de bladloze periode, maar afgelopen jaren (2014 en 2015) is dat niet voor het gehele gebied gelukt. In sommige gevallen zou het interessant kunnen zijn om beelden te hebben van de zomermaanden, wanneer er juist wel vegetatie staat. Een Flying Sensor kan in zo'n geval uitkomst bieden.

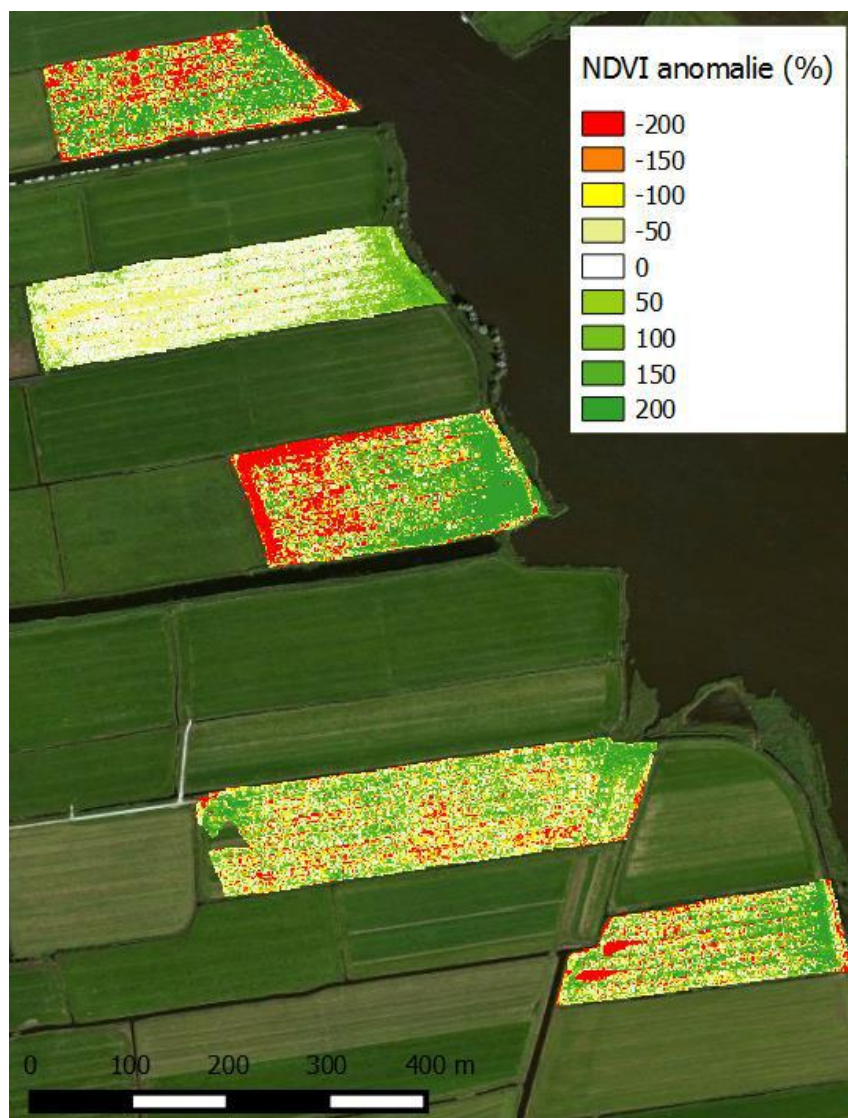
⁸ www.beeldmateriaal.nl

⁹ Van der Zon, N. 2013. Kwaliteitsdocument AHN2 versie 1.3. www.ahn.nl

9. Inspectie bij calamiteiten

9.1. Muizenplaag

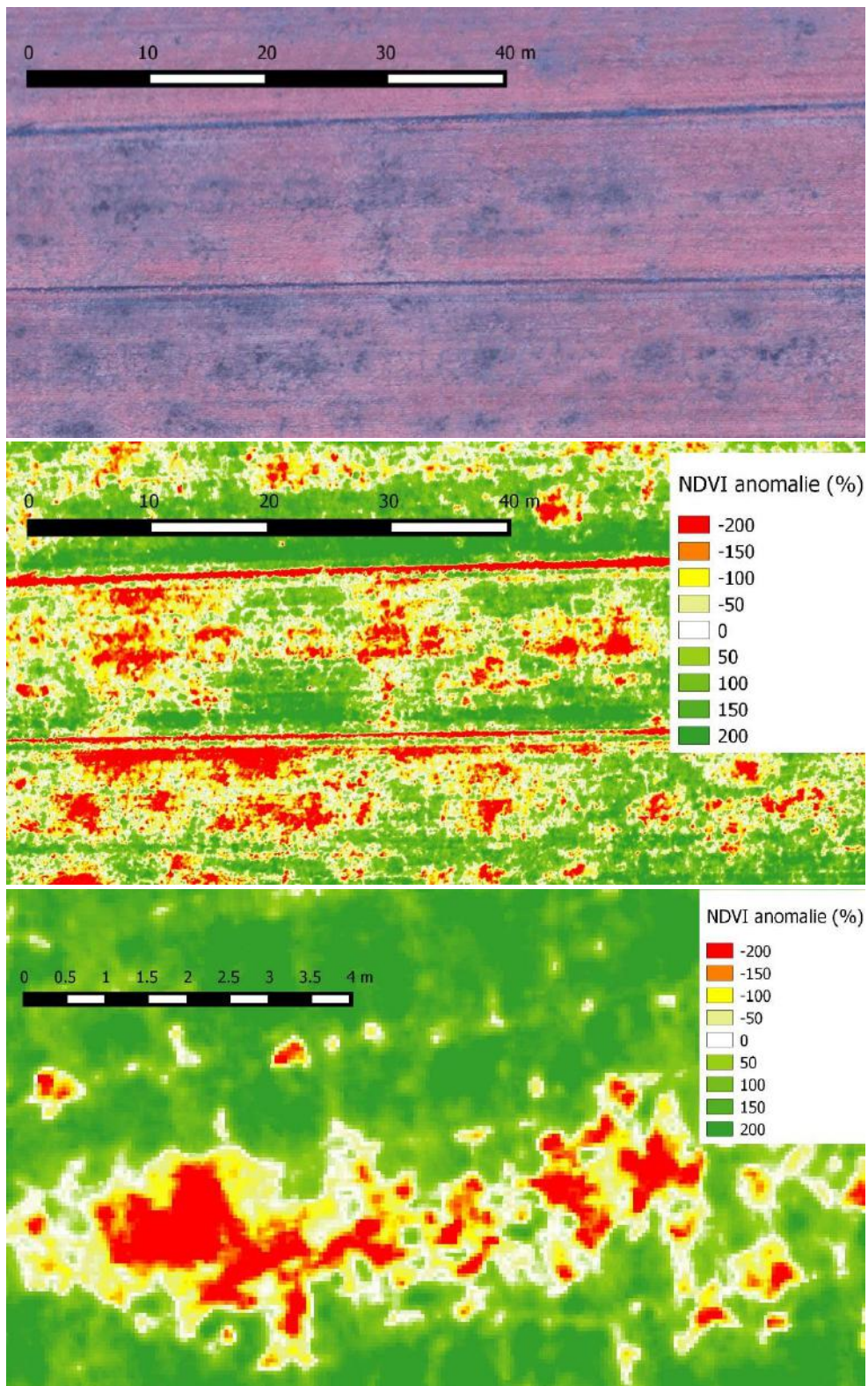
Eind 2014 ontstond er in het zuidwesten van Friesland een muizenplaag. Halverwege januari 2015 was er op basis van een schatting met behulp van satellietbeelden al 12.000 ha grasland aangetast¹⁰. Om de schade op perceelniveau gedetailleerd in kaart te brengen, zijn er begin februari NIR-beelden gemaakt van het gebied tussen Jutrijp en Hommerts. Per perceel is de afwijking (in procenten) van de gemiddelde NDVI berekend (zie Figuur 23). Aan de verspreiding van de locaties met een negatieve NDVI-anomalie is te zien dat er in alle percelen muizen aanwezig zijn. Als er wordt ingezoomd op het onderste perceel in Figuur 23 is te zien dat de muizen zich concentreren in zogenaamde 'kraamkamers' (zie Figuur 24). Voor het monitoren van de muizenschade over geheel Friesland (grote schaal) wordt sinds de muizenplaag de groenmonitor gebruikt¹¹. Deze groenmonitor geeft de NDVI op basis van satellietbeelden met een resolutie van 22 m. Deze beelden worden elke twee weken geüpdatet.



Figuur 23. Afwijking van de gemiddelde NDVI per perceel in het gebied tussen Jutrijp en Hommerts.

¹⁰ <http://nos.nl/artikel/2013042-muizen-veranderen-friesland-in-prairie.html>

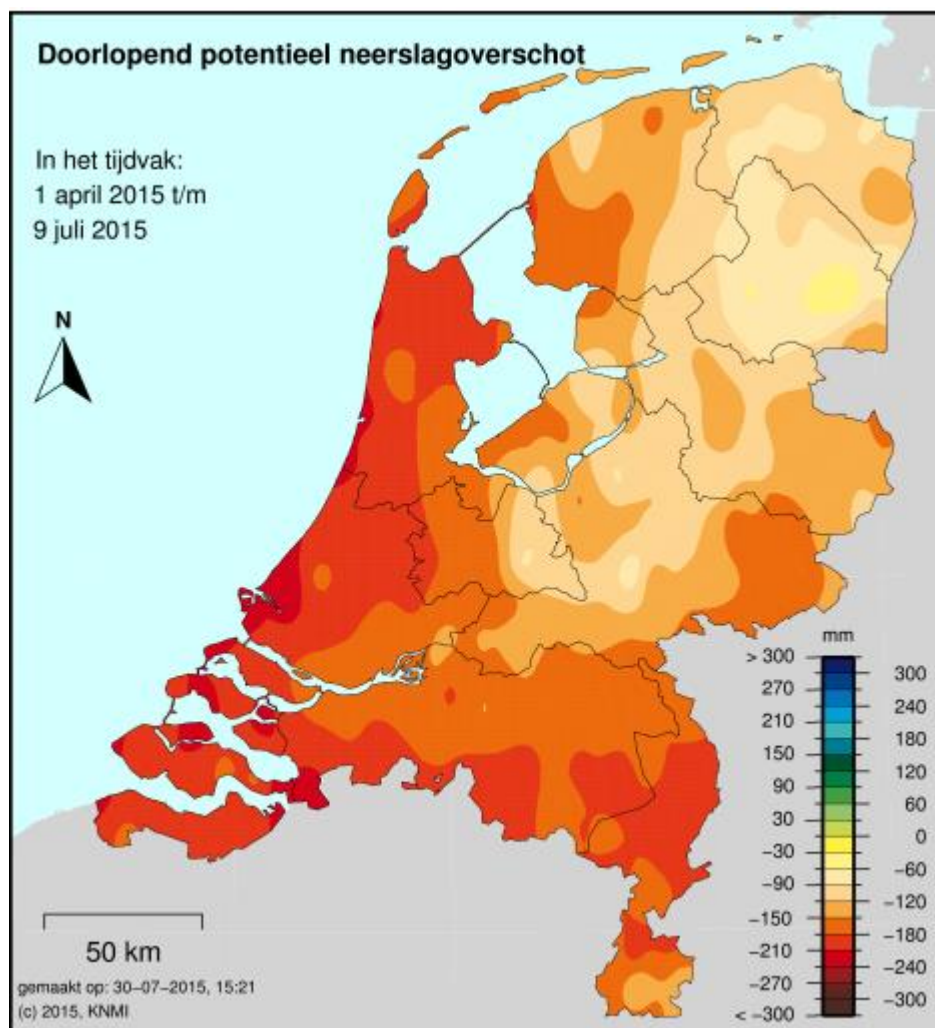
¹¹ <http://www.groenmonitor.nl/>



Figuur 24. Voorbeeld van de muizenschade in het gebied bij Jutrijp/Hommerts. Zowel aan het NIR-beeld (bovenste) als het NDVI-anomalie-beeld op de corresponderende locatie (middelste) zijn de muizenkraamkamers goed te herkennen. Het onderste beeld geeft de NDVI-anomalie van een muizenkraamkamer in nog meer detail weer.

9.2. Droogte

Nadat in 2003 bij Wilnis een veenkade verzakte als gevolg van langdurig aanhoudende droogte, is er bij de waterschappen meer aandacht gekomen voor de kwetsbaarheid van veenkades tijdens droge periodes⁷. Ook in het beheergebied van Wetterskip Fryslân komen veenkades voor. Van de totaal 3.300 km regionale kades, is 200 km geclassificeerd als 'droogtegevoelig'. Tijdens periodes met een neerslagtekort (berekend vanaf 1 april tot en met 30 september) groter dan 150 mm worden de droogtegevoelige keringen steekproefsgewijs geïnspecteerd. Dit komt ongeveer eens in de drie jaar voor. Begin juli 2015 was het neerslagtekort in het zuidwesten van Friesland groter dan 150 mm (zie Figuur 25). Daarom werden tussen 6 en 17 juli 40 km droogtegevoelige kades in dit gebied in het veld geïnspecteerd. Tijdens deze inspectie werd over 4 km kade droogteschade, zoals scheuren in de kade, vastgesteld.



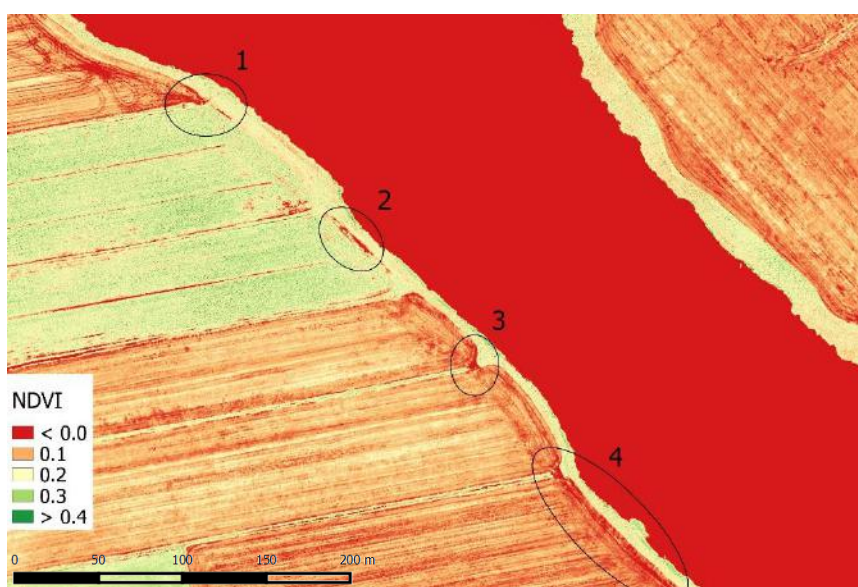
Figuur 25. Doorlopend potentieel neerslagtekort Nederland op 9 juli 2015¹².

In de 3^e week van augustus was het neerslagtekort nog verder opgelopen en stond een tweede inspectieronde gepland waarbij de gehele 200 km droogtegevoelige kaden geïnspecteerd zou worden. Na 16 augustus zakte het neerslagtekort echter tot onder de 175 mm en was een tweede inspectieronde niet meer nodig.

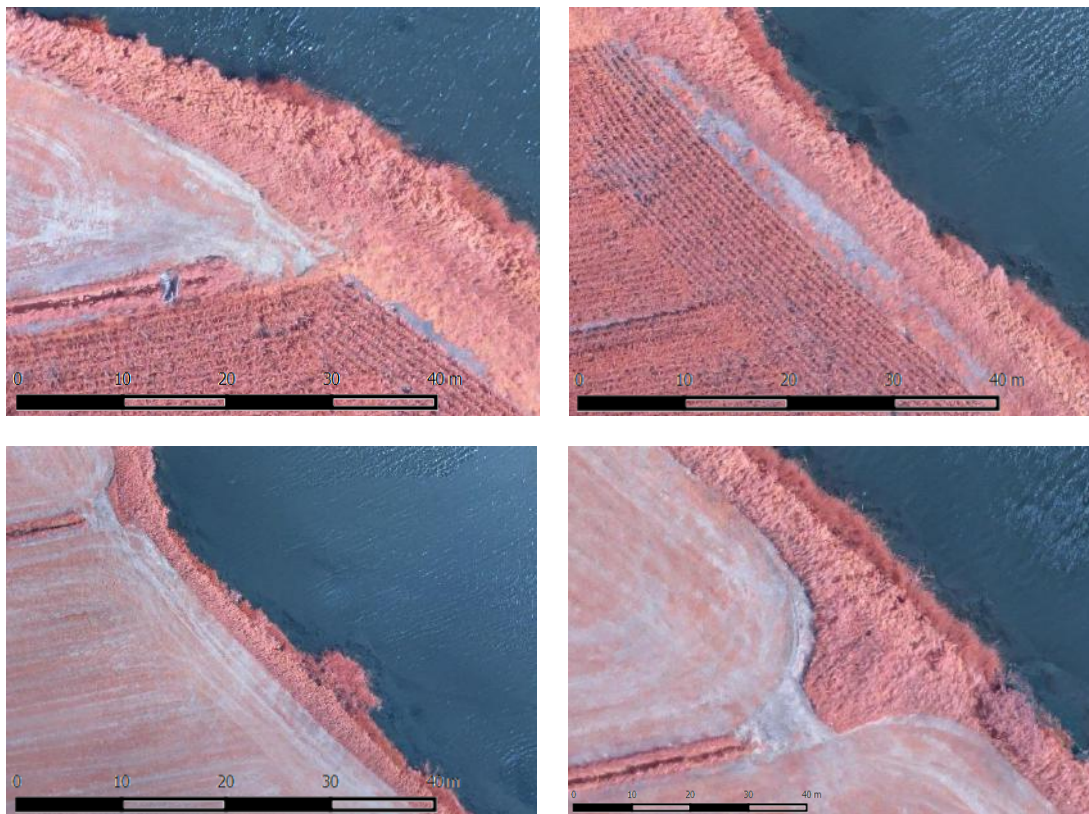
¹² <http://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/geografische-overzichten/archief-neerslagoverschot>

Tijdens de droogte-inspectie letten de kade-inspecteurs onder andere op de vervorming van de kruin en het talud van de kade en vervormingen van het aangrenzende land. Scheurvorming, kruinverzakking en het “opbollen” van het veen onder of langs kaden zijn belangrijke aanwijzingen voor afnemende stabiliteit. Deze vormen van schade zijn tijdens de droogte-inspectie wel vastgesteld, maar niet binnen één van de 9 pilotgebieden. Het enige pilotgebied waarbinnen schade werd vastgesteld was het pilotgebied bij Jutrijp. Of er in de andere pilotgebieden wel geïnspecteerd is, maar geen schade is vastgesteld is niet bekend.

In Jutrijp werd vastgesteld dat de grasmat op en nabij de kade op veel plaatsen afwezig was. Dit is ook terug te zien aan het NDVI-beeld (zie bovenste beeld Figuur 26) en het orthomosaïek van deze locatie op 21 juli 2015 (zie onderste beeld Figuur 26 en Figuur 27). Het voordeel van het op deze manier vastleggen van de droogteschade, is dat later precies teruggekeken kan worden waar de schade zich bevond en gecontroleerd kan worden of de schade op een later moment weer hersteld is.



Figuur 26. Voorbeeld van droogteschade in het pilotgebied bij Jutrijp te zien op het NDVI-beeld (bovenste) en het orthomosaïek (onderste) van 21 juli 2015.



Figuur 27. Details van de locaties binnen de cirkels in Figuur 26. Het detail linksboven komt overeen met locatie 1 in Figuur 26. Met de klok mee komen de overige beelden overeen met respectievelijk locaties 2, 3 en 4.

Voor het pilotgebied bij Oldelamer is gekeken of de invloed van de droogte zichtbaar was aan de gesteldheid van de kadevegetatie. Hiervoor is gekeken naar het verschil in NDVI tussen de beelden van mei en juli 2015. Aan de beelden was te zien dat in de twee maanden tussen mei en juli een groot deel van de kades en de percelen grenzend aan de kades gemaaid werden. Deze maaierwerkzaamheden hadden een directe verlaging van de NDVI tot gevolg. Dit kan geïllustreerd worden aan de hand van Figuur 29. Dit figuur geeft een uitsnede uit de orthomosaïek (bovenste beeld) en de NDVI (onderste beeld) voor 21 juli weer. Op de orthomosaïek is te zien dat een trekker met maaier in noordelijke richting rijdt. Het niet-gemaaid gras rechts van en voor de trekker heeft een NDVI waarde rond 0,25, terwijl de gemaaide banen links van en achter de trekker een NDVI waarde rond 0,15 hebben. Er zijn grove aannames te maken voor de relatie tussen de reflectie in NIR en bodemvocht. Voor een meer nauwkeurige relatie tussen reflectie en verdamping is een thermisch beeld nodig (in combinatie met een RGB- en NIR-beeld). Een voorbeeld van een verdampingsberekening-algoritme is SEBAL¹³.

De maaierwerkzaamheden zijn dus een versturende factor bij het bepalen van de invloed van droogte op de gesteldheid van de kadevegetatie. Om deze versturende factor uit te sluiten, is een stuk kade geselecteerd waar vrij zeker tussen mei en juli niet gemaaid is (zie Figuur 78 linksonder). De NDVI waarde was hier in juli gemiddeld 0,1 lager dan in mei. Ter referentie is ook gekeken naar de NDVI-verandering van boomvegetatie in hetzelfde pilotgebied (zie Figuur 78 rechtsboven). Omdat bomen door hun diepe beworteling veel minder last hebben van droogte dan grasachtige vegetatie, werd verwacht dat de NDVI van de boomvegetatie tussen mei en juli vrijwel gelijk zou blijven. Voor de geselecteerde boomvegetatie nam de NDVI waarde tussen mei en juli gemiddeld af met 0,03. Dit is duidelijk een kleinere afname dan voor de kadevegetatie.

¹³ <http://www.waterwatch.nl/tools0/sebal/sebal-a-scientific-description.html>

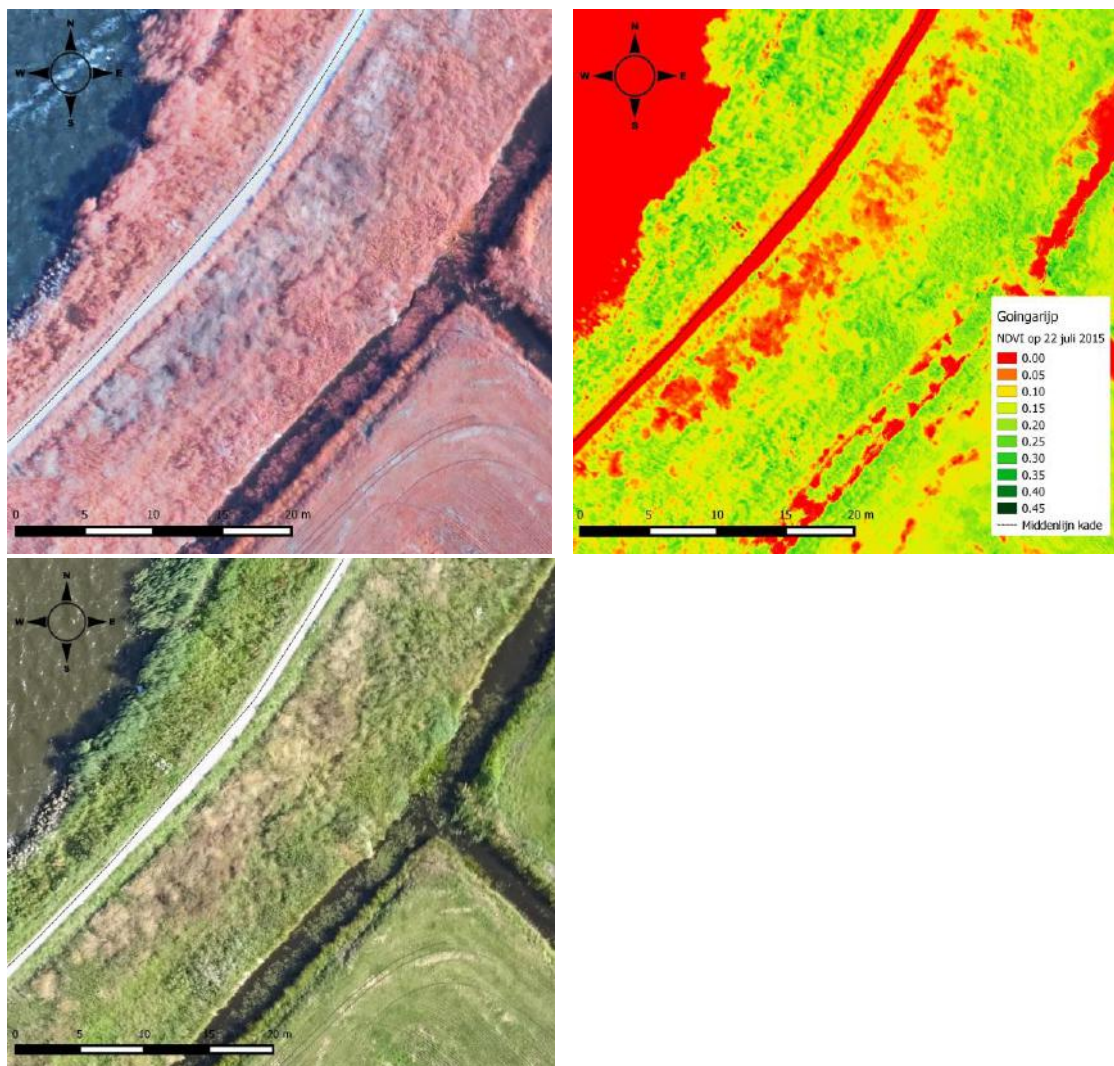
Door de NDVI-verandering van niet-gemaaide kadevegetatie te vergelijken voor verschillende pilotgebieden, kan de droogtegevoeligheid van de kadevegetatie per gebied worden ingeschat. De exacte relatie met de gevoeligheid van de kades voor droogteschade is echter niet bekend. Beter zou het zijn om te kijken naar de meldingen van droogteschade en te kijken in welke gebieden de meeste meldingen voorkomen. Dit zou dan gecorreleerd kunnen worden aan de bodemsoort (klei of veen), maar heeft waarschijnlijk ook met veel andere factoren te maken, zoals het verschil tussen boezempeil en polderpeil.

Voor alle gebieden waar in mei en juli gevlogen is (zie Tabel 12), is de NDVI-verandering van boomvegetatie vergeleken met de NDVI-verandering van niet-gemaaide kadevegetatie (zie Appendix 1.6). Ter referentie is ook de NDVI-verandering van verhard wegdek berekend. De resultaten staan in Tabel 12. Opvallend is dat voor alle gebieden de gemiddelde NDVI-waarde van het wegdek afneemt met 0,06 tot 0,07. De oorzaak is waarschijnlijk dat er in mei met een andere camera is gevlogen dan in juli. De gemiddelde NDVI-afname van de boomvegetatie is voor alle gebieden gelijk aan of kleiner dan de NDVI-afname van wegdek. Als we aannemen dat de NDVI-verandering van het wegdek in werkelijkheid nul was, is de NDVI van de boomvegetatie in werkelijkheid dus waarschijnlijk iets toegenomen tussen mei en juli. Voor de kadevegetatie is de NDVI-afname voor alle gebieden, behalve Allingawier, groter dan voor het wegdek en de boomvegetatie. Uit deze tabel zou je kunnen concluderen dat de kadevegetatie in Baard en Nijhuizum het meest gevoelig is voor droogte. De absolute verschillen zijn echter klein en daarnaast is het een steekproef van kleine oppervlaktes vegetatie. De NDVI-afname zou ook afhankelijk kunnen zijn van het soort vegetatie op de kade. Riet heeft bijvoorbeeld waarschijnlijk minder last van droogte dan gras, maar misschien juist wel een vegetatiecyclus waarbij de NDVI altijd afneemt naarmate de zomer vordert (ook als het niet extreem droog is). De verschillen in NDVI tussen verschillende vegetatietypes is terug te zien in de bovenste beelden van Figuur 28, waar de vegetatie vlak langs het fietspad een lagere NDVI heeft dan de vegetatie dichterbij de sloot. Dit lijkt niet een gevolg van het verschil in vochttoestand (er loopt een duidelijke scheidslijn tussen de verschillende vegetatietypes).

De volledige NDVI-beelden van september 2014, mei 2015, juli 2015 en oktober 2015 van de pilotgebieden uit Tabel 12 staan in Appendix 1.7.

Tabel 12. Verandering van de gemiddelde NDVI-waarde tussen juli en mei voor verschillende vegetaties. Bij negatieve waarden was de NDVI in juli lager dan in mei.

	Allingawier (Figuur 74)	Baard (Figuur 75)	Jutrijp (Figuur 76)	Nijhuizum (Figuur 77)	Oldelamer (Figuur 78)
Bodentype	Scheiding veen/klei	Klei	Veen	Klei op veen	Veen op zand
Gemiddelde NDVI- verandering wegdek	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07	-0,06
Gemiddelde NDVI- verandering boomvegetatie	-0,05	-0,07	-0,07	-0,03	-0,03
Gemiddelde NDVI- verandering kadevegetatie	-0,04	-0,11	-0,08	-0,10	-0,06

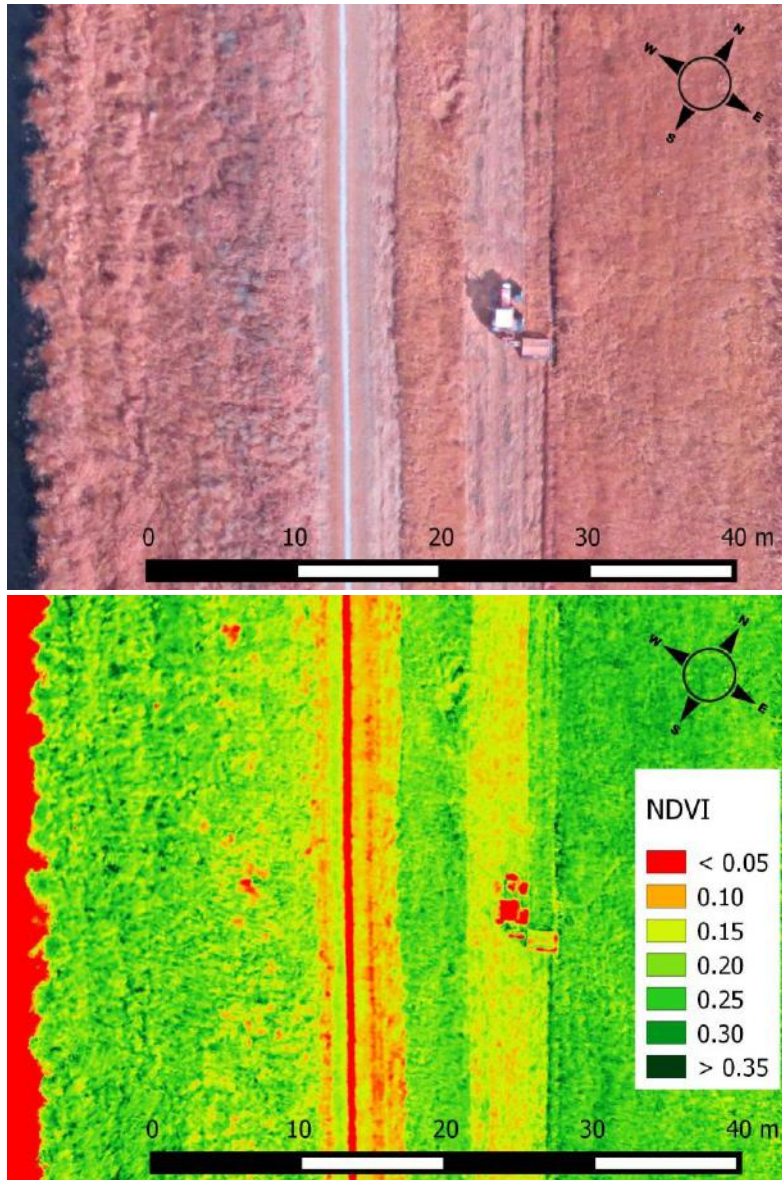


Figuur 28. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van kade in het pilotgebied bij Goingarijp op 22 juli 2015, NDVI-beeld van kade op 22 juli 2015, RGB-orthomosaïek van de kade op 22 juli 2015.

Bij monitoring van droogte is het van belang om vaker te vliegen dan de maaifrequentie. Wanneer grasland niet begraaft wordt, kan het maximaal vijf keer per seizoen gemaaid worden¹⁴. Dit komt neer op een maaifrequentie van eens per maand vanaf eind april/begin mei tot september. Dit houdt in dat voor droogtemonitoring meerdere keren per maand over de gebieden gevlogen zou moeten worden. Daarnaast is ook specifieke gebiedskennis van belang, zoals kennis over waar en wanneer er gemaaid is en wat voor soort vegetatie er aanwezig is.

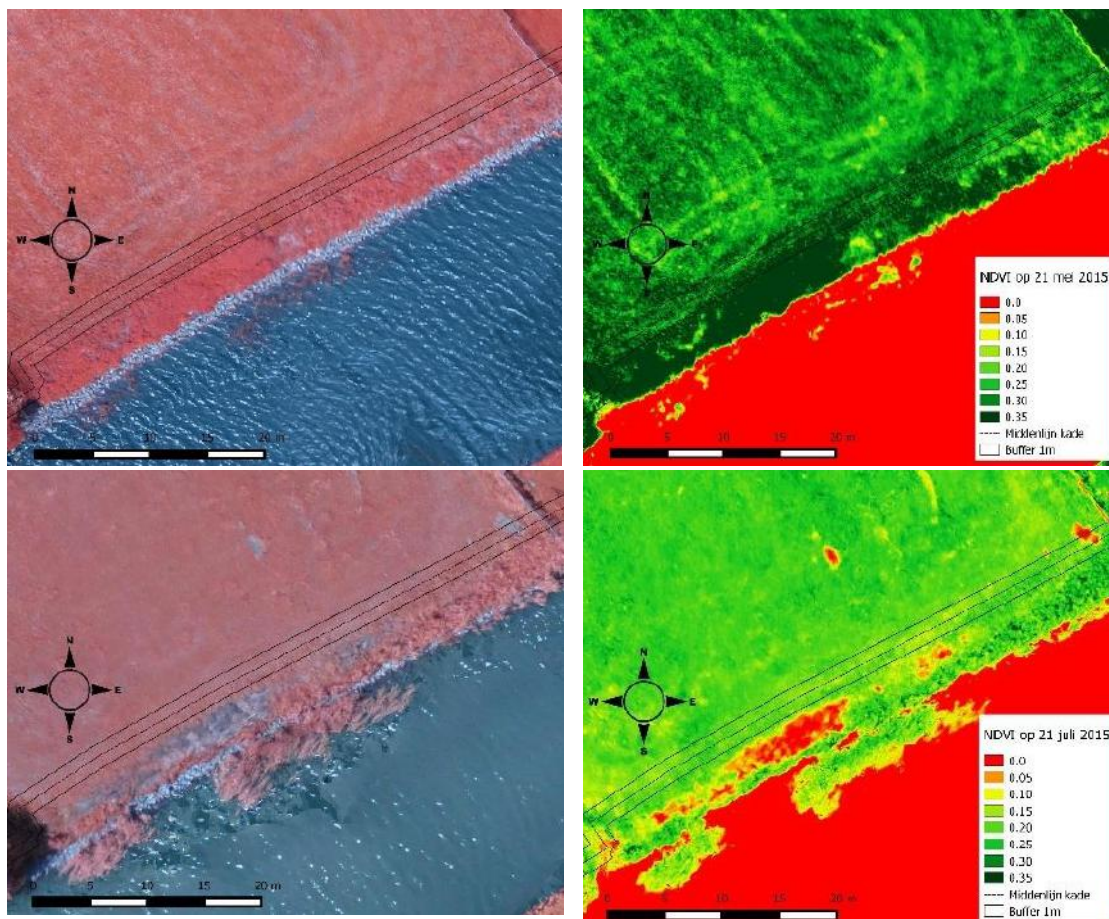
Naarmate een langere tijdserie van vluchten over een bepaald gebied beschikbaar is, kunnen opvallende locaties en momenten steeds beter worden gedetecteerd. De lokale verbanden tussen omgevingsfactoren, vegetatiegesteldheid en de toestand van de kade zijn dan ook steeds beter bekend, waardoor het Wetterskip en de Provincie Fryslân gerichte en adequate maatregelen kunnen treffen om oorzaken van zwakke plekken in de kade tijdig op te sporen en te verhelpen.

¹⁴ <http://www.deboeralsgastheer.nl/evenement/69/mei:-gras-maaien.html>,
http://www.nvwa.eu/data/uploads/documenten/voorjaar-kompas-stramien_3.pdf



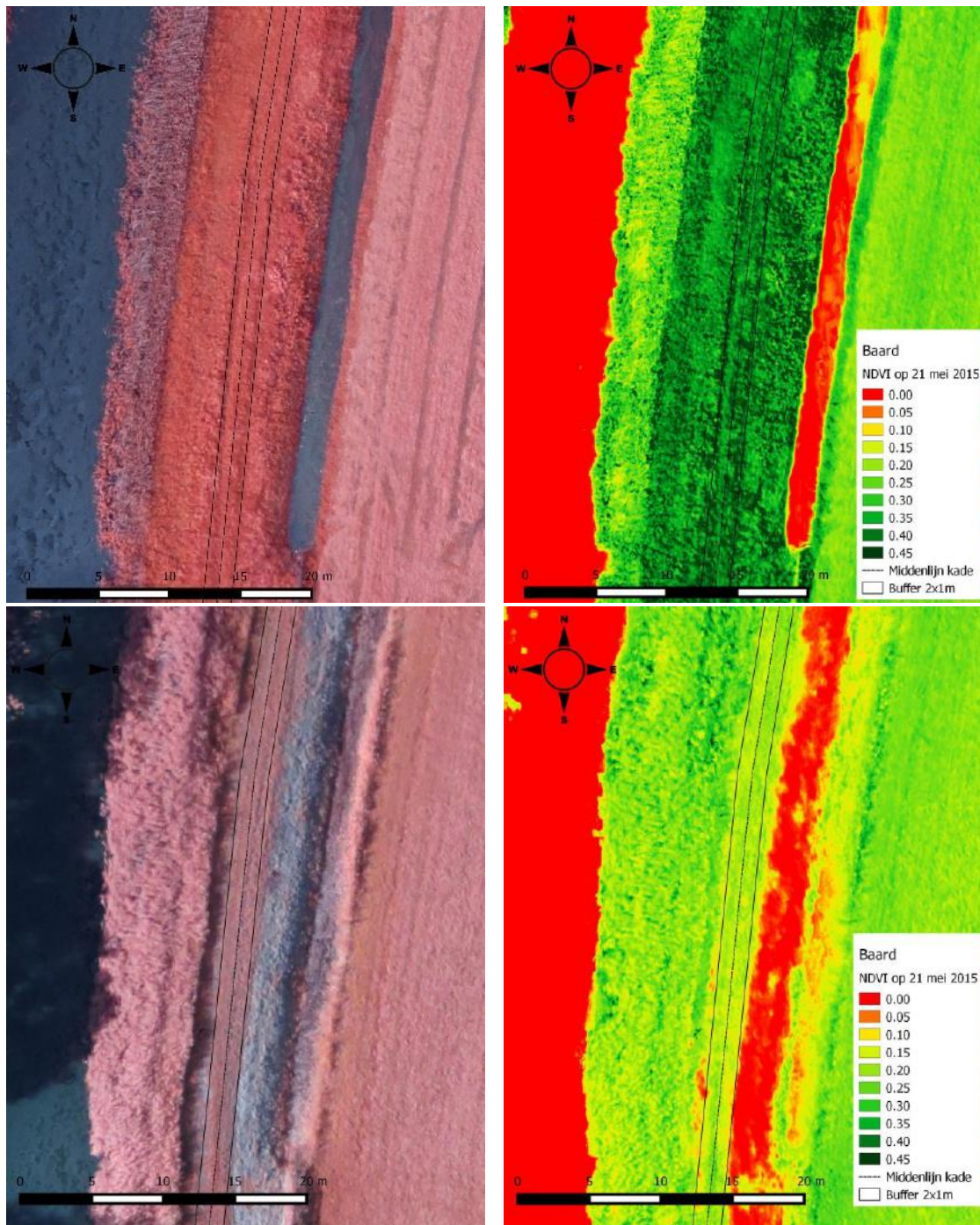
Figuur 29. Voorbeeld van de afname van de NDVI als gevolg van maaiwerkzaamheden in het pilotgebied bij Oldelamer op 21 juli 2015. Bovenste beeld geeft de NIR-orthomosaic weer, het onderste beeld de NDVI. Op de beelden is zowel gemaaide als ongemaaide vegetatie te zien.

Om te illustreren welke NDVI-veranderingen zichtbaar zijn tijdens een droge periode, zijn er voor een aantal gebieden een paar voorbeelden uitgelicht. Het eerste voorbeeld is Allingawier (zie Figuur 30). Hier zien we aan de bovenste beelden, gemaakt op 21 mei 2015 dat de oever van de kade overal goed begroeid is en een NDVI-waarde heeft tussen 0,20 en 0,30. Op de onderste beelden, gemaakt op 21 juli 2015, zien we dat de NDVI van de vegetatie op de oever op bepaalde plekken sterk is afgenomen naar waarden tussen 0 en 0,10. De oevervegetatie lijkt hier sterk verdroogd te zijn.



Figuur 30. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van kade in het pilotgebied bij Allingawier op 21 mei 2015, NDVI-beeld van kade op 21 mei 2015, NDVI-beeld van de kade op 21 juli 2015, NIR- orthomosaïek van kade op 21 juli 2015.

In Figuur 31 is in het pilotgebied bij Baard te zien dat het riet langs de kade zich in juli (onderste beelden) iets richting het water heeft uitgebreid ten opzichte van mei (bovenste beelden). Ook zien we hier dat de vegetatie op de oever van de teensloot (rechts van de kade) in juli een zeer lage NDVI-waarde heeft (rond nul), waar dit in mei nog rond de 0,40 was. De lage NDVI-waarde die op het beeld van mei te zien is, is de NDVI-waarde van het water in de teensloot. In juli staat er geen water meer in de sloot en is de NDVI-waarde van de slootbodem hoger dan nul.



Figuur 31. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van kade in het pilotgebied bij Baard op 21 mei 2015, NDVI-beeld van kade op 21 mei 2015, NDVI-beeld van de kade op 21 juli 2015, NIR-orthomosaïek van kade op 21 juli 2015.

Uit Figuur 30 en Figuur 31 blijkt dat plekken met verdroogde vegetatie goed te herkennen zijn op de NIR-beelden. De vraag is in hoeverre de verdroging van de vegetatie een directe relatie heeft met de plaatselijke vochttoestand van de kade. Daarnaast is het duidelijk dat het op basis van één beeld al mogelijk is om plekken met verdroogde vegetatie te identificeren, maar dat een vergelijking met een eerder gemaakt beeld pas duidelijk maakt wat de begintoestand van de vegetatie vóór de droge periode was.

9.3. Overige calamiteiten

Naast muizenplagen en droogtesituaties zijn er nog meer calamiteiten denkbaar waarbij de inzet van een Flying Sensor (in de toekomst) extra informatie zou kunnen bieden. Het gaat dan bijvoorbeeld om meldingen van rayonbeheerders n.a.v. de jaarlijkse kadeschouw of monitoring in het geval van extreem hoog water, als er water door de kade heen komt. Bij een calamiteit moet je er heel snel bij zijn, je moet er eigenlijk gelijk heen, onder alle weersomstandigheden. Bij een olie- of giflozing wordt de inspectie nu vaak met een bootje of met een helikopter gedaan. Er worden dan (lucht)foto's gemaakt waarop direct te zien is hoe groot het probleem is. Het voordeel van de inzet van een helikopter is dat er gelijk een inspecteur meegestuurd kan worden.

Een calamiteit die enkele keren per jaar voorkomt is het gebruik van gewasverdelger in de oeverzone. Op de oever mag bijvoorbeeld geen Roundup gespoten worden. Het gras sterft dan af. Voor de bewijsvoering zou je beelden vanuit de lucht kunnen maken, maar dat heeft nu nog geen meerwaarde. Nu gaat een inspecteur erheen met een digitale camera en maakt er foto's van. Als je met een Flying Sensor gaat vliegen moet er ook een piloot heen en kost het in totaal meer tijd. De resolutie van 5 bij 5 cm die een Flying Sensor nu kan bieden zou wel voldoende zijn.

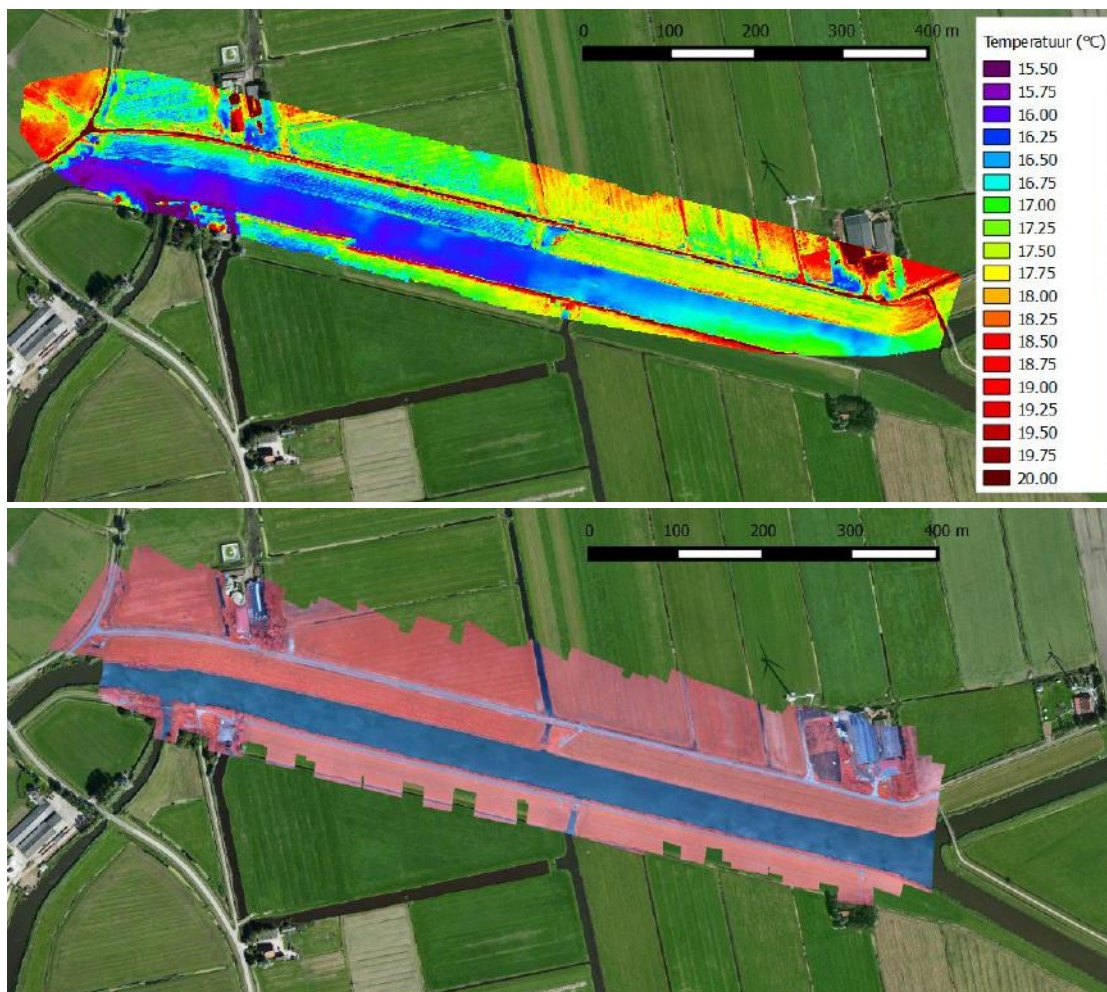
10. Kweldetectie

Uit overleg met het Wetterskip Fryslân kwam naar voren dat er behoefte is aan een innovatieve methode om kwel te detecteren, waarbij geen inspectie in het veld nodig is. Een van de mogelijke methodes om kwel te detecteren is het maken van thermische beelden van een gebied. Thermische beelden geven de oppervlaktetemperatuur in een gebied weer. Door de temperatuurverschillen tussen waterlopen en vasteland zou, in theorie, kwel kunnen worden geconstateerd op plekken waar de landtemperatuur afwijkt van de omgeving. Om deze methode van kweldetectie te testen zijn er op 9 oktober 2015 in drie gebieden in Friesland pilots uitgevoerd met een thermische camera (zie Figuur 32). De geselecteerde gebieden zijn bekende kwellocaties. In Allingawier is er sprake van zoete kwel vanuit de boezem, terwijl er in Roptazijl en Pietersbierum zoute kwel vanuit de Waddenzee optreedt.



Figuur 32. Gebieden waar gevlogen is met een thermische camera. Coördinaatstelsel is Amersfoort RD Nieuw.

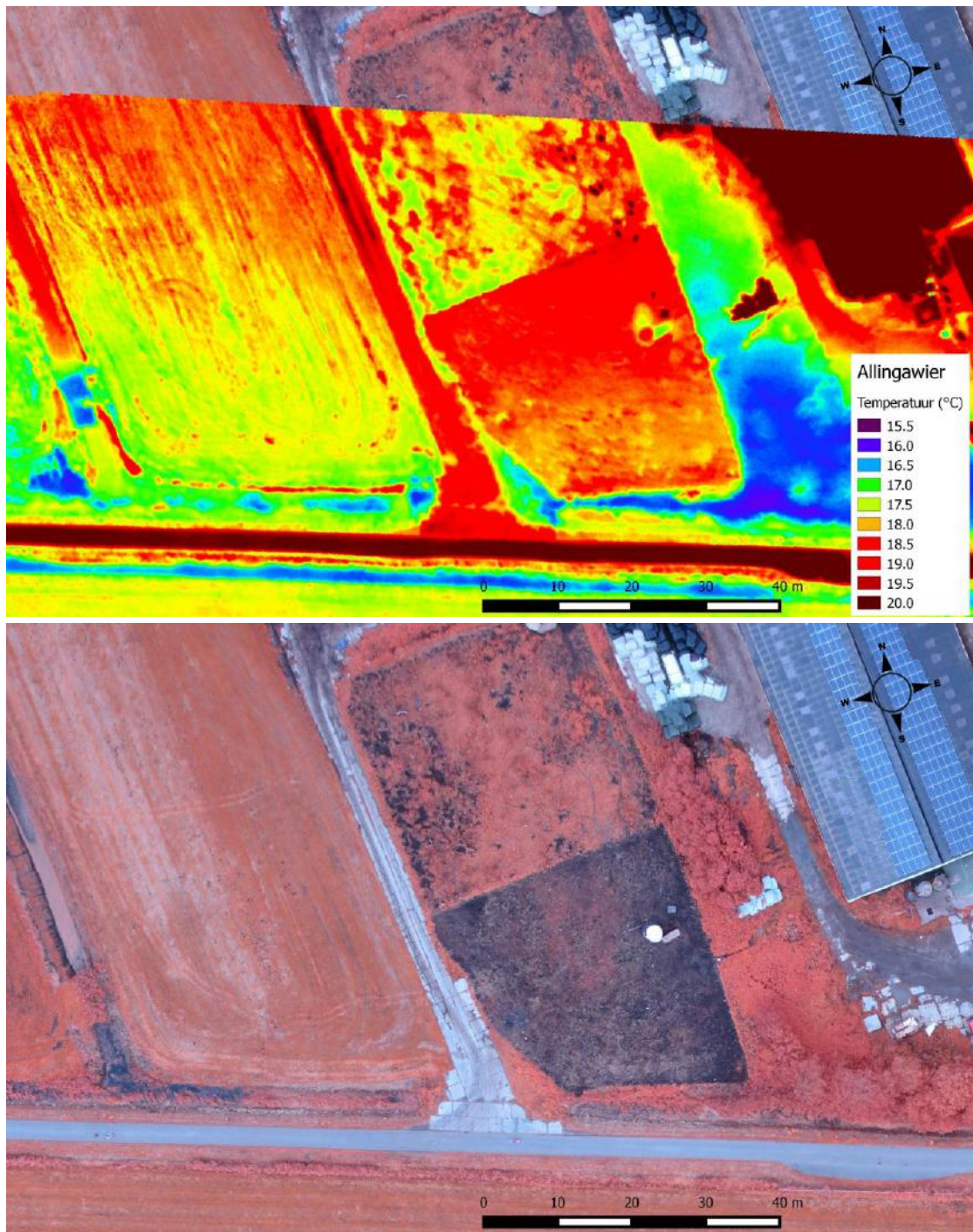
In het gebied bij Allingawier werd naast een thermisch beeld ook een nabij-infrarood beeld genomen. Beide beelden zijn weergegeven in Figuur 33. De opname van het thermische beeld in Allingawier vond plaats tussen 12:46 en 13:07.



Figuur 33. Thermisch beeld (bovenste) en nabij-infrarood beeld (onderste) van het gebied bij Allingawier.

Aan het thermische beeld in Figuur 33 is te zien dat het wateroppervlak van de boezem (in dit gebied) een lagere temperatuur heeft dan het landoppervlak. Het wateroppervlak van het slotwater is echter juist relatief warm ten opzichte van de omgeving. Daarnaast is in Figuur 33 en Figuur 34 te zien dat de temperatuur van het verharde wegoppervlak hoger is dan van het onverharde oppervlak. Ook is in Figuur 34 te zien dat de temperatuur van kale grond (rood gekleurd) hoger is dan van de begroeide grond, waar de temperatuur door gewasverdamping lager is (geel/groen gekleurd). Verder laat het thermische (bovenste) beeld in Figuur 34 zien dat hoge vegetatie een nog lagere oppervlaktetemperatuur heeft (blauw gekleurd). Dit wordt veroorzaakt door een hoge gewasverdamping.

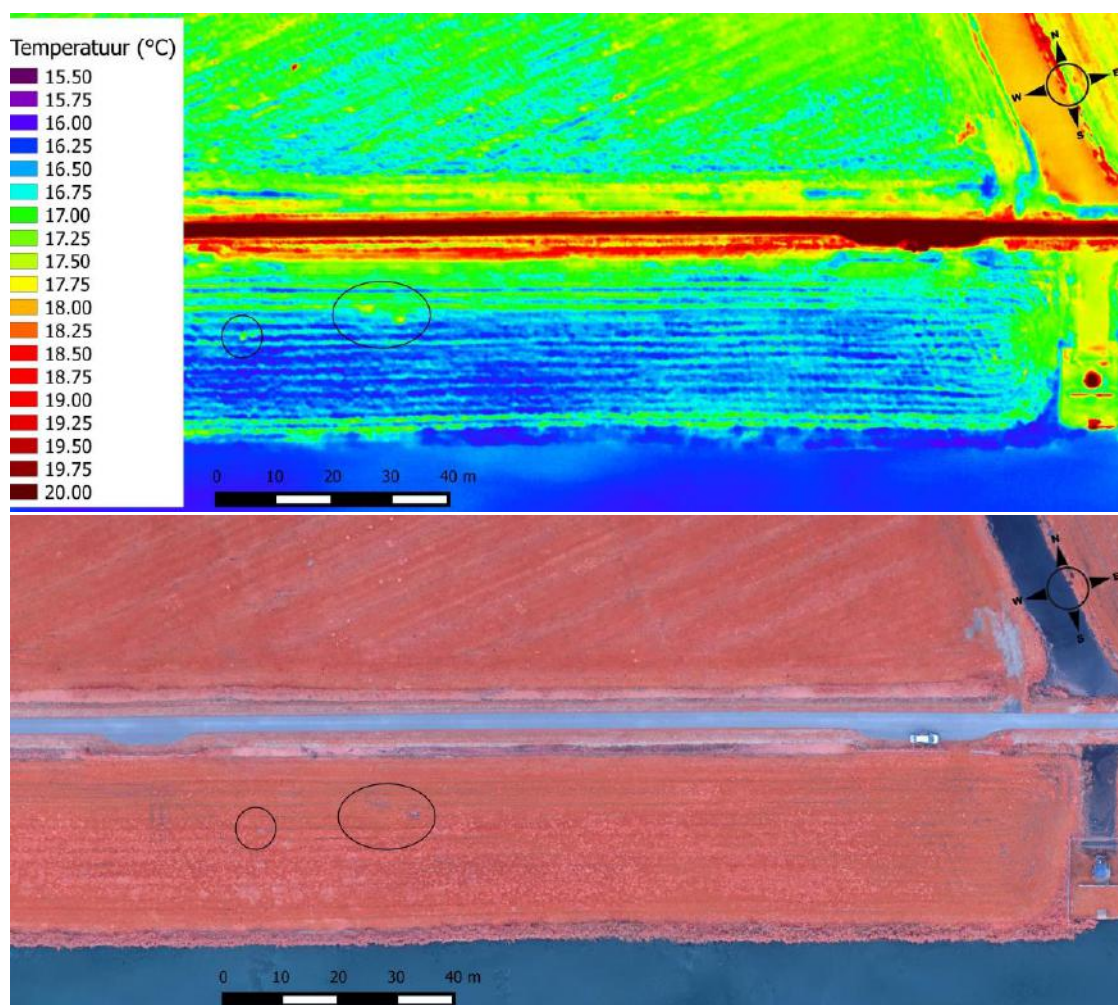
In Allingawier werden door de Flying Sensor operators kwelplekken gevonden in het veld (zie foto's Figuur 35). De kwelplekken bevonden zich onderaan de boezemkade. De plekken zijn in het thermische beeld te herkennen door hun hogere temperatuur (Figuur 36 en Figuur 37). Opvallend is dat deze plekken niet een lagere temperatuur hebben dan de omgeving, zoals je zou verwachten. Als hier inderdaad koud kwelwater vanuit de boezem door de dijk stroomt, heeft dit water de omgevingstemperatuur aangenomen en is mogelijk extra opgewarmd door de zon. Omdat er op deze kwelplekken geen gras staat, wordt het oppervlakte niet afgekoeld door gewasverdamping.



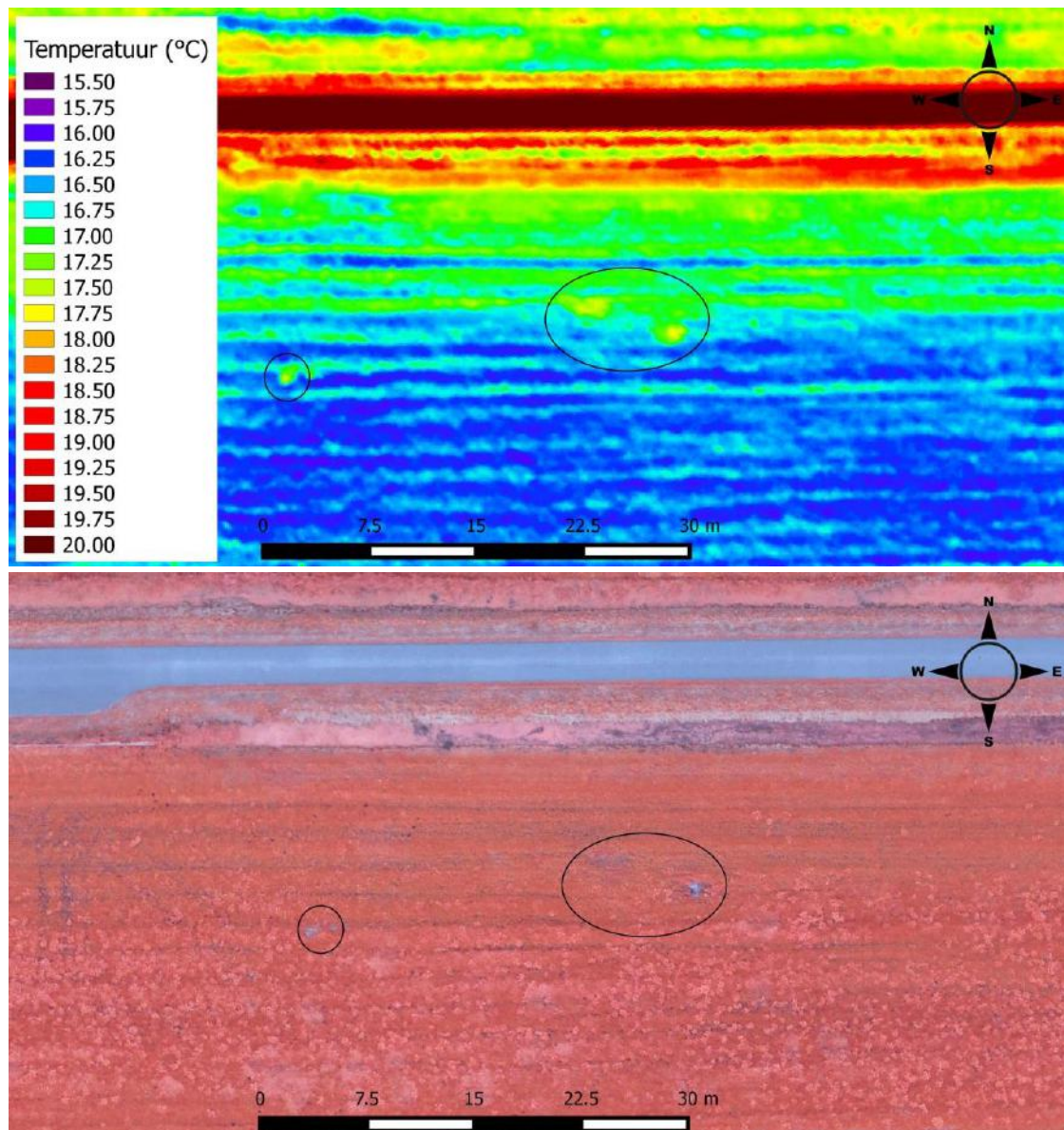
Figuur 34. Detail van thermisch beeld (bovenste) en nabij-infrarood beeld (onderste) waarop het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen kale grond (warm, rood) en begroeiende grond (relatief koud, groen/blauw) te zien is.



Figuur 35. Kwelplekken in het gebied bij Allingawier.

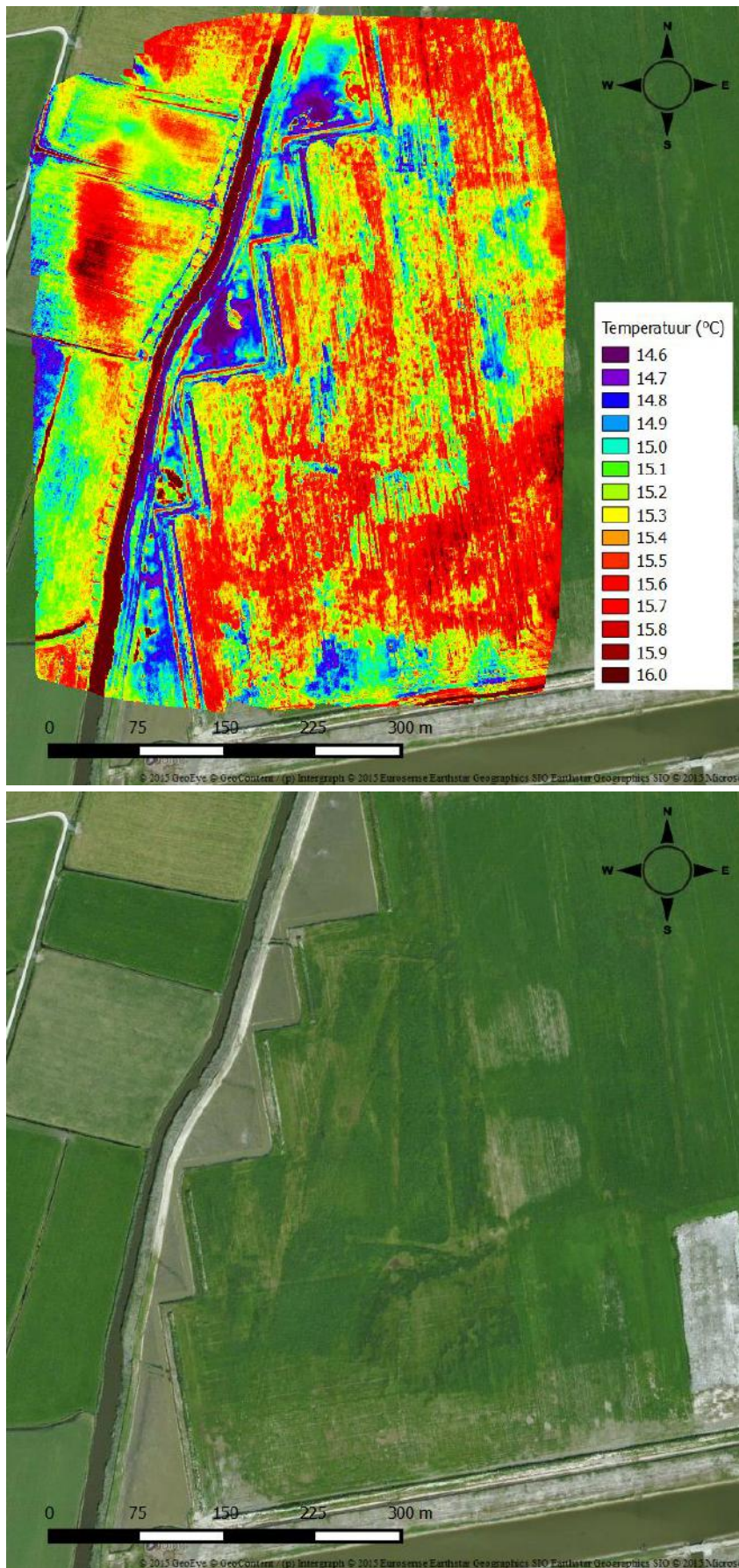


Figuur 36. Thermisch beeld (bovenste) en nabij-infrarood beeld (onderste) van kwelplekken onderaan de kade in het gebied bij Allingawier. Mogelijk zijn er binnen de cirkels kwelplekken te zien.



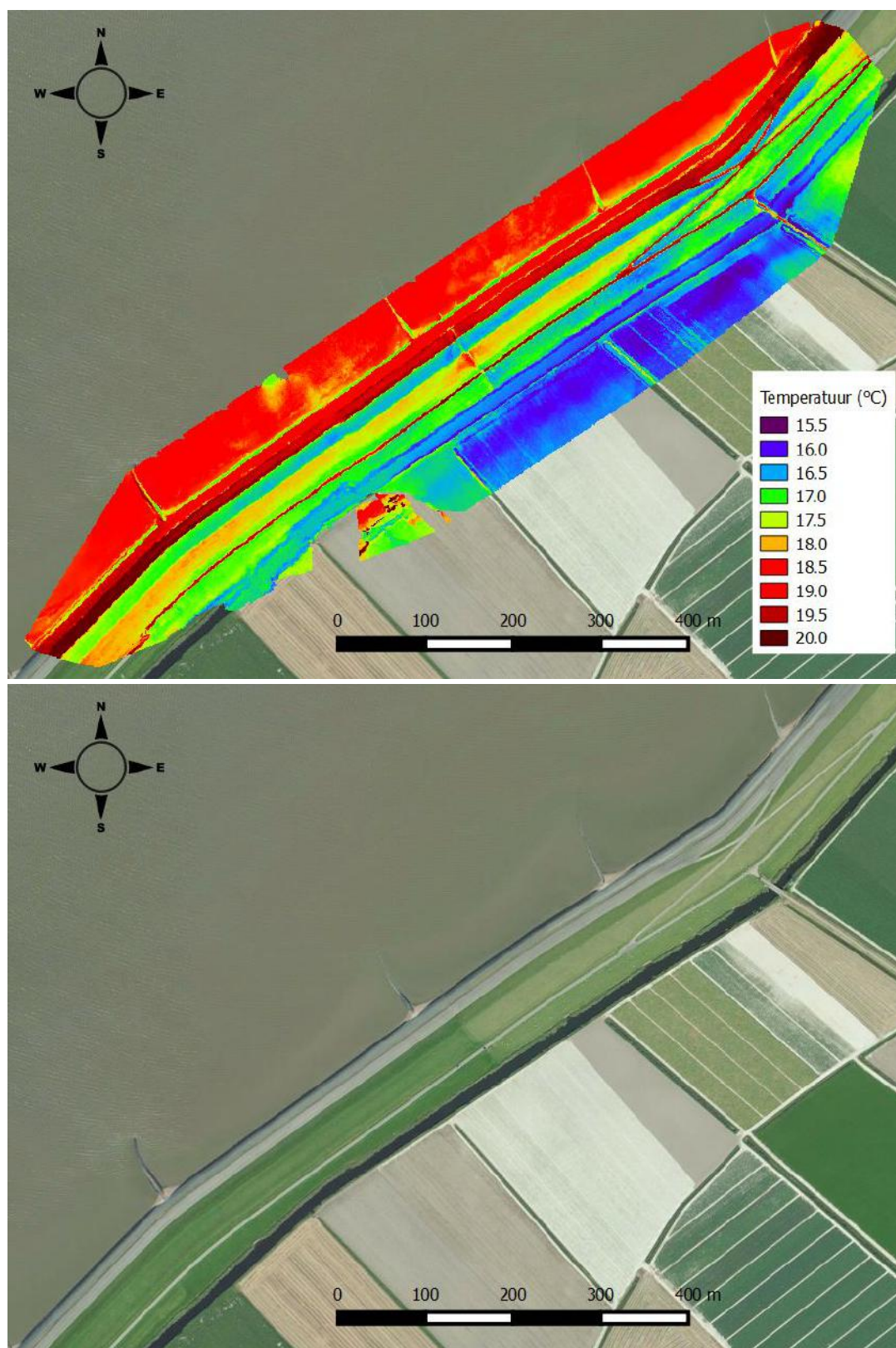
Figuur 37. Detail van thermisch beeld (bovenste) en nabij-infrarood beeld van kwelplekken onderaan de kade in het gebied bij Allingawier.

In Figuur 38 is het thermische beeld van het gebied bij Pietersbierum weergegeven. Dit beeld werd gemaakt tussen 15:51 en 16:09. Hier valt op dat het wateroppervlakte van de boezem juist relatief warm is ten opzichte van het landoppervlak (in tegenstelling tot het boezemwater in het gebied bij Allingawier). Ook valt het op dat het landoppervlak van het middelste perceel aan de linkerkant van het boezemkanaal relatief warm is ten opzichte van de omgeving. Dit zou kunnen komen door een lager waterhoudend vermogen van de bodem op die locatie, waardoor de bodem droger is, het gras minder kan water kan verdampen en het landoppervlakte dus minder afkoelt. Ook zijn er aan de linkerkant van het boezemkanaal opvallende horizontale lijnstructuren te zien. Omdat er in dit gebied geen RGB- of NIR-beelden gemaakt zijn, is het niet mogelijk te achterhalen wat hier de oorzaak van zou kunnen zijn (op het achterliggende satellietbeeld, waarvan de opnamedatum onbekend is, zijn geen bijzonderheden te zien).



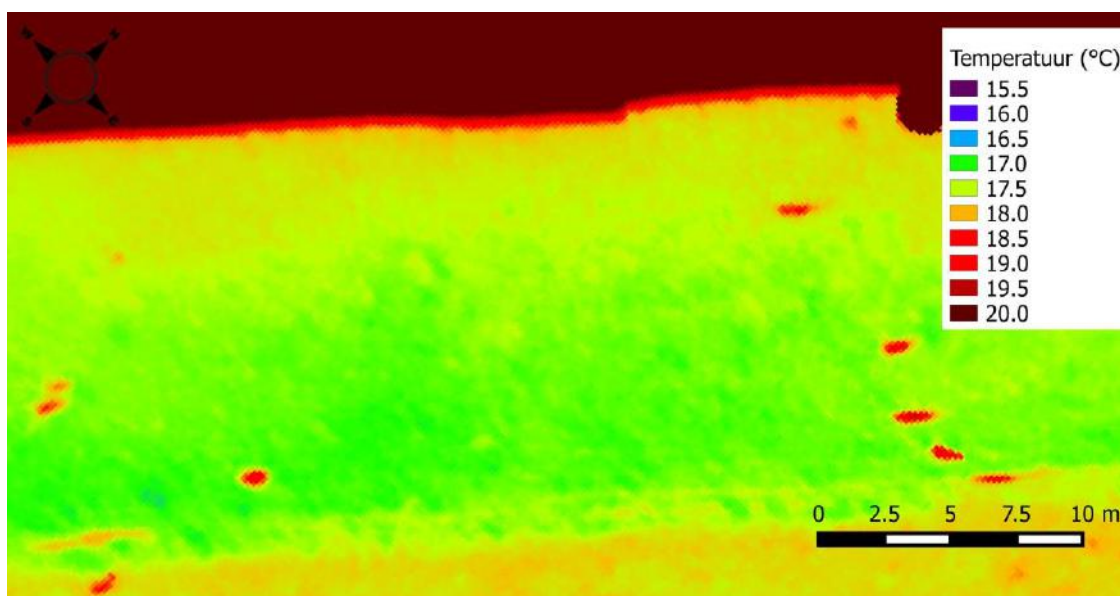
Figuur 38. Thermisch beeld (bovenste) en Bing maps satellietbeeld (onderste) van het gebied bij Pietersbierum.

Figuur 39 geeft het thermische beeld van het gebied bij Roptazijl weer. Dit beeld werd gemaakt tussen 14:19 en 14:31.



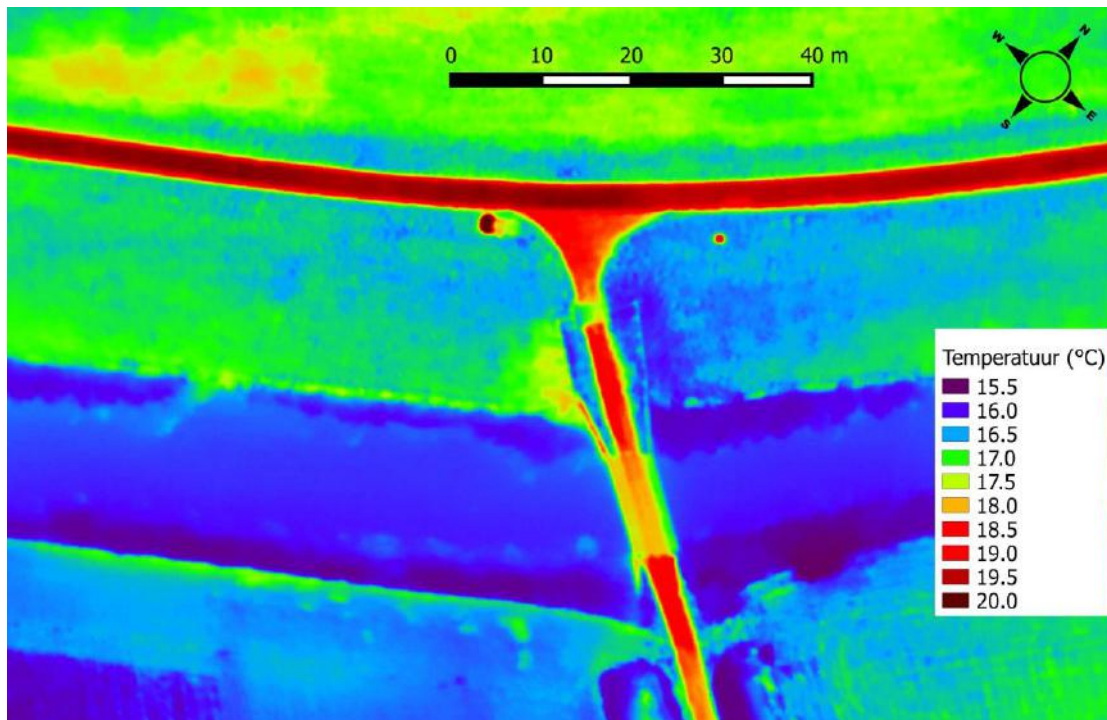
Figuur 39. Thermisch beeld (bovenste) en Bing maps satellietbeeld (onderste) van het gebied bij Roptazijl.

Opvallend is dat het water van de Waddenzee relatief warm is. Ook het verharde oppervlak van de dijk en de wegen springen direct in het oog, doordat zij een relatief hoge oppervlaktetemperatuur hebben. Daarnaast is er een temperatuurverschil te zien tussen de noordwestkant van de dijk (lichtblauw, temperatuur ongeveer 16,5 graden) en de zuidoostkant van de dijk (oranjegeel, temperatuur ongeveer 18,0 graden). Het wateroppervlakte in de sloot onderaan de dijk is relatief koud ten opzichte van de omgeving. Locaties waar in dit gebied zoute kwel optreedt, zouden dus een hogere temperatuur moeten hebben dan de omgeving.



Figuur 40. Detail van het thermische beeld van het gebied bij Roptazijl waarop schapen te zien zijn.

Rechts bovenin beeld zijn opvallende warme vlekken in het beeld te zien (zie Figuur 40). Dit zijn waarschijnlijk schapen die op de dijk grazen. Aan het satellietbeeld (opnamedatum onbekend) is te zien dat dat op die locatie voor kan komen. Iets meer naar het zuidwesten zijn onderaan de dijk nog twee warme plekken te zien (zie Figuur 41). Dit lijken geen schapen te zijn, want de plekken zijn daarvoor te groot en niet in een kudde gegroepeerd. Deze plekken zouden kwelplekken kunnen zijn. Omdat er in dit gebied geen opname is gemaakt in NIR of RGB, is niet te achterhalen wat er op deze warme plekken aan de hand is. Bij het maken van thermische opnamen is het maken van een extra opname in NIR of RGB dus zeker van toegevoegde waarde.

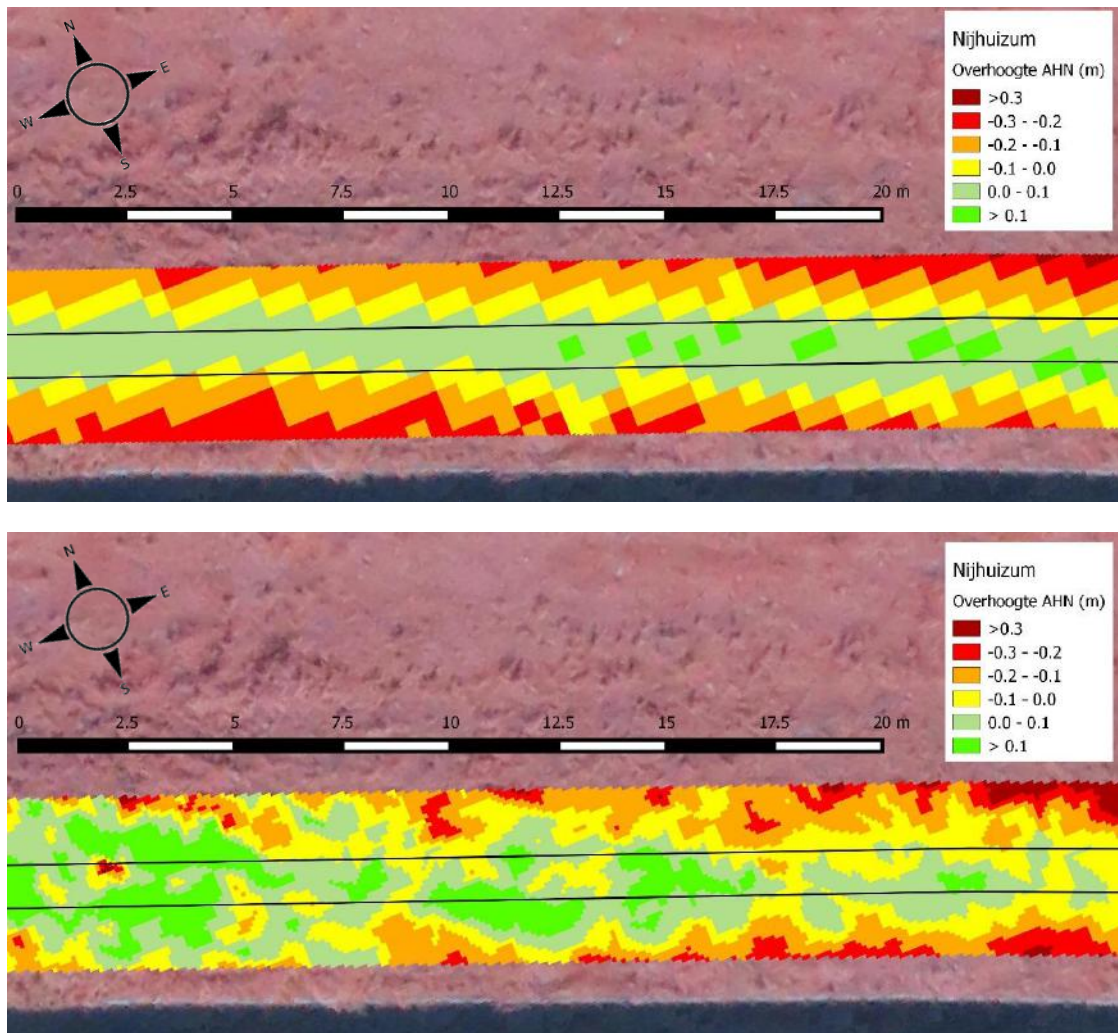


Figuur 41. Detail van het thermische beeld van het gebied bij Roptazijl.

11. Validatie

11.1. Vergelijking AHN met Flying Sensor hoogtemodellen

Het zwakke punt van het AHN2 (2008) is dat het op veel plekken missende data heeft, ook op kadelocaties. Daarnaast is de resolutie van het AHN2 en AHN3 slechts 50 bij 50 cm. Ten slotte is een nadeel van het AHN dat de data niet regelmatig wordt vernieuwd. De resolutie van de hoogtemodellen verkregen uit de Flying Sensors is geschaald naar 10 bij 10 cm voor alle pilotgebieden, behalve voor Haskerdijken waar de resolutie 6 bij 6 cm is. Daarnaast is een groot voordeel van Flying Sensors dat deze op elk gewenst moment kunnen worden ingezet.



Figuur 42. Vergelijking resolutie AHN (boven) met resolutie Flying Sensor hoogtemodel (onder) voor een kadeselement in Nijhuizum.

Om een idee te geven van het verschil in resolutie is in Figuur 42 een voorbeeld weergegeven van de overhoogte van een kadeselement bij Nijhuizum volgens het AHN2 (bovenste beeld) en volgens het Flying Sensor hoogtemodel verkregen op 21 mei 2015 (onderste beeld). De overhoogte is het aantal meter dat de dijk hoger is dan de toetshoogte (hoogte waaraan de kade moet voldoen). De breedte van de geclassificeerde strook is 2 m aan beide kanten van het midden van de kruin. De vereiste kruinbreedte op deze locatie is 1 m, dus de strook die getoetst wordt is in werkelijkheid vier keer smaller (zie oppervlakte tussen de zwarte lijnen).

De nauwkeurigheid van het AHN voldoet over heel Nederland aan een systematische fout van 5 cm en een stochastische fout (één standaardafwijking) van 5 cm (van der Zon, 2013¹⁵). De praktijk wijst uit dat voor alle projectgebieden geldt dat de data hier ruim aan voldoet en in de regel zelfs beter is. Zoals eerder beschreven in Hoofdstuk 7.3 bleek uit een steekproef met veertien controlegrids verspreid over Friesland dat het gemiddelde absolute verschil in z-richting 1.5 cm is, waarbij 68% van de controlegrids een afwijking heeft van minder dan 1,3 cm, 90% een afwijking van minder dan 3,6 cm en 99,6% een afwijking van minder dan 4,5 cm¹⁶. Datasets met een systematische fout van ongeveer 3 centimeter en een standaardafwijking van ongeveer 4 cm komen regelmatig voor. Deze waarden zijn getoetst aan de hand van referentiemetingen, hoogtedata van rioolputdeksels en objecten uit beheerkaarten zoals het DTB (Digitaal Topografisch Bestand) van Rijkswaterstaat.

De systematische fout van de Flying Sensor hoogtebeelden kan worden geschat op 4 tot 6 cm. Dit betekent dat de Flying Sensor hoogtebeelden gemiddeld 4 tot 6 cm hoger liggen dan de grondreferentiepunten. Deze schatting is gebaseerd op het gemiddelde van de verschillen in hoogte tussen de grondreferentiepunten en de Flying Sensor hoogtebeelden (van 21 mei 2015) op de corresponderende locaties (zie tweede kolom Tabel 13). In de eerste kolom van Tabel 13 staat achter de naam van het pilotgebied tussen haakjes het aantal grondreferentiepunten aangegeven dat gebruikt is. Hierbij moet opgemerkt worden dat voor het georefereren van de beelden dezelfde dGPS-punten zijn gebruikt als voor het schatten van de nauwkeurigheid. De standaardafwijking van de fout ligt tussen de 6 en 26 cm (zie laatste kolom Tabel 13). De hoge standaardafwijking in het pilotgebied bij Jutrijp wordt veroorzaakt doordat slechts één van de elf grondreferentiepunten op duidelijk te onderscheiden, verhard oppervlak ligt. De volledige tabellen per pilotgebied zijn te vinden in Appendix 1.3.2.

Tabel 13. Verschil tussen de gemeten hoogte van de grondreferentiepunten (in meter +NAP) en de hoogte van het Flying Sensor hoogtemodel op de corresponderende locaties op 21 mei 2015.

	Gemiddelde verschil (bias) DEM-GCP	Gemiddelde absolute verschil	Standaardafwijking van het verschil
Allingawier (6)	0,045	0,063	0,056
Baard (9)	0,055	0,087	0,098
Jutrijp (11)	0,059	0,206	0,258
Nijhuizum (11)	0,055	0,056	0,060
Oldelamer (5)	-0,068	0,114	0,194

In Tabel 14 is de gemiddelde hoogte van een verhard wegvlak (in meter +NAP) voor de Flying Sensor hoogtemodellen weergegeven voor de verschillende opnamemomenten. Ter referentie is ook de gemiddelde hoogte van het verharde wegvlak voor het AHN weergegeven. De werkelijke gemiddelde hoogte is onbekend, omdat er geen grondreferentiepunten binnen het wegvlak opgemeten zijn. Het pilotgebied bij Jutrijp is niet opgenomen in de tabel, omdat er geen verhard wegvlak aanwezig is binnen het pilotgebied.

¹⁵ Van der Zon, N. 2013. Kwaliteitsdocument AHN2 versie 1.3. www.ahn.nl

¹⁶ BKS. 2009. Inmeting AHN-2 2008. Perceel 2 – Friesland Samenvatting definitief.

Tabel 14. Gemiddelde hoogte van een verhard wegvlak (in meter +NAP) voor de digitale hoogtemodellen op verschillende momenten. In Jutrijp is geen verhard wegdek aanwezig binnen het pilotgebied

	Oldelamer	Nijhuizum	Allingawier	Baard
AHN2 (2008)	-0,12	-0,56	-1,00	0,61
16 september 2014	-0,12	-0,56	-1,05	0,66
21 mei 2015	-0,02	-0,65	-1,03	0,78
21 juli 2015	-0,01	-0,54	-1,07	0,68
1 oktober 2015	-0,06	-0,54	-1,00	0,65

De voorgaande schattingen geven alleen een indicatie van de nauwkeurigheid in de z-richting. Hierbij is aangenomen dat de verplaatsing in de xy-richting zo klein is, dat dit op de beelden niet te zien is. Dit geldt zeker voor de grondreferentiepunten die niet op verhard oppervlakte liggen. Omdat er in de pilotgebieden bij Goingarijp, Haskerdijken, Hommerts en Uilensprong targets ingemeten zijn, is de nauwkeurigheid hier nog beter in te schatten. Daarom is voor het pilotgebied bij Goingarijp aan de hand van de NIR-beelden van 22 juli 2015 een inschatting gemaakt van de nauwkeurigheid in zowel de x-, y- als z-richting. De gemiddelde afwijking in de x-richting was 0,9 cm, de gemiddelde afwijking in de y-richting 0,6 cm en de gemiddelde afwijking in de z-richting was 2,1 cm. Ook hierbij moet opgemerkt worden dat voor het georefereren van de beelden dezelfde dGPS-punten zijn gebruikt als voor het schatten van de nauwkeurigheid. In werkelijkheid kunnen de afwijkingen dus iets groter zijn. De volledige tabel met resultaten is te vinden in Appendix 1.3.3.

11.2. Vergelijking met resultaat 3D-laserscanner en multirotor

Om de verschillende meetmethoden bij kade-inspectie te beoordelen, zijn de kades in de pilotgebieden bij Goingarijp, Haskerdijken, Hommerts, en Uilensprong op twee verschillende momenten ingemeten met een 3D-laserscanner. In alle gebieden zijn de kades over een totale lengte van ongeveer 200 strekkende meter in kaart gebracht met behulp van verschillende aan elkaar gekoppelde scanopstellingen.

Deze laserscanmetingen zijn uitgevoerd door Kavel10. In het pilotgebied bij Haskerdijken zijn de kades ook ingevlogen met een multirotor Flying Sensor (kortweg 'multirotor'). Deze vluchten zijn uitgevoerd door Droneview. Een overzicht van de werkzaamheden van de partners in de verschillende gebieden staat in Tabel 1. In de volgende paragrafen staan de verschillende meetmethodes beschreven en worden de resultaten met elkaar vergeleken. De bijbehorende kosten zijn beschreven in Hoofdstuk 6.

11.2.1. 3D-laserscanner¹⁷

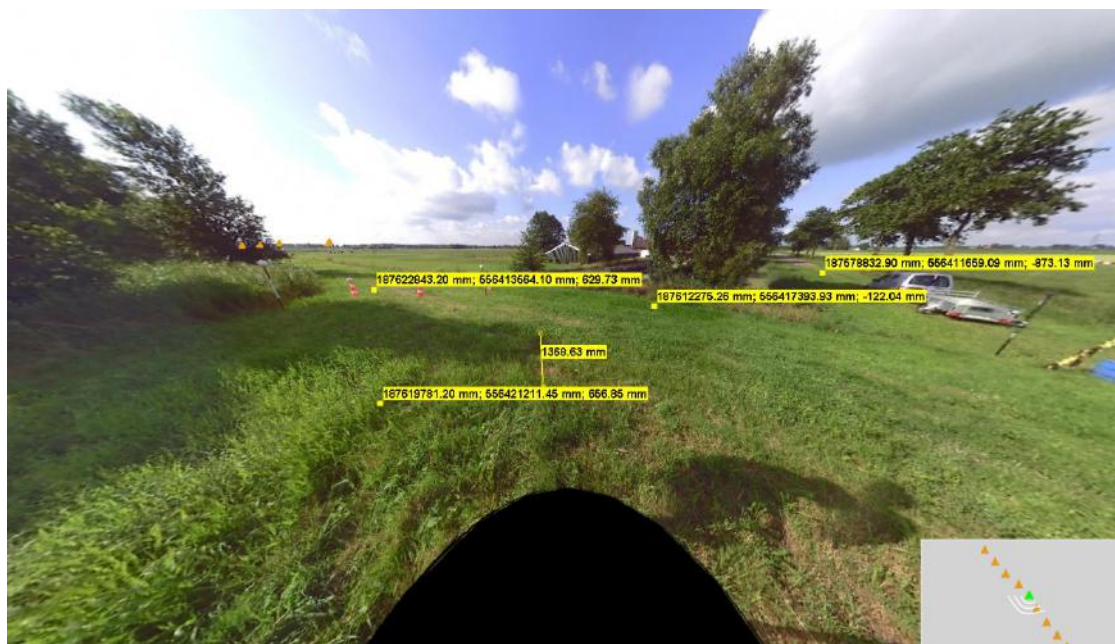
Kavel10 heeft 3D-laserscantechniek ingezet om tot op de millimeter nauwkeurig een beeld te geven van de kades in de pilotgebieden. Figuur 43 geeft het scangebied voor het pilotgebied bij Haskerdijken weer. Om tot op de millimeter nauwkeurig te kunnen meten, werd de inmeting van de referentiepunten gedaan met een Total-station. Deze heeft een hogere nauwkeurigheid dan een dGPS.

¹⁷ Dit hoofdstuk is geschreven door Kavel10.

De scandata ligt in het RD stelsel op coördinaten millimeter nauwkeurig. Hierdoor is direct uit de onderliggende foto beelden te meten in NAP (zie Figuur 44). Rechtsonder in het beeld zijn de verschillende scanopstellingen in beeld gebracht. Deze worden onderling door de software aan elkaar gekoppeld. De koppeling gebeurt op basis van in het veld aangebrachte ballen die herkend worden. Zo kan de data zo efficiënt mogelijk aan elkaar worden vastgezet. Ten behoeve van de verwerking maakt de scanner ook 360 graden foto's die gekoppeld worden aan de point cloud. Door de manier van scannen is het ook mogelijk om dichte objecten, zoals huizen, in 3D in te scannen. Hierdoor is het ook mogelijk om de dikte van bijvoorbeeld wanden in beeld te brengen.



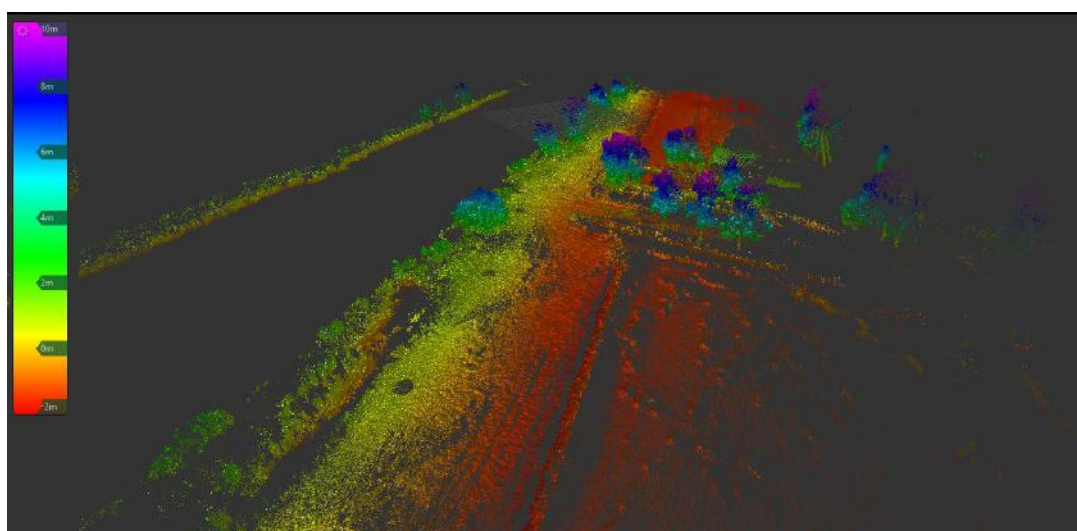
Figuur 43. Werklocatie Kavel10 in het pilotgebied bij Haskerdijken.



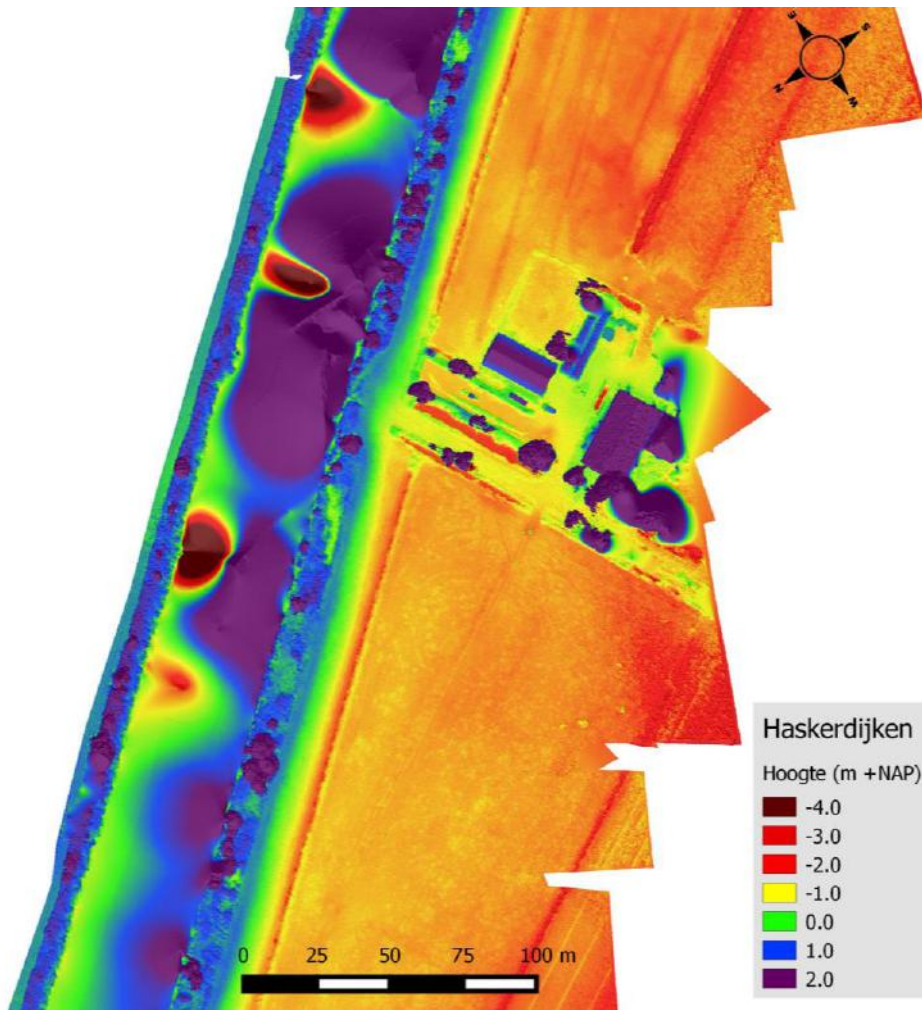
Figuur 44. Foto in NAP, genomen in het pilotgebied bij Haskerdijken.

De scandata kunnen omgezet worden tot een hoogtemodel dat tot op de centimeter nauwkeurig hoogteverschillen in het landschap laat zien (zie Figuur 45). Tevens kunnen er Digitale Terrein Modellen uit de data worden ontwikkeld (zie Figuur 47). Ter vergelijking is in Figuur 46 het Flying Sensor hoogtemodel afgebeeld van de locatie die overeenkomt met de locatie in Figuur 45.

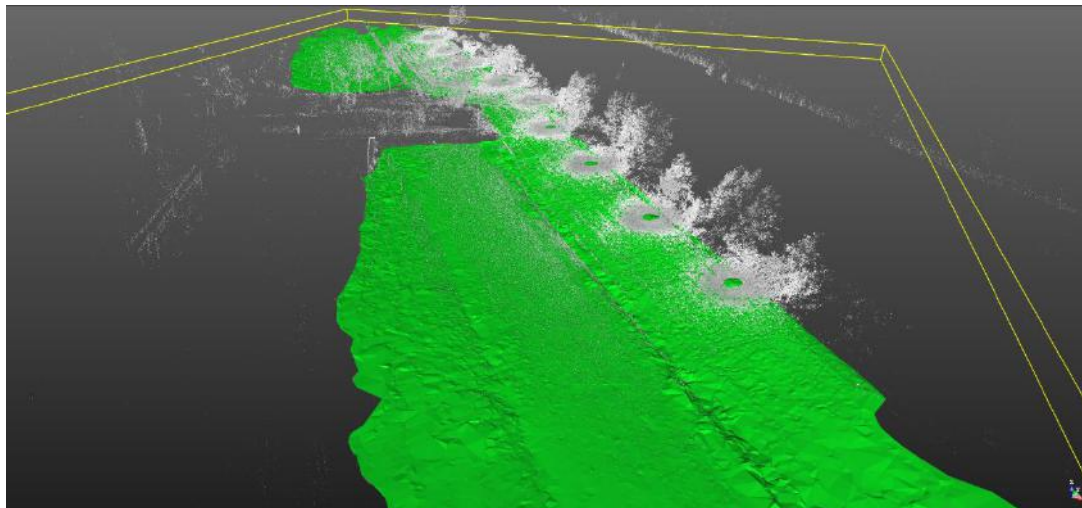
Net zoals bij de Flying Sensor hoogtemodellen representeert het laserscanner hoogtemodel, wanneer er vegetatie aanwezig is, niet de maaiveldhoogte. Daarom heeft Kavel10 bij sommige scans als aanvulling ook dwarsprofielen genomen met het Total Station. Hierbij wordt het meetpunt op maaiveldhoogte (vaste grond) gezet en kan de gemeten hoogte vergeleken worden met de hoogte uit de scanbeelden. Het verschil in hoogte geeft een inschatting van de totale vegetatiehoogte. Hierbij moet er rekening mee worden gehouden dat de hoogte van de vegetatie kan variëren binnen het gebied, zoals bij grasland dat overgaat in riet.



Figuur 45. Hoogtemodel van een kade in het pilotgebied bij Haskerdijken.

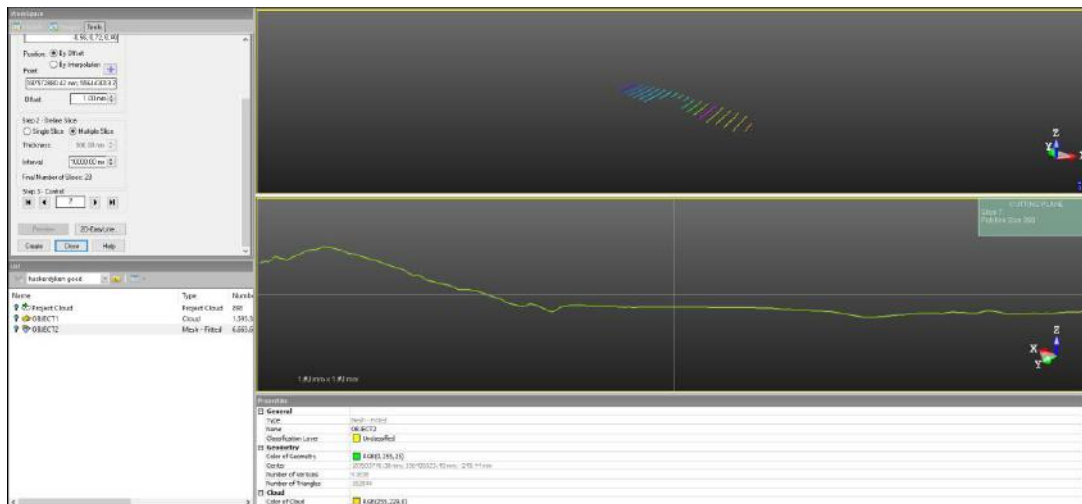


Figuur 46. Flying Sensor hoogtemodel (HiView) van het studiegebied bij Haskerdijken op 22 juli 2015.



Figuur 47. Digitaal Terrein Model van een kade in het pilotgebied bij Haskerdijken.

In verwerkingsprogramma's kunnen er gemakkelijk dwarsdoorsnedes van de gemeten dijklichamen gemaakt worden waardoor afwijkingen in hoogtes snel kunnen worden opgemerkt.

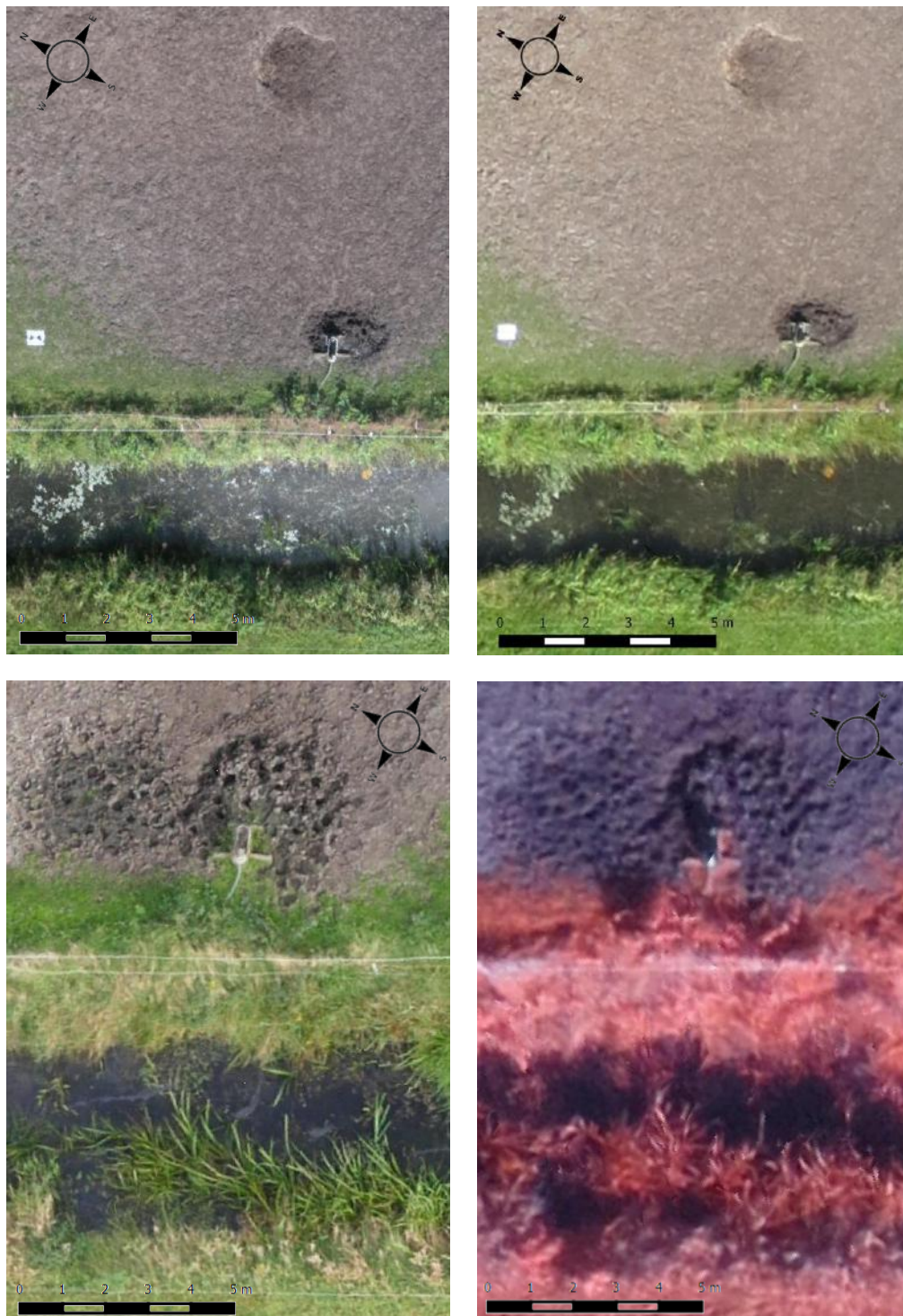


Figuur 48. Voorbeeld van een dwarsprofiel van de kade in het pilotgebied bij Haskerdijken.

11.2.2. Vergelijking met resultaat multirotor

Voor het invliegen van de pilotgebieden werd door HiView de fixed wing Flying Sensor gebruikt (kortweg 'fixed wing'). Ter vergelijking, werd door Droneview een multirotor gebruikt om de kades in het pilotgebied bij Haskerdijken in beeld te brengen. Beide technieken hebben voor- en nadelen. Zo weegt de fixed wing die in deze studie gebruikt werd slechts 0,5 kg, terwijl de multirotor 7,0 kg weegt (inclusief camera). Door dit verschil in gewicht verbruikt de fixed wing minder energie en kan daardoor langer in de lucht blijven (ongeveer 40 tot 50 minuten). Een multirotor kan, onder goede condities, ongeveer 15 minuten in de lucht blijven (de lichtere, nieuwere modellen circa 20 tot 30 minuten). Door dit verschil kan een fixed wing in één vlucht een groter oppervlakte invliegen dan een multirotor. Ter vergelijking: de fixed-wing heeft het pilotgebied bij Haskerdijken in één keer ingevlogen en voor de multirotor waren twee vluchten nodig.

De multirotor heeft in het pilotgebied bij Haskerdijken op 50 m hoogte gevlogen. De fixed wing heeft in dat pilotgebied op een hoogte van 100 m gevlogen. De resolutie van de multirotorbeelden is daarom hoger dan van de fixed wing beelden (Figuur 49). De orthomozaïeken aan de linkerkant, die samengesteld zijn uit multirotor-beelden, hebben duidelijk een hogere resolutie dan de rechter orthomozaïeken, die samengesteld zijn uit fixed wing beelden. De bovenste beelden zijn gemaakt op 22 juli 2015, de onderste beelden op 2 oktober 2015. De orthomozaïeken die met de multirotor gemaakt zijn, zijn te vinden in Appendix 1.5. Er is geen hoogtemodel gemaakt van de multicopterbeelden, dus kan er niet vergeleken worden met de fixed wing hoogtemodel en/of het 3D-laserscan hoogtemodel.



Figuur 49. Voorbeeld van de verschillen in resolutie tussen de orthomozaïek uit de foto's die zijn gemaakt vanuit de multicopter en de orthomozaïek uit de foto's die zijn gemaakt vanuit de fixed wing. Linksboven detail van de multicopter-orthomozaïek van 22 juli 2015. Rechtsboven detail van de fixed-wing-orthomozaïek op 22 juli 2015. Linksonder detail van de multicopter-orthomozaïek van 2 oktober 2015. Rechtsonder detail van de fixed-wing-orthomozaïek van 2 oktober 2015.

De verschillen tussen de eindproducten van de fixed wing, de multirotor en de 3D-laserscanner die gebruikt zijn in het studiegebied bij Haskerdijken, zijn te vinden in Tabel 15. Voor de fixed wing en multirotor gaat het om de eindproducten afgeleid uit de RGB-foto's.

Tabel 15. Verschillen tussen de eindproducten van de Flying Sensors en de laserscanner

	Fixed Wing	Multirotor	Laserscanner
Oppervlakte per vlucht/scan (ha)	78	7,5	0,7
Resolutie/punt dichtheid	3 bij 3 cm	onbekend	enkele mm
Nauwkeurigheid xy-richting	± 2 cm	onbekend	enkele mm
Georeferentie orthomosaïek/ 360° foto's	ja	nee ¹⁸	ja
Hoogtemodel met georeferentie	ja	nee ¹⁸	ja
Nauwkeurigheid hoogtemodel (z-richting)	± 6 cm	n.v.t.	enkele mm
Spectrale reflectie	RGB en NIR	RGB	niet

¹⁸ In theorie wel mogelijk met de luchtfoto's die gemaakt zijn.

12. Aanbevelingen

12.1. Algemeen

Uit dit onderzoek blijkt dat Flying Sensors een waardevolle bijdrage kunnen leveren aan dijkinspectie en vastlegging van nieuw opgeleverde kaden. Het STOWA symposium van juni 2014 (Elke dijkinspecteur een UAV: fictie of werkelijkheid?) toonde de potentie van de inzet van Flying Sensors ook al aan. De bijdrage van HiView aan dit symposium kan worden bekeken op <https://goo.gl/qb1hOy>

Enkele ander waterschappen zijn ook bezig met de inzet van Flying Sensors. Het Waterschap Vallei en Veluwe claimt dat ze met drones een deel van hun werk tien keer zo snel kunnen uitvoeren¹⁹. Ook het Waterschap Amstel, Gooi en Vecht experimenteert met een drone om op afstand dijkinspecties uit te voeren en om watermonsters te nemen²⁰.

Belangrijk en tevens zeer lastig is om een inschatting te maken van de toekomstige ontwikkelingen van Flying Sensors. Technische ontwikkelingen voor het maken van de opnames gaan zeer snel. Nuttige informatie uit de beelden halen blijft nog steeds een grote uitdaging, maar met de komst van verbeterde sensoren en het verder automatiseren van de beeldverwerking zal dit ook steeds sneller en beter kunnen worden uitgevoerd.

Naar alle waarschijnlijkheid zal de wet- en regelgeving de grootste restrictie vormen voor een snelle toepassing. Nadat de eerste regelgeving in 2013 werd ingevoerd, is deze in 2015 nog eens flink aangescherpt.

12.2. Technische verbeterpunten

Al tijdens het begin van het project bleek dat het gebruik van nauwkeurige grondreferentiepunten, die met een dGPS worden ingemeten, van belang zijn om gegeorefereerde beelden te krijgen. Voor een gerichte toepassing van Flying Sensors betekent dit dat GCP's vastgelegd zullen moeten worden. Dit brengt extra kosten met zich mee. Daarom is het van belang te onderzoeken hoeveel GCP's er minimaal per oppervlakte of pilotgebied nodig zijn voor een resultaat met de gewenste nauwkeurigheid. Deze GCP's hoeven slechts eenmalig te worden ingemeten.

Een andere belangrijke les die tijdens dit project geleerd is over de toepassing van Flying Sensors bij kade-inspectie is dat het moment van de beeldopname belangrijk is. Zo kunnen beelden die gebruikt worden voor de hoogtetoets het beste zoveel mogelijk in wintermaanden genomen worden, zodat deze niet gecorrigeerd hoeven te worden voor vegetatie. Eventueel kunnen de beelden voor de hoogtetoets ook in de zomermaanden genomen worden als er net gemaaid is. Indien toch in de zomer gevlogen moet worden, kan een mogelijke correctie van de vegetatiehoogte op basis van NDVI worden overwogen.

Een andere verbetering ligt in het invliegen van grotere oppervlaktes, zodat het 'randeffect' (lagere nauwkeurigheid aan de rand van de beelden) minder wordt en de toepassingsmogelijkheden groter worden.

¹⁹ <http://www.vallei-veluwe.nl/actueel-0/nieuws/nieuws-2015/september/dankzij-drone-werkt/>

²⁰ <https://innovatie2014.uvw.nl/monsters-drones/>

12.3. Inspectieproces

Als aanvulling op de hoogtetoets op basis van het AHN, zou er jaarlijks in de winter over de gebieden gevlogen kunnen worden waar met de hoogtetoets op basis van het AHN te lage kades geconstateerd zijn. Dit zou met een RGB-sensor of met een NIR-sensor uitgevoerd kunnen worden. Zo kan de toestand van de kades gemonitord worden en kan er een afgewogen beslissing worden genomen over de noodzaak tot het uitvoeren van een revisieproject. Dit geldt ook voor de kades waar nader onderzoek nodig is. Ook kunnen gebieden waarin de kades een revisieproject hebben ondergaan, structureel ingevlogen worden, zodat deze beelden later als referentie kunnen dienen.

Als aanvulling op de kadeschouw zou er jaarlijks na de hersteltermijn van de betreffende problemen (zie Tabel 8) met een NIR-sensor over de gebieden gevlogen kunnen worden waar problemen zijn geconstateerd. Zo kan gecontroleerd worden of de problemen binnen de gestelde termijn zijn opgelost.

Als alternatief voor de visuele droogte-inspectie, zou er tijdens droge periodes over gebieden met droogtegevoelige kades gevlogen kunnen worden met een NIR-sensor. Dit zou ongeveer elke één à twee weken moeten gebeuren, zodat de gevolgen van de droogte onderscheiden kunnen worden van vermindering van de NDVI door maaien.

Omdat het totale gebied met droogtegevoelige kaden toch nog vrij groot is (40-200 km kadelengte), is het monitoren van alle gebieden economisch nog niet haalbaar door de wettelijke actie-radius restrictie. Het is wel goed mogelijk om over de gebieden te vliegen waar door de rayonbeheerders tijdens de droogteschouw problemen zijn geconstateerd. Dit gaat dan om verschillende kleinere trajecten. Voor de droogteschouw van juli 2015 gaat het bijvoorbeeld om 13 gebieden.

12.4. GIS-systeem

Een verdere integratie met de bestaande datasystemen van het Wetterskip moet worden bewerkstelligd. De resultaten van het huidige onderzoek zijn in de vorm van GIS bestanden overgedragen aan het Wetterskip. Bij operationele inzet van Flying Sensors moeten deze datastromen worden geoptimaliseerd en real-time inzetbaar worden gemaakt.

12.5. Ontwikkelingspunten

Naast de aanbevelingen die hierboven genoemd zijn en die direct kunnen worden toegepast, zijn er nog diverse verbeterpunten die in diverse ontwikkelingsstadia moeten worden uitgevoerd. Veel van deze ontwikkelingen vinden plaats zonder dat het Wetterskip of andere waterbeheerders zich hiervoor actief hoeven in te zetten, omdat bedrijfsleven en onderzoek dit oppakken. Een aantal specifieke ontwikkelingen zouden de waterbeheerders wel kunnen initiëren en stimuleren.

Een mogelijk nader te stimuleren ontwikkeling is onderzoek naar andere toepassingen van Flying Sensors, zoals monitoring van vegetatiegroei in natuuroevers, monitoring van algenbloei, puntinspectie i.v.m. het vastleggen van milieudelicten, monsternamen van oppervlaktewater en kweldetectie met behulp van een thermische sensor. Dit kan door te kijken naar bestaand

onderzoek in de literatuur of het verder analyseren van de beelden die voor dit project gemaakt zijn.

Momenteel worden er door het waterschap twee soorten vegetatiekartering uitgevoerd, de soortenkartering en de kademonitoring. De soortenkartering wordt uitgevoerd voor de Kaderrichtlijn Water. Voor de soortenkartering worden verschillende waterplanten, waaronder ondergedoken waterplanten zoals fonteinkruid en waterpest, door het Wetterskip Fryslân in kaart gebracht. Dit gebeurt vanaf de kant en bij meren vanaf een boot in de periode tussen juni en augustus. Voor de soortenkartering bestaat een meetnet van punten die eens in de 3 jaar in kaart gebracht worden. Dit komt gemiddeld neer op 100 punten per jaar (50 à 100 km kade). Het Wetterskip wil hierbij ook de soorten vegetatie weten, dit is niet vanuit de lucht te onderscheiden. Ook worden er waterdieptes gemeten. Omdat er vanuit een bootje maar beperkt zicht is op de verspreiding van de vegetatie over het wateroppervlak, zou het waardevol kunnen zijn om met een Flying Sensor NIR beelden te maken om te kijken hoe de vegetatie zich ontwikkelt. Daarvoor zou op de beelden ten minste het verschil tussen algen (zoals blauwalg), kroos en waterplanten zichtbaar moeten zijn (zie Figuur 21). Tussen 1995 en 1997 is er door de BCRS al eens onderzoek gedaan naar meting van waterkwaliteitsparameters met behulp van Remote Sensing²¹. Uit dit onderzoek bleek dat (ondergedoken) waterplanten en algen lastig van elkaar te onderscheiden zijn op basis van de reflecties in de vijf spectrale banden die gebruikt werden. Het is niet aannemelijk dat alleen op basis van de huidige NIR-beelden wel onderscheid tussen deze twee vegetatietypes te maken is. Aangezien het onderzoek van de BCRS alweer van 20 jaar geleden dateert, zou het zinvol zijn om te onderzoeken of aan de hand van beeldopnamen met een moderne hyper-spectrale camera wel onderscheid te maken is tussen (ondergedoken) waterplanten en algen.

Bij de kademonitoring wordt gekeken naar de rietkraagbreedtes, maar ook naar de waterdieptes. Rietkragen kunnen zich namelijk alleen ontwikkelen bij dieptes van minder dan 80 cm. In kanalen is de waterdiepte te groot, maar in meren kunnen rietkragen zich wel ontwikkelen. Hier is ook de grootste golfslag en daarom het grootste gevaar voor afkalving van de oever/kade. Met een Flying Sensor zou de breedte van deze rietkragen goed in beeld gebracht kunnen worden (zie o.a. Figuur 31).

Wat betreft het nemen van watermonsters met een Flying Sensor, is de hoeveelheid water per monster het grootste obstakel. Per monster wordt er minimaal 1 liter meegenomen en in de meeste gevallen zelfs 2,5 liter. Voor het meten van chlorofyl is alleen al 0,5 liter water nodig. Daarnaast kan ook de afstand tot de oever een obstakel vormen. Bij de Fluessen is de afstand vanaf de kade (waar de piloot zich bevindt) tot het meetpunt bijvoorbeeld meer dan 500 m. Er zijn in Friesland honderden punten waar watermonsters genomen worden. Een aantal mensen is hier full-time mee bezig.

In dit project is er al een verkennend onderzoek gedaan naar kweldetectie met behulp van thermische sensoren. Tijdens de vluchten zijn de rayonbeheerders niet mee geweest om in het veld de kwelplekken aan te wijzen en de coördinaten hiervan vast te leggen. Dit zou bij een volgende proef kunnen helpen bij het leren identificeren van de kwelplekken op de beelden. Wanneer er ijs of sneeuw ligt, is het vaak makkelijker te zien waar een kade lekt. Het zou dus ideaal zijn om op deze momenten te vliegen. Naast het feit dat ijsperiodes niet vaak voorkomen, is het echter ook niet toegestaan om te vliegen wanneer de temperatuur lager is dan 2°C (i.v.m. de accucapaciteit). Wel kan het een optie te zijn om te vliegen tijdens droge periodes in de zomer.

²¹ Dekker et al. (1999) "De kwaliteit van enkele Friese binnenwateren gemeten met vliegtuig-remote sensing". BCRS. ISBN 90 5411 276 X. Een hard copy van dit rapport is aanwezig bij de afdeling vegetatiekartering van het Wetterskip Fryslân.

Als een kade lekt tijdens een droge periode is het contrast tussen de droge kade en de natte plekken namelijk het grootst. Daarnaast let een rayonbeheerder op plekken waar pitrus groeit, want deze plant groeit in moerasachtige gebieden. Wellicht is pitrus ook op de NIR-beelden te herkennen.

Een andere belangrijke ontwikkeling zou zich kunnen richten op de correctie van de hoogtebeelden aan de hand van de vegetatiedichtheid op basis van de NDVI. Er is al veel bekend van de classificatie van gewassen (en daardoor dus hoogte) aan de hand van vegetatie-indices. Uit onderzoek blijkt dat lokale ijking noodzakelijk is. Voor Fryslân betekent dit dat de relatie NDVI-vegetatie-hoogte-tijd voor de belangrijkste vegetatietypen moet worden bepaald.

Uit eerdere studies met Flying Sensors in Brabant kwam naar voren dat er behoefte is aan een verbeterde relatie tussen droogte en NDVI. Hiervoor zouden in één of twee pilotgebieden, eens in de twee weken vluchten uitgevoerd kunnen worden gedurende de zomer (periode dat het droger wordt), gecombineerd met bodemvochtmetingen.

13. Conclusies

13.1. Geschiktheid Flying Sensors voor uitvoeren hoogtetoets

Dit project heeft aangetoond dat Flying Sensors de potentie hebben voor het uitvoeren van de hoogtetoets. De hoge resolutie en de flexibiliteit om de Flying Sensors op elk gewenst moment in te zetten, zijn grote verbeteringen ten opzichte van bestaande technieken gebaseerd op het AHN. Daarnaast geeft de Flying Sensor niet alleen de hoogte, maar integraal ook de vegetatietoestand en een hoge-resolutie zichtbaar beeld. De huidige wettelijke restrictie dat er maximaal 500 meter van een waarnemer gevlogen mag worden (dus actieradius van 1 kilometer), maakt wel dat de inzet van Flying Sensors economisch nog niet volledig kan concurreren met andere methoden. Daarnaast moet ervoor gezorgd worden dat, net als bij het AHN, voldoende referentiepunten bekend zijn.

13.2. Mogelijke toepassingen van de hoogtebeelden

Om de dalingssnelheid van boezemkades in beeld te brengen, zou de kade gelijk na een revisietraject ingevlogen kunnen worden met een Flying Sensors of ingemeten kunnen worden met een 3D-laserscanner. De nauwkeurigheid van de Flying Sensor hoogtebeelden valt – bij een vlieghoogte van meer dan 100 m – gemiddeld nu nog net buiten de vereiste nauwkeurigheid van 5 cm. De nauwkeurigheid van de 3D-laserscanner voldoet wel aan deze specificatie. Bij beide technieken blijft de vegetatie een probleem. Dit probleem kan geminimaliseerd worden door in de winter te vliegen. Daarnaast kan er een inschatting van de vegetatiehoogte gemaakt worden met behulp van een NIR-beeld.

Het voordeel van het gebruik van het AHN is dat de informatie 'gratis' wordt aangeleverd door de Rijksoverheid. Het nadeel is dat deze informatie maar eens in de 7 jaar vernieuwd wordt op een vast moment en dus niet altijd op het moment dat het nodig is. Op locaties waar verzakkingen of verdrogingen te verwachten zijn, kan ter controle op elk gewenst moment gevlogen worden met een Flying Sensor of gemeten worden met een 3D-laserscanner.

13.3. Geschiktheid Flying Sensors voor uitvoeren kadeschouw

Door de huidige wet- en regelgeving kan de volledige kadeschouw niet uitgevoerd worden door Flying Sensors. Constatering van bepaalde problemen, zoals ongewenste begroeiing met struiken of bomen, afwezigheid of slechte staat van de kadevegetatie en aanwezigheid van bebouwing is wel mogelijk. Ook kan op basis van eerder waargenomen patronen mollenschade of muizenschade herkend worden met behulp van de vegetatie-index en de orthomozaïek. De resolutie van 3 centimeter is niet altijd voldoende om zonder voorkennis met zekerheid te kunnen constateren waardoor de schade veroorzaakt is. Ook blijven er een aantal uitdagingen over die niet vanuit de lucht te constateren zijn door de loodrechte kijkrichting (bijv. de afwezigheid/beschadiging van kadebeschoeiing) of door de aanwezigheid van hoge vegetatie (afwezigheid/verzakking van de stortsteen). De kracht van de huidige generatie Flying Sensors bij kadeschouw is een gerichte inzet in specifieke gebieden waar er vermoedens bestaan van problemen, in gebieden waar er een noodzaak is tot zeer frequent monitoren of in moeilijk toegankelijke gebieden. Indien wet en regelgeving de actieradius restrictie verruimt, vormen Flying Sensors een kwalitatieve en kosteneffectieve aanvulling ten opzichte van visuele inspectie.

13.4. Mogelijke toepassingen van de orthomozaiëken en NDVI-beelden

In het geval van een calamiteit, zoals (kans op) dijkdoorbraak en muizenplaag, kan ter plekke de schade in kaart gebracht worden met Flying Sensors. Het direct inzetbaar zijn, de mogelijkheid om in zichtbaar en in niet-zichtbaar licht beelden te verzamelen, en de inzet in moeilijk bereikbare gebieden, maken Flying Sensors uitermate geschikt voor inzet tijdens calamiteiten.

13.5. Geschiktheid Flying Sensors voor uitvoeren droogteschouw

Omdat het totale gebied met droogtegevoelige kaden tussen de 40 km en 200 km kadelengte beslaat, ligt het monitoren van het gehele droogtegevoelige gebied tijdens droge periodes nog niet binnen de huidige mogelijkheden van Flying Sensors. Flying Sensors kunnen echter wel aanvullende informatie bieden op locaties waar door de rayonbeheerders tijdens de droogteschouw problemen zijn geconstateerd.

1. Appendix: Technische specificaties en details

1.1. Informatie over de uitvoerende bedrijven

1.1.1. HiView

HiView is gestart met haar activiteiten eind 2012. De ontwikkelingen van Flying Sensors waren zo ver gevorderd dat operationele toepassingen mogelijk waren. Met andere woorden, de aandacht hoefde niet meer gericht te worden op de operationele uitdagingen van het vliegen, maar de focus kon gelegd worden op het toepassen van de verkregen beelden. Sinds 2013 voert HiView opdrachten uit voor en in samenwerking met onder andere: waterschappen, FutureWater, Rijkswaterstaat, ICIMOD, Universiteit Utrecht, DFID, Ministerie van Economisch Zaken, Natuurmonumenten, USAID, World Bank, agrariërs, WUR en Provincies. Projecten worden uitgevoerd in diversen landen zoals Nederland, Nepal, Engeland en Mozambique.

HiView heeft Flying Sensors die zowel in het zichtbare als het niet-zichtbare spectrum gegevens verzamelen. Resoluties starten vanaf 2 x 2 cm (afhankelijke van sensor en vlieghoogte). Maximaal te bedekken gebied is ongeveer 500 ha per dag. HiView verzorgt de volledige beeldverwerking van ruwe beelden, stitchen, geometrische correctie, hoogtekarten, vegetatietoestand tot dijkverschuiving. Verder is HiView volledig gecertificeerd en voldoet aan de strikte eisen die door de Inspectie Leefomgeving en Transport zijn ingesteld. Meer informatie over HiView is te vinden op: <http://www.hiview.nl>.

1.1.2. Kavel10²²

Kavel10 Landmeters is een full-service meetbedrijf dat werkzaam is in verschillende sectoren. Kavel10 Landmeters is een echt Fries familiebedrijf dat wordt geleid door de broers Albert en Stefan Brouwer samen met hun zwager Frank Staal.

De werkzaamheden van Kavel10 Landmeters zijn te onderscheiden in de volgende specialismen:

- Landmeten voor de grond-, weg- en waterbouw;
- Landmeten met behulp van een drone;
- Landmeten voor de agrarische sector;
- Kadastrale metingen.

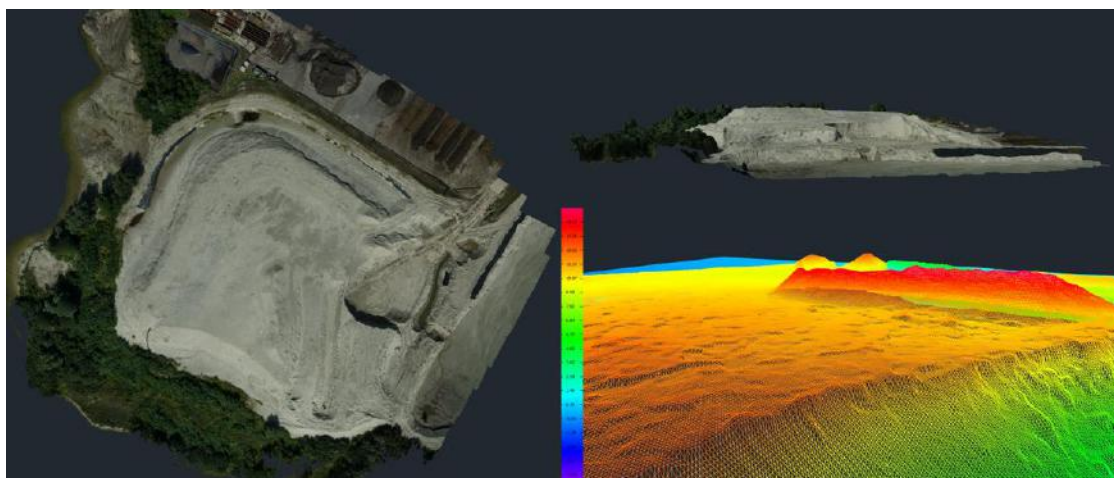
Kavel10 Landmeters heeft de beschikking over verschillende meetapparatuur, zodat zij flexibel inzetbaar is in vele markten. Kavel10 Landmeters beschikt onder andere over GPS, Total-stations en 3D-laserscanapparatuur (Figuur 50).



Figuur 50. Voorbeeld van de meetapparatuur waarover Kavel10 Landmeters beschikt.

²² Dit hoofdstuk is geschreven door Kavel10.

De nieuwste ontwikkeling is de aanschaf van een drone uitgerust met nauwkeurige on-board GPS, zodat landmeetkundige werkzaamheden ook vanuit de lucht uitgevoerd kunnen worden. Voor Van der Wiel te Drachten is met deze methode een volumeberekening gemaakt van een zanddepot zoals te zien in de onderstaande afbeelding.



Figuur 51. Voorbeeld van dronemeting zanddepot door Kavel10. Links de orthomosaïek, rechts het hoogtemodel.

1.1.3. Droneview²³

Droneview B.V. is gespecialiseerd in het maken en bewerken van luchtfoto's en luchtvideo's. Droneview maakt gebruik van UAV's (Unmanned Aerial Vehicle), oftewel radiografisch of GPS bestuurbare multicopters c.q. drones. De drones kunnen worden voorzien van een videocamera's, fotocamera's, thermografischecamera's en gasdetectoren. Ze zijn zeer stabiel en vliegen tot een hoogte van ongeveer 300 meter. Hierdoor is Droneview in staat luchtfoto's en video-opnames te maken, die voorheen onmogelijk leken. Een prachtige en een innovatieve mogelijkheid voor het maken van luchtfoto's en luchtvideo's.

1.2. Praktijkbevindingen

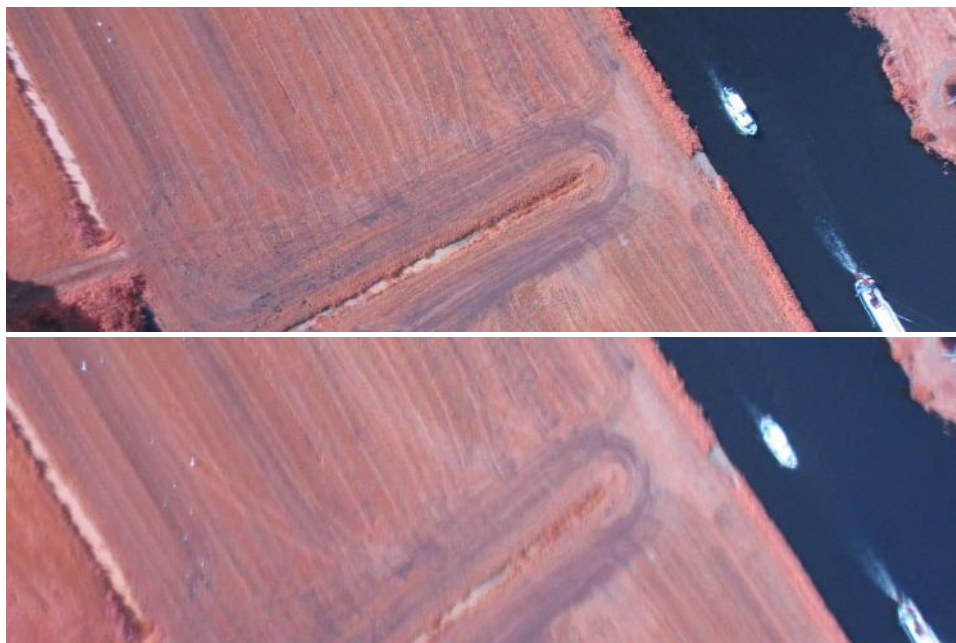
1.2.1. Invloed van weersomstandigheden

Tijdens een van de vluchten voor het vastleggen van de muizenschade in februari 2015 werden problemen ondervonden met de Flying Sensor door de combinatie van koude en vochtige weersomstandigheden. Deze combinatie zorgde ervoor dat de sensoren die de vliegsnelheid bepalen, bevroren raakten en niet meer werkten. Temperaturen onder het vriespunt zijn in principe geen probleem, zoals is bewezen tijdens de vluchten in de Himalaya. Het gaat dus specifiek om de combinatie van een temperatuur onder het vriespunt en een hoge luchtvochtigheid.

De wind heeft invloed op de kwaliteit van de foto's die met de Flying Sensor gemaakt worden. Met de huidige generatie Flying Sensors kan veilig gevlogen worden bij een gemiddelde windsnelheid van 5 m/s (± 3 Bft) met windvlagen tot 8 m/s ($\pm 4-5$ Bft). De nieuwe generatie Flying Sensors kan gemiddelde windsnelheden van 8 m/s met windvlagen tot 11 m/s (± 6 Bft) aan. Om

²³ Deze tekst is overgenomen van <http://droneview.nl/profiel>

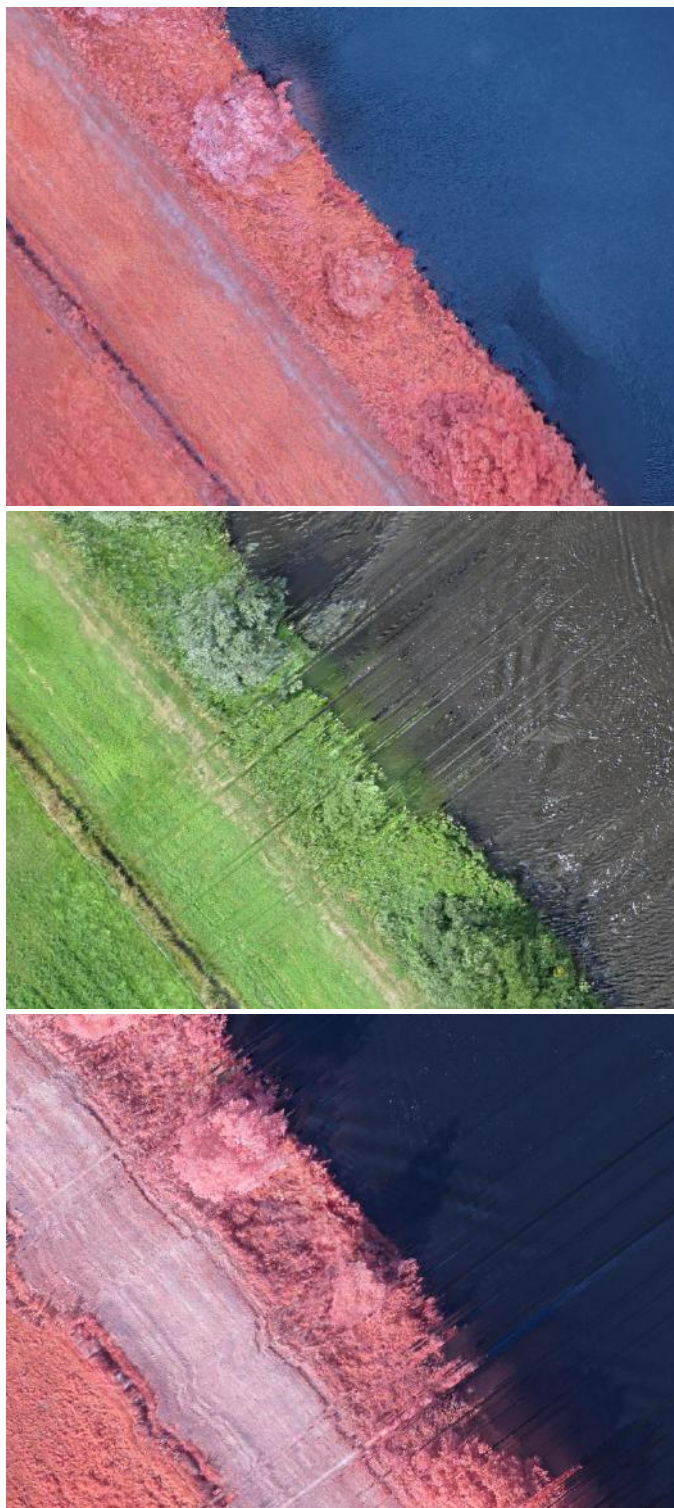
de bewegingen en trillingen van de Flying Sensor tijdens het fotograferen te minimaliseren, wordt de motor telkens automatisch even stilgezet op het moment dat er een foto wordt gemaakt. Een voorbeeld van de invloed van een windvlaag op de kwaliteit van de luchtfoto's is te zien in Figuur 52. De twee foto's zijn opeenvolgend genomen. Het bovenste beeld (uitsnede uit IMG_3151) is scherp, terwijl het onderste beeld (uitsnede uit IMG_3152) bewogen is. Op het totaal van 198 foto's, zijn er echter maar een stuk of 6 in dezelfde mate bewogen. Dit zal dus nauwelijks een negatief effect hebben op de kwaliteit van het orthomozaïek.



Figuur 52. Uitsneden uit twee opeenvolgende foto's, genomen op 21 juli 2015 in het studiegebied bij Oldelamer.

Ook de stand van de zon kan een invloed hebben op de kwaliteit van de beelden. Een goed voorbeeld hiervan is het pilotgebied bij Haskerdijken. Hier werden op 22 juli 2015 luchtfoto's genomen in RGB (15:56-16:05) en vervolgens werd hetzelfde gebied in NIR opgenomen (16:17-16:28). Daarnaast werden op 2 oktober 2015 luchtfoto's in NIR genomen (15:12-15:22). Alle drie de keren werd op gelijke hoogte (100 m) over precies hetzelfde gebied gevlogen in vrijwel gelijke, heldere omstandigheden.

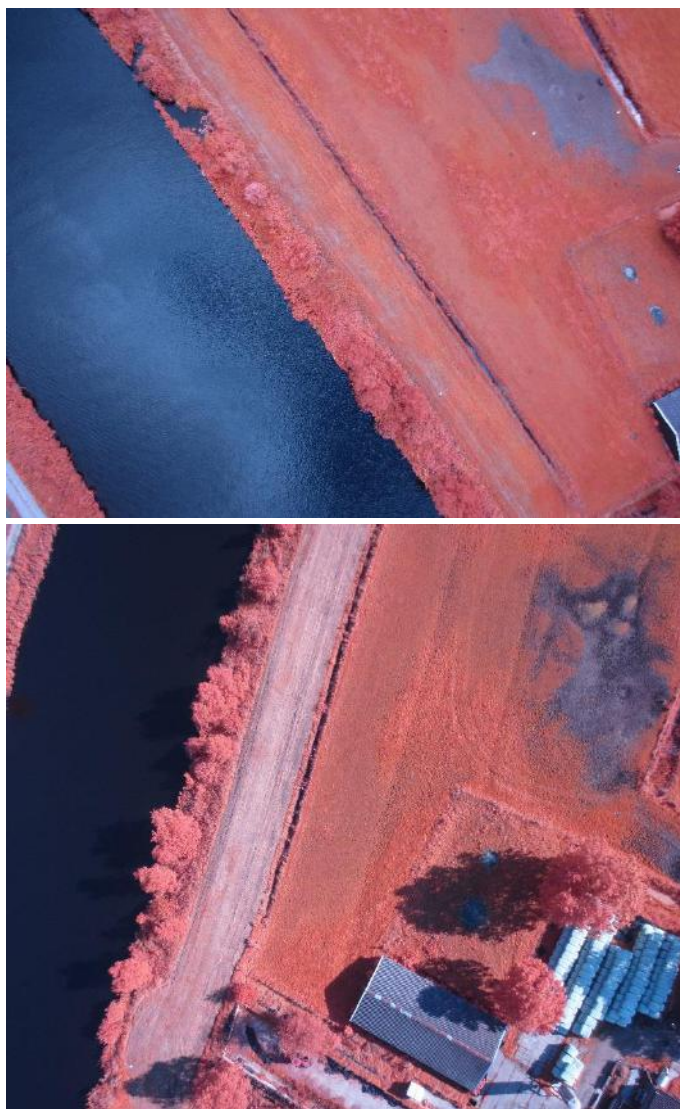
De kwaliteit van de NIR-orthomozaïek van 22 juli 2015 was goed (zie Figuur 53, bovenste beeld), terwijl de kwaliteit van de RGB-orthomozaïek laag was (zie Figuur 53, middelste beeld). Ook de kwaliteit van de NIR-orthomozaïek van 2 oktober 2015 was laag (zie Figuur 53, onderste beeld). De lage kwaliteit is te zien aan de strepen die over het water en de kade lopen. De strepen zijn alleen te zien bij de overgang tussen water en land. De reflectie van het licht op het wateroppervlakte, lijkt hier dus de oorzaak te zijn van de problemen (zie Figuur 54).



Figuur 53. Orthomozaiëken van het pilotgebied bij Haskerdijken. Bovenste beeld is een detail van de NIR-orthomozaiëk van 22 juli 2015, middelste beeld een detail van de RGB-orthomozaiëk van 22 juli 2015 en het onderste beeld een detail van de NIR-orthomozaiëk van 2 oktober 2015.

Omdat dit probleem zich in andere gebieden niet heeft voorgedaan, moet er ook nog een andere factor zijn die een rol speelt. Deze factor is waarschijnlijk de breedte waarover gevlogen is. Er is in het pilotgebied bij Haskerdijken namelijk een smallere strook ingevlogen dan in de andere pilotgebieden; vijf rijen met foto's, waarvan twee rijen recht boven het water gemaakt zijn. Daarnaast staat er in dit pilotgebied veel hoge begroeiing (bomen) op de kade.

Door bij het verwerken van de foto's de twee stroken met foto's die boven het water waren gemaakt weg te laten, verbeterde het resultaat aanzienlijk.



Figuur 54. Reflectie op het wateroppervlak op een NIR-luchtfoto van 22 juli 2015 (bovenste beeld) en op een NIR-luchtfoto van 2 oktober 2015 (onderste beeld) in het pilotgebied bij Haskerdijken.

1.2.2. Vastleggen Ground Control Points met behulp van Bing maps en AHN

Tijdens het creëren van Ground Control Points (GCP's) met Bing Maps als referentiekaart, viel het op dat mogelijke herkenningspunten, die wel zichtbaar waren op de foto's, niet zichtbaar waren op de referentiekaart (Figuur 55 en Figuur 56). Dit gebrek aan nauwkeurige Ground Control Points resulteerde in een kleine verschuiving van het orthomosaïek (Figuur 57 en Figuur 58).



Figuur 55. Links een uitsnede uit de orthomosaïek waarop het einde van het betonnen pad in het weiland duidelijk zichtbaar is. Rechts een uitsnede uit de referentiekaart, waarop het corresponderende punt niet zichtbaar is.



Figuur 56. Links een uitsnede uit de orthomosaïek waarop het dammetje en de scheiding tussen land en water duidelijk zichtbaar zijn. Rechts een uitsnede uit de referentiekaart, waarop het corresponderende punt niet duidelijk zichtbaar is.



Figuur 57. Links een uitsnede uit de orthomosaïek, in het midden een uitsnede van de corresponderende locatie uit de referentiekaart, rechts de overlay van de twee voorgaande uitsneden, waarop een verschuiving van het object in zuidelijke richting te zien is.



Figuur 58. Links een uitsnede uit de orthomozaïek, in het midden een uitsnede van de corresponderende locatie uit de referentiekaart, rechts de overlay van de twee voorgaande uitsneden, waarop een verschuiving van het object in zuidwestelijke richting te zien is.

Een ander probleem dat naar voren kwam tijdens het creëren van de GCP's, was de slechte overlap van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) met de Bing-Maps kaart. In Figuur 59 geeft punt 1a het midden van een dammetje op de Bing-Maps kaart aan. Punt 1b is de corresponderende locatie in het AHN. Het GCP zou de waarde (hoogte) van punt 1b moeten krijgen, maar krijgt de waarde van punt 1a toegewezen. Daarnaast laat punt 2 in Figuur 59 zien dat het AHN soms ook missende waarden heeft op plekken waar zich water bevindt of waar gebouwen staan.



Figuur 59. Overlay van de Bing-Maps kaart met het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN).

Een oplossing voor het gebrek aan goed herkenbare Ground Control Points is om deze punten niet op een referentiekaart aan te wijzen, maar met een dGPS te meten in het veld. Ook de schatting van de hoogte kan daarmee verbeterd worden.

1.2.3. Vastleggen Ground Control Points met behulp van dGPS

Om een zo groot mogelijke nauwkeurigheid te bereiken, is het van belang dat er GCP's worden ingemeten met een dGPS. Tijdens het onderzoek werd ondervonden dat er bij het uitkiezen van goed herkenbare GCP's veel punten zijn waar op gelet moet worden. De punten waar rekening mee moet worden gehouden bij het uitkiezen van GCP's zijn:

- Het in te meten object moet op de luchtfoto's herkenbaar zijn en het horizontale oppervlakte mag daarom niet te klein zijn. Met de standaard vlieghoogte van 130 m, is de bovenkant van een afrasteringspaal bijvoorbeeld niet te herkennen op de luchtfoto's. Hoe lager er gevlogen wordt, hoe meer objecten zichtbaar worden op de luchtfoto's en dus geschikt worden als GCP.

- Strepen op een weg zijn ideale objecten om in te meten als GCP. Hierbij moet echter worden gelet op de schaduwen van bomen of gebouwen. Deze schaduwen kunnen ervoor zorgen dat het object onherkenbaar wordt op de luchtfoto's. Daarnaast kan het gebeuren dat de strepen op de weg in de loop van de tijd opnieuw geplaatst (en dus verplaatst) worden.
- In sommige gebieden zijn weinig verharde objecten beschikbaar om in te meten. Daardoor zijn er in sommige gebieden GCP's ingemeten die onduidelijk gedefinieerd waren. Dit heeft een negatieve invloed op de nauwkeurigheid van het orthomozaïek en het hoogtemodel. Voorbeelden van onduidelijk gedefinieerde punten zijn punten midden op een dam, in het verlengde van een heg of in het verlengde van een steiger. Er moeten in een gebied zo min mogelijk van zulk soort punten uitgekozen worden, behalve wanneer dit nodig is om verspreid over het hele gebied GCP's te kunnen definiëren. Beter is het om in gebieden met weinig verharde objecten, losse objecten (targets/vliegschijven) neer te leggen en deze in te meten. Het nadeel hiervan is dat deze objecten bij elke vlucht opnieuw ingemeten moeten worden.
- Bij alle uitgekozen objecten moet zoveel mogelijk de hoekpunt van het object ingemeten worden.
- Sommige objecten waren alleen te herkennen in het voorjaar, toen er nog weinig begroeiing aanwezig was. Voorbeelden van objecten die begroeid raakten met riet of gras zijn de hoeken van de betonplaten in een weiland en de betonnen palen die langs de uiteinden van sloten liggen.
- Een goede omschrijving of foto van het ingemeten object is van belang om het op de luchtfoto's te kunnen herkennen. Dit werd uitstekend uitgevoerd door een van de landmeters van Wetterskip Fryslân. De landmeter bracht op elk ingemeten object een gele markering aan, gaf het een unieke ID en maakte er een foto van. Deze foto was vaak ver ingezoomd, waardoor de omgeving van het object niet (goed) zichtbaar was. Daarom werd de locatie van het object en de locatie waar de foto van het object genomen was ook nog eens aangegeven op beschikbare luchtfoto's.
- Bij het neerleggen van vliegschijven is het object over het algemeen eenvoudig te herkennen op de luchtfoto's.

Uit de bovengenoemde punten blijkt dat goed overleg met de landmeter van belang is om goede GCP's vast te kunnen leggen. Daarnaast is het beter om, verspreid over het gebied, een paar punten te veel in te meten dan te weinig.

1.2.4. Wegfilteren wateroppervlakte uit de hoogtemodellen

Het wateroppervlak van de Flying Sensor hoogtemodellen, heeft geen realistische hoogte. Om het hoogtebeeld toch visueel aantrekkelijk te maken, kan het water uit het hoogtebeeld gefilterd worden met behulp van de NDVI. Over het algemeen hebben de grotere wateroppervlaktes (boezemkanalen) een NDVI lager dan nul. Kleinere sloten hebben daarentegen soms een NDVI waarde boven nul, zeker als zij in de zomer met algen of kroos begroeid zijn. Kale grond en wegdek hebben vaak een NDVI-waarde onder nul. Hierdoor worden, naast de grote wateroppervlaktes, ook kale grond en wegdek uit het hoogtebeeld gefilterd en blijven de kleinere sloten juist zichtbaar wanneer er geselecteerd wordt op een NDVI lager dan nul. Daarom wordt aangeraden de wateroppervlaktes uit de beelden te filteren met behulp van de digitale kaarten uit de Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT), die naar verwachting in januari 2016 klaar zullen zijn²⁴.

²⁴ <http://www.kadaster.nl/web/Themas/Registraties/BGT.htm>

1.3. Nauwkeurigheid beelden in de x-, y- en z-richting

1.3.1. Inschatting verbetering nauwkeurigheid x-, y-, z-coördinaten door gebruik vaste dGPS-grondreferentiepunten

Voor het inschatten van de nauwkeurigheid werden 6 dGPS-punten gebruikt. Voor de beelden die gegeoreferend werden met dGPS-punten, werden zoveel mogelijk andere dGPS-punten gebruikt dan voor het georefereren van de beelden. Twee van de zes punten (1039 en 1042) zijn zowel gebruikt voor het georefereren van het beeld, als voor het inschatten van de nauwkeurigheid.

Tabel 16. Coördinaten (Amersfoort RD Nieuw) van grondreferentiepunten in het pilotgebied bij Allingawier en de coördinaten van de corresponderende locaties in de orthomozaïek/DEM van 16 september 2014 die werd gegeoreferend met Bing-maps en het AHN

GCP-ID	GCP-x	orthomozaïek- x	GCP-y	orthomozaïek -y	GCP-z	DEM-z
1021	157628,9	157630,4	563158,6	563157,3	1,033	1,1905
1039	157644,8	157645,9	562949,7	562949,5	0,076	0,17674
1005	157746,6	157747,9	563059,2	563058,5	0,014	-0,05366
1042	157871,5	157872,7	563157,6	563157	0,119	0,12013
1040	157906,5	157906,4	562901,2	562901,2	-1,822	-2,22463
1027	158280	158281,8	563115,2	563114,3	0,175	-0,76809

Tabel 17. Verschil (in meters) tussen de coördinaten van de grondreferentiepunten en de coördinaten van de corresponderende locaties in de orthomozaïek/DEM van 16 september 2014 die werd gegeoreferend met Bing-maps en het AHN

GCP-ID	Verschil x- beeld min x-GCP	Absoluut verschil x	Verschil y- beeld min y-GCP	Absoluut Verschil y	Verschil z- beeld min z-GCP	Absoluut verschil z
1021	1,45	1,45	-1,37	1,37	0,16	0,16
1039	1,03	1,03	-0,21	0,21	0,10	0,10
1005	1,20	1,20	-0,74	0,74	-0,07	0,07
1042	1,12	1,12	-0,62	0,62	0,00	0,00
1040	-0,11	0,11	0,05	0,05	-0,40	0,40
1027	1,74	1,74	-0,86	0,86	-0,94	0,94
Gemiddelde (in m)	1,07	1,11	-0,62	0,64	-0,19	0,28

Tabel 18. Coördinaten (Amersfoort RD Nieuw) van grondreferentiepunten in het pilotgebied bij Allingawier en de coördinaten van de corresponderende locaties in de orthomozaïek/DEM van 16 september 2014 die werd gegeoreferend met dGPS-punten

GCP-ID	GCP-x	orthomozaïek -x	GCP-y	orthomozaïek -y	GCP-z	DEM-z
1018	157653	157652,9	563127,8	563127,9	1,07	0,90491
1039	157644,8	157644,8	562949,7	562949,8	0,076	0,09325
1004	157762,6	157762,6	563027,2	563027,3	1,085	0,93047

1042	157871,5	157871,5	563157,6	563157,5	0,119	0,10848
1041	157911,2	157911,3	562903,3	562903,3	-2,089	-2,11757
1024	158289,5	158289,4	563124,9	563124,9	-1,198	-1,31826

Tabel 19. Verschil (in meters) tussen de coördinaten van de grondreferentiepunten en de coördinaten van de corresponderende locaties in de orthomosaïek/DEM van 16 september 2014 die werd gegeoreferereerd met dGPS-punten

GCP-ID	Vershil x- beeld min x-GCP	Absoluut verschil x	Vershil y- beeld min y-GCP	Absoluut Verschil y	Vershil z- beeld min z-GCP	Absoluut verschil z
1018	-0,07	0,07	0,05	0,05	-0,17	0,17
1039	0,01	0,01	0,06	0,06	0,02	0,02
1004	-0,03	0,03	0,10	0,10	-0,15	0,15
1042	-0,09	0,09	-0,10	0,10	-0,01	0,01
1041	0,08	0,08	-0,05	0,05	-0,03	0,03
1024	-0,08	0,08	-0,01	0,01	-0,12	0,12
Gemiddelde (in m)	-0,03	0,06	0,01	0,06	-0,08	0,08

1.3.2. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in de pilotgebieden Allingawier, Baard, Jutrijp, Nijhuizum en Oldelamer.

Tabel 20. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in het pilotgebieden bij Allingawier. De eenheid is in meters

GCP-ID	GCP- hoogte	DEM - hoogte	Verschil DEM-hoogte min GCP-hoogte	Absolute verschil
1	1,033	1,108	0,075	0,075
2	0,076	0,172	0,096	0,096
3	0,014	0,083	0,069	0,069
4	0,119	0,201	0,082	0,082
5	-1,822	-1,843	-0,021	0,021
6	0,175	0,142	-0,033	0,033
Gemiddelde (in m)	-	-	0,045	0,063

Tabel 21. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in het pilotgebieden bij Baard. De eenheid is in meters

GCP-ID	GCP- hoogte	DEM - hoogte	Verschil DEM-hoogte min GCP-hoogte	Absolute verschil
1	0,975	0,997	0,022	0,022
2	0,169	0,317	0,148	0,148
3	-0,192	-0,053	0,139	0,139

4	0,455	0,486	0,031	0,031
5	0,842	0,886	0,044	0,044
6	0,081	0,095	0,014	0,014
7	-0,611	-0,756	-0,145	0,145
8	-0,515	-0,462	0,053	0,053
9	-0,104	0,085	0,189	0,189
Gemiddelde (in m)	-	-	0,055	0,087

Tabel 22. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in het pilotgebieden bij Jutrijp. De eenheid is in meters

GCP-ID	GCP-hoogte	DEM - hoogte	Vershil DEM-hoogte min GCP-hoogte	Absolute verschil
1	-0,869	-1,359	-0,49	0,49
2	-0,486	-0,266	0,22	0,22
3	-0,113	-0,0489	0,0641	0,0641
4	-0,962	-1,159	-0,197	0,197
5	0,265	0,286	0,021	0,021
6	-1,301	-1,116	0,185	0,185
7	-1,045	-1,099	-0,054	0,054
8	-0,558	-0,24	0,318	0,318
9	-0,457	-0,217	0,24	0,24
10	-0,456	-0,525	-0,069	0,069
11	-0,519	-0,108	0,411	0,411
Gemiddelde (in m)	-	-	0,059	0,206

Tabel 23. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in het pilotgebieden bij Nijhuizum. De eenheid is in meters

GCP-ID	GCP-hoogte	DEM - hoogte	Vershil DEM-hoogte min GCP-hoogte	Absolute verschil
1	-0,551	-0,496	0,055	0,055
2	-0,573	-0,475	0,098	0,098
3	-0,55	-0,556	-0,006	0,006
4	-0,191	-0,154	0,037	0,037
5	-0,898	-0,899	-0,001	0,001
6	-0,854	-0,85	0,004	0,004
7	-0,727	-0,685	0,042	0,042
8	-0,824	-0,799	0,025	0,025
9	-1,738	-1,69	0,048	0,048
10	-1,278	-1,077	0,201	0,201
11	-0,962	-0,86	0,102	0,102

Gemiddelde (in m)		0,055	0,056

Tabel 24. Inschatting nauwkeurigheid z-coördinaten van de beelden van 21 mei 2015 gemaakt in het pilotgebieden bij Oldelamer. De eenheid is in meters

GCP-ID	GCP-hoogte	DEM - hoogte	Vershil min DEM-hoogte	Absolute verschil
1	-0,270	-0,256	0,014	0,014
2	-0,205	-0,174	0,031	0,031
3	-0,131	-0,060	0,071	0,071
4	-0,138	-0,544	-0,406	0,406
5	-0,114	-0,162	-0,048	0,048
Gemiddelde (in m)	-	-	-0,068	0,114

1.3.3. Inschatting nauwkeurigheid x-, y-, z-coördinaten van de NIR-beelden van 22 juli 2015 gemaakt in pilotgebied Goingarip.

Tabel 25. Coördinaten (Amersfoort RD Nieuw) van grondreferentiepunten in het pilotgebied bij Goingarip en de coördinaten van de corresponderende locaties in de orthomozaïek/DEM van 22 juli 2015

GCP-ID	GCP-x	orthomozaïek -x	GCP-y	orthomozaïek -y	GCP-z	DEM-z
1	180502,433	180502,411	559317,1	559317,1	2,708	2,68979
2	180553,882	180553,876	559394,8	559394,8	1,901	1,90818
3	180669,223	180669,232	559362	559361,9	2,001	1,85996
4	180806,635	180806,673	559219,7	559219,8	-0,052	-0,00878
5	180817,359	180817,313	559182,3	559182,3	-1,443	-1,38996
6	180839,661	180839,651	559220,4	559220,4	0,583	0,59673
7	180710,603	180710,592	559348,3	559348,3	0,637	0,822
9	180888,025	180887,993	559539,8	559539,8	0,771	0,77593
10	180970,412	180970,413	559459,4	559459,5	0,559	0,60165

Tabel 26. Verschil (in meters) tussen de coördinaten van de grondreferentiepunten en de coördinaten van de corresponderende locaties in de orthomozaïek/DEM van 22 juli 2015

GCP-ID	Vershil beeld x-GCP	Absoluut verschil x	Vershil beeld y-GCP	Absoluut verschil y	Vershil beeld z-GCP	Absoluut verschil z
1	-0,022	0,022	0,020	0,020	-0,018	0,018
2	-0,006	0,006	-0,012	0,012	0,007	0,007
3	0,009	0,009	-0,031	0,031	-0,141	0,141
4	0,038	0,038	0,027	0,027	0,043	0,043
5	-0,046	0,046	-0,034	0,034	0,053	0,053

6	-0,010	0,010	0,025	0,025	0,014	0,014
7	-0,011	0,011	-0,027	0,027	0,185	0,185
9	-0,032	0,032	-0,041	0,041	0,005	0,005
10	0,001	0,001	0,017	0,017	0,043	0,043
Gemiddelde (in m)	-0,009	0,019	-0,006	0,026	0,021	0,057

1.3.4. Inschatting afwijking xy-richting in pilotgebied Oldelamer

Om twee hoogtemodellen met elkaar te kunnen vergelijken, is het van belang dat de georeferentie van de beelden, waar de hoogtemodellen uit afgeleid zijn, gelijk is. Om dit te controleren zijn de orthofoto's van 16 september 2014 en 21 mei 2015 over elkaar heen gelegd (een zogenoemde 'overlay') en is bekeken of de objecten op de foto ten opzichte van elkaar verschoven zijn (Figuur 60 en Figuur 61).

In Figuur 60 is aan het witte pad (linker beeld) en de witte lijnen (rechter beeld) te zien dat er geen grote verschuiving van de georeferentie is opgetreden.



Figuur 60. Uitsneden van een overlay van orthofoto's gemaakt op 16 september 2014 (groen gekleurd) en 21 mei 2015 (rozerood gekleurd).

In Figuur 61 is aan de streep op de weg te zien dat de verschuiving van de georeferentie van de beelden minimaal is (de afmeting van een vierkantje is 5x5 cm). De verschuiving in x-richting is ongeveer 1.3 cm, de verschuiving in y-richting ongeveer 2.1 cm.



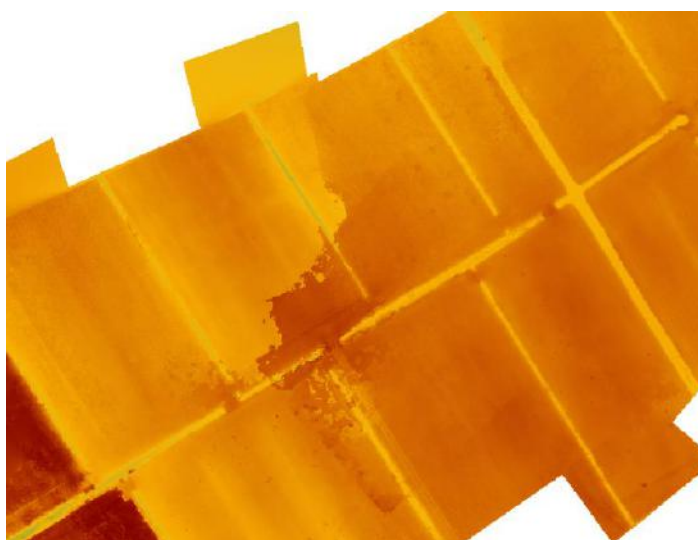
Figuur 61. Detail-uitsnede van een overlay van orthofoto's gemaakt op 16 september 2014 (groen gekleurd) en 21 mei 2015 (rozerood gekleurd).

1.4. Kwalitatieve vergelijking van de hoogtemodellen met AHN en Bing-maps als referentiepunten en de hoogtemodellen met dGPS ingemeten referentiepunten

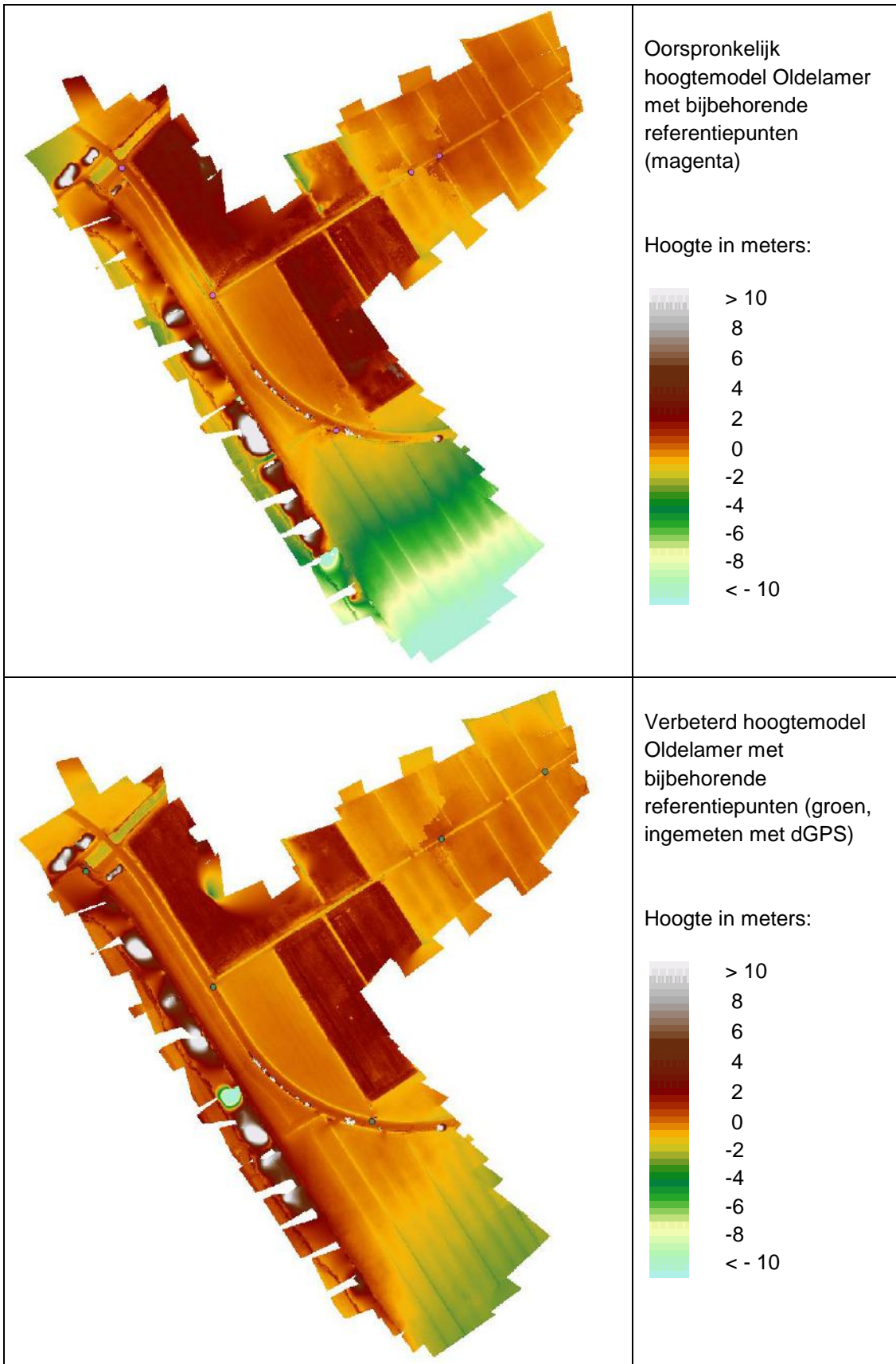
1.4.1. Studiegebied Oldelamer

Wat opvalt voor het studiegebied bij Oldelamer is dat in de zuidoosthoek het nieuwe hoogtemodel duidelijk verbeterd is ten opzichte van het oude hoogtemodel (Figuur 63). Dit kan verklaard worden door het referentiepunt in de zuidoosthoek dat goed herkenbaar was (streep op de weg) en waarvan de coördinaten erg nauwkeurig bepaald konden worden. Over het algemeen is het nieuwe hoogtemodel egalier dan het oude hoogtemodel, maar niet alle onrealistische oneffenheden zijn verdwenen (Figuur 62).

Omdat de foto's zijn genomen in RGB, kon het water niet weggefilterd worden met behulp van de NDVI (hier is de infrarode band voor nodig). Daardoor zijn voor het wateroppervlak aan de westrand onrealistisch hoge pieken en lage dalen te zien (Figuur 63).



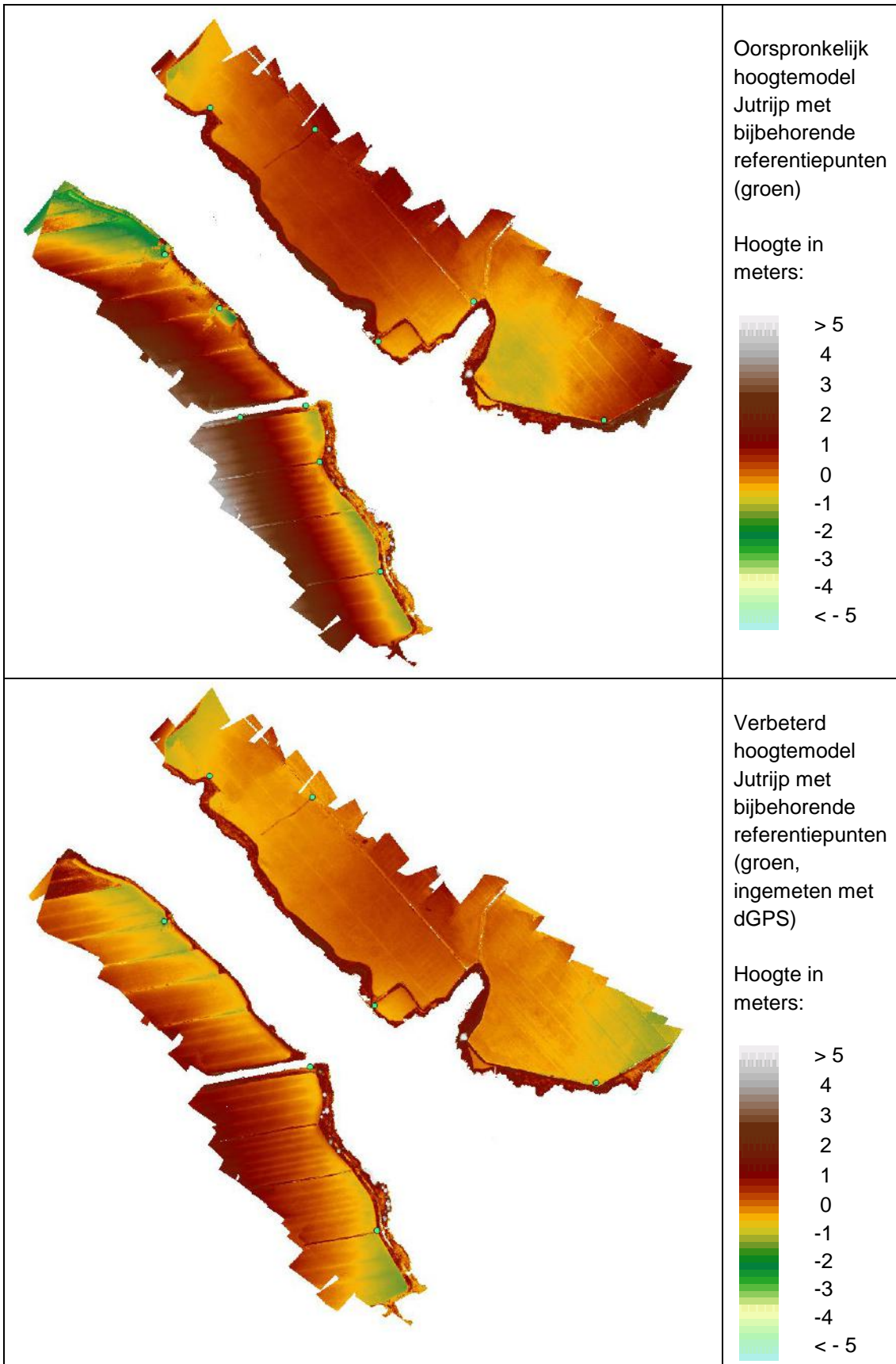
Figuur 62. Voorbeeld van een onrealistisch hoogtepatoon (vlekken in midden van beeld) in het hoogtemodel van het studiegebied bij Oldelamer.



Figuur 63. Oorspronkelijk (bovenste beeld) en verbeterd (onderste beeld) digitaal hoogtemodel van het studiegebied bij Oldelamer. Verkregen door het toepassen van fotogrammetrie: het rekenen met de verschillende kijkhoeken en overlap van de vele foto's genomen met de Flying Sensor.

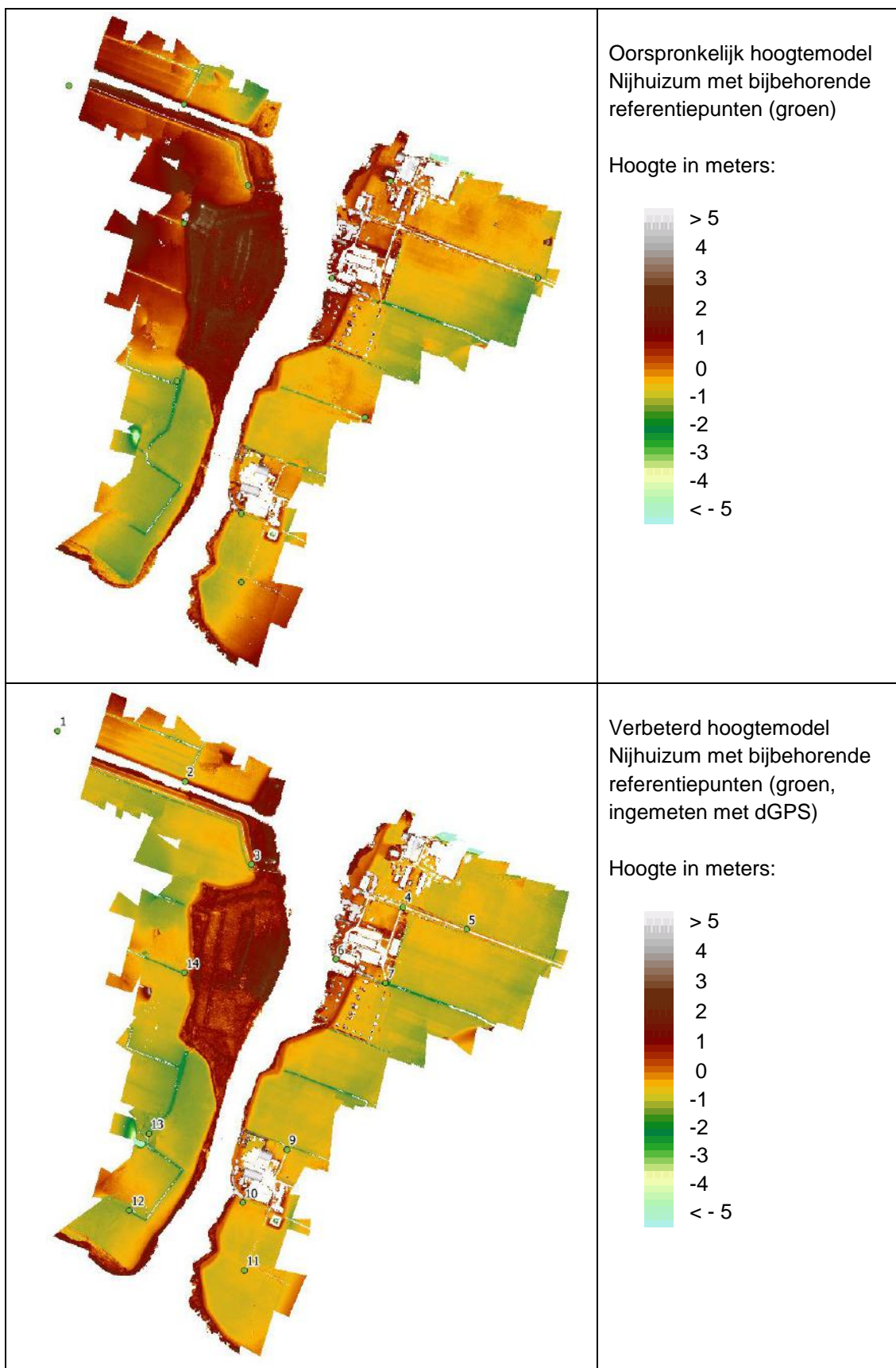
1.4.2. Studiegebied Jutrijp

Het inmeten van referentiepunten op de oostoever van het water (deel van een eiland) was niet mogelijk. Daarom zijn voor de oostoever dezelfde punten gebruikt als bij de eerste analyse. Eén referentiepunt op de oostoever (bij de inham) is weggelaten, omdat dit punt relatief dicht bij een ander referentiepunt lag en minder goed herkenbaar was. Voor de westoever zijn wel ingemeten dGPS-punten gebruikt. Omdat de referentiepunten niet nauwkeurig te bepalen waren (afwezigheid van verharde oppervlaktes met duidelijke grenslijnen), zijn de best herkenbare punten geselecteerd. Er zijn dus aan de westzijde ook minder referentiepunten gebruikt dan bij de eerste analyse. Desondanks is het resulterende hoogtemodel zowel aan de oostzijde als aan de westzijde egaler geworden (Figuur 64). Zeker voor de noordwestelijke oever is het resultaat aan de kant van de dijk realistischer geworden. Toch zijn er aan de westoever nog steeds patronen herkenbaar die niet realistisch zijn (bijvoorbeeld de relatief grote hoogtegradiënt van west naar oost). De verwachting is dat dit bij breder vliegen zal verbeteren, omdat er dan een aantal duidelijk herkenbare referentiepunten bijkomt waarvan de coördinaten al ingemeten zijn. Het is niet altijd mogelijk om bij breder vliegen het hele gebied in één keer te vliegen. Wel is het mogelijk om een tweede vlucht te maken en zo de gewenste breedte te bereiken.



Figuur 64. Oorspronkelijk (bovenste beeld) en verbeterd (onderste beeld) digitaal hoogtemodel van het studiegebied bij Jutriip.

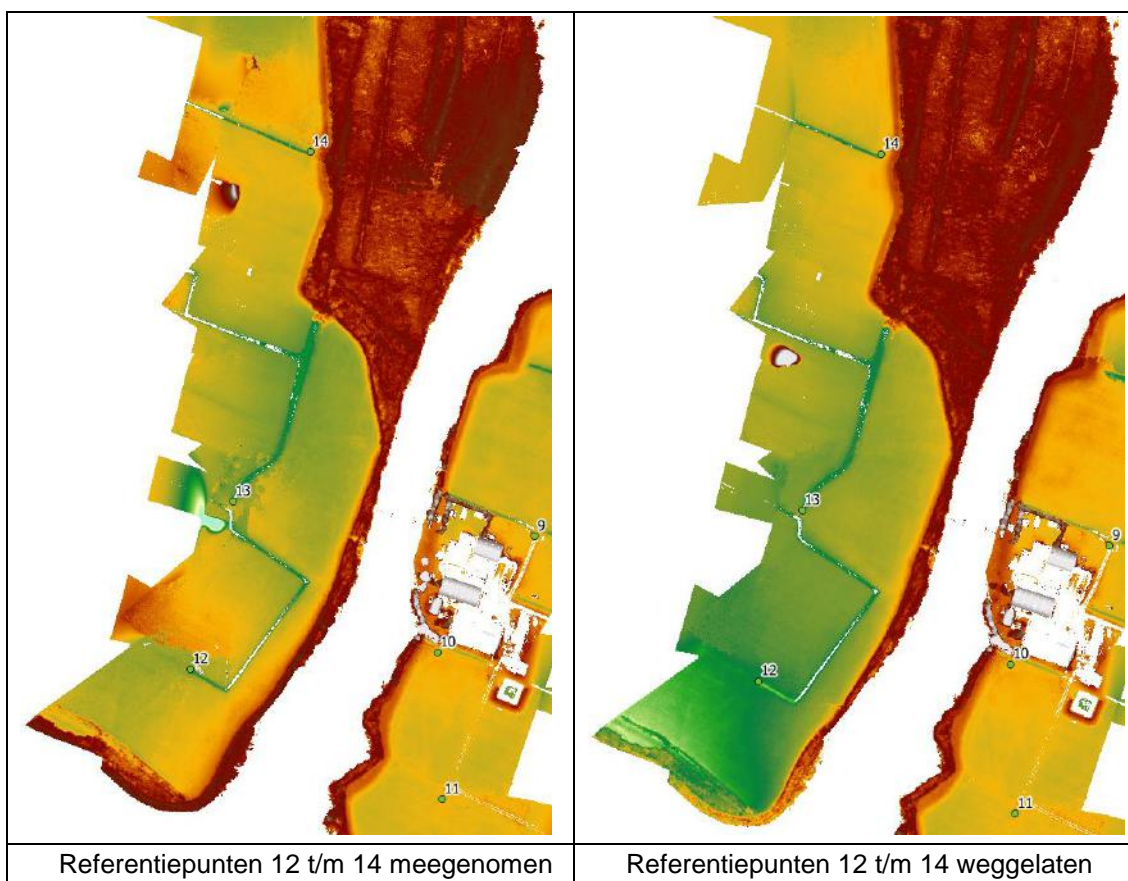
1.4.3. Studiegebied Nijhuizum



Figuur 65. Oorspronkelijk (bovenste beeld) en verbeterd (onderste beeld) digitaal hoogtemodel van het studiegebied bij Nijhuizum.

Het verbeterde hoogtemodel voor het studiegebied bij Nijhuizum is duidelijk een stuk egaler geworden (Figuur 65). Aan de westzijde blijven er een aantal minder realistische patronen zichtbaar. Dit komt doordat referentiepunt 2 en referentiepunten 12, 13 en 14 minder nauwkeurig te bepalen zijn (de laatste drie liggen op een dam in het verlengde van een slootje).

Opvallend is dat wanneer de minder nauwkeurig te bepalen referentiepunten (12 t/m 14) worden weggelaten, het resulterende hoogtemodel lijkt te verbeteren voor de omgeving van de betreffende locaties (behalve aan de uiterste zuidkant van het hoogtemodel, rechterbeeld Figuur 66). Wanneer echter een aantal nauwkeurig te bepalen referentiepunten wordt weggelaten (bijvoorbeeld 9 t/m 11), wordt het resultaat in de omgeving van die locaties minder goed (zoals verwacht kan worden). Dit betekent dat het niet altijd meerwaarde heeft om meer referentiepunten te gebruiken, als deze niet nauwkeurig te bepalen zijn.

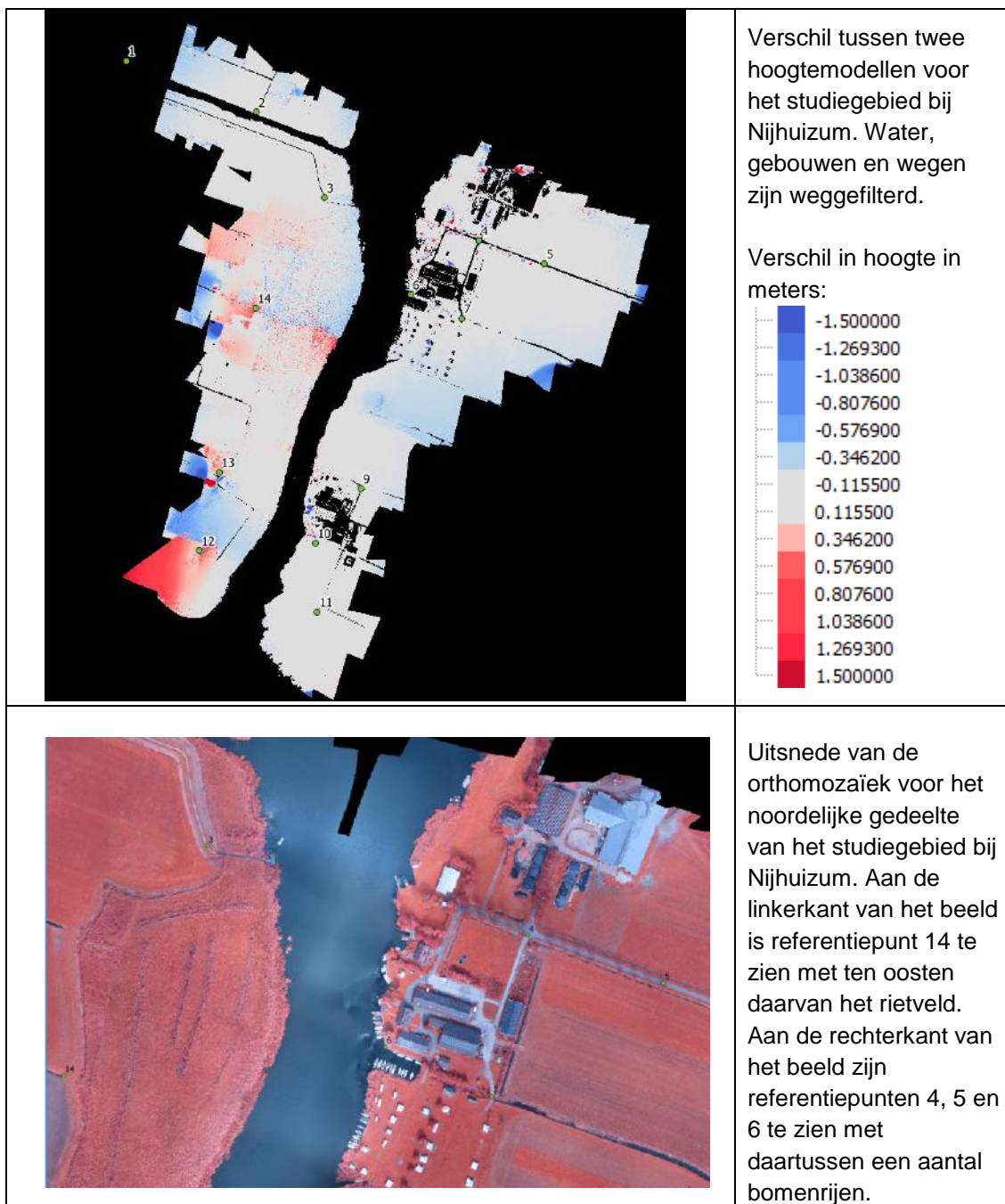


Figuur 66. Uitsneden van het verbeterde digitale hoogtemodel van het studiegebied bij Nijhuizum.

Naast het testen van het effect van het weglaten van een aantal referentiepunten, is het effect van het verschillend plaatsen van de referentiepunten getest. Dit is gedaan door de luchtfoto's twee keer op precies dezelfde manier te verwerken met als enige verschil dat de locatie van de referentiepunten op de luchtfoto's bij de tweede verwerking opnieuw bepaald is. Daarnaast leveren verschillen in het verwijderen van de uitschieters tijdens het proces mogelijk ook een bijdrage aan een verschil in output. De twee resulterende hoogtemodellen zijn vergeleken door ze van elkaar af te trekken (Figuur 67, bovenste beeld).

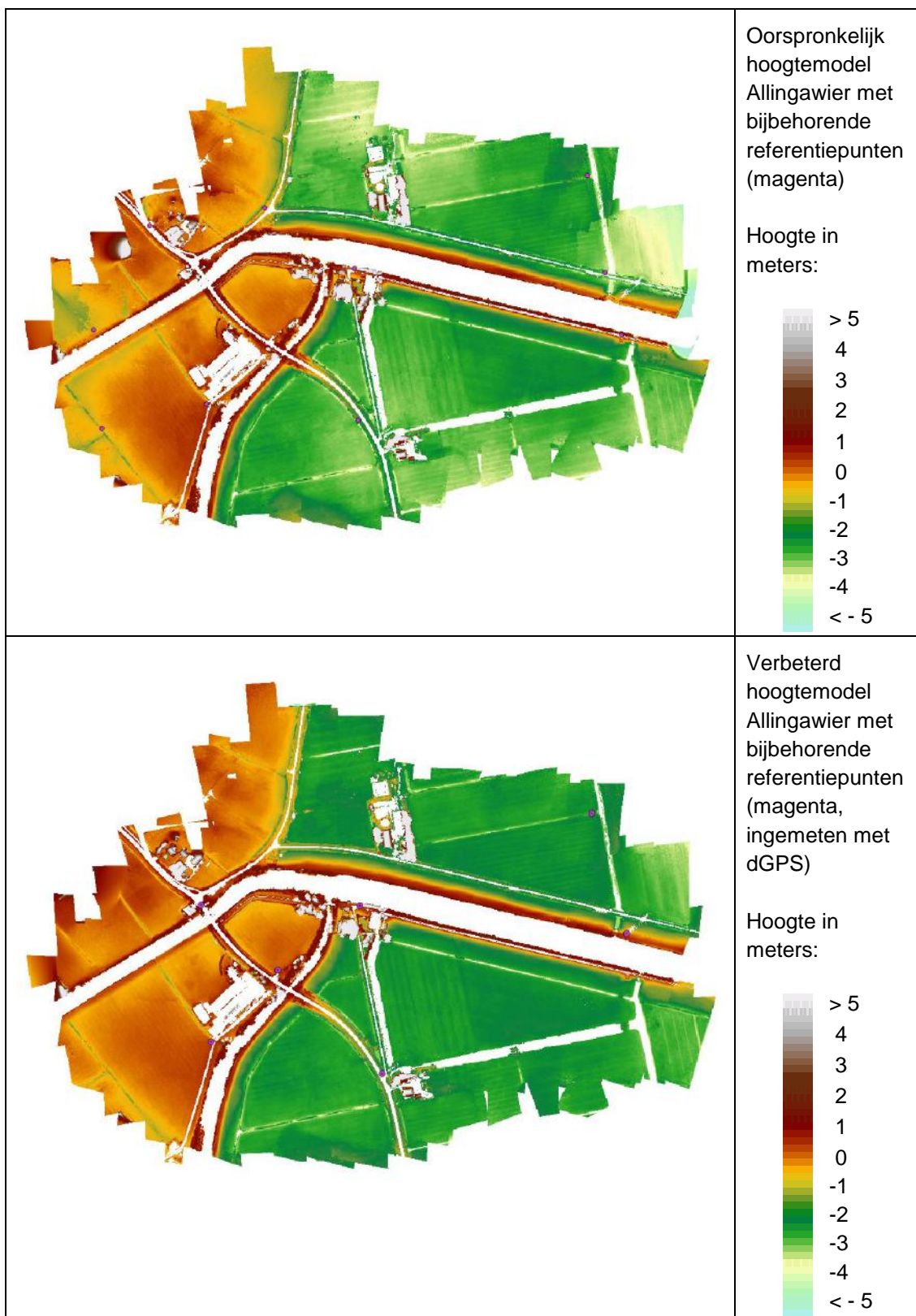
Waar (hoge) vegetatie aanwezig is, zijn de verschillen tussen de hoogtemodellen relatief groot (in de orde van tientallen centimeters), zie bijvoorbeeld het rietveld ten oosten van referentiepunt 14 en de bomenrij ten westen van referentiepunt 4 en ten noorden van referentiepunt 6 (Figuur 67). De nauwkeurigheid van de hoogte is hier dus lager. In de buurt van goed herkenbare en nauwkeurig te bepalen referentiepunten (bijvoorbeeld een kruising tussen betonplaten of een streep op de weg), zijn de verschillen tussen de hoogtemodellen klein (in de

orde van centimeters) en is de nauwkeurigheid van het hoogtemodel dus hoger (bijvoorbeeld rondom referentiepunten 3 t/m 7 en referentiepunten 9 t/m 11). In de buurt van referentiepunten die minder nauwkeurig te bepalen zijn (bijvoorbeeld op een dam in het verlengde van een sloot), is het verschil tussen de hoogtemodellen groter (zie referentiepunten 2 en 12 t/m 14). Dit geeft het belang aan van het gebruik van nauwkeurig te bepalen referentiepunten. Aan de buitenste randen van de hoogtemodellen zijn de verschillen tussen de hoogtemodellen ook groter en is de nauwkeurigheid van de hoogte kleiner.



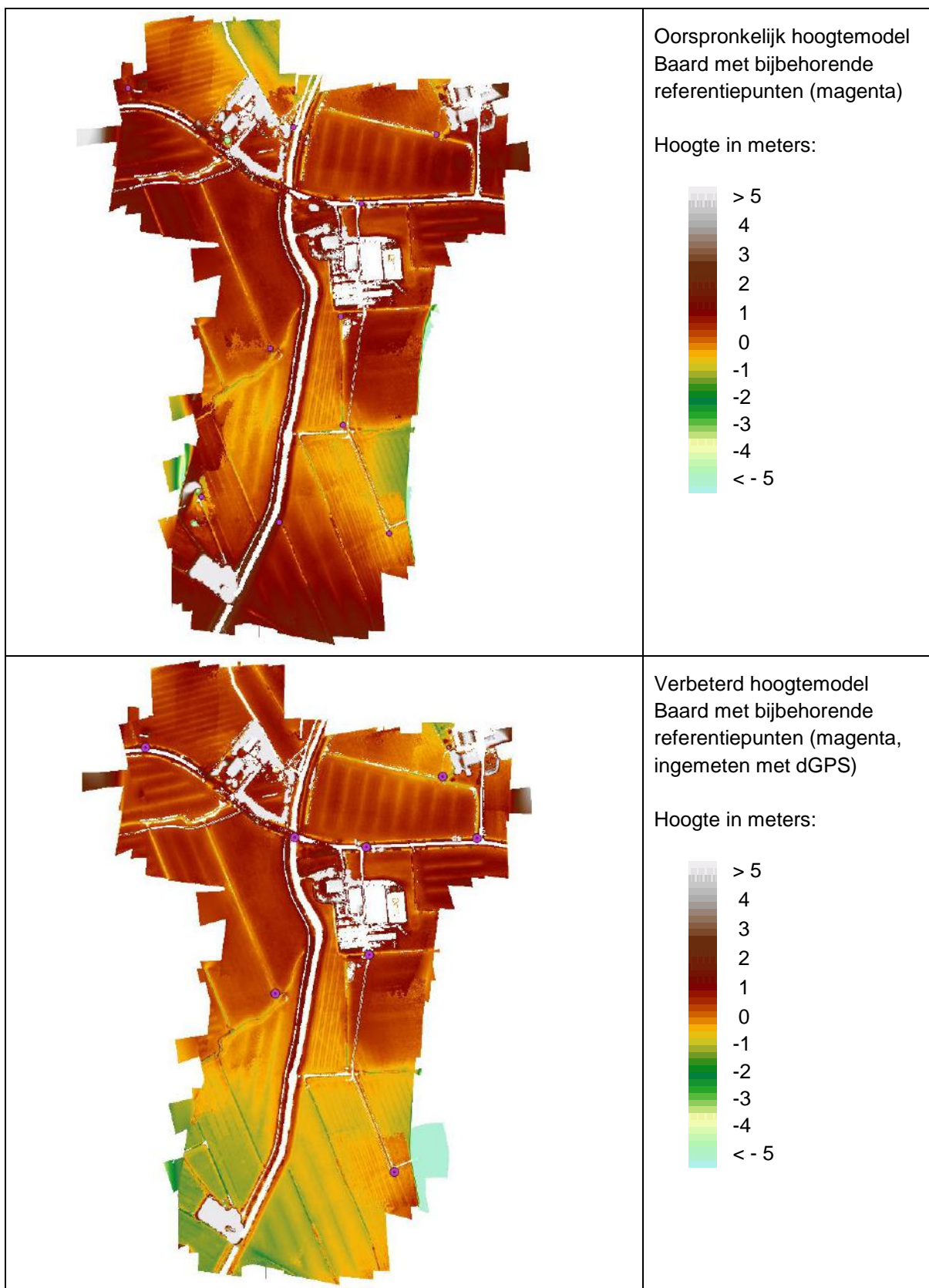
Figuur 67. Verskil tussen twee hoogtemodellen voor het studiegebied bij Nijhuizum (bovenste beeld) en uitsnede van de orthomosaïek voor het noordelijke gedeelte van het studiegebied (onderste beeld).

1.4.4. Studiegebied Allingawier



Figuur 68. Oorspronkelijk (bovenste beeld) en verbeterd (onderste beeld) digitaal hoogtemodel van het studiegebied bij Allingawier.

1.4.5. Studiegebied Baard



Figuur 69. Oorspronkelijk (bovenste beeld) en verbeterd (onderste beeld) digitaal hoogtemodel van het studiegebied bij Baard.

1.5. Volledige beelden multicopter in het pilotgebied bij Haskerdijken



Figuur 70. RGB orthomozaïek van het pilotgebied bij Haskerdijken. Voor deze orthomozaïek zijn op 22 juli 2015 luchtfoto's gemaakt vanuit een multicopter (bron: Droneview).



Figuur 71. RGB orthomozaïek van het pilotgebied bij Haskerdijken. Voor deze orthomozaïek zijn op 22 juli 2015 luchtfoto's gemaakt vanuit een multicopter (bron: Droneview).

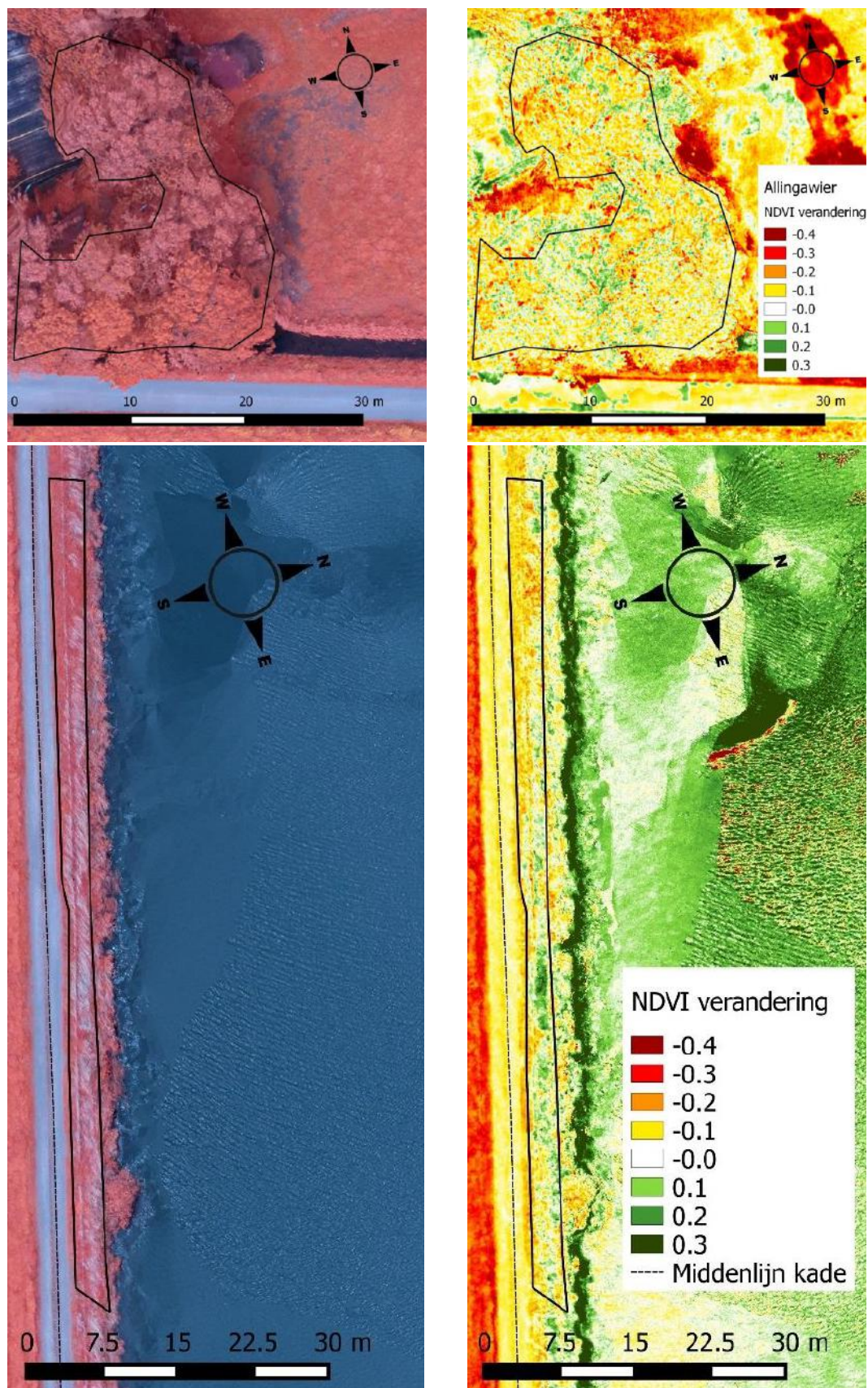


Figuur 72. RGB orthomozaïek van het pilotgebied bij Haskerdijken. Voor deze orthomozaïek zijn op 2 oktober 2015 luchtfoto's gemaakt vanuit een multicopter (bron: Droneview).

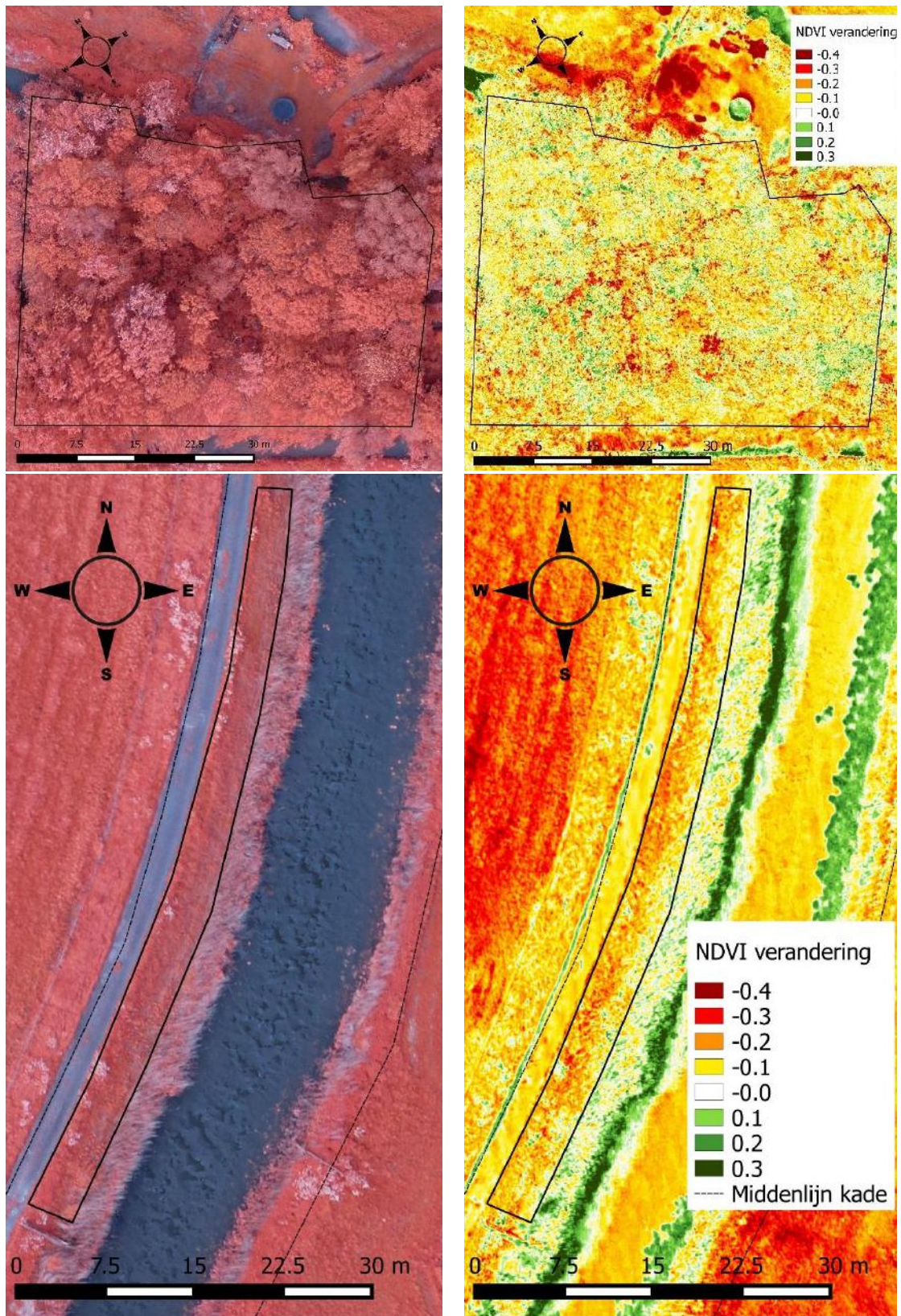


Figuur 73. RGB orthomozaïek van het pilotgebied bij Haskerdijken. Voor deze orthomozaïek zijn op 2 oktober 2015 luchtfoto's gemaakt vanuit een multicopter (bron: Droneview).

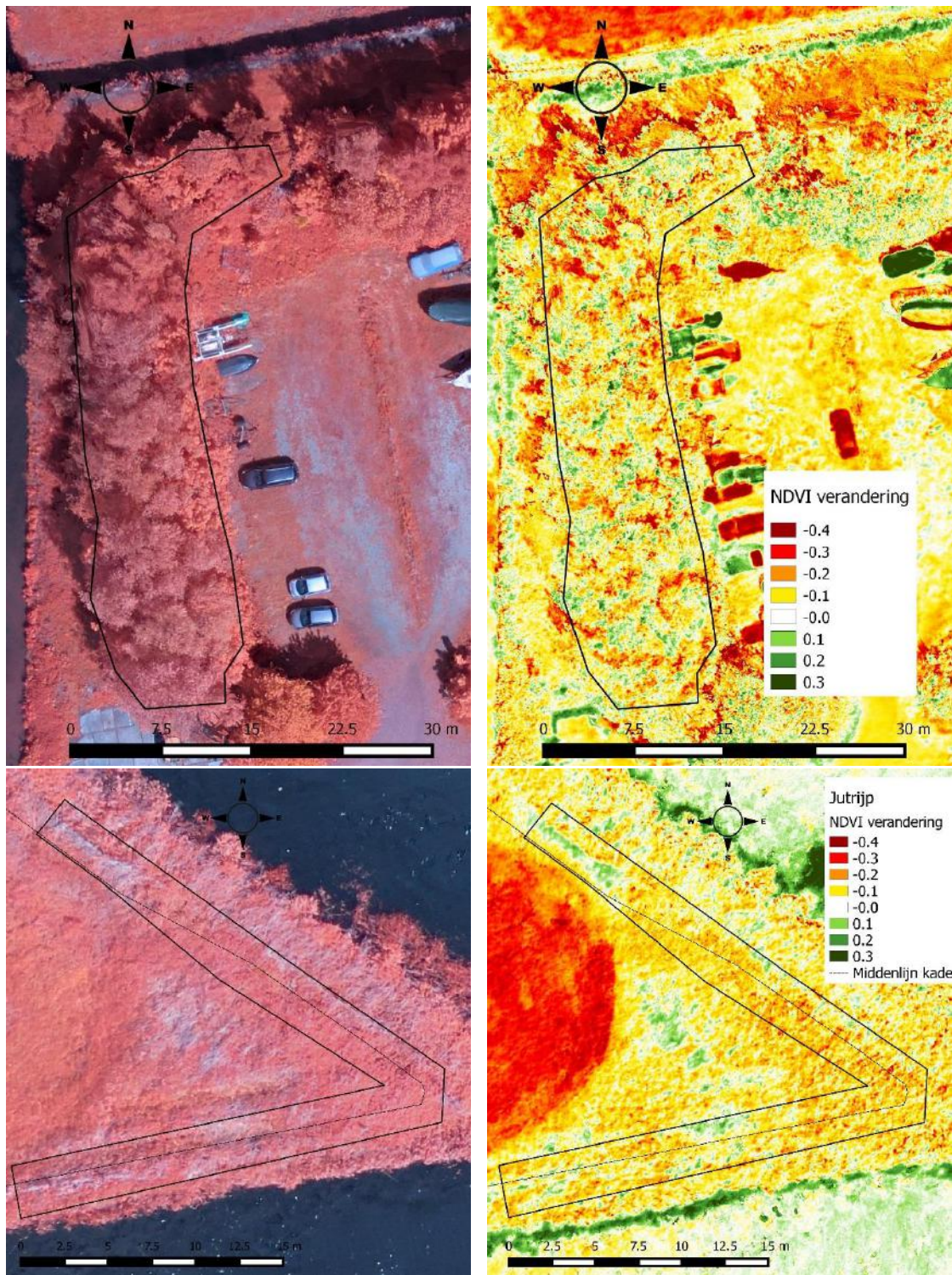
1.6. NDVI-verandering boomvegetatie en niet-gemaaide kadevegetatie



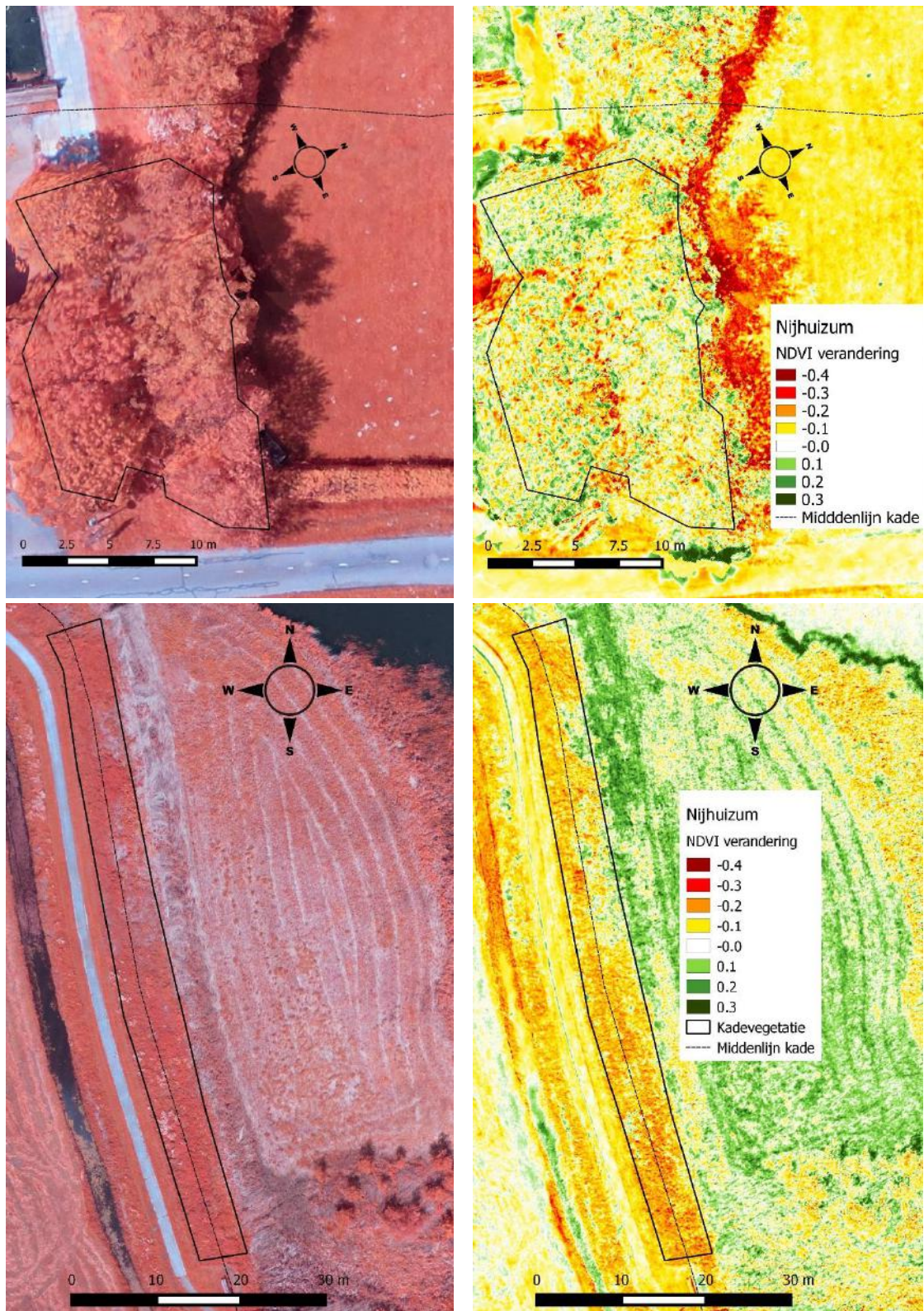
Figuur 74. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van boomvegetatie in het pilotgebied bij Allingawier op 21 mei 2015, NDVI-verandering van de boomvegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NDVI-verandering van de kadevegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NIR-orthomosaïek van kadevegetatie op 21 mei 2015.



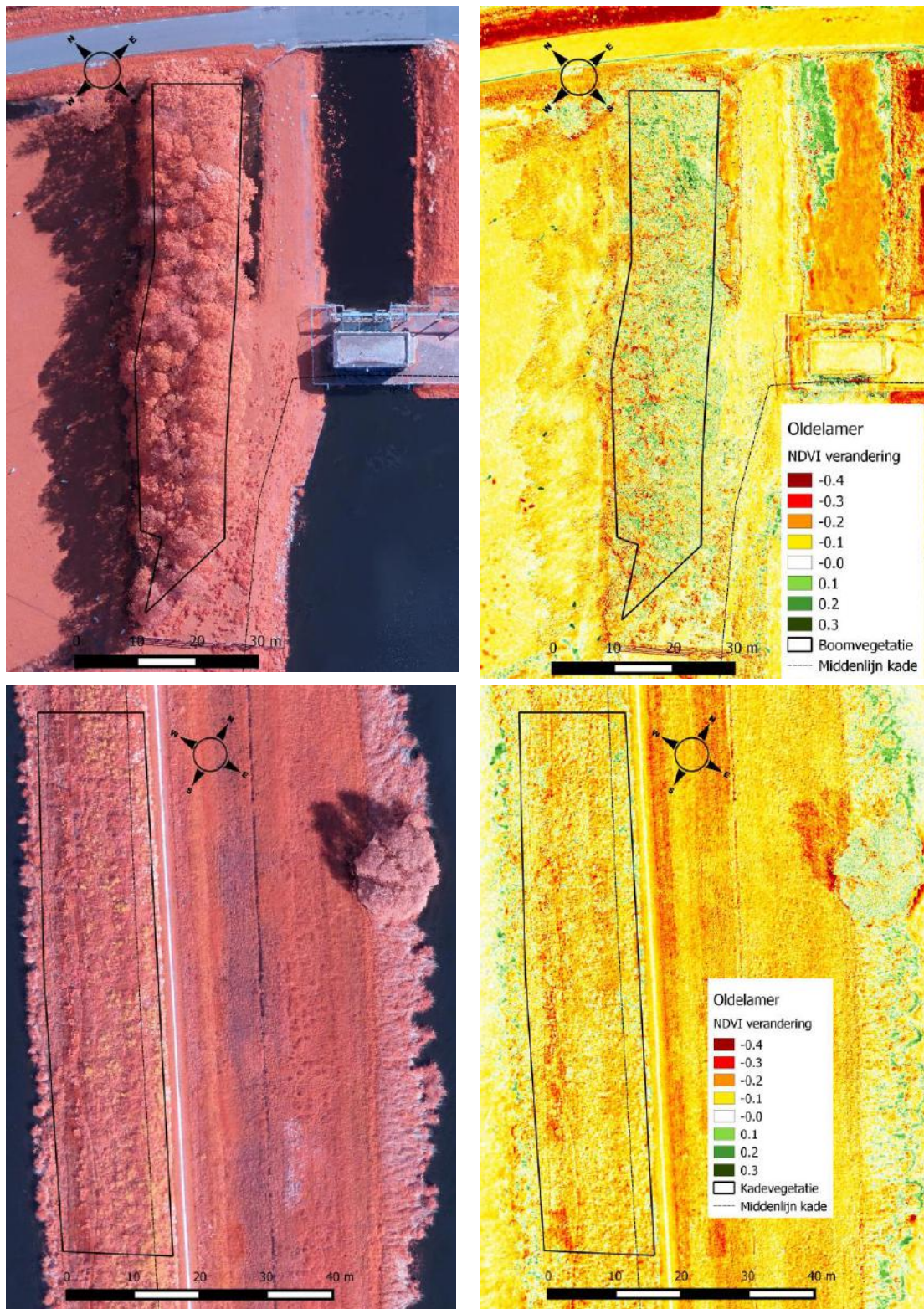
Figuur 75. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van boomvegetatie in het pilotgebied bij Baard op 21 mei 2015, NDVI-verandering van de boomvegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NDVI-verandering van de kadevegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NIR-orthomosaïek van kadevegetatie op 21 mei 2015.



Figuur 76. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van boomvegetatie in het pilotgebied bij Jutrijp op 21 mei 2015, NDVI-verandering van de boomvegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NDVI-verandering van de kadevegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NIR- orthomosaïek van kadevegetatie op 21 mei 2015.

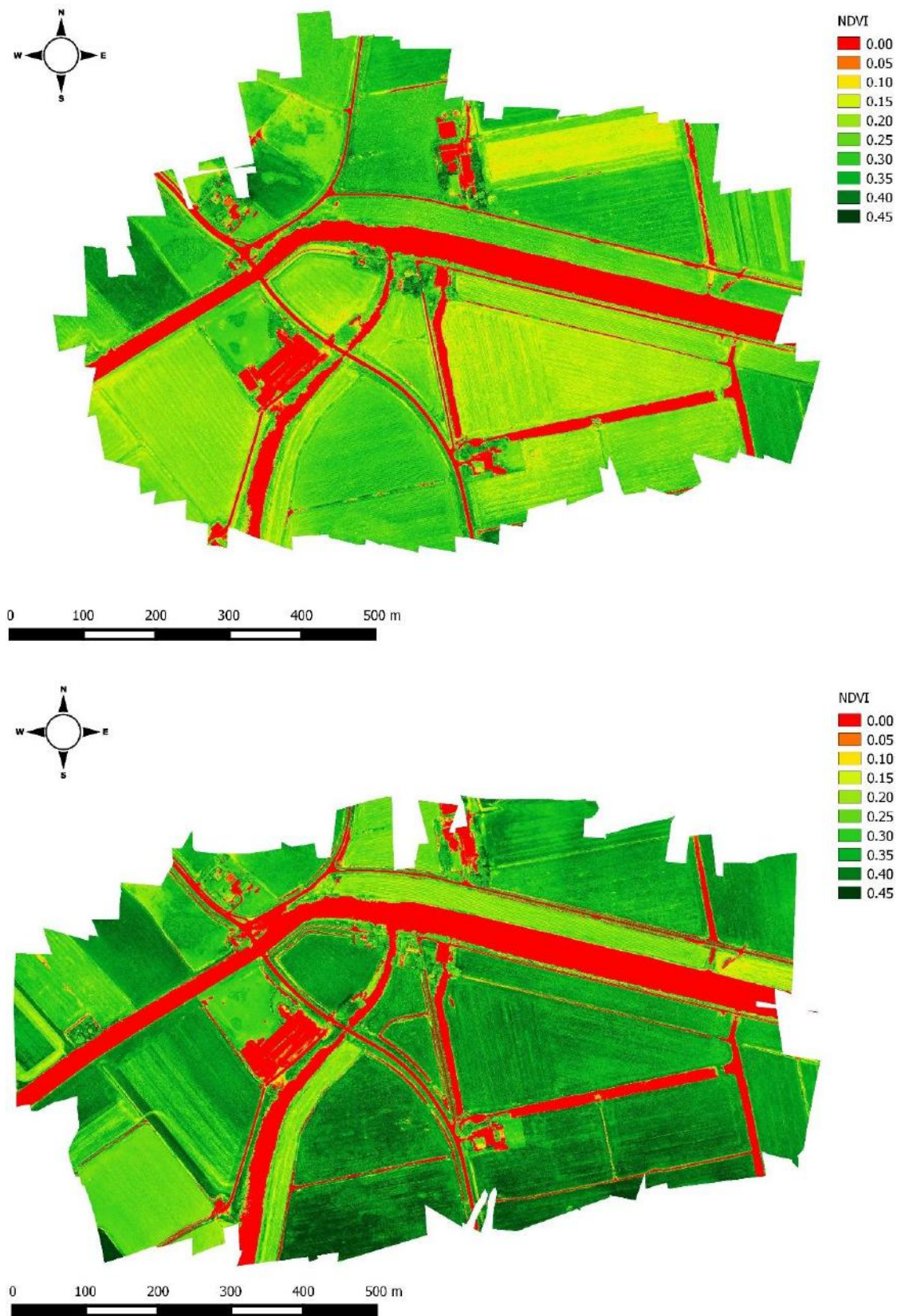


Figuur 77. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van boomvegetatie in het pilotgebied bij Nijhuizum op 21 mei 2015, NDVI-verandering van de boomvegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NDVI-verandering van de kadevegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NIR-orthomosaïek van kadevegetatie op 21 mei 2015.

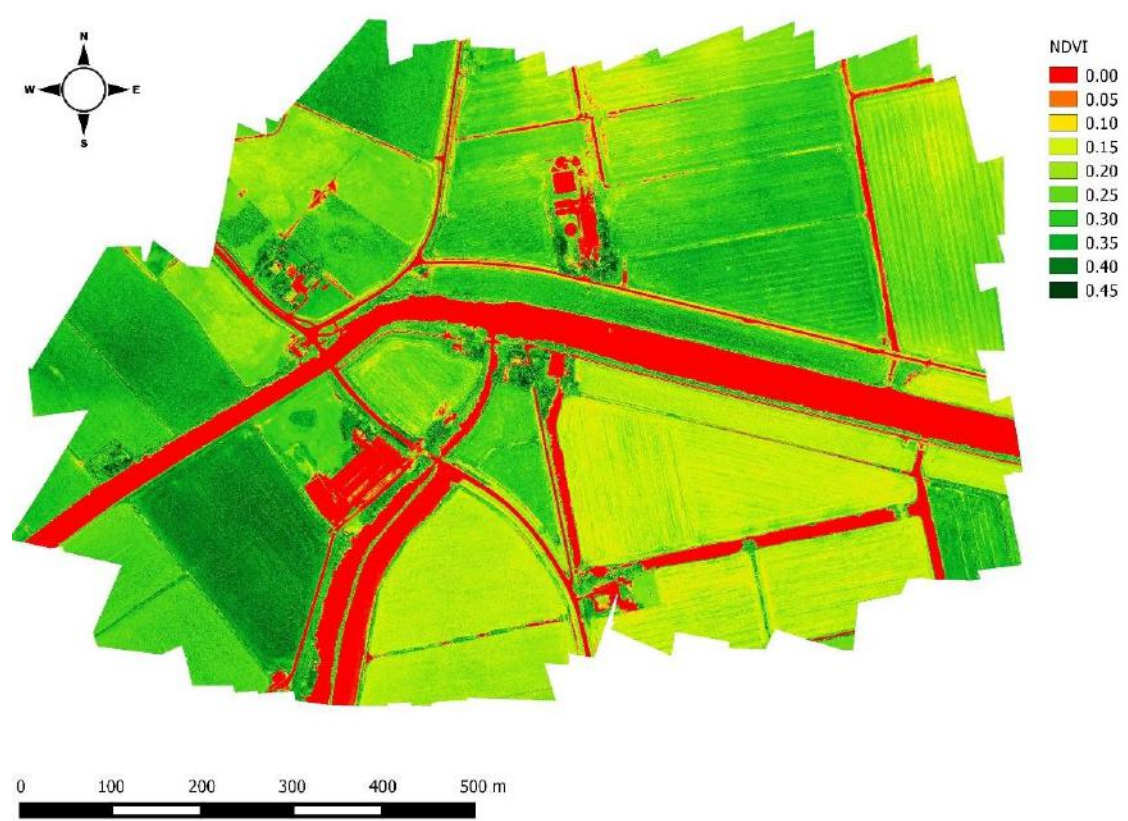


Figuur 78. Met de klok mee: NIR-orthomosaïek van boomvegetatie in het pilotgebied bij Oldelamer op 21 mei 2015, NDVI-verandering van de boomvegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NDVI-verandering van de kadevegetatie tussen 21 mei en 21 juli, NIR-orthomosaïek van kadevegetatie op 21 mei 2015.

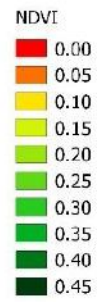
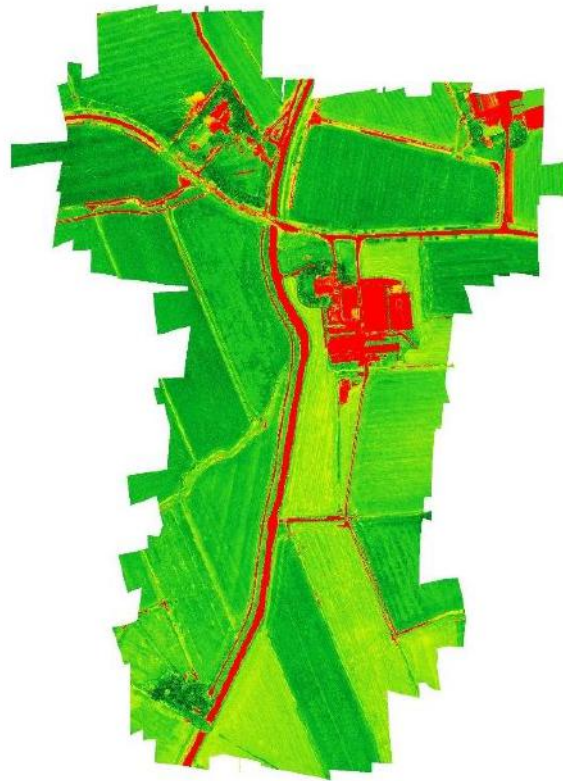
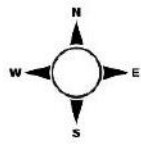
1.7. NDVI-beelden van Allingawier, Beard, Jutrijp, Nijhuizum en Oldelamer



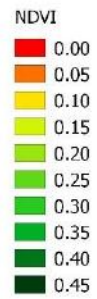
Figuur 79. NDVI-beelden van Allingawier. Boven op 16 september 2014, onder op 21 mei 2015.



Figuur 80. NDVI-beelden van Allingawier. Boven op 21 juli 2015, onder op 1 oktober 2015.

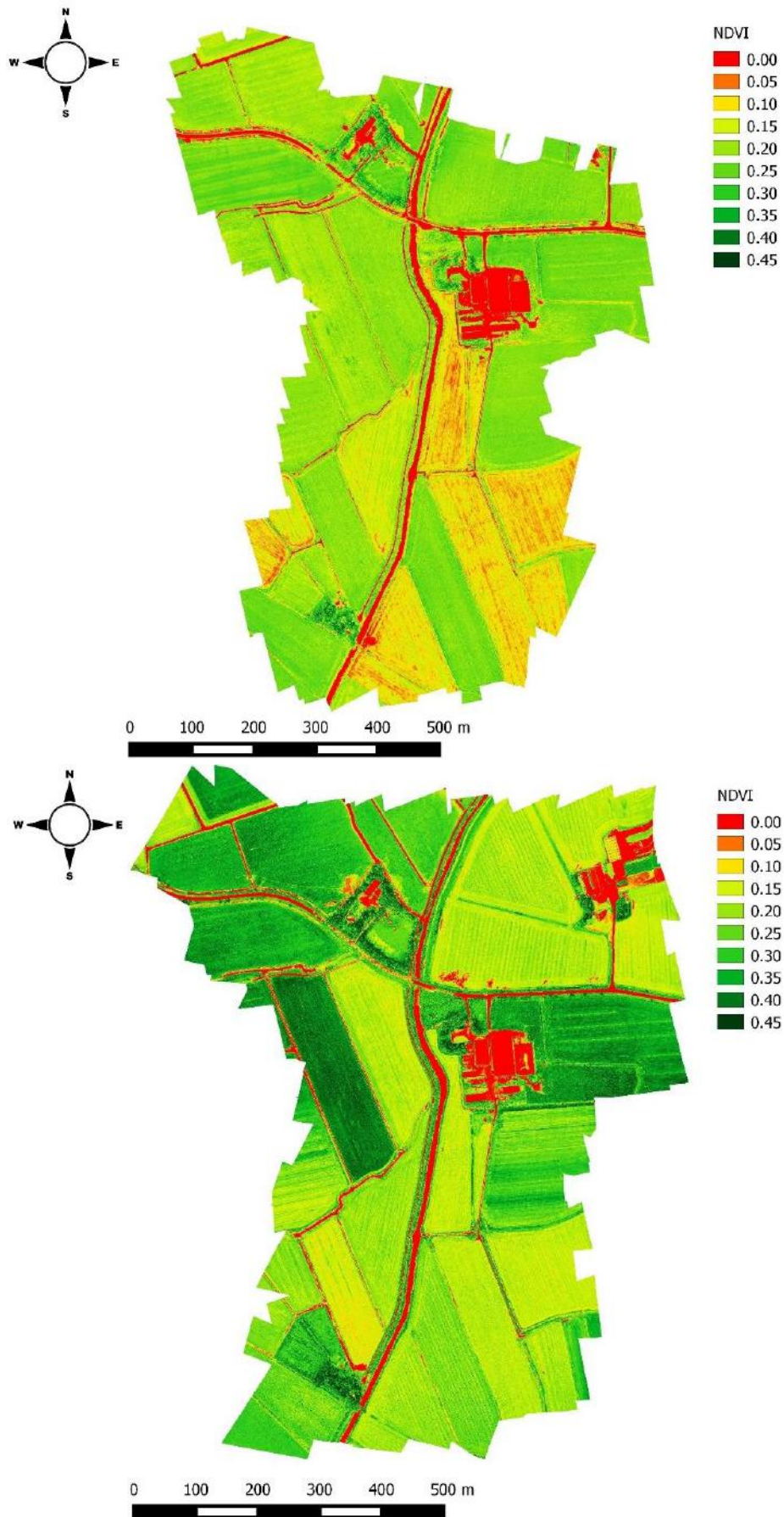


0 100 200 300 400 500 m

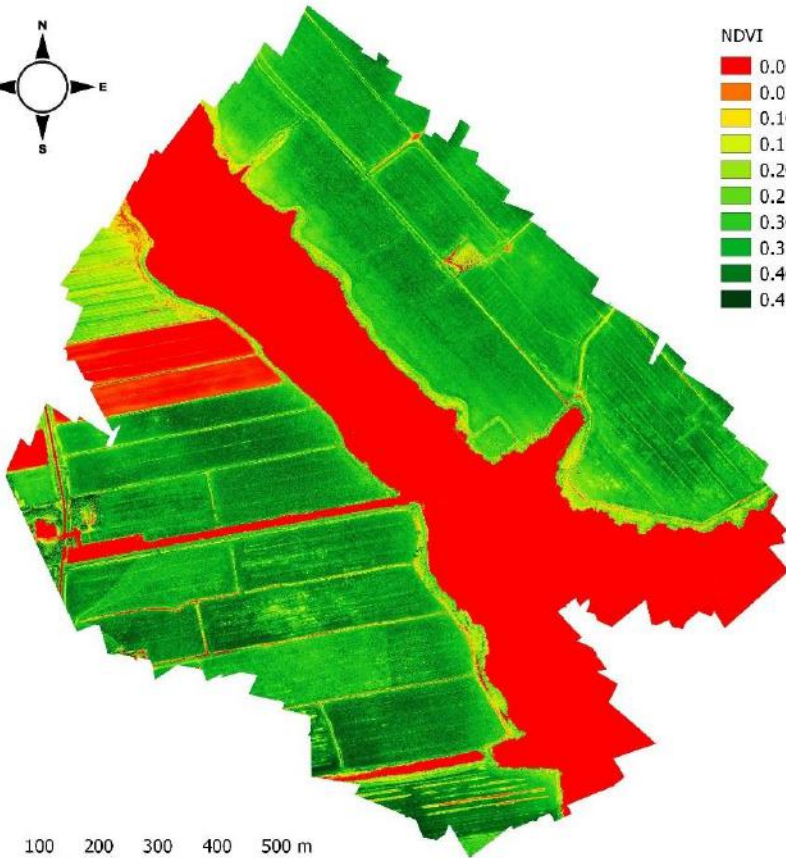
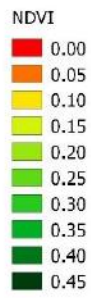
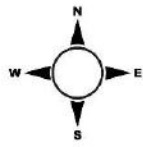
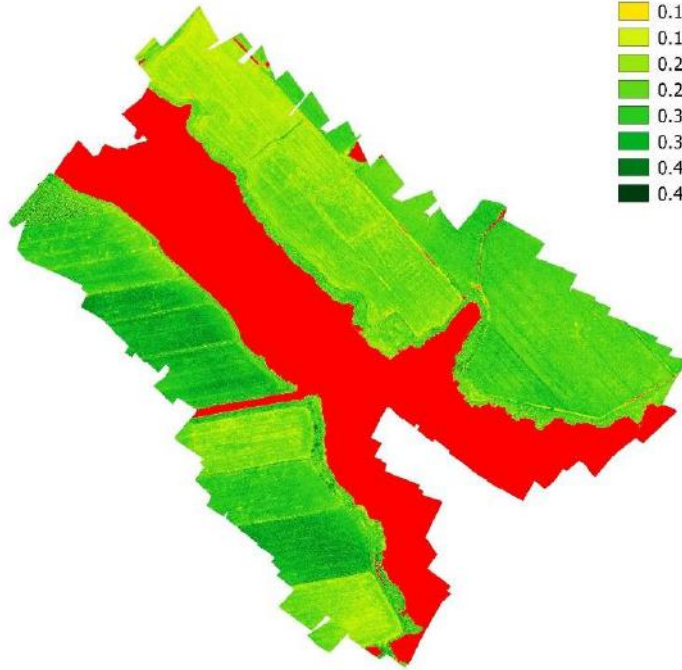
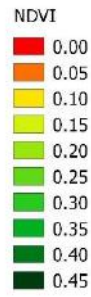
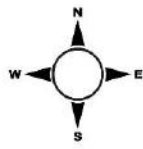


0 100 200 300 400 500 m

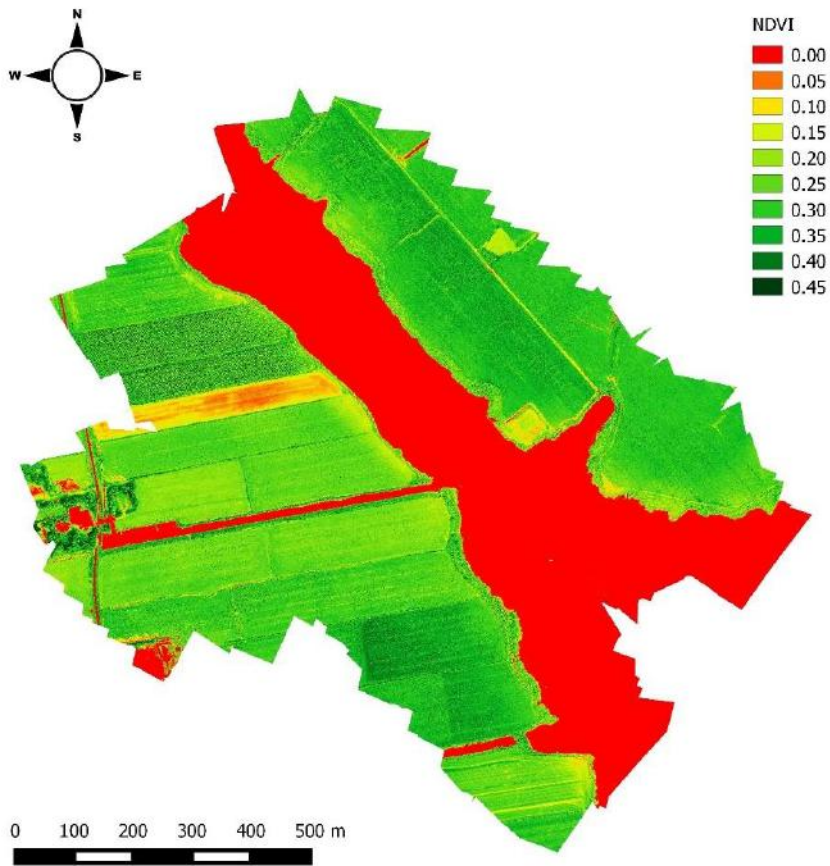
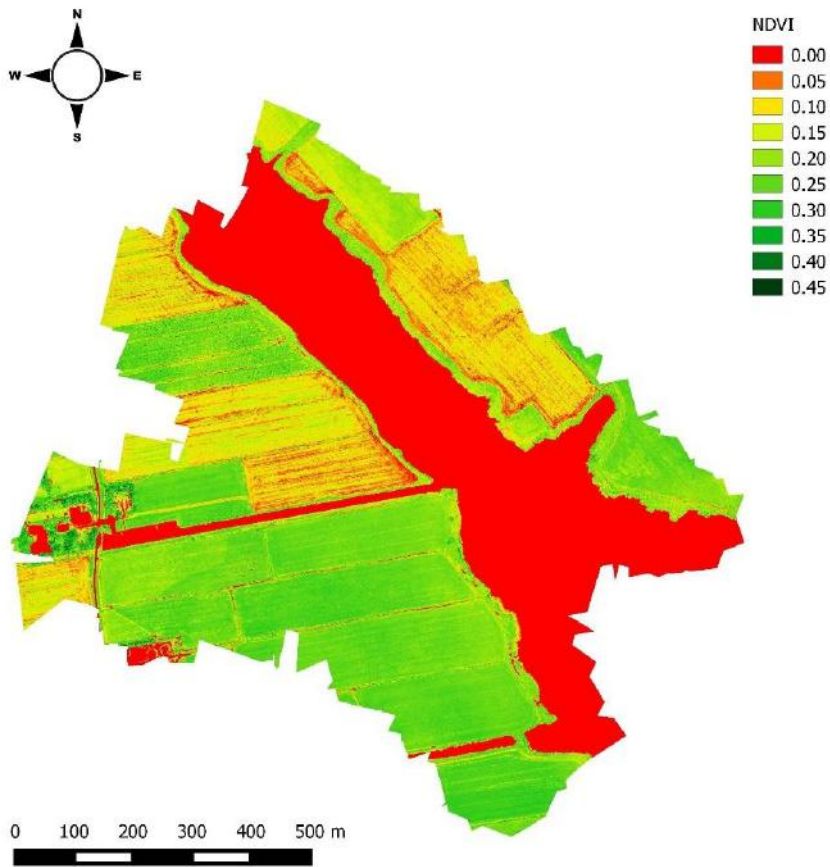
Figuur 81. NDVI-beelden van Baard. Boven op 16 september 2014, onder op 21 mei 2015.



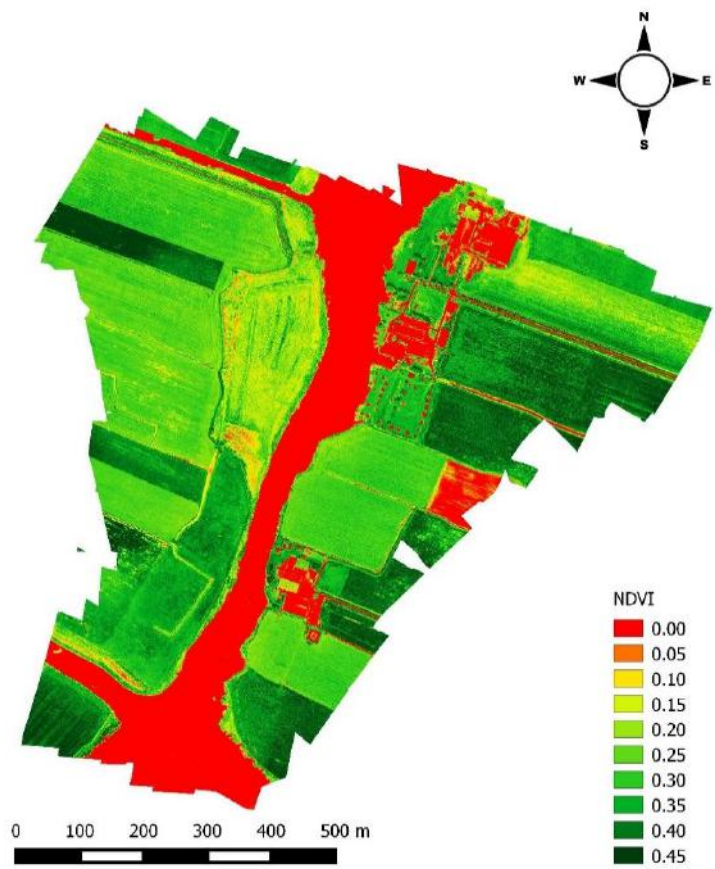
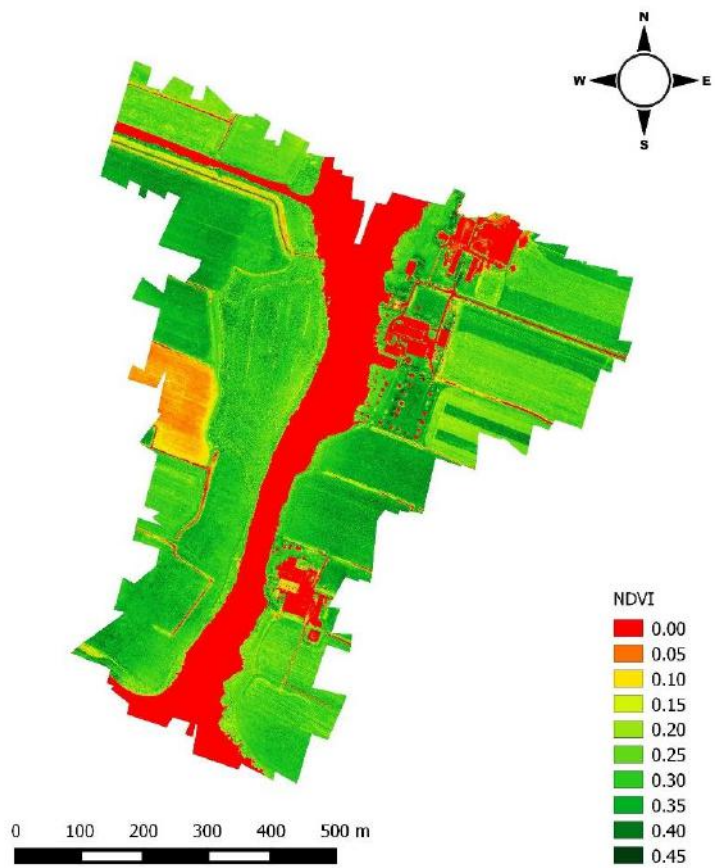
Figuur 82. NDVI-beelden van Baard. Boven op 21 juli 2015, onder op 1 oktober 2015.



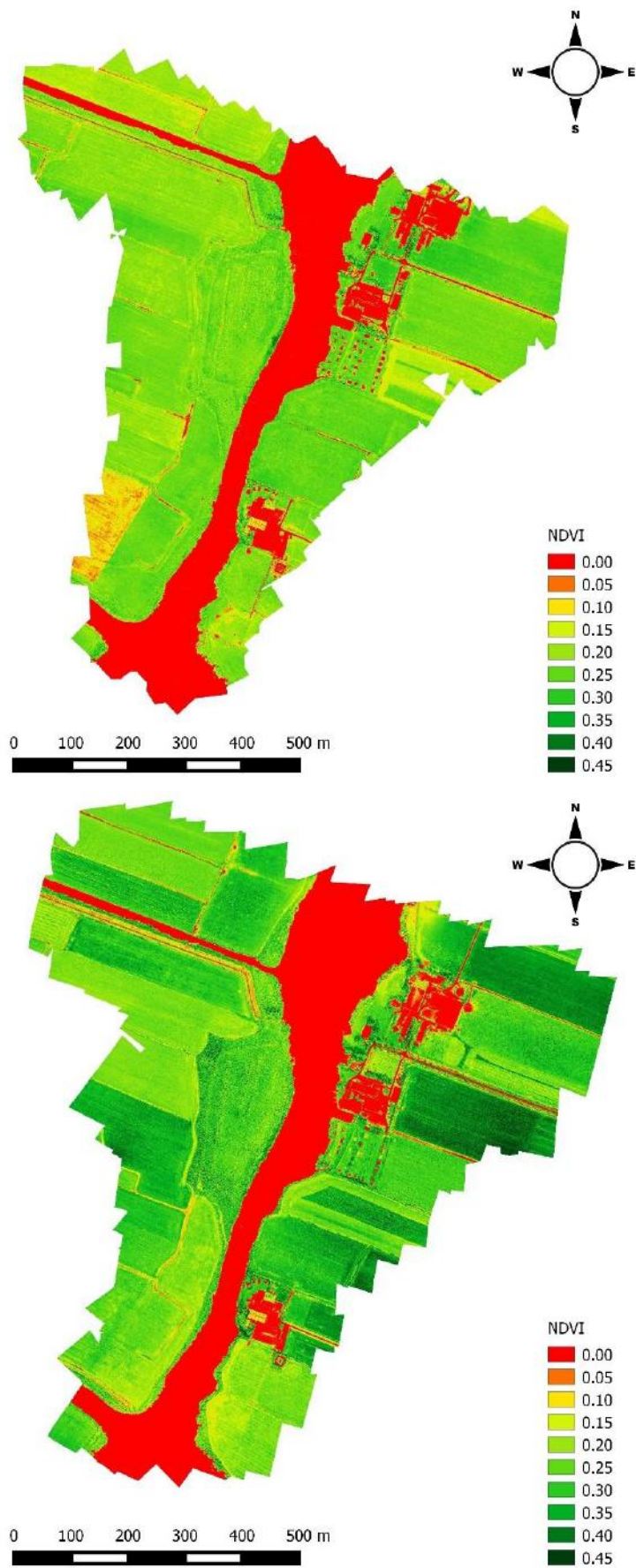
Figuur 83. NDVI-beelden van Jutriip. Boven op 16 september 2014, onder op 21 mei 2015.



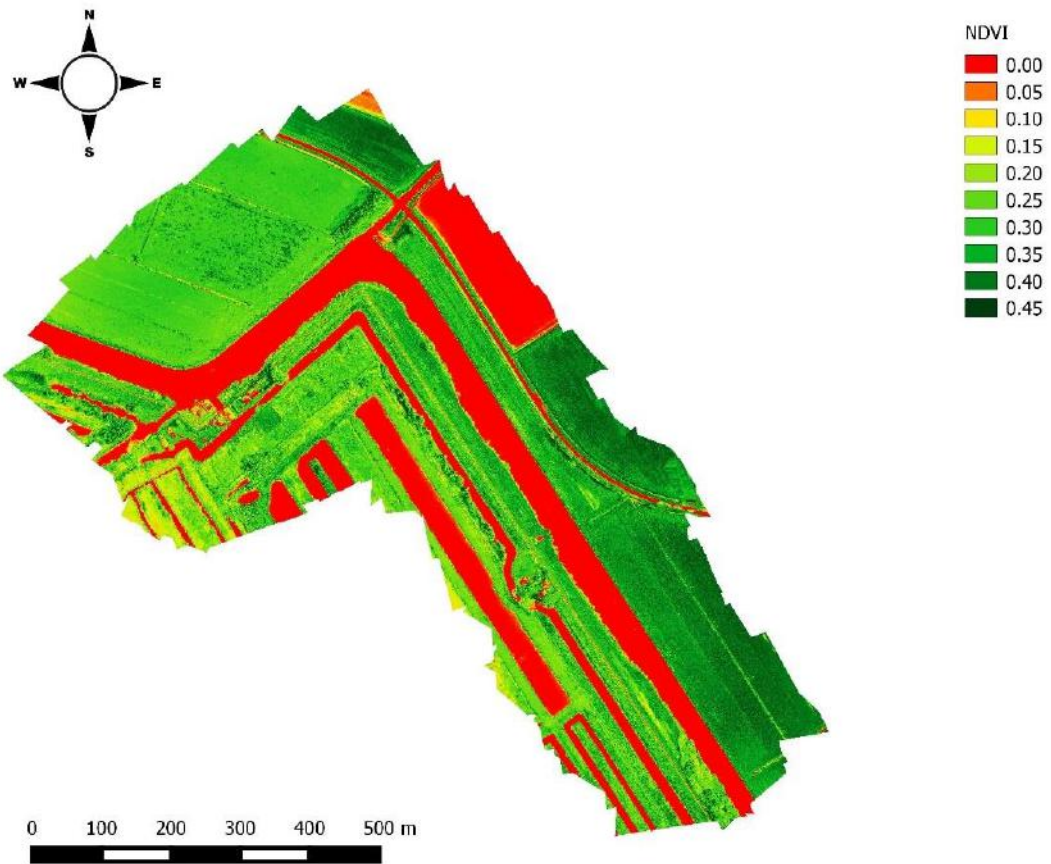
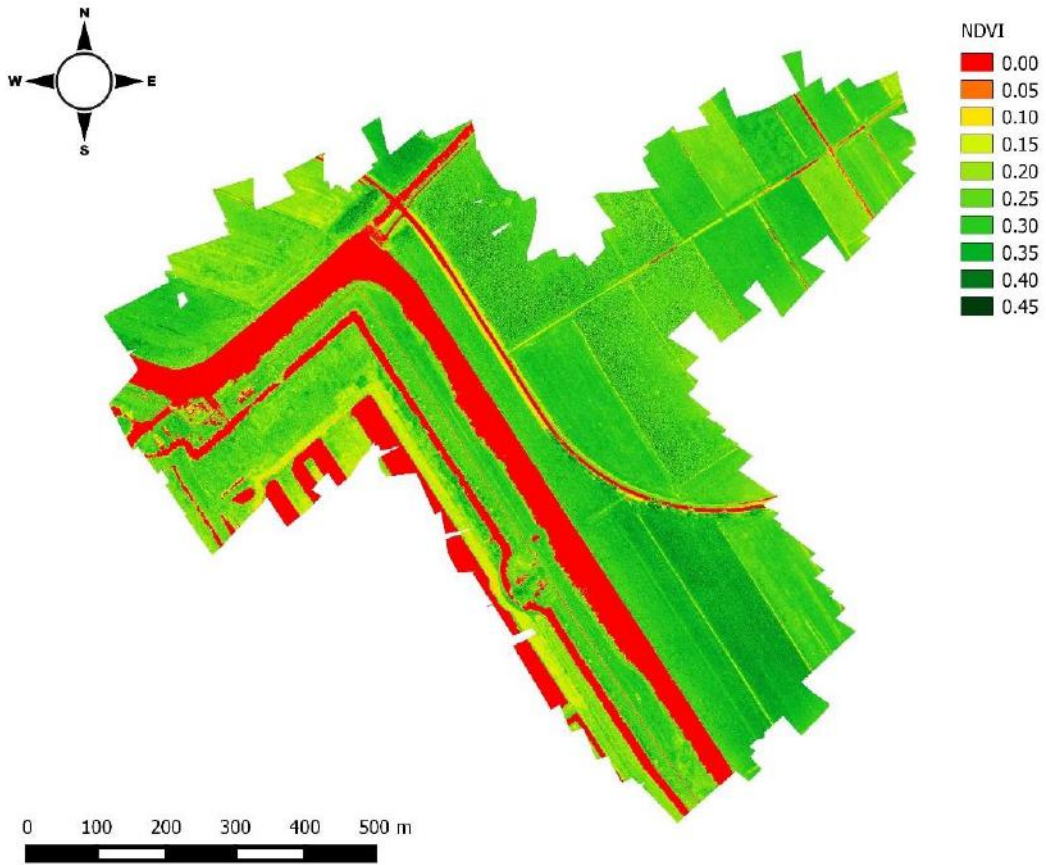
Figuur 84. NDVI-beelden van Jutrijp. Boven op 21 juli 2015, onder op 1 oktober 2015.



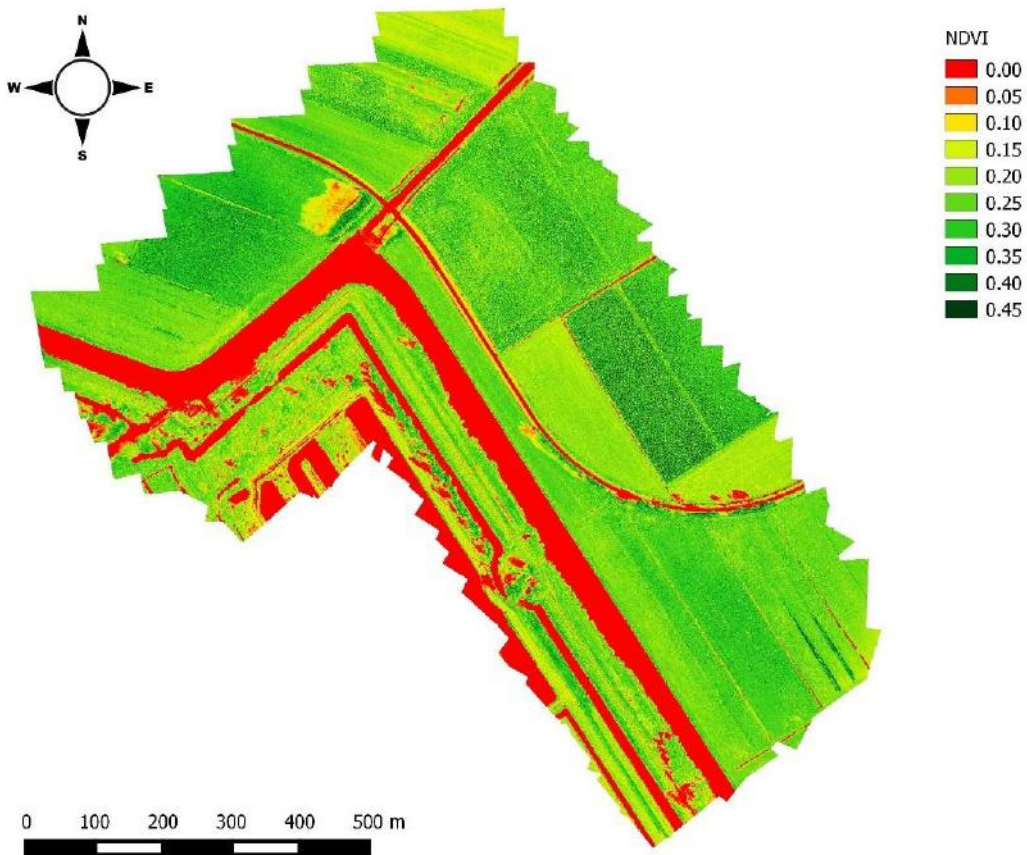
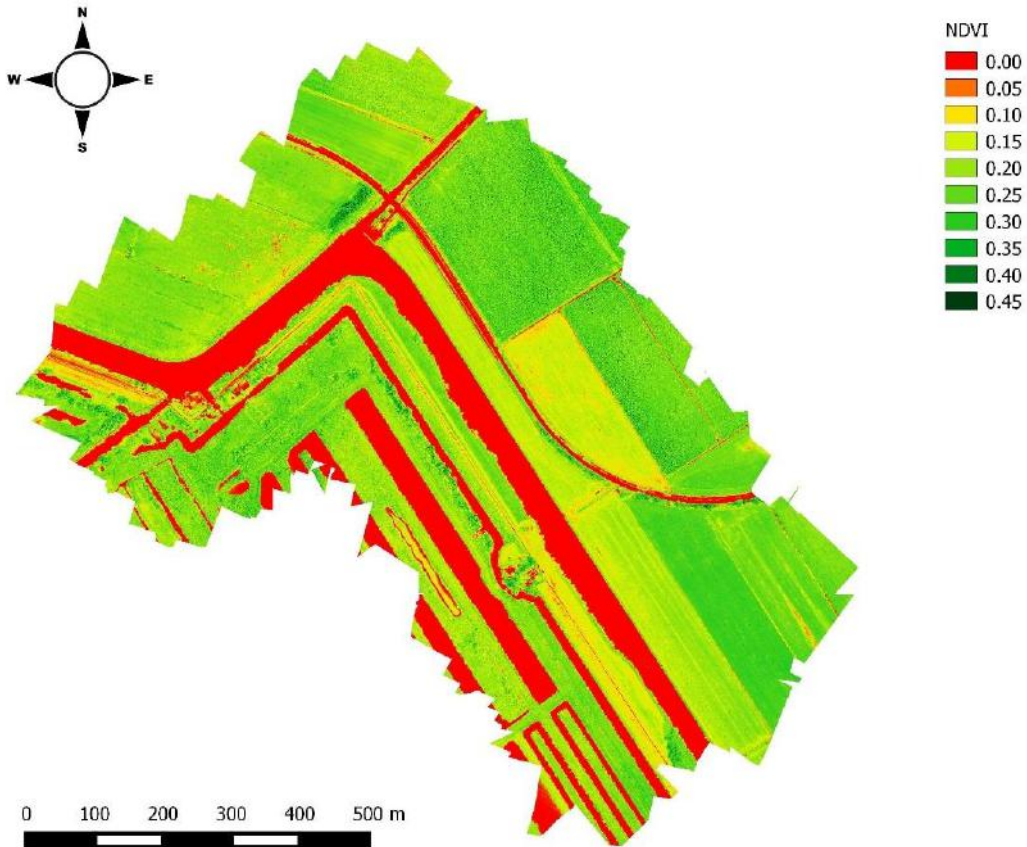
Figuur 85. NDVI-beelden van Nijhuizum. Boven op 16 september 2014, onder op 21 mei 2015.



Figuur 86. NDVI-beelden van Nijhuizum. Boven op 21 juli 2015, onder op 1 oktober 2015.



Figuur 87. NDVI-beelden van Oldelamer. Boven op 16 september 2014, onder op 21 mei 2015.



Figuur 88. NDVI-beelden van Oldelamer. Boven op 21 juli 2015, onder op 1 oktober 2015.