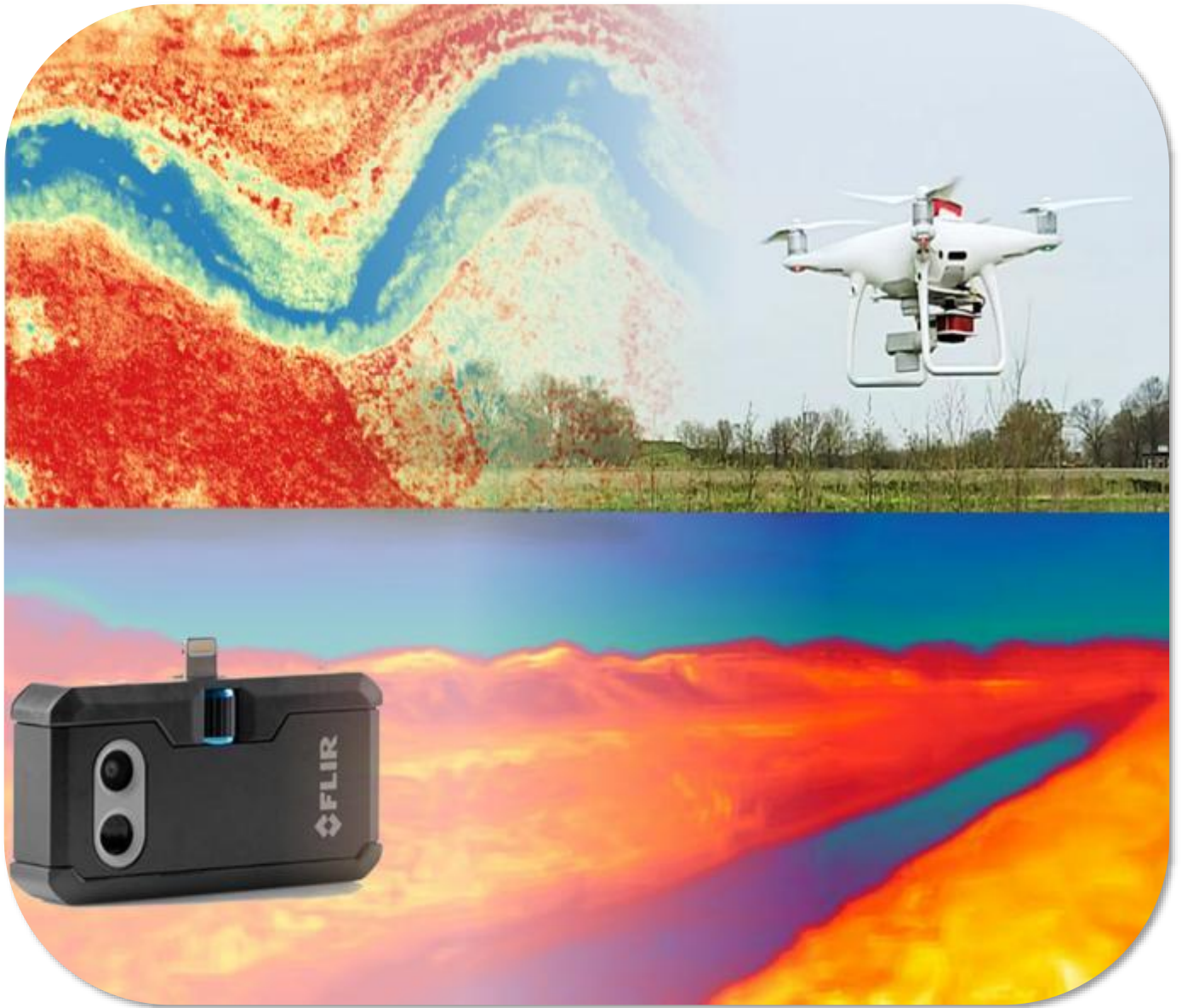




Remote sensing van regionale watergangen

Een afstudeeronderzoek naar de mogelijkheden van commerciële optische remote sensing instrumenten bij het monitoren van de waterkwaliteit in regionale watergangen

Colofon

Remote sensing van regionale watergangen

Een afstudeeronderzoek naar de mogelijkheden van commerciële optische remote sensing instrumenten bij het monitoren van de waterkwaliteit in regionale watergangen

Type document:	Onderzoekschrift
Opdrachtgever	Waterschap Limburg
Onderwijsinstituut:	Hogeschool Van Hall Larenstein
Opleiding:	Land- en Watermanagement
Specialisaties:	Toegepaste Hydrologie, Ruimtelijke Informatie Technologie
Plaats:	Maria Theresialaan 99, Roermond
Publicatiedatum:	04-06-2018
Auteurs:	William Tjong Bart Tromp willy.tjong@hvhl.nl bart.tromp@hvhl.nl 000006318 000006151
Externe begeleider:	Gabriel Zwart G.Zwart@waterschaplimburg.nl
Interne begeleider:	Jack Schoenmakers jack.schoenmakers@hvhl.nl

Betrokken partijen:



Voorwoord

Voor u ligt de scriptie 'Remote sensing van regionale watergangen', een product van ons afstudeeronderzoek naar de mogelijkheden van commerciële remote sensing instrumenten bij het monitoren van de waterkwaliteit in de Limburgse beken. Het onderzoek is uitgevoerd voor Waterschap Limburg. De scriptie is geschreven om te voldoen aan de eisen voor de graad bachelor (Ing.) aan de opleiding Land- en Watermanagement aan de Hogeschool Van Hall Larenstein Velp. Van februari 2018 tot en met juni 2018 zijn wij bezig geweest met het onderzoek en schrijven van deze scriptie.

Samen met onze externe begeleider, Gabriel Zwart, hebben wij de onderzoeksvraag voor de scriptie kunnen opstellen. Het afstudeeronderzoek dat wij hebben uitgevoerd is complex en gewaagd. Dit komt doordat bepaalde onderwerpen in het onderzoek buiten ons vakgebied liggen. Aan de andere kant maakt dat ons onderzoek juist uitdagender en heel leerzaam. Na veel worstelingen en uitvoerig onderzoek hebben wij de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden. Tijdens dit onderzoek hebben wij ook begeleiding mogen krijgen van Jack Schoenmakers die ons veel heeft geholpen met het uitlenen en bedienen van de DJI Phantom Pro 4 drone van school en het verlenen van een Pix4D Mapper softwarelicentie.

Bij dezen willen wij graag onze begeleiders hartelijk bedanken voor de fijne begeleiding en ondersteuning tijdens ons afstudeerperiode. Tevens willen wij Arnoud Soetens en Toon Basten van Waterschap Limburg bedanken voor het meedenken over ons afstudeeronderwerp. Bovendien hebben wij ook een aantal particuliere bedrijven benaderd en adviezen mogen krijgen over water remote sensing. Daarom willen wij Gé van den Eertwegh (KnowH2O), Ellis Penning (Deltares) en Rowland de Roode (DRO Remote Sensing) bedanken voor hun tijd en inspanning om ons te helpen met ons afstudeeronderwerp. Wij hebben veel geleerd van hun kennis op het gebied van remote sensing en waterkwaliteit.

Wij wensen u veel leesplezier toe.

Velp, 7 juni 2018



Bart Tromp en William Tjong

Samenvatting

Dit rapport werd opgesteld in opdracht van Waterschap Limburg om de meerwaarde van optische remote sensing te onderzoeken bij het bepalen van de waterkwaliteit in regionale watergangen. In dit onderzoek werden de Parrot Sequoia multispectraalcamera en FLIR One Pro thermische camera onderzocht op onder andere bruikbaarheid, accuraatheid, betrouwbaarheid, beperkingen en dataverwerkingsmogelijkheden. Hiervoor is het onderzoek gesplitst in twee deelonderzoeken waarin per instrument een pilotstudy en enkele proeven werden uitgevoerd.

Het eerste deelonderzoek richtte zich op de toepassing van de multispectraalcamera bij het bepalen van de troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen in de benedenloop van de Lollebeek. Multispectraalbeelden van de groene, rode, Red Edge en NIR banden werden ingewonnen met behulp van de multispectraalcamera die was gemonteerd onder een drone. Deze multispectraalbeelden werden aan elkaar gerekend met behulp van de Pix4D Mapper software. Vervolgens werden deze multispectraalbeelden omgerekend tot bandratio's en bandindices in QGIS. De reflectiewaardes van deze kaarten werden geëxtraheerd uit tien validatiepunten. Tevens werden op dezelfde punten de watermonsters genomen. Aan de hand van de regressieanalyseresultaten bleek dat de Rood/NIR-bandratio de beste respons geeft op de laboratoriumresultaten van troebelheid ($R^2=0,83$ en P-waarde= 0,005) met uitzondering van drie validatiepunten (w2, w4 en w7) in het regressiemodel. Uit de regressieanalyse bleek dat er geen relatie ($R^2=0,29$ en P-waarde=0,22) is tussen troebelheid en het gehalte aan zwevende stof laboratoriumresultaten uitgaande van het model met tevens zeven validatiepunten. Het troebelheidskaartresultaat berekend uit het beste regressiemodel bevat echter veel vertekeningen als gevolg van bodemreflectie. Dit is mede te wijten aan het relatief ondiepe en heldere water van de Lollebeek. De drone en multispectraalcamera combinatie is verder een ideale methode om waterkwaliteit te kunnen bepalen bij onbegaanbare waterlopen, maar niet bij ondiepe wateren. De hogere ruimtelijke, temporele en radiometrische resoluties maken het mogelijk om vlakdekkende troebelheidskaarten te maken tot 10cm/ px nauwkeurig. Er zijn echter enkele nadelen aan deze methode verbonden, waaronder de lage spectrale resolutie van de multispectraalcamera, onnauwkeurige gps-systeem van de multispectraalcamera en strenge regelgeving omtrent het gebruik van drones.

Het tweede deelonderzoek richtte zich op de toepassing van de thermische camera bij het bepalen van temperatuurverschillen aan het oppervlaktewater. Er werden drie proeven uitgevoerd in het laboratorium: een zandbakproef en twee materiaalproeven. Tevens werden er in de buurt van het Afleidingskanaal en de Lollebeek enkele veldproeven uitgevoerd om warmtebeelden in te winnen. De warmtebeelden uit deze proeven werden verwerkt met de FLIR Tools beeldverwerkingssoftware. Aan de hand van de beeldresultaten was gebleken dat de warmtecamera duidelijk relatieve temperaturen kan meten van oppervlaktewater. Dit wordt echter beïnvloed door onder andere de emissiviteit van het te bestuderen object. Tot slot hebben het profiel en samenstelling van een waterloop duidelijk invloed op de waarnemingen van de warmtecamera.

Op basis van de bevindingen van de twee deelonderzoeken van de Parrot Sequoia multispectraalcamera en de FLIR One Pro warmtebeeldcamera is het onderzoek tot de conclusie gekomen dat optische remote sensing in zekere mate een meerwaarde kan leveren om de waterkwaliteit te bepalen in kleinschalige watergangen.

Inhoudsopgave

Colofon	i
Voorwoord	ii
Samenvatting	iii
Figuren- en tabellenlijst	vii
Figuren.....	vii
Figuren bijlage	viii
Tabellen	ix
Begrippenlijst.....	x
1 Inleiding.....	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleembeschrijving en noodzaak	Error! Bookmark not defined.
1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen	2
1.4 Afbakening	3
1.5 Leeswijzer	3
1.6 Doelgroep	3
2 Optische remote sensing	5
2.1 Elektromagnetische straling	5
2.2 Remote sensing systemen.....	6
2.2.1 Natuurlijke straling	6
2.2.2 Optische domein	6
3 Methode van onderzoek.....	8
3.1 Deelvraag 1.....	8
3.2 Deelvraag 2.....	8
3.3 Deelvraag 3.....	8
3.4 Deelvraag 4.....	8
3.5 Deelvraag 5.....	8
3.6 Deelvraag 6.....	9
3.7 Deelvraag 7.....	9
4 Deelonderzoek A: Toepassing van de Parrot Sequoia multispectraalcamera	10
4.1 Remote sensing data vastleggen met een multispectraalcamera	10
4.1.1 Vastleggen van reflectie	10
4.1.2 Radiometrische kalibratie	11
4.2 Meten van troebelheid en zwevende stof	12
4.2.1 Interactie tussen licht en deeltjes in het water	12

4.2.2	Gangbare methode om troebelheid en zwevende stof te bepalen	13
4.3	Remote sensing van troebelheid	14
4.4	Pilotstudy troebelheidsbepaling met een multispectraalcamera	15
4.4.1	Studiegebied Lollebeek	15
4.4.2	Data acquisitie	16
4.4.3	Dataverwerking	17
4.4.4	Data-analyse	18
4.5	Resultaten pilotstudy troebelheidsbepaling	20
4.5.1	Beeldresultaten	20
4.5.2	Data-analyseresultaten	20
4.6	Voordelen en nadelen	25
4.6.1	Voordelen	25
4.6.2	Nadelen	25
5	Deelonderzoek B: Toepassing van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera	28
5.1	Thermische remote sensing Voordelen en nadelen	28
5.1.1	Zwarte straler model	28
5.1.2	Componenten van thermische straling	29
5.1.3	Emissiviteit van water	29
5.2	Thermische remote sensing data vastleggen met de FLIR One Pro	30
5.2.1	Meettechniek van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera	30
5.2.2	Functionaliteiten van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera en de FLIR One applicatie	31
5.3	Pilotstudy waarnemen van warmte met een thermische camera	32
5.3.1	Laboratoriumproeven	32
5.3.2	In situ toepassing	32
5.3.3	Temperatuuroptnames vanuit drone	34
5.4	Resultaten pilotstudy warmtebeelden FLIR One Pro	35
5.4.1	Laboratorium toepassing	35
5.4.2	In situ toepassing	37
5.4.3	Temperatuuroptnames vanuit drone	37
5.5	Voordelen en nadelen	40
5.5.1	Voordelen	40
5.5.2	Nadelen	40
6	Discussie	42
6.1	Validiteit van het regressiemodel en troebelheidskaart resultaten	42
6.1.1	Verwijderen van uitschieters	42
6.1.2	Zandbanken in de troebelheidskaart	42
6.1.3	Betrouwbaarheid laboratoriumanalyses	42

6.1.4	Betrouwbaarheid data acquisitie	43
6.2	Pilotstudy: FLIR One Pro watertemperatuur meten	43
6.2.1	Opnames bij kamertemperatuur	43
6.2.2	Opgeplakte strips nemen niet de temperatuur volledig over	43
6.2.3	Maatcilinders met troebelheid zijn extremen	43
6.2.4	Schaalverdeling vastzetten voor dronevlucht	43
7	Conclusie en aanbevelingen	44
7.1	Conclusie	44
7.2	Aanbevelingen	45
7.2.1	Vervolgonderzoek op troebelheid en zwevende stof bepaling met een multispectraalcamera	45
7.2.2	Hyperspectraalopnames om andere soorten waterkwaliteitsindicatoren te bepalen	45
7.2.3	Drone en FLIR One Pro combi	45
8	Reflectie	47
8.1	Reflectie William Tjong.....	47
8.2	Reflectie Bart Tromp	48
	Bibliografie.....	49
	Bijlage 1: Oriënterend vooronderzoek naar mogelijk bruikbare remote sensing instrumenten	55
	Bijlage 2: Specificaties van de remote sensing instrumenten	57
	Bijlage 3: Foto's veldbezoek.....	60
	Bijlage 4: Veldwerkplan pilotstudy troebelheidsbepaling met de Parrot Sequoia multispectraalcamera	61
	Bijlage 5: Beeldresultaten Pix4D Mapper	63
	Bijlage 6: Boxplots van de tien validatiepunten	67
	Bijlage 7: Lineaire regressiemodellen van de troebelheid (NTU) met de tien validatiepunten	70
	Bijlage 8: Lineaire regressiemodellen van de troebelheid (NTU) met zeven validatiepunten	72
	Bijlage 9: Troebelheidskaart (NTU)	74
	Bijlage 10: Opstelling laboratoriumproef FLIR One Pro	75
	Bijlage 11: Veldwerkplan pilotstudy FLIR One Pro.....	78
	Bijlage 12: Dwarsprofielen temperatuur	80

Figuren- en tabellenlijst

Figuren

Figuur 1.1. Situering projectgebieden Afleidingskanaal en Lollebeek, bewerkt uit database Waterschap Limburg (z.d.).	4
Figuur 2.1. Diagram van het volledige elektromagnetische spectrum gesorteerd op golflengte (m). Hoe korter de golflengte des te groter is de uitgezonden energie. (Scheenen, 2017).	5
Figuur 2.2. Overzicht van remote sensing systemen. (Feringa, et al., 2001)	6
Figuur 2.3. De werking van actieve- en passieve remote sensing systemen. De meeste satellieten hebben passieve sensoren (links). Een voorbeeld van een actieve sensor is de LiDaR (Light Detection and Ranging) (rechts). Aangepast uit Agensi Angkasa Negar (2012).	7
Figuur 4.1. Discrete spectrale banden van de Parrot Sequoia multispectraalcamera. Van links naar rechts: groen, rood, Red Edge en NIR. (What spectral bands does the Sequoia camera capture?, 2016)	10
Figuur 4.2. Parrot Sequoia multispectraalcamera en zonnensensor gekoppeld aan een DJI Phantom Drone 4. Foto genomen door auteurs.	11
Figuur 4.3. Interactie tussen licht en water. Bewerkt naar Laanen (2007).	12
Figuur 4.4. Schematische weergave van troebelheidsbepaling volgens de ISO 7027 of EPA 180.1 methode. Bewerkt naar Turnerdesign (1999).	13
Figuur 4.5. Verschil tussen NTU (ISO 7027) en FNU (EPA 180.1) metingen met dezelfde suspensie. Troebelheid in FNU en NTU uitgezet tegen het aantal metingen. (Fondriest Environmental, Inc., 2014)	13
Figuur 4.6. Studiegebied benedenloop heringerichte Lollebeek.	16
Figuur 4.7. Stroomdiagram pilotstudy multispectraalcamera	19
Figuur 4.8. Lineair regressiemodel tussen troebelheid (NTU) laboratoriumresultaat en Rood/NIR-ratio. De uitschieters (w2, w4 en w7) zijn in dit model buiten beschouwing gelaten.	22
Figuur 4.9. Troebelheidskaart (NTU) berekend op basis van de Rood/NIR-predictor regressiemodel en RGB-dronebeelden met contrastverrijking. Links is ingezoomd op locatie 1 en rechts is ingezoomd op locatie 2. Deze figuren zijn noordgericht.	23
Figuur 4.10. Lineaire regressiemodellen van het totaal aan zwevende stof (mg/l) en de troebelheid (NTU) laboratoriumresultaten. Links het model met alle 10 validatiepunten en rechts het model zonder uitschieters (w2, w4 en w7).	24
Figuur 4.11. Gps-afwijking (m) uitgezet tegen de vliegduur drone (min).	26
Figuur 4.12. Drone no-fly zones van Provincie Limburg. Aangepast uit Kadaster (z.d.).	27
Figuur 5.1. Zwarte straler curves van de aarde en de zon. Het emissievermogen is uitgezet tegen de golflengte (μm). Aangepast uit Lindsey (2007).	28
Figuur 5.2. Componenten van de stralingsenergie die een sensor meet. Bewerkt naar Visser (2011).	30
Figuur 5.3. Zichtbare componenten van de FLIR One Pro. (FLIR, z.d.)	30
Figuur 5.4. De omzetting van infraroodstraling naar temperatuurweergave. (Gyorki, 2009).	31
Figuur 5.5. Zandbakmodel waarin warm en koud water aangevoerd worden en even later samenkomen.	32
Figuur 5.6. Pijlen geven stromingsrichtingen aan. Rode cirkel, locatie van figuur 5.9.	33
Figuur 5.7. Kartonnen montageconstructie.	34
Figuur 5.8. Resultaten van het zandbakmodel. Bewerkt in applicatie 'Flir Tools'.	36

Figuur 5.9. Beeldresultaat van de FLIR One Pro. Warmer water uit de Venrayse Spurkt mondt uit in de Loobeek. Bewerkt in 'FLIR Tools'. Deze foto is westelijk gericht (zie rode cirkel in figuur 5.6 voor de locatie).....	38
Figuur 5.10. FLIR One Pro opnames vanuit de drone. Schaal en noordrichting zijn onbekend.	39
Figuur 5.11. Warmtebeeld toont gereflecteerde straling van bomen uit de omgeving	41
Figuur 7.1 Parrot drone en FLIR One Pro combi. (Parrot, z.d.)	46
Figuur 7.2 De besturing en de tablet (niet inbegrepen) met de FreeFlight Thermal applicatie. (Parrot, z.d.)	46

Figuren bijlage

Figuur 2a. Componenten van de Parrot Sequoia multispectraalcamera. (Parrot, 2013)	57
Figuur 2b. Componenten van de zonne-sensor. (Parrot, 2013).....	57
Figuur 2c. DJI Phantom 4 Pro drone.....	59
Figuur 2d. FLIR One Pro (FLIR, 2018).....	59
Figuur 3a. Oevervegetatie tot het midden van de beek. Foto genomen op 10 april 2018 door auteurs.	60
Figuur 3c: Olieachtige waasvorming (kaamlaag) als gevolg van afgestorven bacteriën en organisch materiaal. Foto genomen op 12 februari 2018 door auteurs.	60
Figuur 3b. Ondiep water waardoor bodemvegetatie te zien zijn. Foto genomen op 10 april 2018 door auteurs.	60
Figuur 4a. Studiegebied Lollebeek met 10 validatiepunten.....	62
Figuur 4b. Uitgestippelde vliegroute met de DJI Go Pro App. Deze beelden zijn noordgericht.	62
Figuur 5a. RGB-orthofoto van de benedenstroomse Lollebeek met tien validatiepunten (w1-w10). Twee locaties staan aangewezen om als referentie te gebruiken in figuren 5b-5d.	64
Figuur 5d. Histogrammen van de groene, rode, Red Edge en NIR-reflectiekaarten. Het volledige bereik is bij deze weergave gebruikt.	65
Figuur 5b. Onbewerkte secties van beeldresultaten voor verschillende banden. Deze beelden zijn noordgericht.	65
Figuur 5c. Ingezoomde RGB-scenes van de orthofoto. Links voor locatie 1 en rechts voor locatie 2.	65
Figuur 5f. Histogrammen van de bandratio- en bandindex-reflectiekaarten. Het volledige bereik is bij deze weergave gebruikt.	66
Figuur 5e. Aangepaste weergave van de bandratio- en bandindexkaarten op basis van verschillende percentielintervallen. Linker kolom de bandratio's en rechterkolom de bandindices. In deze figuur is slechts ingezoomd op locatie 1. Deze beelden zijn noordgericht.	66
Figuur 6a. Boxplots van de enkelvoudige banden	67
Figuur 6c. Boxplots van de band indices.....	68
Figuur 6b. Boxplots van de bandratio's	68
Figuur 6d. Boxplots van de troebelheid en totaal zwevende stof watermonsters	69
Figuur 7a. Enkelvoudige band als predictor	70
Figuur 7b. Bandratio als predictor	70
Figuur 7c. Bandindex als predictor	71
Figuur 8a. Enkelvoudige band als predictor (7 validatiepunten)	72
Figuur 8b. Bandratio als predictor (7 validatiepunten).....	72
Figuur 8c. Band-index als predictor.....	73

Figuur 9. Troebelheidskaart op basis van het Rood/ NIR-predictor regressiemodel ($R^2=0,826$, RMSE= 0,66 (NTU)). De RGB-beelden (A' - C') zijn weergegeven met contrastverrijking.	74
Figuur 10a. Zandbakmodel waarin twee stromingen met verschillende temperaturen samenkomen	75
Figuur 10b. Maatcilinder met opgeplakte strips	76
Figuur 10c. Maatcilinders met verschillende troebelheid	76
Figuur 11: Meetpunten sonde voor referentietemperatuur	79
Figuur 12: Situering meetpunten dwarsprofielen (schaal 1:10.000). Deze kaarten zijn noordgericht.	Error! Bookmark not defined.

Tabellen

Tabel 4.1 Studies met betrekking tot remote sensing van troebelheid en multispectraalsensor	14
Tabel 4.2 Bandratio's en enkelvoudige banden	18
Tabel 4.3 Band indices	18
Tabel 4.4 Statistische samenvatting van de reflectiewaarden geëxtraheerd uit tien validatiepunten	20
Tabel 4.5 Statistische samenvatting van de watermonster laboratorium resultaten uit tien validatiepunten	20
Tabel 4.6 Statistische samenvatting van de lineaire regressiemodellen van het laboratoriumresultaat troebelheid (NTU) en de reflectiewaardes	21
Tabel 4.7 Statistische samenvatting van de lineaire regressiemodellen van het laboratoriumresultaat troebelheid (NTU) en de reflectiewaardes van slechts zeven validatiepunten (zonder w2, w4 en w7).	22
Tabel 5.1 Rastergroottes als gevolg van de vlieghoogte	34

Begrippenlijst

Begrip	Verklaring
Albedo	Weerkaatsingsvermogen van het object, oftewel de verhouding tussen de opvallende en gereflecteerde straling (Climate Challenge, z.d.)
Bewijs van luchtvaardigheid	Certificaat dat drones dienen te krijgen, waarin de betrouwbaarheid en veiligheid centraal staan (Wolters Kluwer, z.d.)
Bitdiepte	Gevoeligheid van de beeldsensor om radiantie te meten uitgedrukt in 2 ⁿ . Tevens de radiometrische resolutie genoemd. (Adobe, z.d.)
Diffuse straling	Straling nadat deze in de atmosfeer is verstrooid door aerosolen en waterdeeltjes (Vereniging voor Weerkunde en Klimatologie, z.d.)
Elektromagnetische spectrum	Het bereik waarbij alle mogelijke soorten van elektromagnetische straling afgeleid kunnen worden (Natuurkunde.nl, z.d.)
Elektromagnetische straling	Emissie van energie door trillingen van elektronen (Natuurkunde.nl, z.d.)
Elektron	Negatief geladen deeltje dat deel uitmaakt van een atoom (Sterrenkunde in Nederland, z.d.)
RGB-beeld	Kleurenbeeld opgebouwd uit de kleuren rood, groen en blauw.
Foton	Lichtdeeltje zonder massa (Natuurkunde.nl, z.d.)
Humuszuur	Organische stof, vaak uit veengrond, die het water een gelige kleur kan geven (Royal HaskoningDHV, z.d.)
Orthofoto	Luchtfoto die geometrisch gecorrigeerd is en geolocatie informatie bevat
Foton radiantie	Aantal fotonen die de lens van een sensor binnendringt per tijdseenheid (foton s ⁻¹ nm ⁻¹ cm ⁻²) (IUPAC Compendium of Chemical Terminology , 2008)
Spectrale radiantie	Stralingsintensiteit die een beeldsensor meet op basis van het aantal fotonen (W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹) (Abraham, 2017).
Monochroom sensor	Een sensor die slechts één kleur van een bepaald spectrum kan waarnemen
Radiometer	Een instrument om de energie intensiteit van een bepaalde elektromagnetische straling te meten (Advanced Microwave Radiometer, z.d.)
Spectrale banden	Golflengtebereik of stralingsintervallen binnen het elektromagnetische spectrum
Spectrale resolutie	De mate waarin de sensor verschillende banden kan onderscheiden
Spectrometer	Een instrument om de eigenschappen van invallende straling te detecteren, te meten en te analyseren (Encyclo.nl, z.d.)

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Uit het artikel 'Kwaliteit Limburgse beken onder de maat' van Dagblad De Limburger op 27 december 2017 blijkt dat in tal van beken de waterkwaliteit sterk te wensen overlaat. Waterveronreiniging in de Limburgse beken wordt voornamelijk veroorzaakt door diffuse bronnen van sectoren zoals landbouw en veeteelt, verkeer en vervoer. Vooral door de landbouw- en veeteeltsector wordt de waterkwaliteit in regionale watergangen sterk belast. In Limburg hoeven veehouderij- en openteeltbedrijven geen vergunning te hebben om afvalwater te mogen lozen. Zij kunnen wel eenmalig een melding doen bij het waterschap (Waterschap Limburg, z.d.). Dit heeft voornamelijk gevolgen voor de ecologie en waterkwaliteit van de Limburgse beken.

Om de gewenste waterkwaliteitstoestanden in de toekomst wel te kunnen behalen zullen er maatregelen genomen moeten worden. Dijkgraaf Patrick van der Broeck stelt dat het verhogen van waterkwaliteit de komende jaren hoger op de agenda komt te staan van Waterschap Limburg (Hensels, 2017). Het monitoren van waterkwaliteit is essentieel om problematiek in kaart te brengen, de bronnen te lokaliseren en oplossingsgerichte ingrepen te bedenken.

Om de kwaliteit van haar beken te monitoren maakt Waterschap Limburg gebruik van de reeds gangbare meetmethodieken. Hierbij worden voornamelijk watermonsters op willekeurige plekken van een beek genomen. Het watermonster wordt vervolgens in het laboratorium geanalyseerd. Deze methode is veelal niet representatief genoeg om de waterkwaliteitstoestand van de gehele beek goed te kunnen beoordelen. Om deze reden is Waterschap Limburg geïnteresseerd in innovatieve methoden om de waterkwaliteit van haar beken efficiënter te kunnen inventariseren en te monitoren. Wellicht bieden remote sensing technologieën mogelijkheden hiervoor.

Volgens Thomas Heege van EOMAP (2009) kunnen eigenschappen van het water bepaald worden door middel van optische remote sensing sensoren. Zulke sensoren werken op basis van straling die gereflecteerd of geëmitteerd wordt door materie. In de studie van Potes et al. (2012) werd bijvoorbeeld onderzocht of de troebelheid in de Alqueva reservoir in Portugal bepaald kan worden met behulp van de MERIS-sensor (Envisat-1 satelliet van de ESA). Uit zijn studie is gebleken dat remote sensing data van de MERIS-sensor de troebelheid tussen 0-60 NTU (mate van troebelheid) in het water goed kan verklaren ($R^2=0,96$). Een andere studie van Song et al. (2011) heeft een lineaire relatie ($R^2=0,94$) kunnen vinden tussen totaal zwevende stof (5-90 mg/l) en LISS-3 sensordata (IRS-P6 satelliet van India) in het Shitoukoumen reservoir, in noordoost China. Een op drones gebaseerde remote sensing studie werd uitgevoerd door Bampanikos (2016) om onder andere oppervlaktetemperatuur van het water te bepalen van de vennen in het Kampina natuurgebied in Noord-Brabant. Een studie van Xiao et al. (2015) heeft tevens de relatie onderzocht tussen remote sensing data van de HJ-1A en ZY-3 satellieten (beide van China) en fosfaat- en nitraatgehaltes in de Hanrivier in het oosten van China.

De genoemde studies richten zich vooral op grote waterlichamen en rivieren. In het beheergebied van het Waterschap Limburg komen slechts regionalen wateren voor, zoals kanalen en beken. Het is voor het waterschap daarom belangrijk om de bruikbaarheid van optische remote sensing instrumenten ook te onderzoeken voor kleinschalige watergangen.

1.2 Probleembeschrijving en noodzaak

Er zijn verschillende soorten technologieën van remote sensing sensoren en platforms, maar niet allen zijn bruikbaar voor kleinschalige watergangen. Daarnaast kunnen de uitvoeringsprijzen ook verschillen per platform (bijvoorbeeld: vliegtuig, satelliet of handheld). Op basis van een vooronderzoek is in bijlage 1 van dit rapport een samenvatting gegeven van potentiële remote sensing technieken die toegepast kunnen worden voor het bepalen van de waterkwaliteit in oppervlaktewater. Aan de hand van de samenvatting is een keuze gemaakt om twee innovatieve commerciële remote sensing instrumenten te onderzoeken:

1. Parrot Sequoia multispectraalcamera onder een drone
2. FLIR One Pro smartphone warmtebeeldcamera

Uit verschillende studies waaronder die van Hua Chen (2016) is gebleken dat het mogelijk is om de troebelheid, een indicator voor zwevende stof gehalte, van het water te bepalen met slechts een multispectraalcamera. Troebelheid, een fysische eigenschap van water, kan de ontwikkeling van waterorganismen belemmeren. Troebel water vermindert het invallende licht voor de fotosynthese van planten onder water. Deze waterplanten zorgen voor zuurstof en voedsel voor de macrofauna in het water. Het monitoren en meten van de troebelheid is dus een belangrijke indicator voor de toestand van het onderwaterklimaat in beken.

Een ander belangrijke fysische eigenschap van water is temperatuur. In Limburg komen puntlozingen vanuit de landbouwsector regelmatig voor. Zulke lozingen worden vaak niet gemeld en de locatie is daardoor moeilijk te achterhalen. Mogelijkerwijs kan de FLIR One Pro kansen bieden om puntlozingen op te sporen door temperatuurveranderingen aan het oppervlakte van het water waar te nemen.

Om de bruikbaarheid van deze remote sensing instrumenten nader te beoordelen voor het bepalen van de waterkwaliteit van Limburgse beken is het noodzakelijk om eigenschappen als accuraatheid, betrouwbaarheid en beperkingen in kaart te brengen. Daarnaast zijn de techniek van de meetinstrumenten en de mogelijkheden voor verwerking van de data, zaken die nader onderzocht dienen te worden.

1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

De doelstelling van dit onderzoek is om te achterhalen of optische remote sensing nuttig kan zijn voor Waterschap Limburg bij het monitoren van de waterkwaliteit van haar beken. Hiervoor worden de voorgenoemde commerciële remote sensing instrumenten onderzocht. Het resultaat betreft een scriptie met de onderzoeks- en beeldresultaten van de instrumenten. Uit de onderzoeksresultaten moet blijken of waterkwaliteit met betaalbare remote sensing instrumenten bepaald kan worden.

De hoofdvraag die beantwoord dient te worden luidt als volgt:

In hoeverre biedt optische remote sensing een meerwaarde voor het bepalen van de waterkwaliteit in regionale watergangen?

Om tot een gedegen antwoord op deze hoofdvraag te komen is per remote sensing instrument een deelonderzoek opgesteld. De deelvragen die bij deze deelonderzoeken horen staan op de volgende pagina aangegeven.

Deelonderzoek: A Multispectraalcamera

1. Op welke manier worden troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen in het water volgens de gangbare methode bepaald?
2. Op welke wijze kan de Parrot Sequoia multispectraalcamera de troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen bepalen?
3. In hoeverre komen de resultaten van de multispectraalcamera overeen met de gangbare analysemethode van de onderzochte waterkwaliteitsparameters?
4. Wat zijn de voor- en nadelen van de multispectraalcamera?

Deelonderzoek B: FLIR One Pro

5. Op welke wijze kan temperatuur worden bepaald met de FLIR One Pro warmtebeeldcamera?
6. In hoeverre kunnen warmtebeelden van de FLIR One Pro thermische camera verschillen in watertemperatuur waarnemen?
7. Wat zijn de voor- en nadelen van de FLIR One Pro thermische camera?

1.4 Afbakening

In deze paragraaf zijn de randvoorwaarden opgesteld om het onderzoek af te bakenen op de toepassingen die haalbaar zijn voor de auteurs.

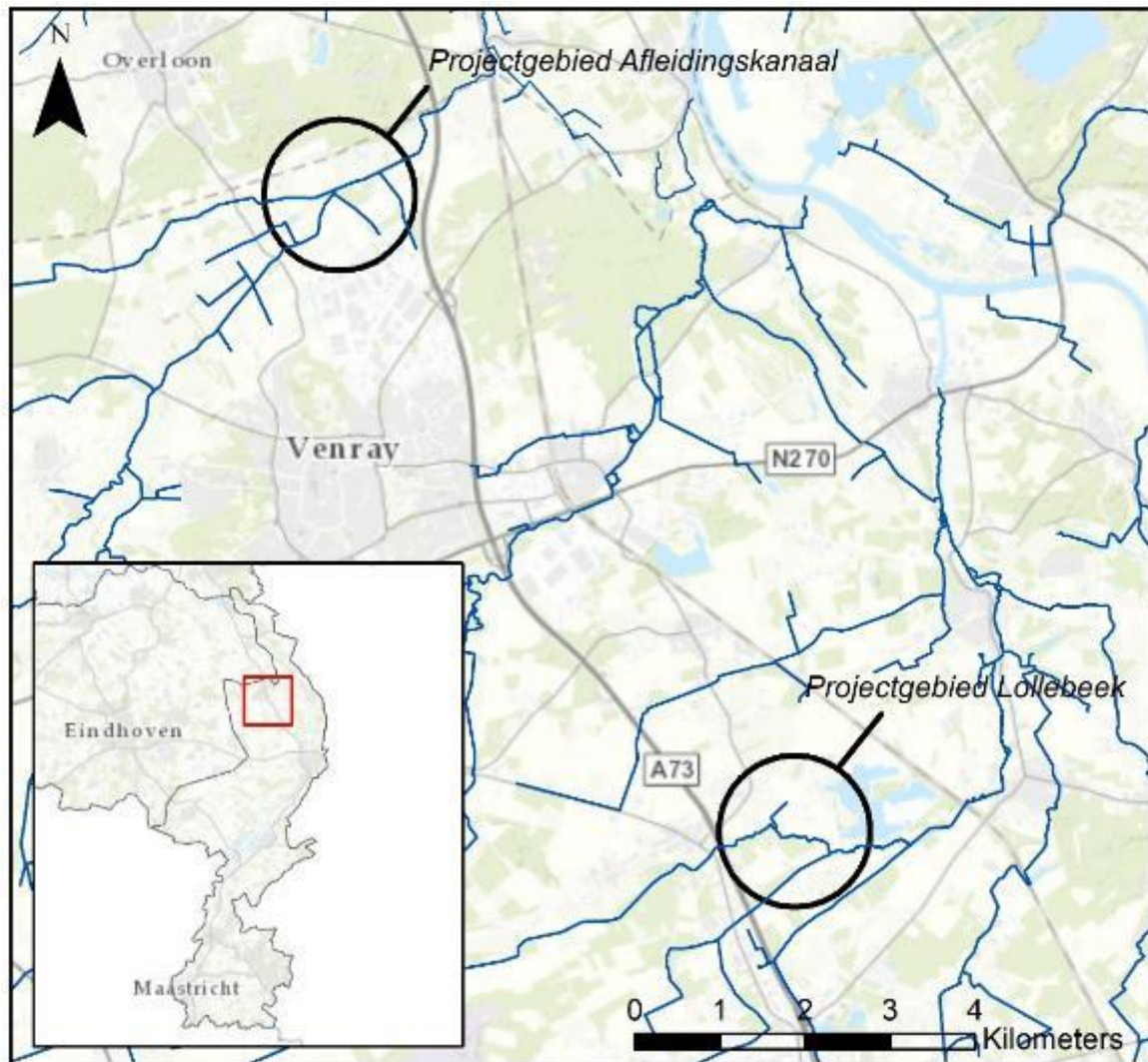
- a. Aan de hand van de vergelijking in bijlage 1 worden slechts twee instrumenten onderzocht. De Parrot Sequoia multispectraalcamera en de drone worden verleend door Van Hall Larenstein. De FLIR One Pro warmtebeeldcamera is aangeschaft via Waterschap Limburg.
- b. De auteurs zijn verantwoordelijk voor de acquisitie van de onderzoeksdata van de multispectraalcamera en de thermische camera.
- c. Bij de deelonderzoeken dienen enkele veldwerken uitgevoerd te worden. Deze worden verricht in de maand april. Het studiegebied voor deelonderzoek A beperkt zich tot het heringerichte deel van de Lollebeek en deelonderzoek B is gericht op het Afleidingskanaal ten noorden van Venray (zie figuur 1.1 op de volgende pagina).

1.5 Leeswijzer

Het rapport begint in hoofdstuk 2 met een inleiding over optische remote sensing in zijn algemeenheid. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de methode van onderzoek besproken. Hoofdstuk 4 behandelt deelonderzoek A met betrekking tot de multispectraalcamera. Hierbij worden zowel de theorie als de onderzoeksresultaten behandeld. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met de voor- en nadelen van deze meetmethode. Hoofdstuk 5 bestaat uit deelonderzoek B. Ook dit hoofdstuk begint met theoretische achtergrond. Dit wordt vervolgens uitgebreid met de verschillende toepassingen van de FLIR One Pro. De resultaten volgen hierna, en ook dit hoofdstuk sluit af met de voor- en nadelen van deze meetmethode. Hoofdstuk 6 bevat de discussie over de deelonderzoeken. In hoofdstuk 7 worden conclusie en aanbevelingen gepresenteerd. Hoofdstuk 8 bevat reflecties van beide afstudeerders.

1.6 Doelgroep

Dit rapport is geschreven voor Hogeschool Van Hall Larenstein en Waterschap Limburg. Daarnaast is het beschikbaar voor algemeen geïnteresseerden.



Figuur 1.1. Situering projectgebieden Afleidingskanaal en Lollebeek, bewerkt uit database Waterschap Limburg (z.d.).

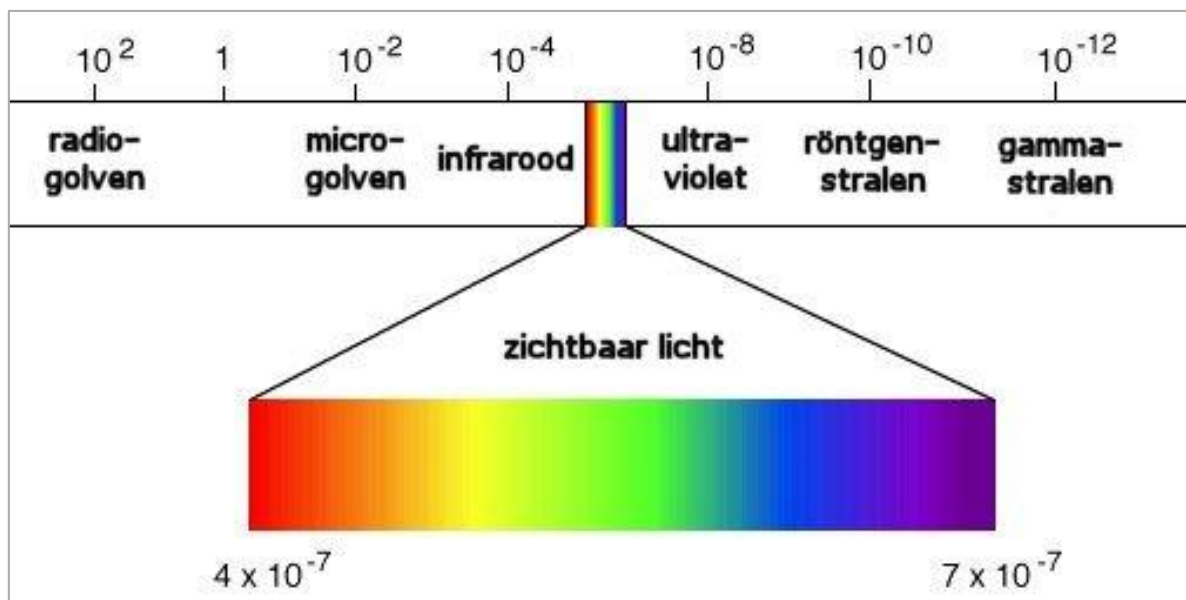
2 Optische remote sensing

Met optische remote sensing is het mogelijk om informatie van materie vast te leggen vanaf een afstand, zonder direct contact. Achtergrondkennis van optische remote sensing is van belang om de werking van de commerciële remote sensing instrumenten binnen dit onderzoek te begrijpen. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd wat elektromagnetische straling is en op welke wijze deze interactie aangaat met materie.

2.1 Elektromagnetische straling

Elektromagnetische straling is energie die overal om ons heen is. Deze vorm van energie wordt uitgezonden wanneer een elektron zich beweegt door het elektromagnetisch veld. Een elektromagnetisch veld bestaat uit elektrische en magnetische energievelden. De beweging van een elektron veroorzaakt trillingen in het elektromagnetisch veld. Tijdens het trillen veranderen de energievelden afwisselend en komen er lichtdeeltjes (fotonen) vrij. Deze fotonen bewegen in een rechte lijn met een snelheid van circa $3 \cdot 10^8$ m/s in vacuüm. De energie van een foton is afhankelijk van de golflengte. Een lichtdeeltje met een korte golflengte heeft meer energie dan een lichtdeeltje met een lange golflengte (Philips & Fritzsche, 1998).

Op basis van de golflengte van een lichtdeeltje kunnen verschillende soorten elektromagnetische straling worden onderscheiden in het elektromagnetisch spectrum (zie figuur 2.1). Het menselijke oog is in staat kleuren waar te nemen in het zichtbare spectrum (rood, groen en blauw) tussen 400 en 700 nm. Straling buiten dit spectrum kan een mens niet zien. Dit kan wel door optische remote sensing systemen waargenomen worden.



Figuur 2.1. Diagram van het volledige elektromagnetische spectrum gesorteerd op golflengte (m). Hoe korter de golflengte des te groter is de uitgezonden energie. (Scheenen, 2017)

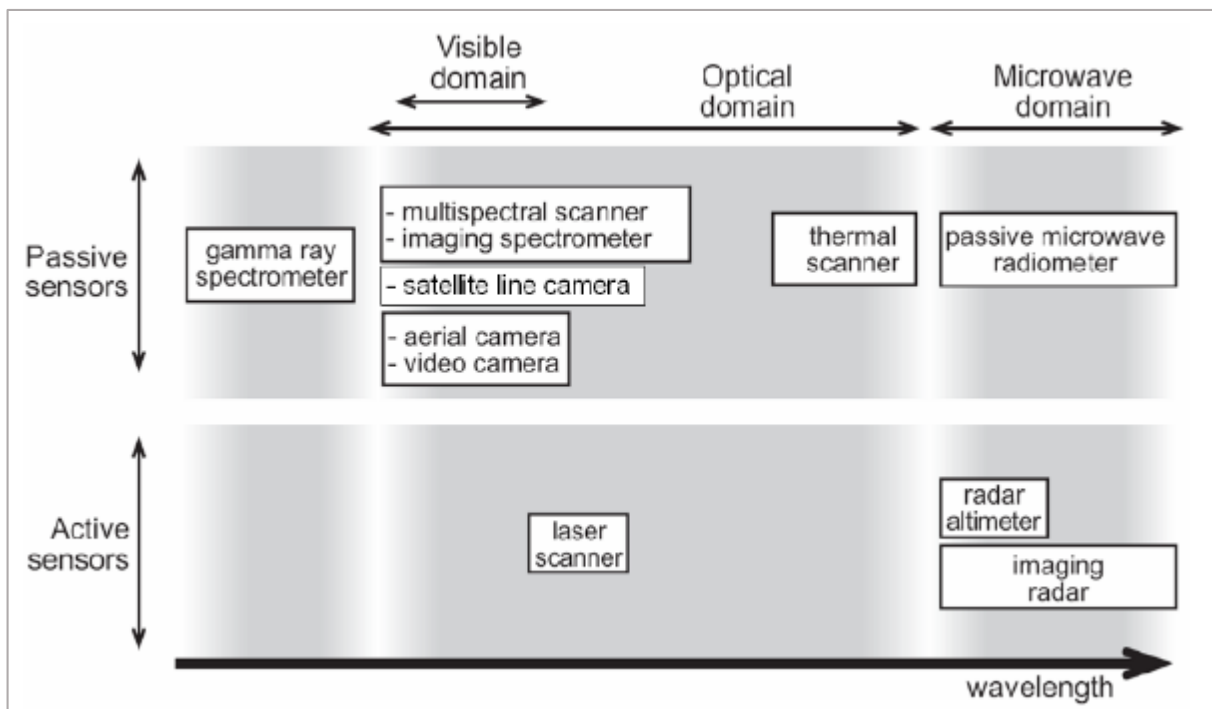
2.2 Remote sensing systemen

2.2.1 Natuurlijke straling

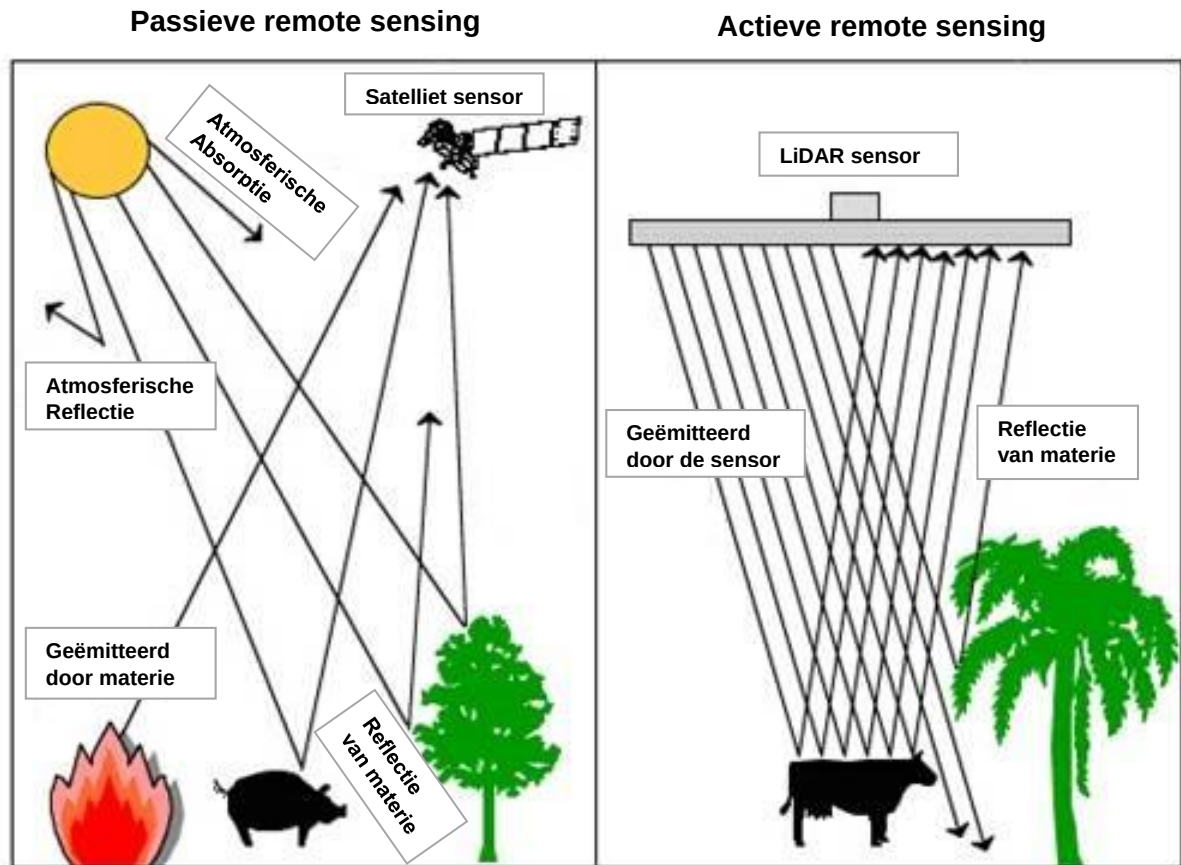
De zon is een belangrijke natuurlijke bron van elektromagnetische straling. Zonnestraling bestaat in feite voor 44% uit licht dat binnen het zichtbare domein valt en de rest is infraroodstraling en Uv-straling (Feringa, et al., 2001). Niet alle zonnestralingsenergie komt echter op het aardoppervlak terecht. Meer dan de helft van de energie wordt geabsorbeerd door de atmosfeer en weerkaatst naar de ruimte (KNMI, z.d.). De zon is niet de enige bron van straling; alle objecten in de natuur met een absolute temperatuur boven $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ zijn in staat om elektromagnetische energie uit te zenden.

2.2.2 Optische domein

In figuur 2.2 is een schematische weergave van verschillende remote sensing systemen weergegeven. Er wordt onderscheid gemaakt tussen passieve en actieve sensoren. Passieve sensoren registreren de reflectie van (zon)licht om kenmerken van het aardoppervlak vast te leggen. Actieve sensorsystemen verzenden zelf kunstmatige straling om gegevens van een object vast te leggen. Denk daarbij aan het LiDaR remote sensing systeem dat gebruikt wordt om de AHN-hoogtemodellen te bouwen. In figuur 2.3 op de volgende pagina is de werking van een passief en een actief remote sensing systeem geschetst. Optische remote sensing systemen maken gebruik van passieve sensoren en kunnen straling waarnemen tussen het ultraviolette UV-spectrum en het thermisch infrarode TIR-spectrum (National Research Council of Italy, z.d.). Dit spectrum wordt het optische domein genoemd. Remote sensing meetinstrumenten die onder dit domein vallen zijn onder andere thermische camera's, spectrometers en multispectraalcamera's. De Parrot Sequoia multispectraalcamera en de FLIR One Pro warmtebeeld camera vallen ook onder passieve optische remote sensing meetinstrumenten.



Figuur 2.2. Overzicht van remote sensing systemen. (Feringa, et al., 2001)



Figuur 2.3. De werking van actieve- en passieve remote sensing systemen. De meeste satellieten hebben passieve sensoren (links). Een voorbeeld van een actieve sensor is de LiDAR (Light Detection and Ranging) (rechts). Aangepast uit Agensi Angkasa Negara (2012).

3 Methode van onderzoek

In dit onderzoek wordt er gewerkt met twee commerciële remote sensing instrumenten: de Parrot Sequoia multispectraalcamera en de FLIR One Pro thermische camera. De instrumenten werken verschillend van elkaar en daarom is het onderzoek opgedeeld in twee deelonderzoeken. In dit hoofdstuk wordt de globale methode en werkwijze voor ieder deelonderzoek behandeld per deelvraag.

3.1 Deelvraag 1

Op welke manier wordt de troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen in het water volgens de gangbare methode bepaald?

Deze deelvraag bestaat uit literatuuronderzoek waarbij allereerst algemeen literatuuronderzoek wordt uitgevoerd.

3.2 Deelvraag 2

Op welke wijze kan de Parrot Sequoia multispectraalcamera de troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen bepalen?

Hierbij wordt literatuuronderzoek uitgevoerd, waarbij met name wordt gekeken naar eerder uitgevoerde onderzoeken en de bevindingen daarbij. Dit wordt gecombineerd met de specificaties van de Parrot Sequoia multispectraalcamera.

3.3 Deelvraag 3

In hoeverre komen de resultaten van de multispectraalcamera overeen met de gangbare analysemethode van de onderzochte waterkwaliteitsparameters?

Deze deelvraag wordt beantwoord met behulp van praktijkonderzoek bij de Lollebeek. Hiervoor wordt een dag uitgekozen om de opnames te maken. Tevens worden monsters genomen door een extern laboratorium, zodat de remote sensing resultaten vergeleken kunnen worden met die van een geijkte meetmethode.

3.4 Deelvraag 4

Wat zijn de voor- en nadelen van de multispectraalcamera?

Deze deelvraag wordt beantwoord met behulp van de bevindingen van deelvragen 1, 2 en 3.

3.5 Deelvraag 5

Op welke wijze kan temperatuur worden bepaald door de FLIR One Pro warmtebeeldcamera?

Deze vraag wordt beantwoord met behulp van literatuuronderzoek naar thermische remote sensing in zijn algemeenheid en naar de specificaties van de FLIR One Pro.

3.6 Deelvraag 6

In hoeverre kunnen warmtebeelden van de FLIR One Pro thermische camera verschillen in watertemperatuur waarnemen?

Alvorens het apparaat in het veld wordt toegepast, wordt gekeken naar de accuraatheid in het laboratorium bij een waterbakmodel en bij maatcilinders. Hierna wordt het apparaat toegepast in het veld. De resultaten van deze veldwerksessie worden in situ bekeken, maar worden ook achteraf bewerkt met de bijgeleverde software. Tijdens het veldwerk wordt de temperatuur ook vastgelegd met een geijkte temperatuursonde. Op basis van deze bevindingen kan vastgesteld worden in hoeverre de resultaten van de FLIR One Pro betrouwbaar en valide zijn.

3.7 Deelvraag 7

Wat zijn de voor- en nadelen van de FLIR One Pro thermische camera?

Aan de hand van deelvragen 5 en 6 wordt gekeken naar de mogelijkheden en beperkingen van de FLIR One Pro. Hierbij worden kenmerken als gebruiksvriendelijkheid, toepasbaarheid en betrouwbaarheid meegenomen.

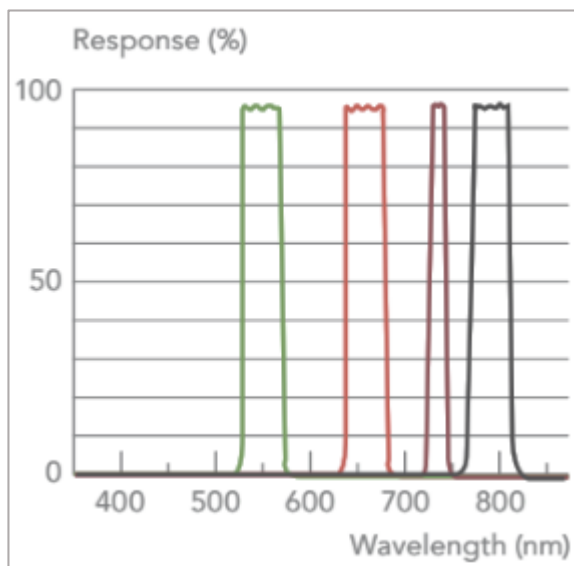
4 Deelonderzoek A: Toepassing van de Parrot Sequoia multispectraalcamera

In dit hoofdstuk wordt de toepassing van de Parrot Sequoia multispectraalcamera behandeld. De multispectraalcamera is gemonteerd aan een drone. De werking van dit remote sensing systeem en welke eigenschappen van water de multispectraalcamera kan waarnemen worden in dit hoofdstuk uitgelegd. Een pilotstudy wordt tevens uitgevoerd om te onderzoeken of de desbetreffende eigenschappen van water bepaald kunnen worden in de Lollebeek. Tot slot worden de voordelen en nadelen van de toepassing van de multispectraalcamera aan het einde van dit hoofdstuk behandeld.

4.1 Remote sensing data vastleggen met een multispectraalcamera

4.1.1 Vastleggen van radiantie

De multispectraalcamera van de Parrot Sequoia (zie figuur 4.2, p.11) is een combinatie van een beeldsensor en een spectrometer. De multispectraalcamera is in staat om vier banden en een kleurenbeeld (RGB-beeld) waar te nemen. De spectrale resolutie van de Parrot Sequoia camera is in figuur 4.1 weergegeven. In bijlagen 2.1-2.3 zijn de technische specificaties van de multispectraalcamera en de drone samengevat. De NIR (nabij infrarood) en de Red Edge banden worden binnen de remote sensing wetenschappen vaak toegepast om de gezondheid van planten te monitoren. Gezonde planten hebben namelijk de neiging om deze twee golflengtes te reflecteren. Het bestuderen van het reflectievermogen van materie (albedo) is een belangrijk onderwerp binnen dit deelonderzoek. De multispectraalcamera is niet in staat om direct de reflectie van een object te meten. De multispectraalcamera meet echter wel de foton radiantie (aantal fotonen).

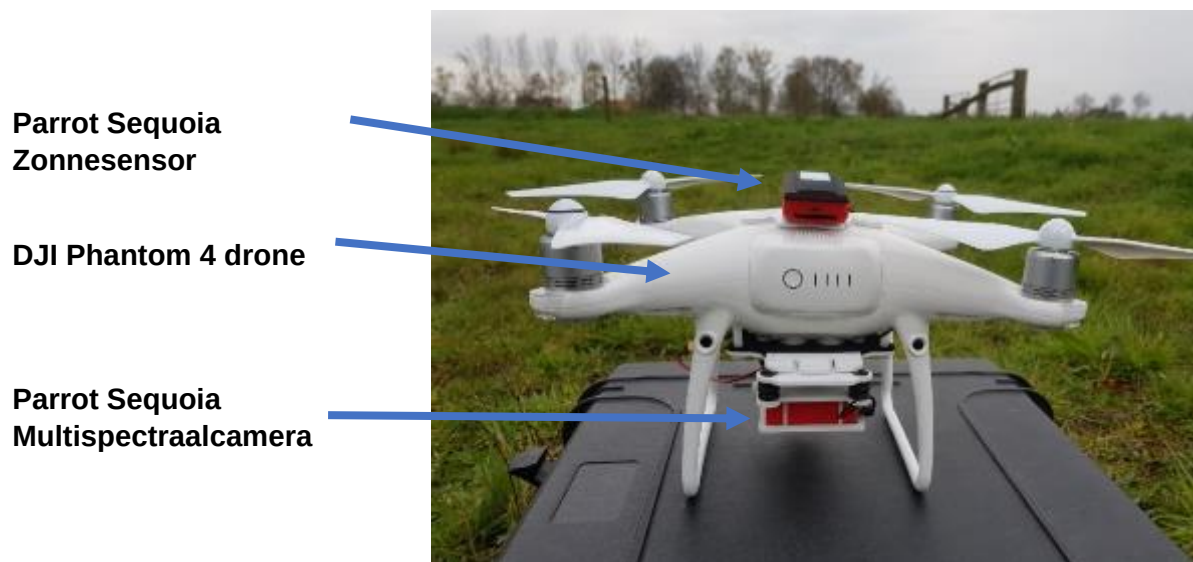


- Groen 550 ± 20 nm
- Rood 660 ± 20 nm
- Red Edge 735 ± 5 nm
- NIR 790 ± 20 nm

Figuur 4.1. Discrete spectrale banden van de Parrot Sequoia multispectraalcamera. Van links naar rechts: groen, rood, Red Edge en NIR. (What spectral bands does the Sequoia camera capture?, 2016)

Tijdens een opname worden deze fotonen geregistreerd door beeldsensoren (beeldpixels) van de multispectraalcamera. In dit proces komen elektronen vrij die elektrische stroming opwekken. De foton radiantie wordt vervolgens omgezet naar spectrale radiantie (stralingsintensiteit) ter hoogte van de sensor van elke band. De elektrische spanning is

evenredig met de spectrale radiantie. De spanning wordt daarna omgezet in digitale getallen (pixelwaardes). Elke pixelwaarde is gelijk aan een bepaalde stralingsintensiteit. De monochroomsensoren kunnen 1024 verschillende stralingsintensiteiten waarnemen (bitdiepte = 2^{10}). Het resulterende beeld als gevolg van de conversie naar pixelwaardes is een digitale afbeelding die de stralingsintensiteit van een bepaalde band weergeeft, aldus een spectraalbeeld.



Figuur 4.2. Parrot Sequoia multispectraalcamera en zonnensensor gekoppeld aan een DJI Phantom Drone 4. Foto genomen door auteurs.

4.1.2 Radiometrische kalibratie en reflectie data

Binnen remote sensing wordt nagestreefd om de 'signal-to-noise' ratio (S/N) te maximaliseren. Hierin is het signaal de gemeten radiantie van een bepaalde band. De ruis kan ingedeeld worden in twee typen: intern en extern (Conghe, 2008). Externe ruis wordt voornamelijk veroorzaakt door deeltjes in de lucht. Absorptie of reflectie door luchtdeeltjes kan ervoor zorgen dat een deel van het gemeten signaal of de pixelwaarde van de spectrale beelden onbruikbaar wordt. Interne ruis is afkomstig van de sensor zelf. De radiantie die de sensor meet kan verschillen met de radiantie die aan het aardoppervlak wordt weerkaatst. Dit wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld de hoek van instraling van de zon, reflectie van het oppervlak, hoogteverschillen en het gehalte aan deeltjes in de atmosfeer. Een radiometrische kalibratie dient toegepast te worden om de werkelijke radiantie en reflectie aan het oppervlak te herleiden van de door de sensor gemeten radiantie en pixelwaardes (Humboldt State University, z.d.).

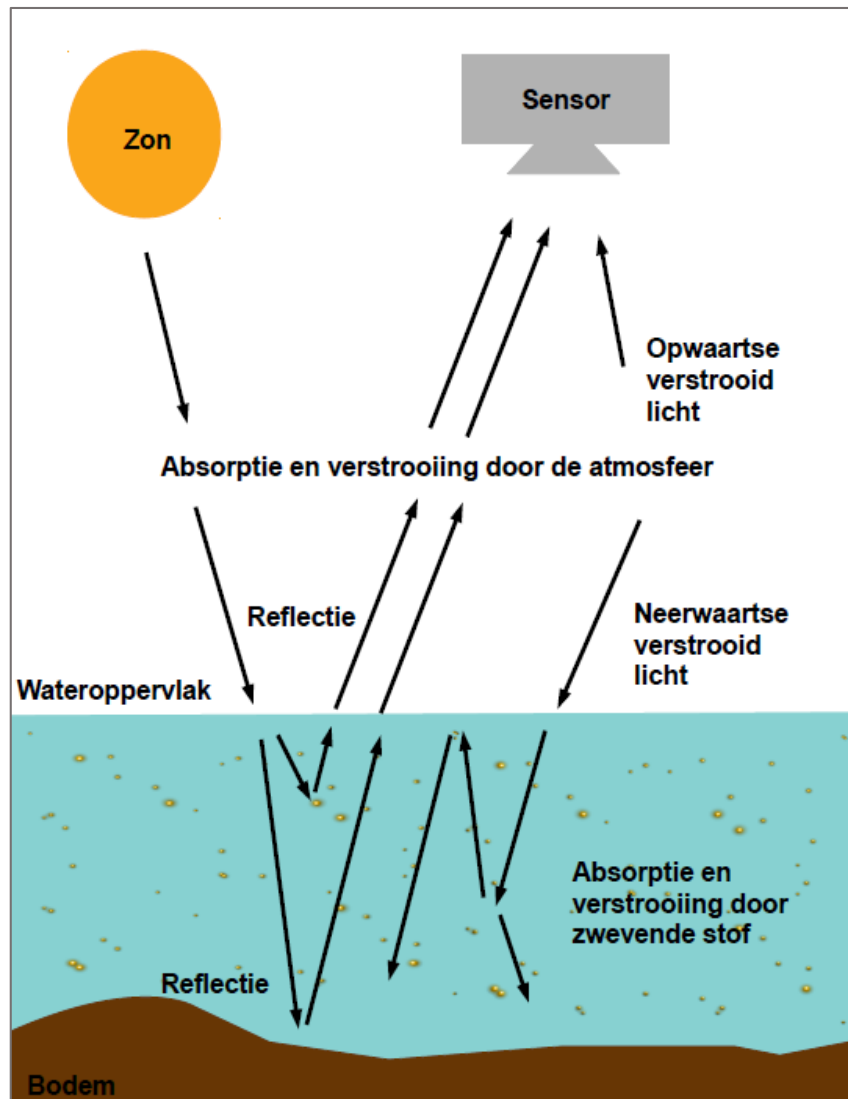
Tijdens een dronevlucht kan de lichtconditie veranderen als gevolg van bijvoorbeeld sluierwolken. Hierdoor kunnen de dronebeelden overbelicht of onderbelicht raken. De multispectraalcamera van de Parrot Sequoia wordt als één systeem geleverd met een zonnensensor. De zonnensensor wordt gebruikt om de veranderingen in lichtconditie als gevolg van de instraling van de zon te compenseren. Een reflectiepaneel met een vaste albedo wordt tevens meegeleverd met de multispectraalcamera om de instraling vanaf de grond te kunnen kalibreren met de instraling op de zonnensensor tijdens de dronevlucht. Op deze wijze kan er hoge kwaliteit reflectiedata van objecten aan de grond of het water vastgelegd worden (MicaSense, 2017).

4.2 Meten van troebelheid en zwevende stof

4.2.1 Interactie tussen licht en deeltjes in het water

De troebelheid van water wordt veroorzaakt door verstrooiing van licht door deeltjes in het water. Meer zwevende stoffen in het water veroorzaken dus meer verstrooiing van het invallende licht. Zwevende stof is een verzameling van onopgeloste deeltjes groter dan $2\text{ }\mu\text{m}$ zoals silt, zand en kleine organische stoffen zoals fytoplankton, algen en plantenresten. Afhankelijk van de deeltjesgrootte en stroming kunnen zwevende stoffen in suspensie (colloïden) blijven of op de bodem landen (Fondriest Environmental, Inc., 2014).

In figuur 4.3 is de interactie tussen licht en deeltjes in het water geschetst. Het licht dat het water binnentreedt is zowel direct als indirect van de zon afkomstig. Een deel van het licht dat op het wateroppervlak valt, wordt weerkaatst. Het andere deel van het licht dat de waterkolom binnendringt kan verstrooid of geabsorbeerd worden door de zwevende deeltjes. Naast zwevende stoffen kunnen gekleurde opgeloste organische stoffen (Engels: colored dissolved organic matter (CDOM)), fluorescerende opgeloste organische stoffen (Engels: fluorescent dissolved organic matter (FDOM)) en andere kleurstoffen ook voor verstrooiing van licht in het water zorgen. CDOM wordt ook wel humuszuur genoemd, een restproduct van de afbraak van organische stoffen (Fondriest Environmental, Inc., 2014).

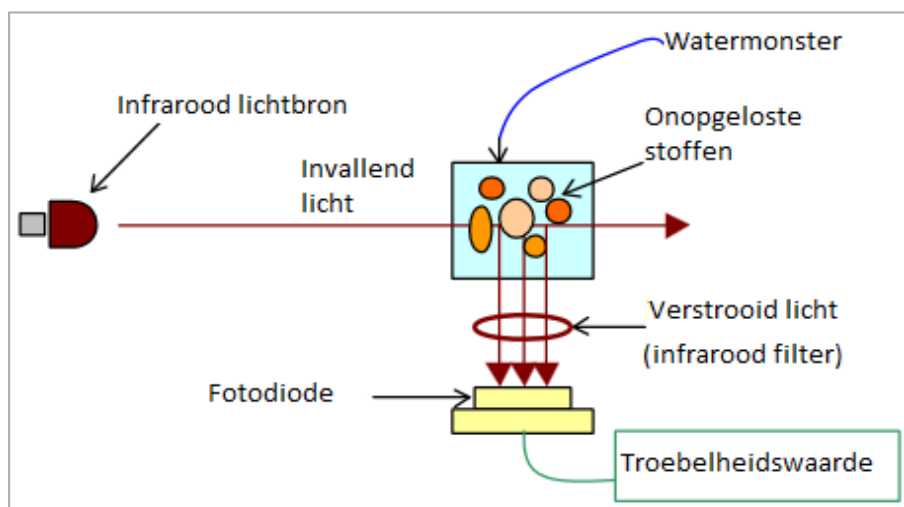


Figuur 4.3. Interactie tussen licht en water. Bewerkt naar Laanen (2007).

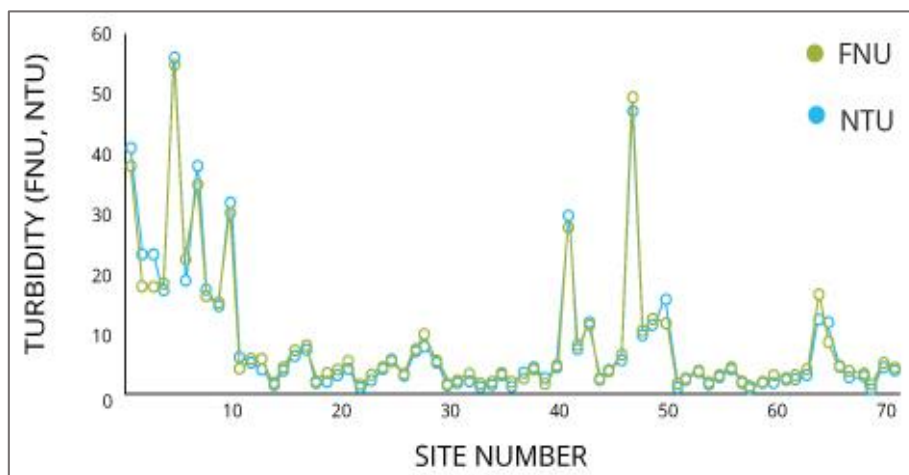
4.2.2 Gangbare methode om troebelheid en zwevende stof te bepalen

Bepalen van troebelheid

Het meten van troebelheid kan gedefinieerd worden als de 'kwantitatieve bepaling van diffuse straling' (Bampanikos, 2016). In de ISO 7027 norm wordt de kwantitatieve methode beschreven voor het bepalen van troebelheid. Volgens de norm kan de mate van troebelheid in FTU¹ (Engels: Formazine Turbidity Units) en FNU² (Engels: Formazine Nephelometric Units) bepaald worden door de verstrooiing van infraroodstraling met een golflengte van 860 ± 30 nm te meten onder een hoek van $90 \pm 2,5^\circ$ (zie figuur 4.4) (Inven, z.d.). De ISO 7027 methode is verder ook goed te gebruiken voor golflengtes tussen 780 en 900 nm (NIR-spectrum). Een andere veelgebruikte kwantitatieve methode is de NTU (Engels: Nephelometric Turbidity Units) van de Amerikaanse EPA 180.1 norm (United State Geological Survey, 2017). De NTU-troebelheidsbepaling maakt gebruik van golflengtes tussen 400 en 680 nm (zichtbaar spectrum). De NTU- en FNU-methoden zijn vergelijkbaar maar niet identiek aan elkaar (zie figuur 4.5).



Figuur 4.4. Schematische weergave van troebelheidsbepaling volgens de ISO 7027 of EPA 180.1 methode. Bewerkt naar Turner design (1999)



Figuur 4.5. Verschil tussen NTU (ISO 7027) en FNU (EPA 180.1) metingen met dezelfde suspensie. Troebelheid in FNU en NTU uitgezet tegen het aantal metingen. (Fondriest Environmental, Inc., 2014)

¹ Formazine is een zeer giftige stof. De methode is over het algemeen goedkoper.

² Maakt gebruik van niet-giftige stoffen. De methode is duurder dan voor FTU.

Bepalen van het gehalte aan zwevende stof

Het gehalte aan zwevende stof wordt bepaald op basis van de NEN-EN 872:2005. In principe wordt een watermonster gefilterd door glasvezelfilters, met een filterdensiteit tussen 50 en 100 g/m² (poriëngrootte van 2 µm), in onder- of overdruk (Emis Vito, 2011).

Vervolgens wordt het residu (deeltjes groter dan 2 µm) gedroogd bij 105 °C. Vergelijking 1 geeft weer hoe het gehalte aan zwevende stof kan worden berekend.

Vergelijking 1. Formule om het gehalte aan zwevende stof te berekenen.

$$TSM = \frac{1000 * (b - a)}{V}$$

Waarin:

- b massa van de filter na filtratie (mg);
- a massa van de filter voor de filtratie (mg);
- TSM totaal zwevende stoffen (mg/l);
- V Volume van het monster (ml).

Colley en Smith (2001) hebben onderzocht dat er een sterke correlatie te vinden is tussen de troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen ($R^2=0,96$). Het gehalte aan zwevende stof in hun onderzoek was kwantitatief bepaald door middel van een gewichtsbepalingsmethode.

4.3 Remote sensing van troebelheid

Eerdere remote sensing studies hebben met succes troebelheid kunnen onderzoeken. De meeste studies richten zich op het gebruik van de spectraalbanden tussen rood en NIR uit satellietbeelden. Een studie door Liversedge (2007) bekrachtigt tevens de toepassing van *band reflectie rationering* met de NIR-band om troebelheid te bepalen. Volgens haar kan zeer troebel water (663-1000 NTU) goed bepaald worden met een NIR-bandratio. Dit geldt volgens Hua Chen (2016) ook voor minder troebel water tot en met 16 NTU. Verder heeft hij veldwaarnemingen gebruikt om remote sensing satellietdata te kunnen valideren met geijkte grondwaardes. In tabel 4.1 is een samenvatting gegeven van verschillende studies en methodes met betrekking tot troebelheidsbepaling.

Tabel 4.1

Studies met betrekking tot remote sensing van troebelheid en multispectraalsensor

Studie	Bereik	Methode	Satelliet sensor en golflengte
Bustamante, Pacios, Díaz-Delgado, & Aragonés (1991)	1,5 - 8 NTU	Veldwaarneming en band reflectie (empirisch model)	Landsat 5 en 7 band 3 (630-690 nm)
Choubey (1991)	14 - 45 NTU	Veldwaarneming en band reflectie (empirisch model)	LISS-I band (620–680 nm)
Goodin, Jr., Nellis, & Rundquist (2008)	3 - 15 NTU	Veldwaarneming en band reflectie (empirisch model)	SPOTHRV2 band (610–680 nm)
Potes, Costa, & Salgado (2012)	1 - 60 NTU	Veldwaarneming en band reflectie (empirisch model)	Ratio tussen 560 nm en 412,5 MERIS banden
Nechad & Neukersmans (2009)	0,6 - 83 FNU	Semi-analytisch model met generieke reflectie eigenschappen van kustwateren	MERIS-band 681 nm. Ook voor golflengtes tussen 600 en 885 nm.

Een analytisch model zoals ontwikkeld werd door Nechad (2009) wordt tevens een bio-optisch model genoemd. Een bio-optisch model benadert de optische eigenschap van biologische stoffen, zoals het gehalte aan plankton en andere eencellige organismen. De optische eigenschappen die gemodelleerd worden heten de intrinsieke optische eigenschappen (Engels: inherent optical properties, IOP). Variabelen die ertoe doen in het model kunnen fysieke eigenschappen zijn van de stof zoals celgrootte, dichtheid van de deeltjes en chemische samenstelling (Morel, 2001). Daarnaast worden ook de schijnbare optische eigenschappen (Engels: apparent optical properties AOP) meegenomen in het model. Dit zijn eigenschappen die afhankelijk zijn van de IOP en geometrische structuur van het lichtveld (Mobley, 1994). Dat laatste slaat op de wijze hoe licht reflecteert (polarisatie) en breekt (refractie) op het moment dat de lichtdeeltjes een ander medium dan lucht doordringen. In een empirisch model worden deze bio-optische factoren vaak verwaarloosd. Een analytisch model kan meer betrouwbaar zijn dan een empirisch model. De toepassing van een analytisch model valt buiten het kader van dit onderzoek, omdat de expertise van de auteurs ontoereikend is. In de volgende paragraaf wordt daarom op basis van een pilotstudy onderzocht of een empirisch model opgesteld kan worden voor troebelheid en zwevende stof op basis van remote sensing data.

4.4 Pilotstudy troebelheidsbepaling met een multispectraalcamera

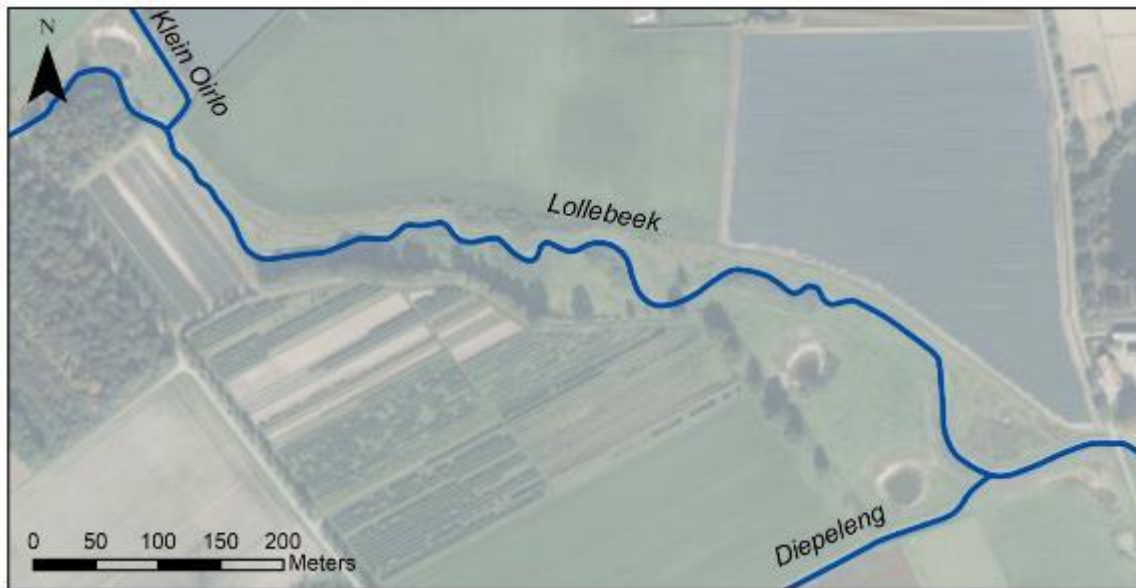
Zoals in paragraaf 4.3 beschreven staat, kan de mate van troebelheid in het water goed bepaald worden met de rode en NIR-banden. De Parrot Sequoia multispectraalcamera is in staat om de rode, NIR- en Red Edge-banden vast te leggen. In deze pilotstudy is onderzocht in hoeverre deze banden de troebelheid in het water kunnen bepalen. De troebelheid is tevens gerelateerd aan het gehalte aan zwevende stoffen in het water. Met troebelheid als maatstaf voor het gehalte aan zwevende stoffen zou het dus mogelijk zijn om vlakdekkende kaarten te maken van troebelheid en het totaal aan zwevende stof in het water.

4.4.1 Studiegebied Lollebeek

Het studiegebied is de benedenloop van de Lollebeek (zie figuur 4.6). Eind 2014 is de beek hermeanderd en sindsdien functioneert de directe omgeving weer als een natuurlijk watersysteem. De beek heeft een klein en ondiep profiel met een breedte variërend tussen 3 en 5 meter en een waterdiepte geschat op 40 tot 80 cm (watertype R4). De beek wordt gevoed met Maaswater via het Peelkanaal. Via zijwaterloop de Diepe Leng komt eveneens Maaswater in de beek terecht. De Lollebeek stroomt van west naar oost waarna deze in de Groote Molenbeek uitmondt (gelegen ten oosten van figuur 4.6) (Inrichtingsplan Lollebeek, 2013).

Afvoer uit het omliggende landbouwgebied zorgt voor verhoogde stikstof- en fosfaatconcentraties in de Lollebeek. Het Maaswater voert daarnaast ook sulfaat en bicarbonaatrijk water aan in de beek (Inrichtingsplan Lollebeek, 2013). Dit zijn stoffen die zich aan zwevende stoffen in het water kunnen hechten.

In bijlage 3 is een aantal impressies van het studiegebied weergegeven. De foto's zijn opgenomen tijdens veldbezoeken op 12 februari en 10 april 2018.



Figuur 4.6. Studiegebied benedenloop heringerichte Lollebeek.

4.4.2 Data acquisitie

In het veldwerkplan in bijlage 4 wordt de werkwijze voor het inwinnen van de multispectraalbeelden beschreven. Het deel van de waterloop dat onderzocht wordt is circa 700 m lang. In figuur 4a van bijlage 4 zijn de meetpunten voor het bemonsteren van troebelheid en zwevende stof weergegeven.

Multispectraalbeelden onder een drone

De Parrot Sequoia multispectraalcamera wordt gebruikt om de radiantie van de rode, groene, NIR en Red Edge banden vast te leggen in een digitaal beeldformaat. De RGB-sensor neemt tevens ware kleurenbeelden op die als referentie worden gebruikt. De multispectraalcamera wordt gekoppeld aan een DJI Phantom 4 Drone en zal vliegen op een hoogte van circa 80 m om een grondresolutie te verkrijgen van <10 cm/px (zie tabel 2a in bijlage 2.2 voor de berekening hiervan).

Belichtingscompensatie

Om goede reflectiekaarten van de multispectraalbeelden te produceren, waarbij de veranderende lichtconditie gecompenseerd wordt, zullen voor en na het vliegen beelden gemaakt worden van een reflectiepaneel. Het reflectiepaneel heeft de volgende bekende reflectiewaardes (albedo) per band:

- Groen 0,173
- Rood 0,216
- Red Edge 0,266
- NIR 0,369

De resulterende beelden worden in het verwerkingsproces van de Pix4D Mapper beeldverwerkingssoftware gebruikt om de beelden radiometrisch te kalibreren.

Bemonstering voor troebelheid en zwevende stof

De mate van troebelheid (NTU) wordt bepaald op basis van de Amerikaanse EPA 180.1 norm en de zwevende stof concentratie (mg/l) wordt door middel van glasvezelfiltratie bepaald op basis van de NEN-EN 872:2005. De monsteranalyse wordt uitgevoerd door het bedrijf Eurofins Omegam.

4.4.3 Dataverwerking

Zie het stroomdiagram op pagina 19 (figuur 4.7) voor een samenvatting van de dataverwerking en data-analysestappen.

Ruwe multispectraalbeelden

De multispectraalbeelden uit de Parrot Sequoia multispectraalcamera worden verwerkt in Pix4D Mapper beeldverwerkingssoftware. Een aantal verwerkingsstappen wordt vervolgens uitgevoerd:

Verwerking van de monochrome beelden:

1. Importeren van de rode, groene, NIR en Red Edge spectraalbeelden en de correctiebeelden voor de radiometrische kalibratieprocedure
2. Start verwerking om o.a. de volgende handelingen uit te voeren:
 - Beeldoptimalisatie en radiometrische kalibratie
 - Bouwen van een puntenwolkmodel
 - Genereren reflectiekaarten

Verwerking van de RGB-beelden:

1. Importeren van de RGB-beelden
2. Start verwerking om o.a. de volgende handelingen uit te voeren:
 - Beeldoptimalisatie
 - Bouwen van puntenwolkmodel
 - Genereren orthofoto

Bandrationering en bandindices

Om de samenstelling van het water beter te kunnen onderscheiden worden met behulp van QGIS-rastercalculator verschillende bandcombinaties berekend aan de hand van de reflectiekaarten. Hieronder vallen zowel bandratio's als bandindices (zie tabel 4.2 en 4.3 op de volgende pagina). Bandcombinaties maken is een veelgebruikte techniek binnen remote sensing. Materialen op het aardoppervlak hebben ieder een karakteristiek reflectievermogen op bepaalde golflengtes. Gezonde 'groene' planten reflecteren bijvoorbeeld vooral het NIR-spectrum.

Binnen de remote sensing van water worden deze bandcombinaties ook toegepast zoals in de studie van Chen (2016). In zijn onderzoek werd een vergelijkbare multispectraalcamera gebruikt met slechts de banden blauw, groen, rood, en NIR. Het onderzoeken van karakteristieke reflectievermogens van stoffen in het water is complexer dan van materialen op het aardoppervlak. Stoffen in het water komen in veel verschillende vormen voor (zie paragraaf 4.3) en kunnen niet altijd gerelateerd worden aan een bepaalde golflengte. Daarom worden met behulp van empirische vergelijkingen de beste bandcombinaties gezocht (trial and error). Er bestaan ingewikkeldere band combinaties, maar deze worden buiten beschouwing gelaten.

Tabel 4.2
Bandratio's en enkelvoudige banden

Bandratio	Enkelvoudige band
Rood/ NIR	NIR
Groen/ NIR	Rood
Red Edge/ NIR	Red Edge
Rood/ Red Edge	

Tabel 4.3
Band indices

Band-index	Vergelijking
NDVI (JR, Haas, Schell, & Deering, 1974)	$(\text{NIR} - \text{rood}) / (\text{NIR} + \text{rood})$
NDRE (Aerial Agi Imagery, z.d.)	$(\text{NIR} - \text{Red Edge}) / (\text{NIR} + \text{Red Edge})$
NDWI (McFeeters, 1996)	$(\text{Groen} - \text{NIR}) / (\text{Groen} + \text{NIR})$

Extractie van reflectiewaardes

De tien gps-punten worden gekoppeld aan de analyseresultaten uit het laboratorium van troebelheid en zwevende stof. In QGIS worden dezelfde punten op de bandratio's en bandindiceskaarten geprojecteerd. Vervolgens wordt er een buffer van 1 m aangemaakt om de gemiddelde reflectiewaarde binnen die buffer te extraheren. De buffer dient ertoe om de kans op afwijkingen³ in de bemonsteringslocatie ten opzichte van de tien validatiepunten (van tevoren bepaald) te verkleinen. Er wordt verondersteld dat de samenstelling van het water niet veel verandert binnen die 1 meter. Het resultaat uit deze stap is een dataset met analyseresultaten van de watermonsters en data van de reflectiewaardes van iedere bandcombinaties op tien punten van de Lollebeek.

4.4.4 Data-analyse

Opstellen van een empirische vergelijking

Een uitgebreid bureauonderzoek wordt uitgevoerd in RStudio om de relatie te vinden tussen de bandratios, bandindicesresultaten en de laboratoriumresultaten van troebelheid en zwevende stof. Er wordt daarbij een regressieanalyse toegepast om een empirische vergelijking op te stellen. In de regressieanalyse wordt er vooral gebruikt gemaakt van een eenvoudig lineair model, zoals in vergelijking 2:

Vergelijking 2. Lineaire vergelijking.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

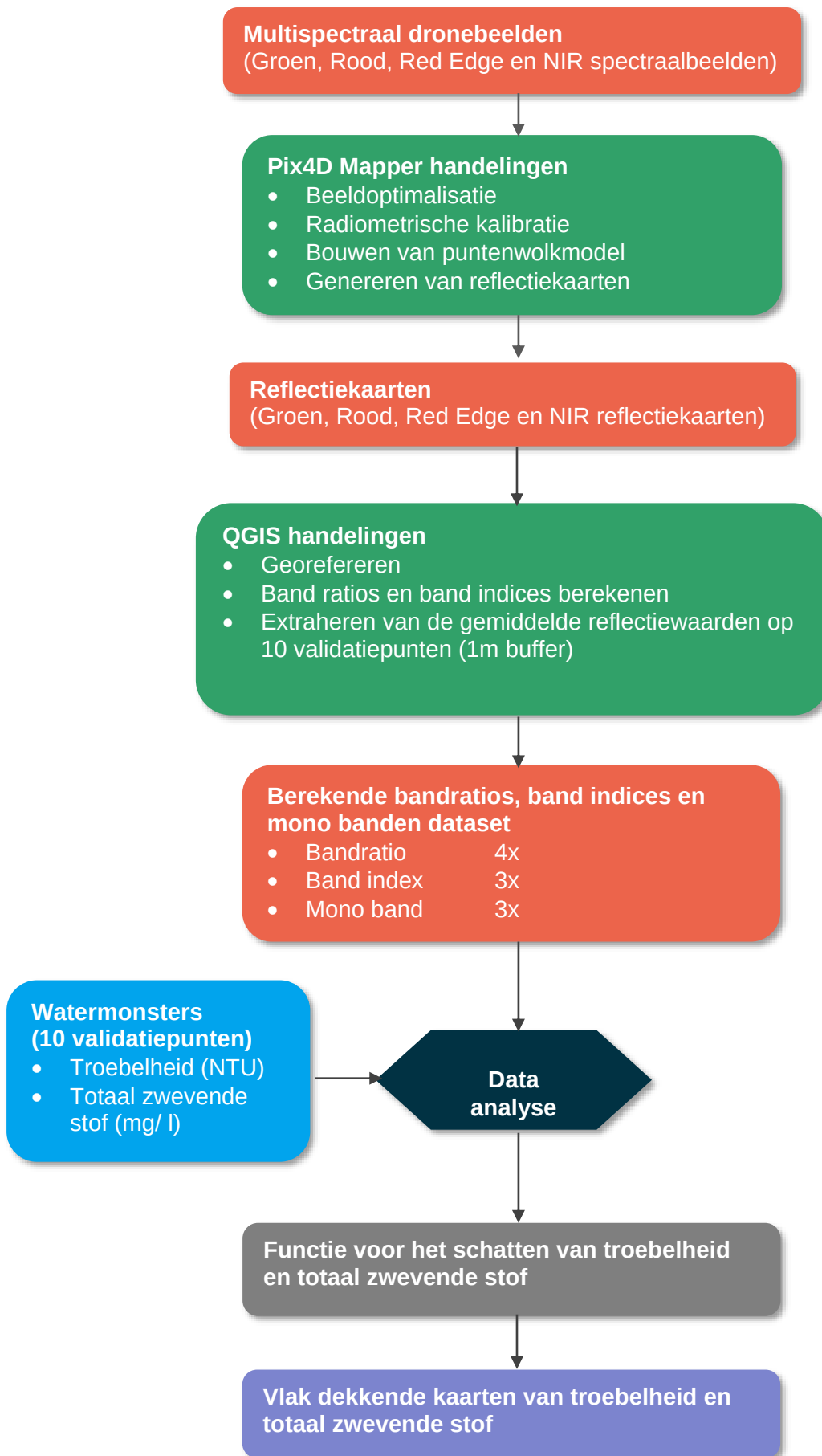
Waarin 'Y_i' de afhankelijke variabele is (troebelheid laboratoriumresultaten), 'β₀' en 'β₁' de regressiecoëfficiënten zijn, 'X_i' de onafhankelijk variabele⁴ is (reflectiewaardes) en 'ε_i' de afwijking (residu) is van de datapunten ten opzichte van de regressielijn.

De modellen worden vervolgens beoordeeld volgens de determinatiecoëfficiënt (R²), overschrijdingskans (p-waarde) en de wortel van de gemiddelde standaardafwijking (RMSE). De functie van een model dat de troebelheid het best kan beschrijven wordt toegepast om een vlakdekkende troebelheidskaart te maken. Een kaart van het totaal aan zwevende stof wordt tevens gemaakt wanneer er een relatie wordt gevonden tussen de laboratoriumresultaten van troebelheid en zwevende stof.

³ Op de validatiepunten kunnen bijvoorbeeld vegetaties groeien. Dit kan de troebelheid/ zwevende stof resultaten beïnvloeden. Vegetaties worden vermeden en daaromheen bemonsterd.

⁴ Tevens de 'predictor' variabele genoemd

Remote sensing van regionale watergangen



4.5 Resultaten pilotstudy troebelheidsbepaling

4.5.1 Beeldresultaten

Vier reflectiekaarten van de banden: groen, rood, Red Edge en NIR zijn met behulp van de Pix4D Mapper beeldverwerkingssoftware geproduceerd. De geproduceerde kaarten hebben een grondresolutie van circa 7,5 cm/px. Een standaard RGB-orthofoto is tevens gemaakt om als referentie te gebruiken. De RGB-kaart heeft een resolutie van circa 2,0 cm/px. De beeldresultaten zijn gegeoreferentieerd en geprojecteerd op WGS 84/UTM-zone 32N. De beeldresultaten zijn in bijlage 5 weergegeven en samengevat. Op basis van de ruwe reflectiekaarten (enkelvoudige banden) zijn vier bandratiokaarten en drie bandindexkaarten geproduceerd.

4.5.2 Data-analyseresultaten

Beschrijvende statistiek

In bijlage 5 is de verdeling van de validatiepunten in boxplots weergegeven en samengevat. In tabel 4.4 en 4.5 zijn de beschrijvende statistieken samengevat van de geëxtraheerde reflectiewaarden en de laboratoriumresultaten van de watermonsters.

Tabel 4.4

Statistische samenvatting van de reflectiewaarden geëxtraheerd uit tien validatiepunten

Kaart	Min	Q ₁	Mediaan	Gemiddelde	Q ₃	Max
Rood	0,049	0,058	0,062	0,062	0,065	0,078
Red Edge	0,055	0,070	0,074	0,075	0,081	0,089
NIR	0,064	0,081	0,091	0,090	0,098	0,107
Groen/ NIR	0,483	0,537	0,589	0,609	0,653	0,863
Rood/ NIR	0,508	0,639	0,737	0,717	0,784	0,945
Red Edge/ NIR	0,803	0,819	0,831	0,838	0,859	0,889
Rood/ Red Edge	0,606	0,795	0,879	0,854	0,925	1,091
NDVI	0,028	0,126	0,156	0,177	0,227	0,342
NDWI	-0,362	-0,302	-0,261	-0,250	-0,211	-0,074
NDRE	0,059	0,076	0,093	0,088	0,099	0,110

Tabel 4.5

Statistische samenvatting van de watermonster laboratorium resultaten uit tien validatiepunten

Watermonster	Min	Q ₁	Mediaan	Gemiddelde	Q ₃	Max
Troebelheid (NTU)	11,0	14,0	15,0	15,1	16,0	19,0
Totale zwevende stof gehalte (mg/l)	7,60	8,35	9,10	9,58	9,85	15,00

Regressieanalyse tussen laboratoriumresultaat troebelheid, bandratio's en bandindices met tien validatiepunten

In deze regressieanalyse is onderzocht of de troebelheid in studiegebied de Lollebeek te verklaren valt met behulp van de berekende reflectiewaardes. In bijlage 6 zijn de plots van de lineaire regressiemodellen weergegeven met de reflectiewaarde als onafhankelijke variabele (predictor) en de troebelheid als afhankelijke variabele. In tabel 4.6 is een statistische samenvatting van deze modellen getoond.

De NIR-band heeft, in vergelijking met andere enkelvoudige bandmodellen, de sterkste benadering. Dit model beschrijft dat circa 13% (R^2) van de variatie in troebelheid verklaard kan worden met behulp van de NIR-band. Van de bandratio-modellen kan de groen/NIR-ratio circa 26% van de variatie in troebelheid het beste verklaren. Verder kan de NDRE circa 25% van de variatie in troebelheid het beste verklaren. Op basis van de P-waarde van alle modellen kan tevens worden aangenomen dat er geen enkel model is dat een significante correlatie heeft met troebelheid uitgaande van de 95% betrouwbaarheidsnorm (P-waarde $<0,05$). De standaardafwijking (RMSE) van de validatiepunten ten opzichte van de regressielijn is gemiddeld 1,85 NTU voor alle predictors.

Tabel 4.6

Statistische samenvatting van de lineaire regressiemodellen van het laboratoriumresultaat troebelheid (NTU) en de reflectiewaardes

Predictor	Intercept	Helling	R^2	RMSE (NTU)	P-waarde
Rood	14,892	3,352	0	2,022	0,973
Red Edge	19,768	-62,325	0,084	1,935	0,416
NIR	20,332	-58,458	0,131	1,886	0,305
Groen/ NIR	9,126	9,809	0,256	1,745	0,136
Rood/ NIR	9,948	7,187	0,188	1,822	0,211
Red Edge/ NIR	-14,356	35,143	0,238	1,765	0,152
Rood/ Red Edge	10,289	5,634	0,134	1,882	0,299
NDVI	16,595	-8,47	0,135	1,881	0,296
NDWI	18,022	11,676	0,201	1,807	0,193
NDRE	20,448	-60,486	0,245	1,757	0,146

Regressieanalyse tussen laboratoriumresultaten troebelheid, bandratio's en bandindices met zeven validatiepunten

In de plots van de lineaire modellen (zie bijlage 6) komen enkele uitschieters voor. Dit zijn voornamelijk de validatiepunten w3, w4 en w7, waarvan w7 in ieder model terug te zien is. De NDRE en de Groen-/NIR-modellen hebben de meeste uitschieters op vier validatiepunten (w2, w3, w4 en w7). Het Red Edge lineaire model heeft slechts één uitschieter op validatiepunt w7. Uit de data-analyse is gebleken dat het verwijderen van de validatiepunten w2, w4 en w7 een hogere variantie in troebelheid geeft voor de meeste predictors. De statistische samenvatting van de nieuwe regressiemodellen voor de zeven overgebleven validatiepunten is in tabel 4.7 getoond. In het model zijn nieuwe uitschieters geïntroduceerd en het verwijderen hiervan levert geen verbetering op van het model. De nieuwe lineaire modellen zijn in bijlage 8 getoond. Het beste model heeft de rood/NIR-ratio als predictor (zie figuur 4.8 op de volgende pagina).

Tabel 4.7

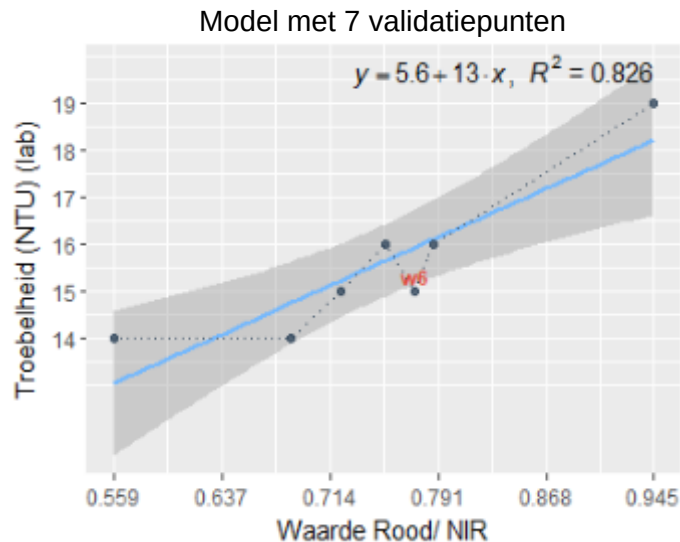
Statistische samenvatting van de lineaire regressiemodellen van het laboratoriumresultaat troebelheid (NTU) en de reflectiewaarden van slechts zeven validatiepunten (zonder w2, w4 en w7).

Predictor	Intercept	Helling	R ²	RMSE (NTU)	P-waarde
Rood	15,523	0,747	0	1,591	0,995
Red Edge	24,733	-124,397	0,579	1,032	0,047
NIR	24,201	-97,954	0,636	0,96	0,032
Groen/ NIR	7,269	13,282	0,802	0,709	0,006
Rood/ NIR	5,554	13,42	0,826	0,664	0,005
Red Edge/ NIR	-14,392	35,785	0,386	1,247	0,137
Rood/ Red Edge	4,915	11,97	0,727	0,831	0,015
NDVI	18,495	-19,029	0,764	0,773	0,01
NDWI	19,957	18,523	0,782	0,743	0,008
NDRE	21,029	-61,374	0,392	1,24	0,133

De functie die de troebelheid in de Lollebeek het best kan benaderen op basis van de Rood/NIR-ratio is gedefinieerd in vergelijking 3:

Vergelijking 3. Functie waarin troebelheid benaderd wordt.

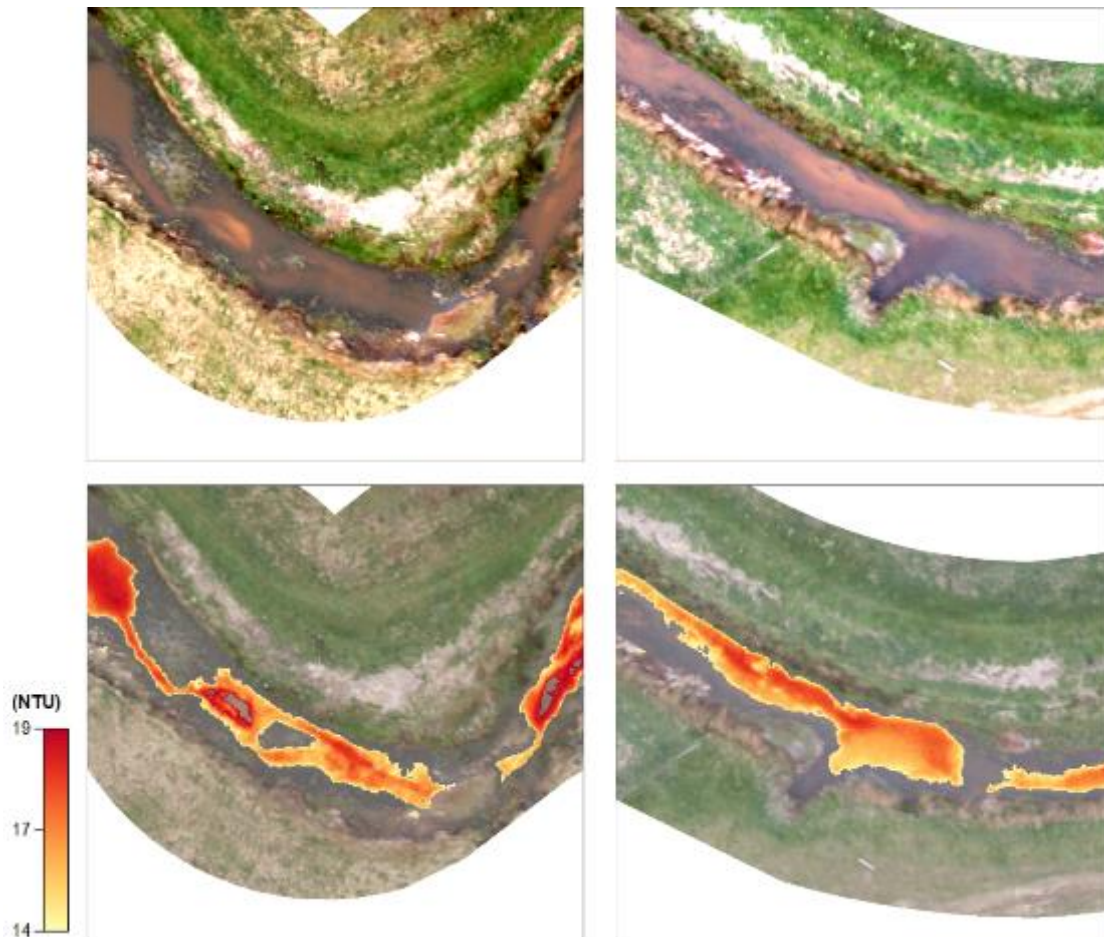
$$Troebelheid (NTU) = 5,5 + 13,4 \left(\frac{Rood}{NIR} \right) \pm 0,7$$



Figuur 4.8. Lineair regressiemodel tussen troebelheid (NTU) laboratoriumresultaat en Rood/NIR-ratio. De uitschieters (w2, w4 en w7) zijn in dit model buiten beschouwing gelaten.

Troebelheidskaart (NTU)

In bijlage 9 is een vlakdekkende troebelheidskaart (in NTU) weergegeven op basis van het Rood/NIR-predictor regressiemodel ($R^2=0,826$). Op deze kaarten is op twee willekeurige plekken van de beek ingezoomd, met en zonder de overliggende troebelheidskaart. Op de RGB-kaart komen de bodemlooppatronen en zandbanken veel overeen met de patronen op de troebelheidskaart. In figuur 4.9 is ingezoomd op locatie 1 en 2. De meeste vegetatieclusters en oevervegetaties vallen buiten het bereik van de troebelheidskaart. Hierdoor zijn er veel delen zonder NTU-waardes te zien op de kaart.



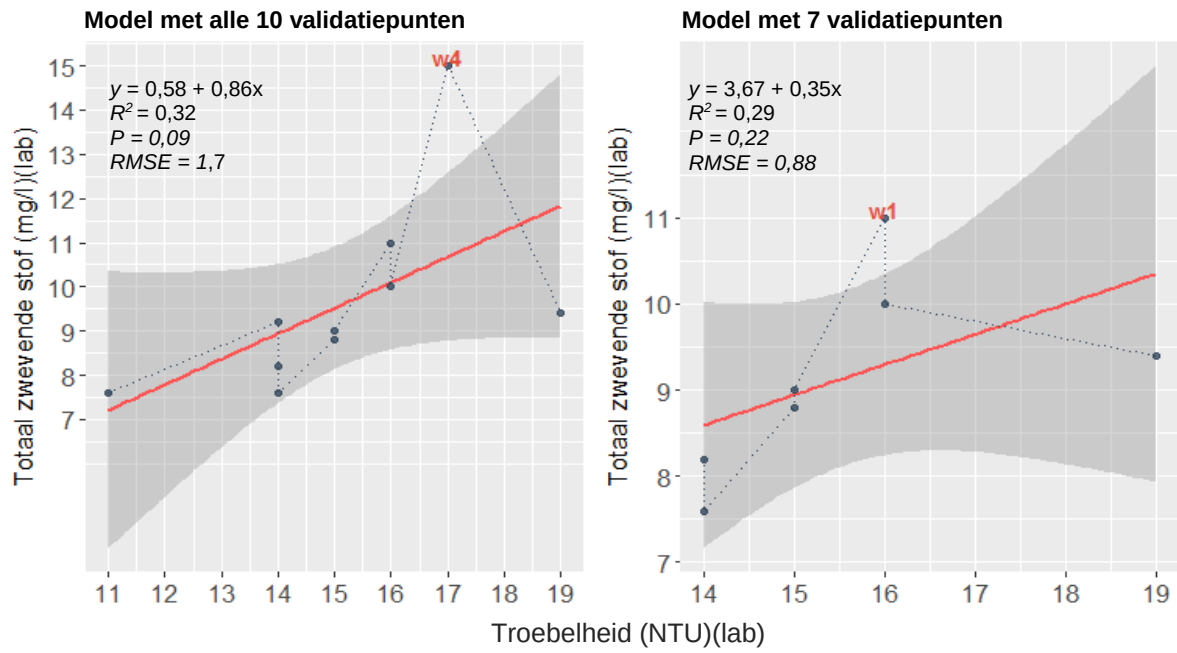
Kaartschaal 1: 350

Figuur 4.9. Troebelheidskaart (NTU) berekend op basis van de Rood/NIR-predictor regressiemodel en RGB-dronebeelden met contrastverrijking. Links is ingezoomd op locatie 1 en rechts is ingezoomd op locatie 2. Deze figuren zijn noordgericht.

Regressieanalyse tussen troebelheid en laboratoriumresultaten gehalte aan zwevende stof

Er is ook onderzocht of de toename van het gehalte aan zwevende stof gerelateerd is aan de troebelheid. In figuur 4.10 op de volgende pagina zijn twee regressiemodellen weergegeven van het totaal aan zwevende stof (mg/l) en de troebelheid (NTU) uit de laboratoriumresultaten, met en zonder uitschieters (w2, w4 en w7). Uit het model met alle 10 validatiepunten kan 32% van de variatie in het totaal aan zwevende stof verklaard worden door de troebelheid. Het verwijderen van uitschieters levert geen hogere significantie op. Slechts 29% van de variatie in het totaal aan zwevende stoffen kan verklaard worden door de troebelheid in het model met zeven validatiepunten. Er kan hierdoor geen functie worden opgesteld die het totaal aan zwevende stof kan benaderen op basis van de Rood/NIR-ratio en de troebelheid.

Remote sensing van regionale watergangen



Figuur 4.10. Lineaire regressiemodellen van het totaal aan zwevende stof (mg/l) en de troebelheid (NTU) laboratoriumresultaten. Links het model met alle 10 validatiepunten en rechts het model zonder uitschieters (w2, w4 en w7).

4.6 Voordelen en nadelen

In deze paragraaf worden de voor- en nadelen van de Parrot Sequoia multispectraalcamera in combinatie met de DJI Phantom Pro 4 drone behandeld. De beoordeling is gebaseerd op de uitgevoerde pilotstudy met betrekking tot de troebelheidsbepaling in de benedenloop van de Lollebeek.

4.6.1 Voordelen

Hoge ruimtelijke resolutie

De monochroomsensoren (rood, groen, Red Edge en NIR banden) van de Parrot Sequoia multispectraalcamera hebben een beeldresolutie van 1,2 megapixel (1280 x 960 px). In de pilotstudy is gevlogen op een hoogte van circa 80 m. Daarmee is een resolutie van 7,5 cm/px behaald. Per beeldopname betekent dit een grondoppervlakte van circa 96 x 72 m. De resolutie biedt meer dan genoeg dekking van het wateroppervlak voor de smalle Lollebeek (3 tot 5 m breedte). Variaties en patronen in het water zijn goed te herkennen. Met de RGB-sensor is het mogelijk om een circa drie keer kleinere resolutie te verkrijgen dan de monochroomsensoren.

Toegankelijkheid van de waterloop

Door de integratie van de Parrot Sequoia multispectraalcamera met het DJI Phantom 4 dronesysteem kunnen gebruikers multispectrale beelden maken op moeilijk begaanbare plekken van de waterloop. Tijdens de bemonstering van de troebelheid en het gehalte aan zwevende stoffen was het lastig om op bepaalde stukken van de waterloop te komen. Hekken belemmerden de toegang of de oever was plaatselijk te steil om op te staan. Met een drone kan de gebruiker daar eenvoudig overheen vliegen.

Momentopnames zijn te kiezen

Met de multispectraalcamera en dronecombinatie heeft de gebruiker zelf de vrijheid om te bepalen op welk moment de beelden ingewonnen worden. Dit is anders bij satellietopnames, waarbij de temporele resolutie aangeeft om de hoeveel dagen de satelliet weer opnames maakt van hetzelfde gebied.

Hoge radiometrische resolutie

De Parrot Sequoia monochroomsensoren hebben een radiometrische resolutie van 10 bit. Dat wil zeggen dat 1024 (2^{10}) verschillende reflectieniveaus onderscheiden kunnen worden per beeldpixel. Hiermee zouden dus ook 1024 verschillende niveaus van troebelheid waargenomen kunnen worden. Uit de pilotstudy is gebleken dat de verschillen in troebelheidsniveaus heel klein zijn (14-19 NTU). De Parrot Sequoia camera heeft dus een groot bereik om variaties in zeer lage en hoge troebelheid in het water waar te nemen.

4.6.2 Nadelen

Spectrale resolutie

De spectrale resolutie is het aantal banden dat de spectrale camera's opnemen. Deze waarde geeft ook de mate aan van meetnauwkeurigheid (meetbereik) van iedere band. De Parrot Sequoia heeft slechts vier banden (groen, rood, Red Edge en NIR) met een meetbereik van ± 20 nm (groen, rood en NIR) en ± 5 nm (Red Edge). Niet alle banden zijn bruikbaar voor troebelheidsbepalingen, zo blijkt uit de pilotstudy. De lage meetnauwkeurigheid maakt de banden ook discreet. Dat wil zeggen dat in de overgangen van de bandbreedtes, bijvoorbeeld rood (640-680 nm) naar Red Edge (730-740 nm), een deel van het bereik van het spectrum niet gemeten wordt, terwijl dit mogelijk bruikbaar kan zijn voor het bepalen van troebelheid.

Weersomstandigheden

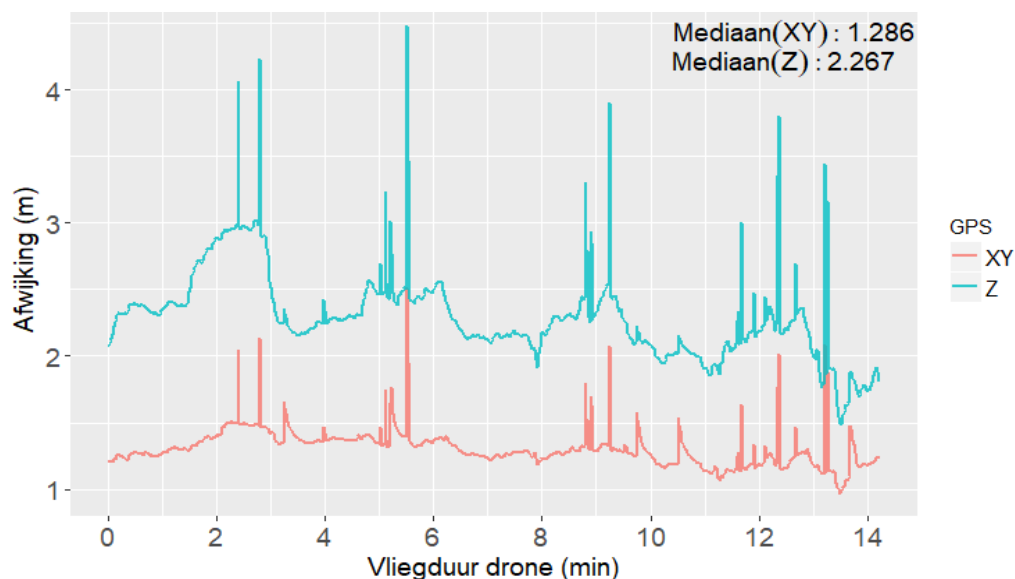
De weersomstandigheden spelen een belangrijk rol in de toepassing van de multispectraalcamera en de drone. Een van de zaken waar rekening mee gehouden moet worden tijdens het vliegen is de zonnestand. Als de zon loodrecht boven de drone en camera schijnt, kan er sprake zijn van weerkaatsing van licht op het wateroppervlak. Weerkaatsing treedt bij deze zonnestand op, doordat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van uitval. Weerkaatsing op de sensor zorgt voor een extreem heldere pixel op de beelden. Bij remote sensing is het juist belangrijk om naar diffuse straling te kijken van het object aan het oppervlak. Diffuse straling bevat bruikbare remote sensing informatie (SEOS, z.d.). Echter, de multispectraalcamera is niet geschikt om in mistige omstandigheden te gebruiken. Waterdeeltjes in de lucht zorgen ervoor dat het licht diffuus wordt weerkaatst voordat het op het oppervlak valt. Informatie die op de sensoren terecht komt wordt op deze wijze onderschat. Daarnaast is de DJI Phantom 4 drone een relatief lichtgewicht toestel (1.388 g incl. batterij). Bij hogere windsnelheden, hoger dan schaal 4 Beaufort (5,6 - 7,8 m/s), wordt de drone te onstabiel om te vliegen. Beelden kunnen daardoor vervagen of veel vertekeningen vormen.

Grondwaarneming

Bij remote sensing is het altijd noodzakelijk om een grondwaarneming en validatie van de te onderzoeken variabelen uit te voeren. Ingewonnen remote sensing data is pas bruikbaar als er een relatie gevonden kunnen worden tussen de reflectiewaarden en een bepaald verschijnsel. Vooral bij nieuwe studies zoals deze pilotstudy is het belangrijk om gegevens te verzamelen en te valideren.

Gps-precisie en georeferentie

De Parrot Sequoia heeft een gps-precisie van 1 tot 3 m. Dit betekent dat elke pixel minimaal 1 meter naast de absolute locatie kan liggen. Dit betekent ook dat de remote sensing data en pixels die gekoppeld zijn aan de gps-locatie niet altijd de absolute reflectie aangeven. Dit heeft ook effect op de nauwkeurigheid van de projectie van de geleverde beelden. Daarom dienen de beelden altijd georeferereerd worden. In figuur 4.11 is een grafiek weergegeven van de dynamiek in gps-nauwkeurigheid, afgeleid per RGB-beeld (totaal circa 950 afbeeldingen) in de tijd.



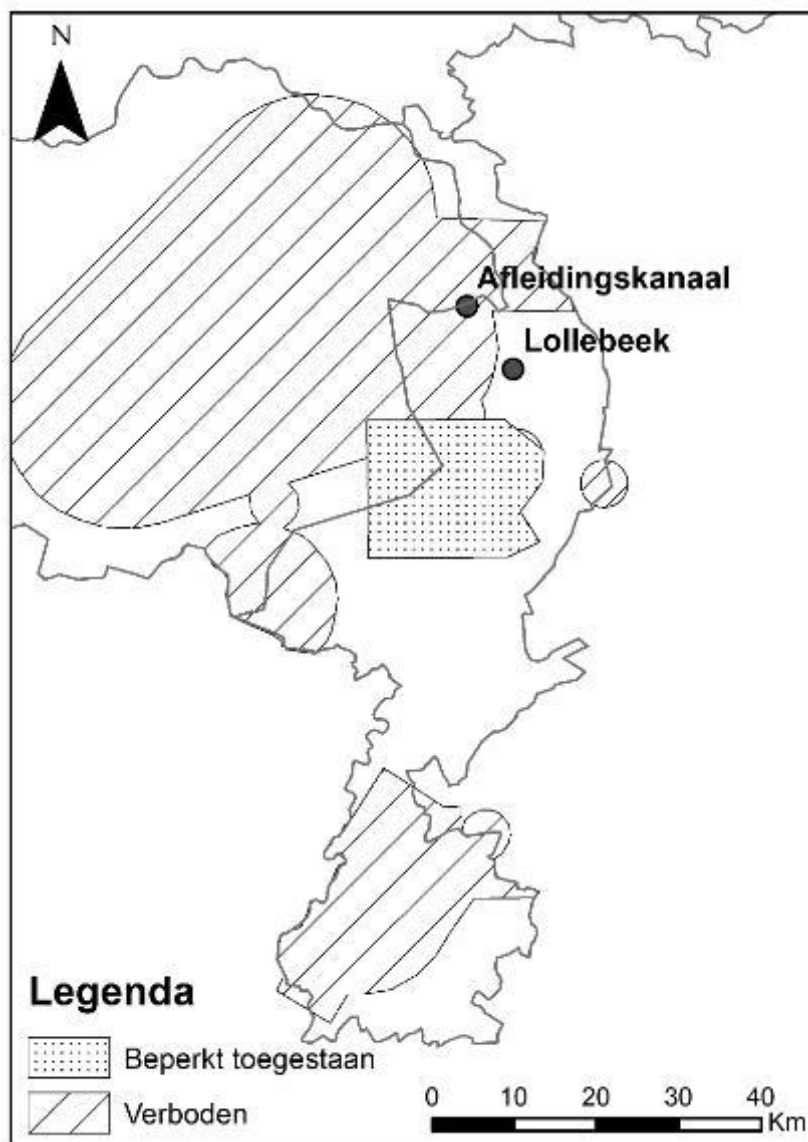
Figuur 4.11. Gps-afwijking (m) uitgezet tegen de vliegduur drone (min).

Regelgeving

In Nederland wordt een aantal regelgevingen gehandhaafd omtrent het vliegen met een drone. De dronewetgeving in Nederland legt de nadruk op de privacy- en veiligheidsaspecten. De wetgeving maakt ook onderscheid tussen particulier en commercieel gebruik. Een hobbyist mag bijvoorbeeld niet hoger dan 120 m vliegen (Wet Luchtvaart, artikel 5.3). Daarnaast mag een dronepiloot niet overal vliegen. In figuur 4.12 is een kaart van de 'drone no-fly zones' in Limburg weergegeven. Verboden gebieden zijn voornamelijk militaire vliegbases of luchthavens (Rijksoverheid, z.d.).

Voor commerciële gebruikers gelden andere regels. Een particulier die een drone gebruikt voor zijn eigen bedrijf heeft de volgende vergunningen nodig: ROC (drone operator certificatie), een vliegbrevet en een bewijs van luchtvaardigheid. Als een bedrijf een dronevlucht uitbesteedt dan heeft de opdrachtgever slechts een ROC-vergunning nodig. Er bestaan twee soorten ROC-vergunningen: ROC en ROC-light.

Met de ROC-light mag een piloot slechts een drone van maximaal 4 kg besturen en vliegen tot een hoogte van 120 m. Met de ROC mag de piloot een drone van 150 kg besturen en vliegen tot een hoogte van 150 m (Regels voor zakelijk gebruik drone, z.d.).



Figuur 4.12. Drone no-fly zones van Provincie Limburg. Aangepast uit Kadaster (z.d.).

5 Deelonderzoek B: Toepassing van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera

In dit hoofdstuk wordt de toepassing van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera behandeld. De warmtebeeldcamera wordt gekoppeld aan een smartphone. Met een applicatie kan de warmtebeeldcamera bediend worden. De werking van dit remote sensing systeem en de bruikbaarheid van het apparaat worden in dit hoofdstuk uitgelegd. Tot slot wordt er een pilotstudy uitgevoerd om te onderzoeken in hoeverre de FLIR One Pro temperatuurverschillen van het wateroppervlak kan onderscheiden.

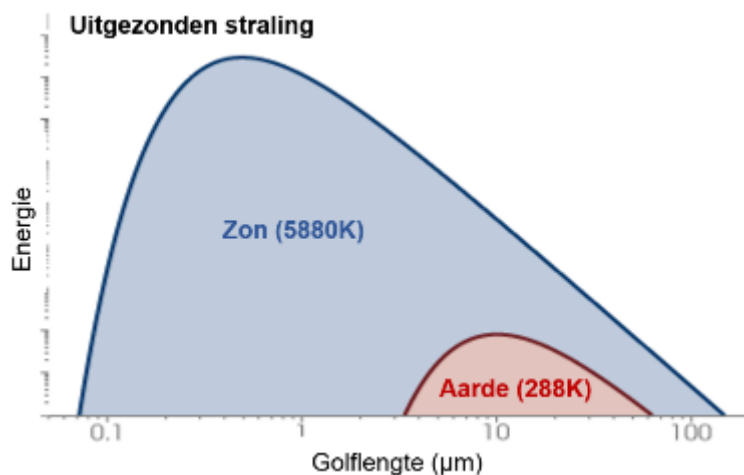
5.1 Thermische remote sensing Voordelen en nadelen

5.1.1 Zwarte straler model

Binnen thermische remote sensing wordt de emissie-energie van materie bestudeerd. Dit is anders dan bij reflectie remote sensing, waarin het reflectievermogen van materie voor bepaalde golflengtes wordt onderzocht. Doordat de twee systemen van elkaar verschillen, vergt dit een andere interpretatie en verwerking van de remote sensing data.

Emissie-energie van materie kan omschreven worden door middel van het 'zwarte straler model'. Een zwarte straler is een theoretisch object dat alle soorten elektromagnetische straling absorbeert, en dus geen straling reflecteert. Een eigenschap van een zwarte straler object is het uitzenden van de opgenomen stralingsenergie. De aarde gedraagt zich ook als een zwarte straler object. De stralingsbron van het licht dat op de aarde valt is de zon. Meer dan de helft van de zonnestraling bestaat uit thermische infraroodstraling ($>700\text{ nm}$) die geabsorbeerd en weer uitgezonden wordt door het aardoppervlak. Hierdoor wordt het aardoppervlak warmer. De aarde is geen ideale zwarte straler (i.e. grijze straler) omdat het aardoppervlak een deel van de straling kan weerkaatsen. Weerkaatsing van zonnestraling gebeurt voornamelijk in het zichtbare spectrum ($400 - 700\text{ nm}$).

In figuur 5.1 wordt de stralingsenergie van de zon met de aarde vergeleken. In deze figuur is goed te zien dat de stralingsenergie van de aarde varieert tussen 3.000 en 60.000 nm in het infraroodspectrum. Op basis van het zwarte straler model van de aarde kan er een relatie worden gelegd tussen temperatuur en bepaalde golflengtes.



Figuur 5.1. Zwarte straler curves van de aarde en de zon. Het emissievermogen is uitgezet tegen de golflengte (μm). Aangepast uit Lindsey (2007)

5.1.2 Componenten van thermische straling

Het meten van thermische straling is gebaseerd op de uitstraling van de objecten zelf, en niet op straling die een gevolg is van reflectie. Hierdoor zijn temperatuuroptnames altijd passief van aard (NASA, z.d.). De meeste thermische sensoren maken gebruik van infraroodbanden in de 3.000 - 5.000 nm (middel-golflengte infrarood) en 8.000 - 14.000 nm (lang-golflengte infrarood) intervallen. Een thermische sensor is een soort radiometer die deze infraroodspectra kan meten. Het onderscheiden van kleine temperatuurverschillen op aarde is complex. Dit komt voornamelijk door het lage stralingsvermogen van de aarde.

De stralingsenergie die een object uitzendt is afhankelijk van verschillende factoren zoals het type materiaal en de omgevingsstraling. Drie soorten stralingsenergieën (zie figuur 5.2 op de volgende pagina) kunnen onderscheiden worden:

Vergelijking 4. Drie soorten stralingsenergieën die elkaar complementeren.

$$1 = A + R + T$$

Waarin:

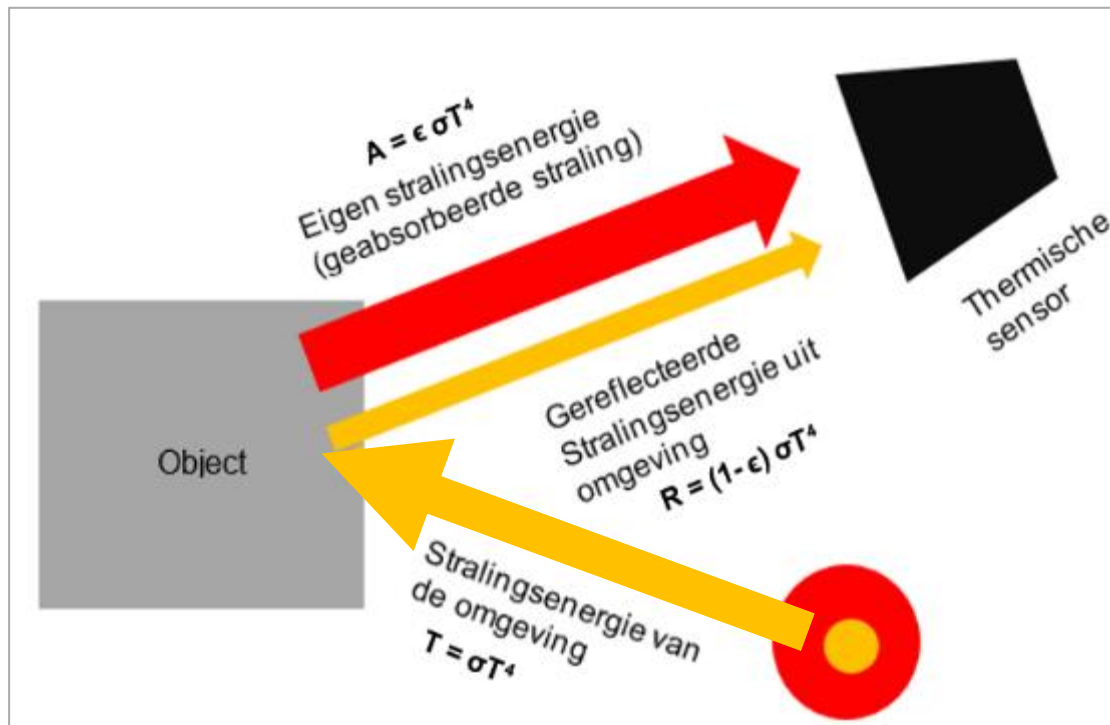
A = Eigen stralingsenergie (geabsorbeerde energie)	$0 < A < 1$
R = Gereflecteerde stralingsenergie uit de omgeving	$0 < R < 1$
T = Stralingsenergie door het object heen (overgedragen energie)	$0 < T < 1$

(Visser, 2011)

Energie kan verloren gaan, maar kan nooit verdwijnen. Dit is terug te vinden in de Wet van Behoud van Energie, waarin de som van alle energieën "M" gelijk aan 1 is. Het object absorbeert en reflecteert de straling. De mate van reflectie is de emissiviteit 'ε': de verhouding van het totale emissievermogen van een ideale zwarte straler (M=1) ten opzichte van het object (M<1) op dezelfde temperatuur (Visser, 2011). Deze variabele is afhankelijk van de golflengte en temperatuur. Volgens de Wet van Kirchhoff is er een omgekeerd evenredige verhouding tussen de mate van absorptie en de stralingsenergie (Divame Linga, z.d.).

5.1.3 Emissiviteit van water

Water heeft een hoge soortelijke warmte. In de vloeibare fase is deze vier keer zo groot als die van lucht. Water heeft dus meer energie nodig om warmer te kunnen worden. De voornaamste warmtebron van oppervlaktewater is de zon. Een rivier absorbeert de energie van de zonnestraling en kan deze overdragen (conductie) naar het land of overdragen aan de atmosfeer via luchtdeeltjes (convection). Deze fysische eigenschap van water kan tevens gerelateerd worden aan het emissievermogen van water. Puur water heeft een hoge emissiviteit van 0,98 in de vloeibare fase. Sneeuw heeft een emissiviteit van 0,80. Sneeuw reflecteert dus meer dan water. De samenstelling van het water heeft tevens invloed op de emissiviteit. Een studie van Liu Wen Yao et al. (1986) beweert dat er een omgekeerd evenredig verband is tussen het zwevende stof gehalte en de spectrale emissiviteit tussen 8 en 14 micrometer.

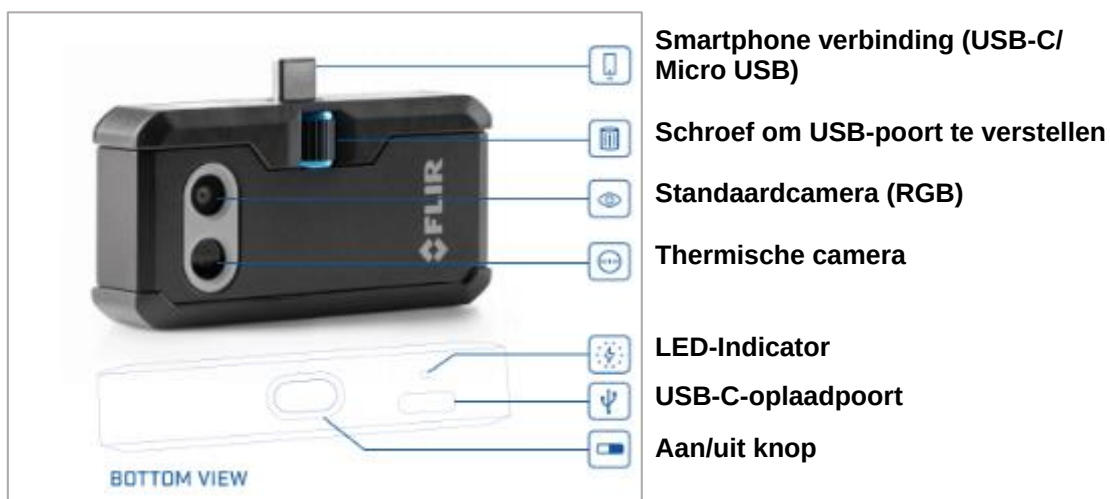


Figuur 5.2. Componenten van de stralingsenergie die een sensor meet. Bewerkt naar Visser (2011).

5.2 Thermische remote sensing data vastleggen met de FLIR One Pro

5.2.1 Meettechniek van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera

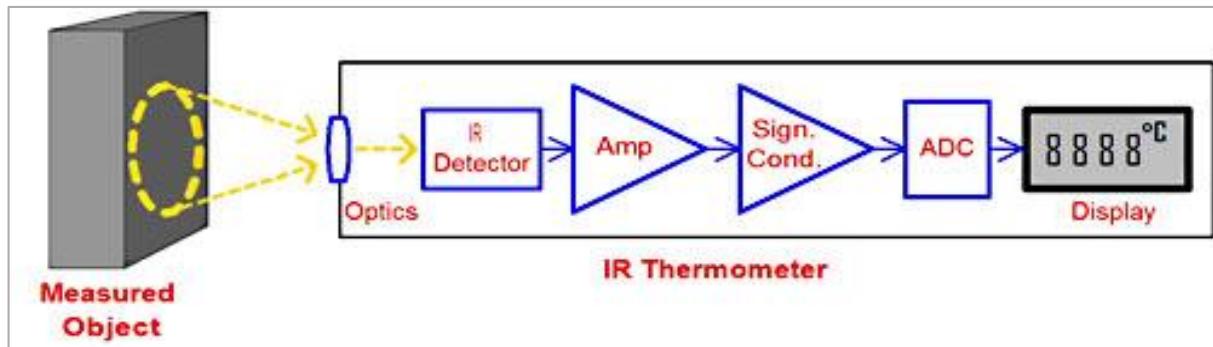
De FLIR One Pro (zie figuur 5.3) is een extern apparaat dat kan worden aangesloten op een smartphone (iOS of Android). Het apparaat is in staat om thermische infraroodstraling waar te nemen. De fases waaruit deze opnames bestaan is in figuur 5.4 op de volgende pagina weergegeven.



Figuur 5.3. Zichtbare componenten van de FLIR One Pro. (FLIR, z.d.)

Thermische infraroodstraling wordt waargenomen door de ingebouwde FLIR Lepton 3 microbolometer (infraroodsensor). Via de lens komt de lichtbundel op de microbolometer terecht. De microbolometer is in staat om de infraroodfotonen om te zetten naar een elektrisch signaal (Optotherm Thermal Imaging, z.d.). Het zwakke signaal uit een

infrarooddetector wordt versterkt en vervolgens omgezet naar spanning via een linearisatiecurve. Vervolgens wordt de relatie gelegd tussen de gemeten spanning en temperatuur, wat resulteert in een waarde met een temperatuureenheid (°C of °F).



Figuur 5.4. De omzetting van infraroodstraling naar temperatuurweergave. (Gyorki, 2009)

5.2.2 Functionaliteiten van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera en de FLIR One applicatie

Technische specificaties FLIR One PRO warmtebeeldcamera

De FLIR One Pro is geschikt om infraroodstraling waar te nemen tussen 8 en 14 micrometer. De omgevingswarmte en warmte van het apparaat zelf hebben invloed op de meetnauwkeurigheid van de warmtesensor. Volgens de producent (FLIR) heeft de FLIR One Pro een meetnauwkeurigheid van circa $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5\%$) na 60 seconde opstarten als de temperatuur van het apparaat ligt tussen 15°C en 35°C , en de temperatuur van de te meten omgeving tussen 5°C en 120°C valt (Flir One Pro datasheet, z.d.). In bijlage 2.4 zijn enkele technische specificaties van de FLIR One Pro warmtebeeldcamera weergegeven.

Beeld- en video-opname

Het apparaat wordt bediend via de FLIR One Androidapplicatie. Met behulp van deze software is het mogelijk om interactieve temperatuurbeelden en -video's te maken. De beelden zijn zichtbaar op de smartphone. Het maken van een *time lapse video* behoort ook tot de functionaliteit van de applicatie en de thermische sensor. De resultaten zijn weer te geven in drie typen beeldweergaven: normaal beeld, MSX-beeld en thermisch beeld. Het normale beeld is de standard RGB-beeldweergave. Het MSX (Multispectral Dynamic Imaging) beeld is een combinatie van RGB en thermische beelden. Daarnaast is de applicatie in staat om de temperatuur weer te geven in verschillende kleurpaletten (12 Things to Consider Before Buying an Infrared Camera, z.d.).

Instellingsmogelijkheden

Het temperatuurbereik is aan te passen, waarbij gekozen kan worden tussen een bereik tot 450°C of tot 150°C . Ook kan gekozen worden voor een automatische of een handmatige kalibratie van de resultaten. Volgens Allain (2014) is dit mogelijk, maar is het proces te ingewikkeld om betrouwbare resultaten te boeken. De schaal kan vastgesteld worden, zodat de kleuren een duidelijk, relatief verschil tonen. Ook kan hierbij gekozen worden voor een schaalverdeling waar het onderzoek op gericht is. De laatste waardevolle instelling is de emissiviteit. Deze is standaard op 0,95 ingesteld, maar bijvoorbeeld bij spiegelende materialen levert het betere resultaten op als deze op lagere waardes wordt ingesteld (12 Things to Consider Before Buying an Infrared Camera, z.d.).

5.3 Pilotstudy waarnemen van warmte met een thermische camera

Op basis van de vorige paragrafen is herleid dat het vaststellen van de temperatuur afhankelijk is van verschillende factoren. In deze pilotstudy wordt onderzocht in hoeverre de FLIR One waarnemingen betrouwbaar zijn ongeacht samenstelling, dwarsprofiel en de hoek van inval van zonnestraling. De werkwijze van deze proeven wordt in de volgende paragrafen beschreven. Verder worden de warmtebeelden uit iedere proef bewerkt in de FLIR Tool warmtebeeldverwerkingssoftware.

5.3.1 Laboratoriumproeven

Zandbakmodel

Er zijn drie onderzoeken intern uitgevoerd in het laboratorium van Van Hall Larenstein op 5 april 2018. Allereerst is het zandbakmodel gebruikt (figuur 5.5). Dit bestaat uit een bak gevuld met zand, die voorzien is van een wateraanvoer van twee bronnen met verschillende watertemperaturen. Op vier punten wordt de temperatuur digitaal vastgesteld. De FLIR One Pro wordt gekoppeld aan een smartphone en vervolgens wordt deze combinatie bevestigd aan een driepootstatief die op een vaste plaats naast het zandbakmodel staat. Bij de applicatie wordt het bereik van de schaalbalk vastgezet. Dit dient om de verschillen tussen de meetmomenten duidelijker weer te geven. Tijdens deze modelstudie zijn zowel foto- als video-opnames gemaakt.



Figuur 5.5. Zandbakmodel waarin warm en koud water aangevoerd worden en even later samenkomen.

Materiaalinvloed

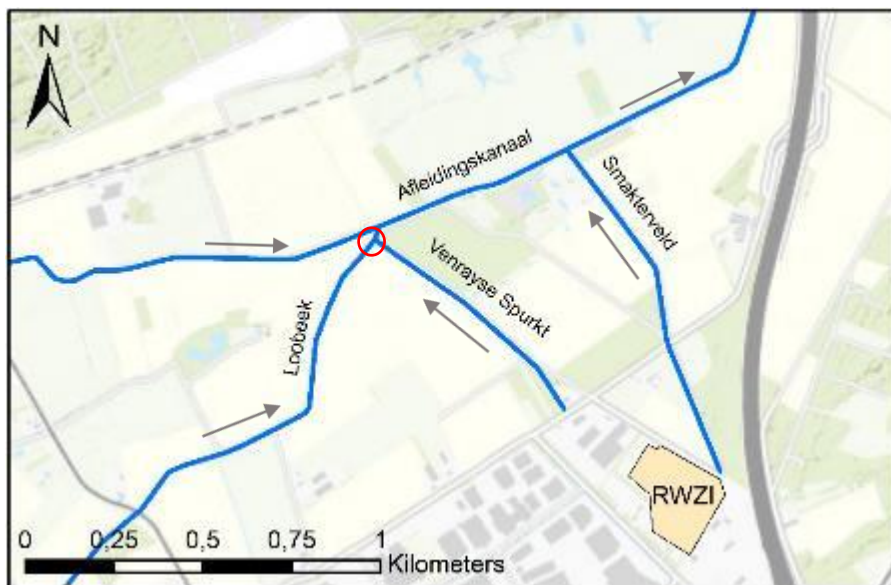
Om de mate van externe invloeden te kunnen beoordelen worden twee kleinere practica uitgevoerd (zie bijlage 10). Zo wordt een maatcilinder beplakt met een strook van aluminiumfolie en een strook van plastic verpakkingsmateriaal. Vervolgens wordt deze gevuld met water. Deze dient ertoe om na te gaan of de FLIR One Pro dezelfde temperaturen meet, ongeacht het materiaal. Het tweede deel van het onderzoek kijkt in hoeverre troebelheid invloed heeft op de betrouwbaarheid. Hiervoor wordt één maatcilinder gevuld met kraanwater en de ander wordt gevuld met kraanwater en enkele lepels zand, om troebel water te benaderen.

5.3.2 In situ toepassing

Het tweede deel van het onderzoek vindt plaats bij het Afleidingskanaal op 6 april 2018, waarbij de FLIR One Pro opnames maakt op verschillende plaatsen van het onderzoeksgebied (zie figuur 5.6 op de volgende pagina). Hier worden zowel foto's als video's gemaakt. Het doel van deze veldwerkdag is om na te gaan of temperatuurverschillen bij het Afleidingskanaal duidelijk en betrouwbaar zijn vast te leggen met dit meetinstrument. Een temperatuursonde wordt gebruikt om na te gaan of de metingen overeenkomen met een

betrouwbaar en gekalibreerd instrument. Ook wordt op vier plaatsen gekeken of de temperatuur aan het wateroppervlak overeenkomt met de temperatuur op andere dieptes van de watergang (zie bijlage 11). Dit dient om te kunnen bepalen of de opnames van de FLIR One Pro representatief zijn voor de watergang in zijn geheel. Volgens Schott (1979) kan de watertemperatuur namelijk verschillen op verschillende dieptes bij kleinschalige watergangen.

Voor dit deelonderzoek is het Afleidingskanaal gekozen, omdat het een interessante samenstelling van afvoerwater heeft. In het begin van de 20^e eeuw werd het hoogveen ontgonnen in het Peelgebied. Meteen werden intensieve ontwaterings- en afwateringssystemen aangelegd, waardoor water niet of nauwelijks vastgehouden werd. Hierdoor was het afvoerpatroon van neerslag heel direct en sterk verdeeld: droge zomers en sterke piekafvoeren in de winter. In de jaren 80 zijn ingrepen uitgevoerd, waardoor de Loobek gevoed werd met Maaswater uit de Helenavaart. In die tijd werden eveneens grootschalige drainages aangebracht voor de landbouwsector (Verlinden & Visman, 2004).



Figuur 5.6. Pijlen geven stromingsrichtingen aan. Rode cirkel, locatie van figuur 5.9.

Volgens onderzoeksrapport 'Ontwerp projectplan Waterwet Loobek' (2016) van Waterschap Limburg wordt het noordelijk gelegen Afleidingskanaal gevoed door zowel gebiedseigen grondwater en regenwater, als door gebiedsvreemd water van het Peelkanaal vanuit de Noord-Brabantse Vredepeel. Inmiddels is het volledig eigendom van Waterschap Limburg en bestaat het uit genormaliseerde waterlopen die gevoed worden door riooloverstorten. Dit heeft tot gevolg dat piekafvoeren plaatsvinden die een negatieve invloed hebben op de waterkwaliteit. Het waterlichaam behoort tot KRW-type R5 (langzaamstromende middenloop/benedenloop op zand). Op provinciaal niveau heeft het gebied een Specifieke Ecologische Functie (SEF) toegewezen gekregen. Uit diverse metingen over een langere termijn blijkt dat verbeteringen voor waterkwaliteit gewenst zijn, omdat metingen uitwijzen dat de stikstof- en fosfaatgehalten de strengere normen van 2015 - 2021 overstijgen (Waterschap Limburg, 2018).

5.3.3 Temperatuuropmes vanuit drone

De tweede veldwerksessie bij de Lollebeek op 10 april 2018 heeft naast de opnames met de Parrot Sequoia eveneens opnames gemaakt met de FLIR One Pro en de smartphone eraan bevestigd (zie figuur 5.7). De applicatie is ingesteld zodat de schaal van temperatuur zichzelf aanpast tijdens de vlucht. De opnames bestaan uit videobeelden, zodat achteraf de juiste, bruikbare beelden geëxtraheerd kunnen worden. De rastergrootte van de resultaten is vergelijkbaar met die van de reguliere sensoren van een drone: hoe hoger de drone vliegt, hoe groter de oppervlakte is die een pixel vertegenwoordigt. Tabel 5.1 benadert de rastergroottes van de resultaten op basis van de verschillende vlieghoogtes, gebaseerd op vergelijking 5.

Tabel 5.1

Rastergroottes als gevolg van de vlieghoogte

Vlieghoogte (m)	Raster- grootte (m)
10	0,07
20	0,13
30	0,20
40	0,26
50	0,33
60	0,39
70	0,46
80	0,52



Figuur 5.7. Kartonnen montageconstructie.

Vergelijking 5. Bepaling van rastercelgrootte o.b.v. vlieghoogte en aantal pixels.

$$\text{Rastercelgrootte} = \frac{\tan(0,5 * 55^\circ) * \text{vlieghoogte}}{0,5 * \text{Aantal pixels in breedte}}$$

Hierin is een denkbeeldige driehoek opgesteld waarin de rastercelgrootte wordt afgeleid uit de vlieghoogte, het aantal pixels in de breedte en de hoek van de camera-opname (55°) (ivy Tools, z.d.). Hierbij is de aanname gemaakt dat iedere pixel dezelfde oppervlakte vertegenwoordigt, maar dit zal kleine afwijkingen hebben in de werkelijkheid, omdat de pixels recht onder de camera een kleinere oppervlakte dekken dan de pixels richting de randen.

5.4 Resultaten pilotstudy warmtebeelden FLIR One Pro

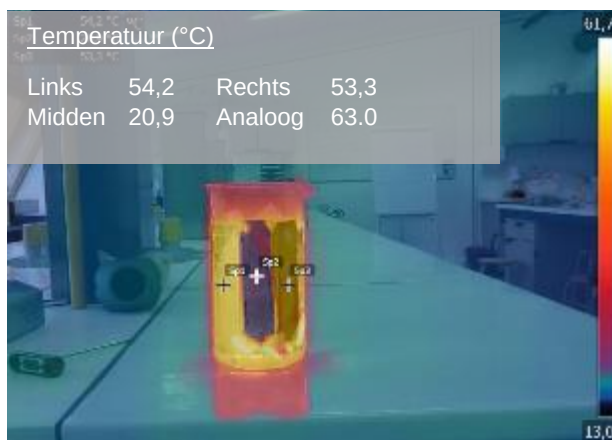
5.4.1 Laboratorium toepassing

Het tafelmodel is uitgevoerd waarbij meerdere foto's zijn genomen. Figuur 5.8 op pagina 36 laat een bewerkt resultaat zien, waarbij de schaal is aangepast en waarbij thermische beelden gecombineerd zijn met de reguliere foto-beelden. Te zien is een kleurenpalet met een afgebakende schaal en tien meetwaarden met bijbehorende waarden. Tot slot zijn de waargenomen temperaturen handmatig toegevoegd die gemeten zijn met een analoge thermometer met een nauwkeurigheid van één decimaal. Uit deze resultaten is af te lezen dat op kamertemperatuur de temperatuur van het water niet nadrukkelijk waargenomen wordt, omdat deze gelijk is aan een groot deel van de omgeving. De invloed van dit deel van de watergang is echter zeer duidelijk te zien: van punt Sp7 is duidelijk te zien dat de kleur verandert en vervolgens nagenoeg gelijk blijft. Daarnaast is af te lezen uit de kolommen linksboven dat de resultaten van de FLIR One Pro redelijk in de buurt komen van de waargenomen temperaturen van de thermometer. De analoge thermometer meet slechts enkele graden lager dan de FLIR One Pro.

Op de resultaten van de maatcilinder met opgeplakte materialen is duidelijk is te zien dat aluminiumfolie (middelste) zich duidelijk anders gedraagt dan het verpakkingsmateriaal (rechts) of het glas zelf (links). De temperaturen die de FLIR One Pro waarneemt verschillen bij hogere temperaturen blijkbaar sterker dan bij lagere temperaturen, want het resultaat laat zien dat de resultaten sterk afwijken van de analoog gemeten 63°C.

De resultaten van de laatste proef lijken in eerste instantie sterk te verschillen. De maatcilinders zijn gevuld met helder water (links) en troebel water (rechts). De kleuren verschillen enigszins, maar uit de waarden valt af te leiden dat ze toch in de buurt komen van de daadwerkelijke temperatuur. Troebel water levert een lichte afwijking naar boven, en helder water naar beneden. Eveneens is te zien dat het heldere water de achtergrond laat doorschijnen, waardoor de achtergrond ook wordt meegenomen in de temperatuurwaarden. Opmerkelijk zijn de weerkaatsingen onder de maatcilinders: te zien is dat de FLIR One Pro de weerkaatste straling op de tafel opvat als een warmte uitstralend object. Dit is een foutieve weergave. Wellicht komen soortgelijke situaties ook voor bij watergangen, omdat wateroppervlaktes eveneens straling vanuit de omgeving weerkaatsen.

Remote sensing van regionale watergangen



Figuur 5.8. Resultaten van het zandbakmodel. Bewerkt in applicatie 'Flir Tools'.

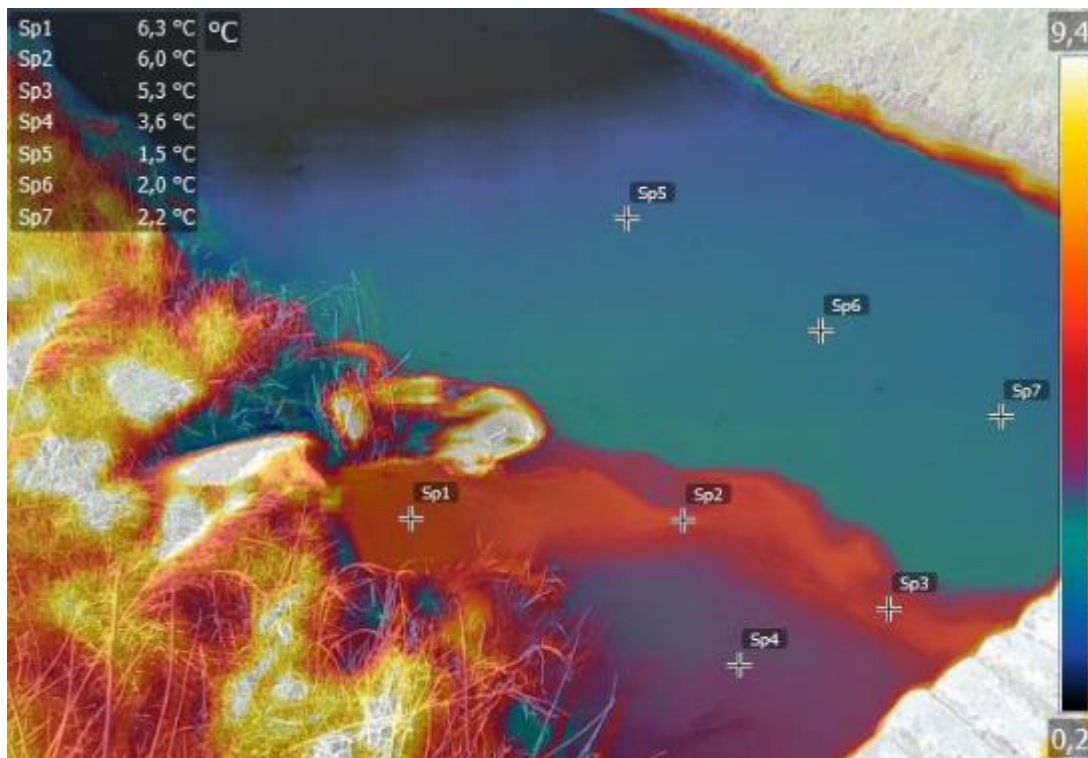
5.4.2 In situ toepassing

De toepassing van de FLIR One Pro in het onderzoeksgebied bij de Lollebeek en het Afleidingskanaal is uitgevoerd op 6 april 2018. De beelden leveren resultaten waarin de warmere bronnen duidelijk te zien zijn. Figuur 5.9 op pagina 38 laat een meting zien waar een watergang vanuit het RWZI uitkomt op de Loobeek, nabij het Afleidingskanaal (zie figuur 5.6, pagina 33, rode cirkel). Bij dit punt zijn eveneens temperatuurmetingen vanaf de brug met een sonde gemaakt om na te gaan of de oppervlaktetemperatuur kenmerkend is voor de volledige watergang (zie Bijlage 12). De variatie op verschillende dieptes is minimaal (geen verschil, gemeten met één decimaal getal), maar duidelijk is te zien dat de schaal van de FLIR One Pro sterk afwijkt van de metingen van de temperatuursonde. Zo liggen de waarden van de FLIR One Pro tussen $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en $\pm 6,5^{\circ}\text{C}$ en die van de sonde tussen de $\pm 9,5^{\circ}\text{C}$ en $\pm 10,5^{\circ}\text{C}$.

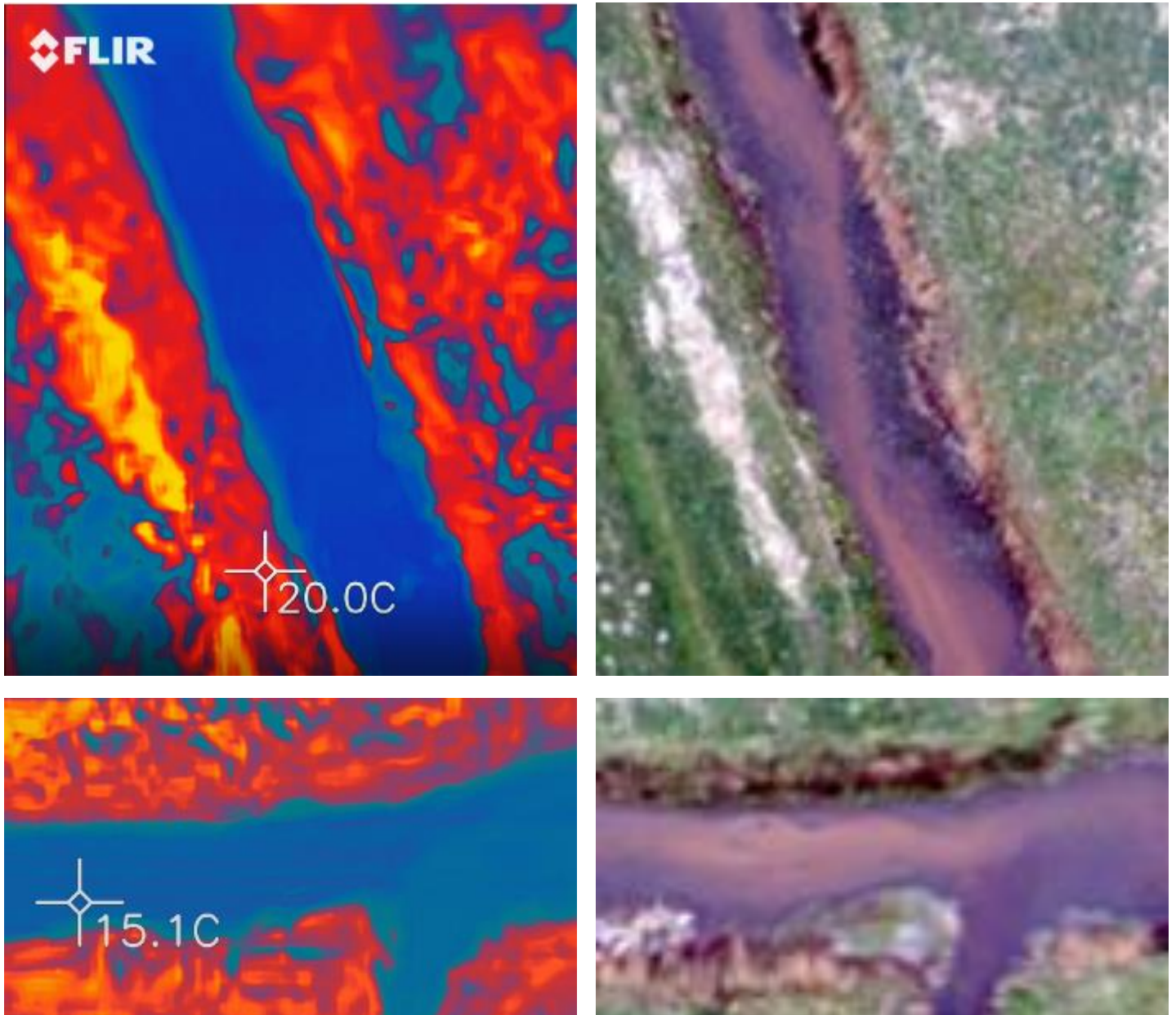
5.4.3 Temperatuuroptnames vanuit drone

Een screenshot van de videobeelden is weergegeven in figuur 5.10 op pagina 39. De opnames zijn gemaakt vanuit de drone met een vlieghoogte van 40m. De Lollebeek wordt opmerkelijk kouder weergegeven dan de begroeide oevers. Deze watergang heeft weinig verschil in temperatuur, maar wel is te zien dat de oevers enigszins warmer zijn (lichtblauw) dan het midden van de watergang (donkerblauw). Uit de videobeelden is eveneens af te leiden dat de Diepeleng, die uitmondt in de Lollebeek (onderste figuren), warmer water toevoegt aan de Lollebeek. De oevers zijn een stuk warmer. Hierdoor is het bereik van de temperatuurschaal vrij groot, zodat de relatief kleine temperatuurverschillen van het water minder duidelijk naar voren komen. Toch is te zien dat het mogelijkheden voor toekomstig onderzoek biedt, bijvoorbeeld door van tevoren de schaal vast te stellen op een klein bereik.

Remote sensing van regionale watergangen



Figuur 5.9. Beeldresultaat van de FLIR One Pro. Warmer water uit de Venrayse Spurkt mondt uit in de Loobeek. Bewerkt in 'FLIR Tools'. Deze foto is westelijk gericht (zie rode cirkel in figuur 5.6 voor de locatie).



Figuur 5.10. FLIR One Pro opnames vanuit de drone. Schaal en noordrichting zijn onbekend.

5.5 Voordelen en nadelen

De toepassingen van de FLIR One hebben duidelijk gemaakt wat de voor- en nadelen zijn van dit apparaat. In deze paragraaf zijn deze opgesomd op basis van eigen bevindingen van zowel het laboratorium als het veldwerk.

5.5.1 Voordelen

Detailniveau

De resultaten van de FLIR One laten zien dat kleine temperatuurverschillen waargenomen kunnen worden. Op één afbeelding van een watergang kan duidelijk te zien zijn dat er lozingen met warmer water plaatsvinden. Hierbij wordt zelfs de stroming van het warme water zichtbaar indien video-opnames gemaakt worden. De resultaten kunnen achteraf nog uitgebreid geanalyseerd worden met de bijgeleverde software, zodat details van lozingen verder inzichtelijk gemaakt kunnen worden.

Praktisch

Het apparaat is handzaam, waardoor het eenvoudig meegenomen kan worden in het veld. Anders dan bij een zware koffer met sondes, kan dit apparaat zonder problemen meegenomen worden bij een lange wandeling naar afgelegen gebieden.

Brede inzetbaarheid

Uit eigen bevindingen is gebleken dat het apparaat ook toepasbaar is bij waarnemingen vanuit de lucht. Het apparaat kan bevestigd worden aan een drone, zodat de metingen meteen een grootschaligere toepassing krijgen. Mogelijk kan het apparaat ook gebruikt worden tijdens vluchten met een helikopter of vliegtuig. Volgens Zwart (2018) is de afdeling 'handhaving' van Waterschap Limburg altijd op zoek naar manieren om hun bevindingen te presenteren aan publiek. De FLIR One maakt het mogelijk om resultaten te leveren die weinig toelichting behoeven, waardoor het interessant is voor presentaties aan het publiek.

Dynamiek

Bij reguliere temperatuurmeetmethodes zit altijd enige tijd tussen het gebruik van het meetinstrument en het verkrijgen van een resultaat. Zo kan een temperatuurprofiel van een dwarsdoorsnede niet gebaseerd zijn op metingen op één moment, tenzij op één moment meerdere sondes gebruikt worden. De FLIR One levert meteen resultaten en temperaturen over het gehele beeld. Hierdoor kan tijdens de opnames veel eenvoudiger achterhaald worden waar het warme water vandaan komt, dat het uit meerdere bronnen komt of dat het slechts tijdsgebonden lozingen zijn.

5.5.2 Nadelen

Oppervlaktetemperatuur

De resultaten van de FLIR One zijn gebaseerd op slechts de oppervlakte van het waterlichaam. Dit heeft mogelijk als nadeel dat lozingen vanuit een grotere diepte mogelijk niet waar te nemen zijn bij de bron zelf, maar slechts verder stroomafwaarts als het warme water al deels is afgekoeld.

Relatieve temperatuur

Uit zowel laboratoriumproeven als literatuurstudies is gebleken dat de metingen slechts relatieve temperatuurverschillen meten, en dat ze niet accuraat overeenkomen met geijkte thermometers. Hierdoor moeten de resultaten altijd relatief opgevat worden: ze geven slechts aan waar water warmer of kouder is en niet welke temperatuur het water daadwerkelijk heeft. Dit heeft als nadeel dat de temperatuuropnames niet bruikbaar zijn in databases (spreadsheets) voor waterkwaliteit, omdat de resultaten van de FLIR One niet

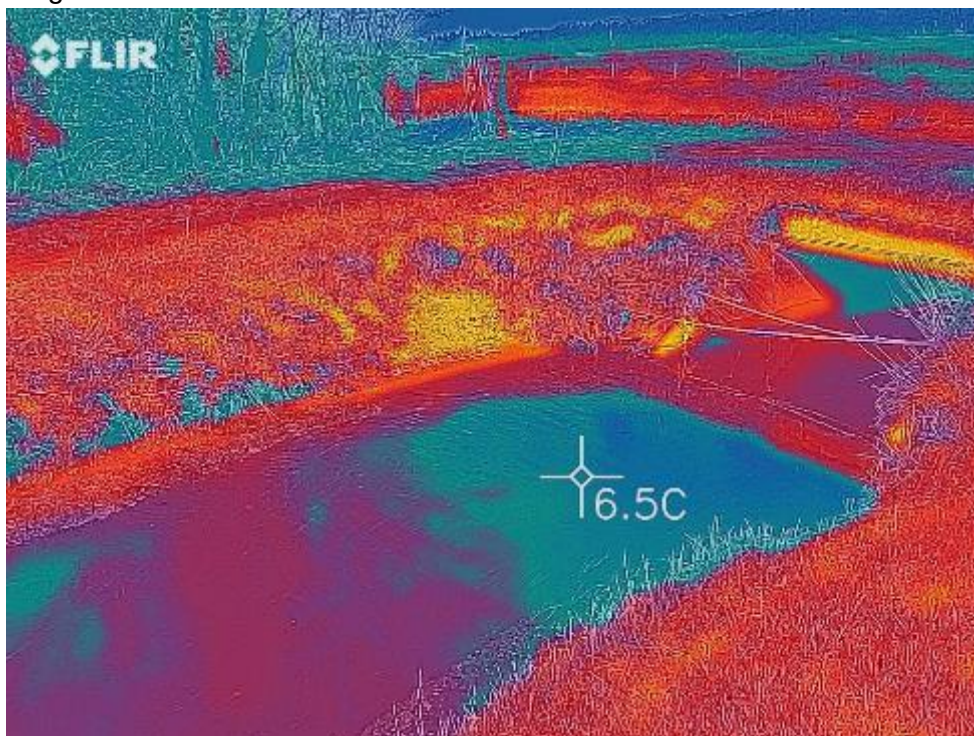
omgezet kunnen worden naar cijfers. Dit is wel mogelijk met metingen van temperatuursondes.

Afhankelijk van watereigenschappen

Uit laboratoriumproeven is gebleken dat de waarnemingen van de FLIR One afhankelijk zijn van andere eigenschappen van water. Zo levert een verschil in troebelheid andere resultaten op. In de praktijk kan dit een vertekend beeld geven. Indien troebel, warm water geloosd wordt in helder, koud water, dan zou de FLIR One Pro dit kunnen interpreteren als wateren met dezelfde temperatuur.

Gereflecteerde straling

De laboratoriumproef met de maatcilinders heeft aangetoond dat de weerspiegeling van warme objecten wordt vastgelegd alsof de spiegeling vanuit het materiaal zelf komt. Dit geeft een vertekend beeld, waardoor dit meegenomen dient te worden als zwakte van de meetmethode. In figuur 5.11 is duidelijk te zien dat de naastgelegen bomen voor vertekening zorgen.



Figuur 5.11. Warmtebeeld toont gereflecteerde straling van bomen uit de omgeving

Gebruiksgemak

Tijdens de laboratorium- en veldwerksessies werd duidelijk dat het gebruik van de app enige gebruikservaring behoeft. Er zijn veel opties beschikbaar, maar van tevoren moet duidelijk zijn wat de gebruiker graag als product wilt krijgen. Daarnaast is uit eigen ervaring gebleken dat de videofunctie instabiel is: meerdere keren viel de applicatie uit en diende deze opnieuw opgestart te worden. Ook is enige tijd nodig om de temperatuurschaal goed te krijgen en vast te zetten. Het apparaat is daarnaast vrij kwetsbaar en de kans is groot dat deze schade oploopt als hij vaak gebruikt wordt bij veldwerk. Zo zit het apparaat niet stevig vast aan de telefoon en komen er eenvoudig vlekken op de lens. Tot slot is de batterijduur een nadeel, omdat deze maximaal 40 minuten aan staat. Bij een indicatie van een lage batterijwaarde, valt het apparaat al uit. Hierdoor is het niet geschikt om een hele dag achtereen te gebruiken.

6 Discussie

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de uitgevoerde deelonderzoeken, de resultaten die daaruit voortkwamen en enkele opmerkingen over de toegepaste onderzoeksmethodieken. Op deze wijze wordt er een oordeel gegeven over de betrouwbaarheid en validiteit van de deelonderzoeken. Er wordt hierbij de nadruk gelegd op de twee pilotstudies: troebelheidsbepaling met de multispectraalcamera en het meten van warmte met de warmtebeeldcamera.

6.1 Validiteit van het regressiemodel en troebelheidskaart resultaten

6.1.1 Verwijderen van uitschieters

In de data-analysefase werden regressiemodellen gebouwd om de troebelheid te voorspellen op basis van de multispectraalbeelden. Het verwijderen van drie uitschieters (w2, w4 en w7) blijkt een betere significantie te geven voor bepaalde bandcombinaties. In feite liggen de verwijderde punten binnen het bereik van de bemonsterde troebelheid (11 - 19 NTU) met 14 NTU (w2), 17 NTU (w4) en 11 NTU (w7) en mogen niet beschouwd worden als uitschieters. Daarnaast is een regressiemodel met slechts zeven validatiepunten niet geheel representatief voor het onderzoek. Er is echter geen vaste regel voor de hoeveelheid validatiepunten dat genomen moet worden om een representatief regressiemodel te bouwen. Het opnemen van meerdere bemonsteringspunten zou het model wellicht betrouwbaarder maken. In deze pilotstudy is uit praktische overweging gekozen om slechts op tien punten de troebelheid te bemonsteren.

6.1.2 Zandbanken in de troebelheidskaart

Volgens S. Farooq (z.d.) kunnen er drie 'reflectiesoorten' van een waterlichaam onderscheiden worden: speculaire reflectie (weerkaatsing), bodemreflectie en volumereflectie. Volumereflectie bevat belangrijke informatie over de samenstelling van het water. Echter, voor diepe (>2 m) en heldere waterlichamen is de volumereflectie heel beperkt (6 - 8 %). In deze pilotstudy is er sprake van helder en ondiep (< 1m) water. De patronen die in de gegenereerde troebelheidskaart (NTU) (zie bijlage 9) te zien zijn komen overeen met de patronen van de bodemlopen/zandbanken in de RGB-beelden. Dit duidt dus op bodemreflectie. De validiteit van de troebelheidskaart komt hierdoor in het geding.

6.1.3 Betrouwbaarheid laboratoriumanalyses

De troebelheid watermonsters werden geanalyseerd volgens de EPA 180.1 (NTU) methode. Hierbij is licht gebruikt tussen 400 en 680 nm om de verstrooiing als gevolg van de stoffen in het water te bepalen. De banden van de multispectraalcamera (550 - 790 nm) vallen gedeeltelijk binnen dit bereik. De verstrooiing van licht is afhankelijk van de intrinsieke eigenschappen (deeltjesgrootte en vorm) van het watermonster. Volgens een onderzoek van Shafiee et al. (2014) kunnen grote deeltjes voor een kleine hoek van verstrooiing zorgen, maar kleine deeltjes juist voor een grote hoek. In de EPA 180.1 methode wordt gebruikt gemaakt van een detectiehoek van 90°. Dat wil zeggen dat de sensor de verstrooiing van het licht niet optimaal kan waarnemen als er te veel kleine deeltjes zijn in het watermonster.

Er is echter niet onderzocht in hoeverre de grootte van de deeltjes effect heeft op de meting. Als er verondersteld wordt dat slechts zwevende stoffen voor troebelheid zorgen, zouden in de troebelheidsanalyse alleen deeltjes groter dan 2 µm aanwezig zijn. In werkelijkheid kunnen ook deeltjes kleiner dan 2 µm (bijv. lutum) voor lichtverstrooiing in het watermonster zorgen.

6.1.4 Betrouwbaarheid data acquisitie

De dronebeelden van het veldwerk werden aan elkaar gerekend tot kaarten met de Pix4D Mapper beeldverwerkingssoftware. De kans op vertekeningen (Engels: *ghost effect*) in de resulterende kaarten is groot als er veel bewegingen zijn in de ruwe beelden. In deze pilotstudy wordt verondersteld dat zwevende stoffen in het water niet beïnvloed worden door de stroming van het water, en dat de samenstelling van de beek dus homogeen is over het gehele traject.

In werkelijkheid zou een lokale piekafvoer, als gevolg van bijvoorbeeld een puntlozing op dat moment, een lading aan stoffen kunnen vervoeren. Dit moment zou vastgelegd kunnen worden door de multispectraalcamera maar wellicht niet tijdens de bemonstering of andersom. De bemonstering en vliegmissie zijn niet synchroon (tijdsverschil van circa één uur) uitgevoerd, waardoor zulke momentane piekafvoeren de resultaten kunnen beïnvloeden.

6.2 Pilotstudy: FLIR One Pro watertemperatuur meten

6.2.1 Opnames bij kamertemperatuur

De laboratoriumproeven zijn uitgevoerd in een gesloten ruimte, op kamertemperatuur en met kunstlicht. Dit wijkt af van de praktijktoepassing in het veld waar het onderzoek voor bedoeld is. De mogelijkheid bestaat dat de resultaten hierdoor vertekend zijn.

6.2.2 Opgeplakte strips nemen niet de temperatuur volledig over

Bij het laboratoriumonderzoek waarbij de maatcilinders voorzien zijn van twee verschillende materialen, is het mogelijk dat er lucht van buitenaf tussen het materiaal en de maatcilinder is gekomen. Hierdoor nemen deze materialen niet dezelfde temperatuur over van de maatcilinder, waardoor de gemeten verschillen mogelijk (deels) hieraan te relateren zijn.

6.2.3 Maatcilinders met troebelheid zijn extremen

De laboratoriumproef met de maatcilinders met een verschil in troebelheid heeft weinig overeenkomst met praktijksituaties. Het heldere kraanwater heeft helemaal geen troebelheid, terwijl het troebele water helemaal geen doorzicht heeft. In het veld komt dit niet of nauwelijks voor, waardoor deze proef vrij ver af staat van de praktijktoepassingen.

6.2.4 Schaalverdeling vastzetten voor dronevlucht

Op de afbeeldingen van de FLIR One Pro aan de drone is te zien dat de schaal breed is ingesteld. Dit is gebaseerd op het warmere naastgelegen land. Hierdoor zijn de verschillen in temperatuur van het water minder duidelijk weergegeven. Indien de schaal bij voorbaat was vastgelegd dan waren de beelden waardevoller geweest.

7 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de hoofd- en deelvragen. Vervolgens worden enkele aanbevelingen gegeven over potentiële vervolgonderzoeken met betrekking tot optische remote sensing.

7.1 Conclusie

Dit onderzoek werd uitgevoerd om uit te zoeken in hoeverre optische remote sensing een meerwaarde biedt om de waterkwaliteit in regionale watergangen te bepalen. Op basis van de twee uitgevoerde deelonderzoeken van de Parrot Sequoia multispectraalcamera en de FLIR One Pro warmtebeeldcamera komt het onderzoek tot de conclusie dat commerciële optische remote sensing instrumenten in zekere mate een meerwaarde kunnen leveren om de waterkwaliteit te bepalen in regionale watergangen. Er zijn echter enkele kanttekeningen te maken over de toepassing van deze instrumenten.

Volgens de literatuurstudie behorend tot deelonderzoek A is de multispectraalcamera in staat om troebelheid -een maatstaf van zwevende stof- vast te leggen met behulp van de golflengtes tussen rood en NIR. Troebelheid is te bepalen volgens de EPA 180.1 (NTU) methode. In deze methode wordt de mate van verstrooiing van licht, als gevolg van deeltjes in het water, tussen de golflengte blauw en rood gemeten. Een pilotstudy in de Lollebeek werd uitgevoerd om te onderzoeken of troebelheid en zwevende stof bepaald kunnen worden met de Parrot Sequoia multispectraalcamera. Uit de resultaten blijkt dat er geen verband ($R^2 < 0,26$ en P-waarde $> 0,14$) is tussen remote sensing data van de dronebeelden en de troebelheid uit laboratoriumresultaten. Tevens is er geen relatie gevonden tussen de troebelheid en zwevende stof laboratoriumresultaten. Het verwijderen van enkele validatiepunten (w2, w4 en w7) heeft enkele regressiemodellen aanzienlijk verbeterd. De Rood/ NIR-bandratio kan circa 83% van de variatie in troebelheid, tussen 14 en 19 NTU, voorspellen. Van dit model is een troebelheidskaart afgeleid. Echter de patronen in de troebelheidskaart komen overeen met de bodemlopen/zandbanken in de RGB-referentiekaart. Dit leidt tot de bevinding dat de troebelheid en zwevende stof in een al relatief helder en ondiep water (< 1 m) niet bepaald kunnen worden met een multispectraalcamera.

In het tweede deelonderzoek zijn warmtebeelden gemaakt met behulp van de FLIR One Pro. Hiermee zijn opnames gemaakt bij watergangen van het Afleidingskanaal. Daarnaast is met dit apparaat geëxperimenteerd in het laboratorium, waarbij gekeken is naar verschillende omstandigheden en de nauwkeurigheid van het apparaat. Tot slot is een experimentele opzet gemaakt door de telefoon met de FLIR One Pro te bevestigen aan een drone. Uit de resultaten is gebleken dat de FLIR One Pro duidelijk temperatuurverschillen laat zien. Relatief kleine verschillen zijn al waarneembaar en de interface geeft veel mogelijkheden om de beelden te optimaliseren, zowel in situ als achteraf. Uit het veldwerk van 6 april 2018 is gebleken dat puntlozingen vanuit een warmere bron duidelijk worden vastgelegd met dit apparaat. Het apparaat heeft echter ook een aantal beperkingen, waardoor het belangrijk is om de vastgelegde beelden kritisch te bekijken. Voornamelijk het feit dat het apparaat de oppervlaktetemperatuur meet en dat het verschillende resultaten geeft bij een variërende troebelheid kan in de praktijk zorgen voor beperkingen van deze meetmethode. De slotconclusie van dit deelonderzoek is dat de FLIR One Pro wel degelijk een meerwaarde biedt voor het monitoren van waterkwaliteit. Waterschap Limburg heeft veel te maken met onderbemaling en puntlozingen vanuit de landbouwsector op hun watergangen, zodat de waterkwaliteit in het gedrang komt. Het monitoren van deze gebeurtenissen is een belangrijk onderdeel van de afdeling 'handhaving'. Zij kunnen deze of soortgelijke apparatuur toepassen bij hun helikopters of vliegtuigen, zodat ze de problematiek rond waterkwaliteit beter onder controle krijgen.

7.2 Aanbevelingen

7.2.1 Vervolgonderzoek op troebelheid en zwevende stof bepaling met een multispectraalcamera

Op basis van de getrokken conclusies kunnen enkele aanbevelingen gemaakt worden voor mogelijk vervolgonderzoek. Uit de resultaten van de multispectraalcamera is af te leiden dat troebelheid in ondiepe wateren onbetrouwbaar vast te leggen is. Het is aan te bevelen om dit soort toepassingen alleen in te zetten op diepere watergangen en oppervlaktewateren, of op enigszins troebelere watergangen zoals de Loobeeek. De referentiewaardes van troebelheid zijn genomen door een extern bedrijf, waardoor het enige tijd heeft geduurd voordat de resultaten bekend werden gemaakt. Er zijn sondes op de markt te vinden die in situ de troebelheid bepalen (Eijkelkamp, z.d.). Dergelijke apparatuur is aan te raden bij vervolgonderzoek, omdat dan een dwarsdoorsnede-profiel gemaakt kan worden.

7.2.2 Hyperspectraalopnames om andere soorten waterkwaliteitsindicatoren te bepalen

De mogelijkheden met multispectrale remote sensing technologieën zijn beperkt tot enkele banden. Daardoor is het niet mogelijk om andere waterkwaliteitsindicatoren naast troebelheid te bepalen. Wellicht bieden hyperspectrale remote sensing technologieën kansen om meerdere waterkwaliteitsindicatoren en spectrale banden te kunnen meten. Voorbeelden van waterkwaliteitsindicatoren die bepaald kunnen worden met hyperspectrale technologieën zijn: chlorofyl-A, opgeloste gekleurde organische stoffen (CDOM) en blauwalgen. In tabel 1 van bijlage 1 worden enkele hyperspectrale remote sensing technologieën beschreven die deze waterkwaliteitsindicatoren kunnen bepalen. De WISP-3 is bijvoorbeeld een handheld remote sensing instrument dat in-situ en direct de genoemde waterkwaliteitsindicatoren kan vastleggen van oppervlaktewater. Daarnaast is er de Rikola hyperspectraalcamera die in staat is om tot wel 50 hyperspectraalbeelden te kunnen maken per opname.

7.2.3 Drone en FLIR One Pro combi

De FLIR One Pro is een uitstekend toestel om temperatuurverschillen van oppervlaktewater waar te nemen. Met een prijskaartje van circa 400 euro (exclusief smartphone) is deze warmtebeeldcamera zeer voordelig in tegenstelling tot professionele warmtebeeldcamera's die vaak in de 10.000-20.000 euro prijsklasse vallen. Het is mogelijk om de warmtebeeldcamera (en smartphone) onder een drone te monteren en warmtevideo's te laten opnemen. Tijdens de dronevlucht is de gebruiker helaas niet in staat om aanpassingen te maken aan de instellingen (live-view, bereik, inzoom etc.) van de warmtebeeldcamera.

Onlangs is er op de markt een nieuwe Parrot Bebop drone en FLIR One Pro combi (zie figuur 7.1) ontwikkeld door de bedrijven Parrot en FLIR. De drone en warmtebeeldcamera combi heeft een prijskaartje van 1800 euro. Voor die prijs heeft de gebruiker een FLIR One Pro en een Parrot Bebop drone die werken als één systeem. De besturing (zie figuur 7.2) gebeurt met een tablet/ smartphone (niet inbegrepen in de prijs) waarvoor een nieuwe applicatie is ontwikkeld om aanpassingen aan de warmtebeeldcamera en de drone te kunnen maken. De drone heeft tevens een standaardcamera (RGB-camera) waarmee de gebruiker kan zien wat de warmtebeeldcamera in feite vastlegt.

De Parrot Bebop drone en FLIR One Pro combi zou voor het waterschap een ideale methode kunnen zijn om de temperatuurverschillen in kleinschalige watergangen vast te leggen op een voordelige en gebruiksvriendelijke manier.

Remote sensing van regionale watergangen



Figuur 7.1. Parrot drone en FLIR One Pro combi. (Parrot, z.d.)



Figuur 7.2. De besturing en de tablet (niet inbegrepen) met de FreeFlight Thermal applicatie. (Parrot, z.d.)

8 Reflectie

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de persoonlijke ervaringen van de auteurs met betrekking tot het afstudeeronderzoek. Er wordt tevens gereflecteerd op het functioneren van de auteurs in de groep, wat er goed en slecht ging gedurende de afstudeerperiode en wat zij in die tijd geleerd hebben. Dit hoofdstuk voegt geen meerwaarde toe aan de afstudeerscriptie en het hele onderzoek.

8.1 Reflectie William Tjong

Met dit afstudeeronderzoek heb ik mijn kennis op het gebied van remote sensing en GIS weten te verbreden. Het afstudeeronderwerp is niet geheel nieuw voor mij, omdat ik tijdens mijn stages al in aanraking ben gekomen met remote sensing technologieën en het onderwerp waterkwaliteit. In dit afstudeeronderzoek heb ik de kennis en ervaring die ik gedurende mijn stages heb opgedaan goed kunnen toepassen.

Samenwerking met medestudent

Gedurende de afstudeerperiode was de samenwerking met de medestudent naar mijn mening goed verlopen. Wij zijn allebei enthousiast over het afstudeeronderwerp en konden goed elkaars werk beoordelen. Zodoende wisten wij elkaar aan te vullen of te verbeteren waar dat nodig was. Verder vind ik het fijn dat de medestudent heel flexibel en gemotiveerd is om nieuwe dingen te leren. Wij hebben bijvoorbeeld besproken om een webapplicatie te ontwerpen om meer waarde uit ons afstudeerperiode te halen. De applicatie is geen vereiste voor de afstudeeropdracht maar biedt wel een creatieve bijdrage aan de presentatie van onze onderzoeksresultaten.

Uitvoering afstudeeropdracht

Persoonlijk vond ik de uitvoering van onze afstudeeropdracht matig. Dit kwam deels omdat bepaalde onderwerpen binnen ons afstudeeropdracht buiten ons vakgebied liggen. Daarnaast waren wij afhankelijk van externe partijen als het gaat om het huren/ lenen van remote sensing instrumenten en uitvoeren van het veldwerk. Hierdoor vond ik het lastig om gedurende het onderzoek de hoofdlijnen van het onderzoek vast te stellen en de planning goed na te lopen. Uiteindelijk wisten wij de middenweg te nemen om toch met weinig risico en beperkte middelen die wij hadden een redelijk kwantitatief onderzoek te kunnen uitvoeren.

Communicatie met begeleiders

De communicatie met de opdrachtgever ging prima. Wij hebben een aantal weken voordat de afstudeerperiode begon al regelmatig contact opgenomen met de opdrachtgever om de invulling van onze afstudeeropdracht te bespreken. Gedurende de afrondingsfase werd de communicatie met de opdrachtgever minder. Misschien zou het voor ons beter zijn geweest om in die fase de stand van zaken frequenter aan te geven en daarvoor feedback te vragen. Tegenover onze interne begeleider was het wellicht ook meer gepast om vaker feedback te vragen over ons werk.

Opstellen scriptie

Het opstellen van de scriptie heeft ons veel moeite gekost. Wij hebben gedurende de afstudeerperiode meerdere keren de deelvragen, structuur en inhoud van de scriptie moeten aanpassen. Dit komt voornamelijk doordat wij niet zeker wisten welk instrument wij wilden en konden onderzoeken. Wij hebben uiteindelijk voor de minst risicovolle instrumenten gekozen om pilotstudies te kunnen uitvoeren. Hiervoor hebben wij het onderzoek in twee deelonderzoeken moeten opdelen op basis van de warmtebeeldcamera en

multispectraalcamera. Ik vond het daardoor toch lastig om de hoofdlijnen en structuur van de scriptie goed voor de lezers op te stellen. Volledig richten op de multispectraalcamera deelonderzoek was geen optie omdat het waterschap tevens graag te weten willen komen over de toepassing van de warmtebeeldcamera. Ten slotte kunnen wij met de multispectraalcamera meer data uit halen en analyseren dan de warmtebeeldcamera. Hierdoor zijn de twee deelonderzoeken niet in evenwicht.

8.2 Reflectie Bart Tromp

Dit is het eerste onderzoeksproject waarin ik vanaf het afbakenen tot en met het afronden en presenteren deel van heb uitgemaakt. Voorheen waren de doelen en onderzoeksonderwerpen reeds afgebakend, maar voor dit onderzoek heb ik hier ook zelf deel van uitgemaakt. Dit is voor mij zeer leerzaam geweest, omdat het me veel heeft bijgebracht over het organiseren en het in de gaten houden van de planning en samenhang.

Samenwerking met medestudent

Meer dan een half jaar heb ik samengewerkt met Willy Tjong. Hij is erg gemotiveerd en heeft ook veel parate kennis op het gebied van remote sensing. We hebben elkaar op veel punten kunnen aanvullen en corrigeren. Hiermee hebben we een betrouwbaarder en creatiever eindproduct kunnen leveren. De nadruk binnen de opdracht hebben we verdeeld, zonder elkaars werk uit het oog te verliezen. Dit zie ik als sterk punt van onze samenwerking, omdat we beide de totstandkoming van alle eindproducten hebben meegemaakt.

Uitvoering afstudeeropdracht

Iedere dag hebben we samengewerkt op Hogeschool Van Hall Larenstein. In het begin was het aftasten en we wilden aanvankelijk een heel brede opzet van remote sensing en waterkwaliteit. Dit hebben we moeten aanpassen, zodat we duidelijk afgebakende, haalbare eindresultaten hebben kunnen leveren. Het was vaak zoeken naar een middenweg tussen de gewenste resultaten van het waterschap, en waar onze eigen interesse naar uitgaat. Een nadeel van dit soort onderzoeken is het afhankelijk zijn van derde partijen. Dit resulteerde vaak in het moeten aanpassen van de planning.

Communicatie met begeleiders

De communicatie met de begeleiding binnen Waterschap Limburg ging heel goed. We kregen snel reacties en veel mogelijkheden om te communiceren. Gabriel had daarnaast ook aanvullende ideeën over onderzoeksonderwerpen en hij heeft vanaf het begin duidelijk gemaakt welke onderwerpen en projectgebieden interessant kunnen zijn. Ook heeft hij veel interne contacten, waardoor we vaak snel de juiste personen konden aanspreken. De begeleiding vanuit VHL door Jack Schoenmakers verliep ook prettig. Hij heeft een aantal keren veel tijd voor ons vrijgemaakt, waardoor we zijn feedback konden gebruiken.

Opstellen scriptie

Het schrijven van de scriptie heeft behoorlijk wat uren gekost, maar dat was van tevoren al bekend. Gedurende de gehele afstudeerperiode hebben we kritisch naar ieder hoofdstuk gekeken. Hierdoor hebben we veel weggelaten, verbeterd en aangevuld. Omdat het onderzoek breed is, vereist dit veel aandacht om er toch één geheel van te maken dat leesbaar, georganiseerd is en verband heeft met elkaar. Het samenstellen van de GIS-kaarten heeft mijn vaardigheden op dat gebied verder uitgebreid.

IT-vaardigheden

Voor het onderzoek heb ik veel tijd gestoken in het verwerken van de data in RStudio. Mijn vaardigheden op dit gebied zijn sterk toegenomen. Daarnaast heb ik kennisgemaakt met het maken van webapplicaties met behulp van open source tools voor R.

Bibliografie

- Abraham, C. (2017, Mei 1). *The Units of Spectral Radiance*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Medium: <https://medium.com/hipster-color-science/the-units-of-spectral-radiance-bb97c3b27c6d>
- Adobe. (z.d.). *Grondbeginnselen van afbeeldingen*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Adobe: <https://helpx.adobe.com/nl/photoshop/using/image-essentials.html>
- Advanced Microwave Radiometer*. (z.d.). Opgeroepen op mei 14, 2018, van NASA: https://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/multimedia/radiometer.html
- Aerial Agi Imagery. (z.d.). *About NDRE*. Opgehaald van Aerial Agi Imagery: <http://aerialagimagery.com/NDRE.html>
- Agensi Angkasa Negara. (2012, december 27). *Remote Sensing Technology*. Opgehaald van Agensi Angkasa Negara: <http://www.angkasa.gov.my/?q=en/node/303>
- Allain, R. (2014, december 9). *Testing the accuracy of the FLIR One*. Opgehaald van www.wired.com: <https://www.wired.com/2014/09/testing-accuracy-flir-one/>
- Bampanikos, K. (2016). *Deriving Water Quality Indicators from UAV-based Sensors to Map Natural Water Systems in The Netherlands*. Wageningen: Wageningen University & Research.
- Bampanikos, K. (2016). *Deriving Water Quality Indicators from UAV-based Sensors to Map Natural Water Systems in The Netherlands*. Wageningen: Wageningen University of Research.
- Bampanikos, K. (2016). *Deriving Water Quality Indicators from UAV-based Sensors to Map Natural Water Systems in The Netherlands*. Wageningen: Wageningen University of Research.
- Bustamante, J., Pacios, F., Díaz-Delgado, R., & Aragonés, D. (1991). *Predictive models of turbidity and water depth in the Doñana marshes using Landsat TM and ETM+ images*. *Journal of Environmental Management*.
- Chen, H. (2016). *Monitoring tropical billabong water turbidity using Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) derived imagery*. Darwin: Charles Darwin University.
- Choubey, V. K. (1991). *Correlation of turbidity with Indian Remote Sensing Satellite-1A data*. *Hydrological Science Journal*.
- Climate Challenge. (z.d.). *Het albedo-effect*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Climate Challenge: <http://www.climatechallenge.be/nl/klimaatverandering-woord-en-beeld/wat-is-klimaatverandering/het-broeikaseffect/natuurlijk-broeikaseffect/albedo-effect.aspx>
- Conghe, S. (2008). *Geog 577 Advanced Remote Sensing and Image Processing*. Opgehaald van The University of North Carolina at Chapel Hill: <https://www.unc.edu/courses/2008spring/geog/577/001/>
- Davies-Colley, R. J., & Smith, D. G. (2001). *Turbidity, Suspended Sediment, and Water Clarity: A Review*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association.

- Divame Linga. (z.d.). *De wet van Kirchhoff warmtestraling*. Opgeroepen op mei 10, 2018, van De wet van Kirchhoff warmtestraling: <http://divamelinga.com/category/d/de-wet-van-kirchhoff-warmtestraling.php>
- DJI. (z.d.). *Phantom 4 Specs*. Opgeroepen op mei 16, 2018, van DJI: <https://www.dji.com/phantom-4/info>
- Eijkelkamp. (z.d.). *Sonde AP-7000 SDI-12*. Opgeroepen op mei 16, 2018, van Eijkelkamp: <https://www.eijkelkamp.com/producten/sensors-monitoring/sonde-ap-7000-sdi-12-8204.html>
- Emis Vito. (2011). *Bepaling van vaste stoffen in suspensie. Methode door filtratie op glasvezelfilter*. Opgehaald van Emis Vito: https://esites.vito.be/sites/reflabos/2012/Online%20documenten/WAC_III_D_002.pdf
- Encyclo.nl. (z.d.). *Spectrometer*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Encyclo.nl: <http://www.encyclo.nl/begrip/Spectrometer>
- ESA. (2018, mei 24). *SENTINEL-3 OLCI Introduction*. Opgehaald van ESA: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci>
- ESA. (2018, mei 24). *Spatial Resolution*. Opgehaald van ESA Sentinel Online: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
- Farooq, S. (z.d.). *Spectral Reflectance of Land Covers*. Opgeroepen op Mei 14, 2018, van Department of Geology Aligarh Muslim University: <http://www.geol-amu.org/notes/m1r-1-8.htm>
- Feringa, W., Bakker, W. H., Gieske, A. S., Gorte, B. G., Grabmaier, K. A., Hecker, C. A., . . . Woldai, T. (2001). *Principe of Remote Sensing*. Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).
- FLIR. (z.d.). *12 Things to Consider Before Buying an Infrared Camera*. Opgeroepen op Maart 2, 2018, van Omega: https://www.omega.com/manuals/manualpdf/Flir12_Booklet.pdf
- FLIR. (z.d.). *Flir One Pro datasheet*. Opgeroepen op Maart 3, 2018, van FLIR: https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/17-1746-oem-flir_one_pro_datasheet_final_v1_web.pdf
- Fondriest Environmental, Inc. (2014, september 2). *Measuring Turbidity, TSS, and Water Clarity*. Opgehaald van Fundamentals of Environmental Measurements: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/equipment/measuring-water-quality/turbidity-sensors-meters-and-methods/#TurbidMM2>
- Goodin, D. G., Jr., J. A., Nellis, M. D., & Rundquist, D. C. (2008). *Mapping Reservoir Turbidity Patterns Using SPOT-HRV Data*. Geocarto International.
- Gyorki, J. R. (2009, september 10). *Understanding the Infrared Temperature Sensor*. Opgehaald van Sensor Tips: <https://www.sensortips.com/temperature/infrared-temperature-sensor/>
- Heege, T. (2009, maart 31). *Optical remote sensing*. Opgehaald van Vlaams Instituut Voor De Zee: http://www.vliz.be/wiki/Optical_remote_sensing

- Hensels, J. (2017, december 27). *Kwaliteit Limburgse beken onder de maat*. Opgehaald van De Limburger: https://www.limburger.nl/cnt/dmf20171226_00052881/kwaliteit-limburgse-beken-onder-de-maat
- Humboldt State University. (z.d.). *Radiometric Corrections*. Opgeroepen op Maart 27, 2018, van Humboldt State University: http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson4-1/radiometric.html
- Instrumart.com. (2018, mei 24). *Raytek Raynger ST20 Infrared Thermometer*. Opgehaald van Instrumart.com: <https://www.instrumart.com/products/2270/raytek-raynger-st20-infrared-thermometer>
- Inven. (z.d.). *Wat is troebelheid ?* Opgeroepen op Maart 7, 2018, van Inven: <http://www.inven.nl/iso7027.html>
- IUPAC Compendium of Chemical Terminology . (2008). *Photon Radiance*. Opgehaald van Mcrimeritics: <http://www.micromeritics.com/Repository/Files/photon%20radiance.pdf>
- ivy Tools. (z.d.). *FLIR ONE Pro Thermal Camera - Key features*. Opgeroepen op april 24, 2018, van ivy Tools: <https://www.ivytools.com/flir-one-pro-thermal-camera-p/flir-one-pro.htm>
- JR, J. W., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA special publication.
- Kadaster. (z.d.). *Drone no-fly zones*. Opgeroepen op Mei 2, 2018, van <https://kadata.kadaster.nl/dronekaart/>
- KNMI. (z.d.). *Energiebalans van de aarde*. Opgeroepen op Maart 27, 2018, van KNMI: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/energiebalans-van-de-aarde>
- Laanen, M. (2007). *Yellow Matters- Improving the remote sensing of Coloured Dissolved Organic Matter in inland freshwaters*. Amsterdam: Vrije Universiteit Amsterdam.
- Laanen, M. (2017, december 11). Gesprek over huren WISP-3. (W. T. Tromp, Interviewer)
- LANDinfo. (2018, mei 24). *Landsat 7 15m & 30m Resolution Satellite Imagery*. Opgehaald van LANDinfo: <http://www.landinfo.com/l7.htm>
- Lenders, S., Driest, S. v., Kroon, M. L., & Matla, E. (2013). *Inrichtingsplan Lollebeek*. Venlo: Waterschap Peel en Maasvallei.
- Liversedge, L. K. (2007). *Turbidity Mapping and Predicition in Ice Marginal Lakes at the Bering Glacier System, Alaska*. Ann Arbor: University of Michigan.
- McFeeters, S. K. (1996). *The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. International Journal of Remote Sensing.
- MicaSense. (2016, juni 1). *What spectral bands does the Sequoia camera capture?* Opgehaald van MicaSense: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/217112037-What-spectral-bands-does-the-Sequoia-camera-capture->
- MicaSense. (2017, augustus 30). *Light Sensors: the Basics (DLS and Sunshine Sensor)*. Opgehaald van MicaSense: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115002782008-Light-Sensors-the-Basics-DLS-and-Sunshine-Sensor->

- Mobley, C. (1994). *Handbook of Optics*. McGrac-Hill.
- Morel, A. (2001). *Bio-Optical Models*. Villefranche-sur-mer: Université Pierre et Marie Curie.
- NASA. (2018, mei 24). *Data*. Opgehaald van Modis Web: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>
- NASA. (2018, mei 24). *Landsat 8*. Opgehaald van Landsat Science: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>
- NASA. (z.d.). *What are passive and active sensors?* Opgeroepen op april 9, 2018, van NASA.gov: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html
- National Research Council of Italy. (z.d.). *Optical Remote Sensing*. Opgeroepen op maart 26, 2018, van National Research Council of Italy: http://www.irea.cnr.it/en/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=1&Itemid=161
- Natuurkunde.nl. (z.d.). *6.1 Het elektromagnetisch spectrum*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Natuurkunde.nl: <https://www.natuurkunde.nl/artikelen/2117/61-het-elektromagnetisch-spectrum>
- Natuurkunde.nl. (z.d.). *Licht en massa*. Opgeroepen op mei 16, 2018, van Natuurkunde.nl: <https://www.natuurkunde.nl/vraagbaak/20620>
- Nechad, B., & Neukersmans, G. (2009). *Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters*. The International Society for Optical Engineering.
- Optotherm Thermal Imaging. (z.d.). *Microbolometers*. Opgeroepen op Maart 28, 2018, van Optotherm Thermal Imaging: <http://www.optotherm.com/microbolometers.htm>
- Parrot. (2013). *Parrot Sequoia User Guide*. Parijs: Parrot.
- Parrot. (2017, April 2). *Sensor height and width/ distortion*. Opgehaald van Parrot for Developers: <http://forum.developer.parrot.com/t/sensor-height-and-width-distortion/5567/2>
- Parrot. (2018, mei 24). *PARROT SEQUOIA+*. Opgehaald van Parrot.com: <https://www.parrot.com/business-solutions-us/parrot-professional/parrot-sequoia#parrot-sequoia-pix4d-precise-data-brings-accurate-analysis>
- Parrot. (z.d.). *PARROT BEBOP-PRO THERMAL*. Opgeroepen op Mei 15, 2018, van Parrot: <https://www.parrot.com/eu/business-solutions/parrot-bebop-pro-thermal>
- Philips, M., & Fritzsche, H. (1998, juli 20). *Electromagnetic radiation*. Opgehaald van Encyclopaedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation>
- Pix4D. (z.d.). *TOOLS - GSD Calculator*. Opgeroepen op mei 17, 2018, van Pix4d: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-Calculator#gsc.tab=0>
- Potes, M., Costa, M. J., & Salgado, R. (2012). *Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modelling*. Hydrology and Earth System Sciences.

- Potes, M., Salgado, R., & Costa, M. J. (2012). *Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and*. Evora: Hydrology and Earth System Sciences.
- Rijksoverheid. (z.d.). *Mag ik als particulier vliegen met een drone?* Opgeroepen op Mei 2, 2018, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/drone/vraag-en-antwoord/regels-drone-particulier>
- Rijksoverheid. (z.d.). *Regels voor zakelijk gebruik drone*. Opgeroepen op Mei 2, 2018, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/drone/zakelijk-gebruik-drone>
- Roode, R. d. (2018, februari 2). *Offerte. Offerte: Lollebeek opnamen*. Mijdrecht, Utrecht, Nederland: DRO Remote Sensing.
- Royal HaskoningDHV. (z.d.). *Royal Haskoningdhv haalt wereldwijd waarde uit water met innovatie Vitens*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Royalhaskoning DHV: <https://www.royalhaskoningdhv.com/nl-nl/nederland/nieuws/nieuwsberichten/royal-haskoningdhv-haalt-wereldwijd-waarde-uit-water-met-innovatie-vitens/1262>
- Scheenen, H. (2017, mei 27). *Wat is het elektromagnetische spectrum?* Opgehaald van Kuuke Sterrenbeelden: <https://www.kuuke.nl/het-elektromagnetische-spectrum/>
- Schott, J. R. (1979). Temperature Measurement of Cooling Water Discharged from Power Plants. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 9.
- SEOS. (z.d.). *Interaction of radiation with the earth surface*. Opgeroepen op Mei 3, 2018, van <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c01-p04.html>
- Shafiee, S. S., Zakaria, N. A., Adnan, A. B., Razali, A. N., Chao, T. Z., & yee, L. S. (2014, December 10). *LASER LIGHT SCATTERING METHOD*. Opgehaald van Technology Pharmaceutical: <https://technologypharmaceutical.wordpress.com/>
- Song, K., Li, L., Xu, J., & Du, J. (2011). *Retrieval of total suspended matter (TSM) and chlorophyll-a (Chl-a) concentration from remote-sensing data for drinkign water resoruces*. Environmental Monitoring and Assessment.
- Sterrenkunde in Nederland. (z.d.). *Elektron*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Sterrenkunde in Nederland: <http://www.sterrenkunde.nl/index/encyclopedie/elektron.html>
- Turnerdesign. (1999, april). *Turbidity Provisions*. Opgehaald van Turnerdesign: <https://www.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/S-0132.pdf>
- United State Geological Survey. (2017, september 4). *Turbidity -- Units of Measurement*. Opgehaald van United States Geological Survey: <https://or.water.usgs.gov/grapher/fnu.html>
- USGS. (2018, mei 24). *What are the band designations for the Landsat satellites?* Opgehaald van USGS: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>
- Vereniging voor Weerkunde en Klimatologie. (z.d.). *Zonnestraling*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Vereniging voor Weerkunde en Klimatologie: https://www.vwkweb.nl/index.php?page=Achtergrond_Zon
- Vespadrones. (2018, mei 24). *Hyperspectral Camera Rikola*. Opgehaald van Vespadrones: <http://vespadrones.com/product/hyperspectral-camera-rikola/>

- Visser, B. (2011, augustus 21). *Infrarood temperatuurmeteren*. Opgehaald van B.L.W. Visser: https://www.blwvisser.nl/image/pdf_products/Infrarood_temperatuurmeteren_BLWVISSER_bev1.pdf
- Warmtebeeldcamera.nl. (2018, mei 25). *FLIR ONE PRO ANDROID USB-C*. Opgehaald van Warmtebeeldcamera.nl: <https://www.warmtebeeldcamera.nl/nl/flir-one-pro-android-usb-c.html>
- Waterschap Limburg. (z.d.). GIS database. *watersysteem shapefile*. Roermond. Opgeroepen op april 18, 2018
- Waterschap Limburg. (z.d.). *water of stoffen lozen*. Opgeroepen op Februari 15, 2018, van Waterschap Limburg: <https://www.waterschaplimburg.nl/productencatalogus/product/lozingen/>
- Wenyao, L., Field, R. T., Gantt, R. G., & Klemas, V. (1986). *Measurement of the surface emissivity of turbid waters*. Chinese Journal of Oceanology and Limnology.
- Wolters Kluwer. (z.d.). *Beperkt bewijs van luchtwaardigheid voor vluchten met oude luchtballonnen, vliegtuigjes en helikopters*. Opgeroepen op mei 14, 2018, van Kluwer Easy Web: <http://www.kluwereasyweb.be/documents/lawyer-news/201710-lawyer2/kl2160597-beperkt-bewijs-van-luchtwaardigheid-voor-vluchten-met-oude-luchtballonnen-vliegtuigjes-en-helikopters.xml?lang=en&template=/system/templates/site/print.html>
- Xiao, X., Jian, X., Xiongfei, W., Chengfang, H., Xuejun, C., Zhaohui, W., & Dengzhong, Z. (2015). *Evaluation method fo water quality for river based on multi-spectral remtoe sensing data*. Berlin: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Zwart, G. (2018, maart 28). Telefonisch gesprek. (B. Tromp, Interviewer)

Bijlage 1: Oriënterend vooronderzoek naar mogelijk bruikbare remote sensing instrumenten

Tijdens de vooronderzoeksfase zijn verschillende soorten remote sensing instrumenten geanalyseerd en geïnventariseerd. Op basis van deze bevindingen is Tabel 1 opgesteld met de voor- en nadelen per instrument of type.

Tabel 1

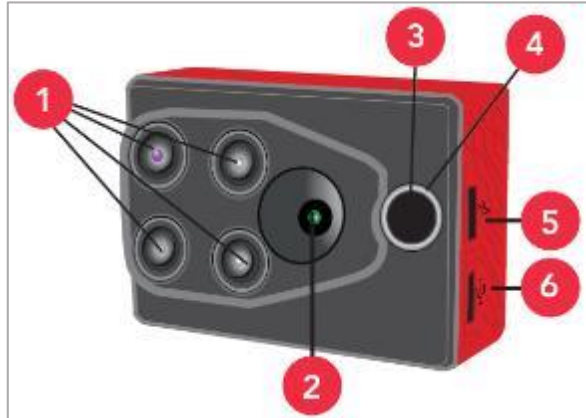
Vergelijking tussen mogelijke meetinstrumenten en sensoren

Instrument	Kosten	Technische specificaties	Bron
Handheld apparaat			
WISP-3	€20.000 of €500 /week (exc. btw)	Parameters: Chl-A, Fycocyanine, TSM, CDOM, Troebelheid, afgeleid uit hyperspectrale beelden tussen 350 en 800 nm.	Bampanikos (2016) en Laanen (2017)
FLIR One Pro	€499	Thermische resolutie: 160 x 120, beeldresolutie: 1440x1080, nauwkeurigheid: $\pm 3^{\circ}\text{C}$ of $\pm 5\%$	Warmtebeeldcamera.nl (2018)
Avio R300SR	€6.200	Bereik: -40 tot 500°C , resolutie $0,03^{\circ}\text{C}$	Prijs
Raytek Raynger ST	€250	Bereik: -32 tot 400°C , resolutie $0,2^{\circ}\text{C}$	Instrumart.com (2018)
Camera aan drone (UAV)			
Parrot Sequoia multispectrale camera	\$3.500 (ca. €3.100)	4 banden: Rood, groen, red-edge, NIR	Parrot (2018)
Rikola hyperspectrale camera	€40.000	Hyperspectrale banden van 10 nm tussen 500 en 830nm	Vespradrone (2018)
Luchtvaartuig			
De Roode Optics	€ 2200/ha (exc. btw)	Hyperspectrale banden van 10 nm. Meestal tussen 0,5 en 1,0 m/px	Rowland de Roode (2018)
Satelliet			
MODIS	Gratis	Grove resolutie (250, 500 of 1000m), afhankelijk van bewolking	NASA (2018)
Sentinel-2	Gratis	Grove resolutie (10 tot 60m), afhankelijk van bewolking.	ESA (2018)
Sentinel-3	Gratis	Grove resolutie (300m), afhankelijk van bewolking	ESA (2018)
Landsat-7	$\pm$ €1000 / beeld	Grove resolutie (15-60m), afhankelijk van bewolking	USGS (2018) en LANDinfo (2018)
Landsat-8	Gratis	Grove resolutie (30-60m), afhankelijk van bewolking	NASA (2018)

De keuze voor de FLIR One Pro en de Parrot Sequoia multispectraalcamera is gebaseerd op dit vooronderzoek. Doorslaggevend waren de prijs en de mogelijke toekomstige toepasbaarheid voor Waterschap Limburg. De keuze voor de thermische FLIR One Pro camera is voornamelijk het gevolg van de relatief lage prijs en de mogelijkheid om resultaten te leveren die tot de verbeelding spreken. Een alternatief was de Raytek Raynger, maar dit instrument zou enkel puntresultaten hebben geleverd. Dit is minder interessant voor het waterschap, omdat zulke temperatuurmetingen ook accuraat uitgevoerd kunnen worden met temperatuursondes. De Avio R400SR viel af door de hoge aankoopprijs. De WISP-3 is halverwege het onderzoek afgevallen, omdat Water Insight meldde dat de instrumenten lange tijd niet beschikbaar waren wegens vereiste kalibraties. Hogeschool Van Hall Larenstein beschikt over een Parrot Sequoia multispectraalcamera, waardoor het gebruik van dit instrument voor het onderzoek geen kosten met zich meebrengt. Een alternatief zou een Rikola hyperspectraalcamera zijn geweest. Dit zou de mogelijkheden van de metingen enorm hebben uitgebreid, maar de kosten van dit apparaat zijn veel te hoog. Een andere manier om hyperspectraalbeelden op te nemen is via het bedrijf DRO. Deze firma maakt opnames vanuit een vliegtuig, waarbij hyperspectraalbeelden geleverd worden. De resolutie is vrij hoog en er zijn maar weinig verboden vlieggebieden. Voor het waterschap was deze optie niet interessant genoeg, omdat ze zelf al beschikken over een vliegtuig en op zoek zijn naar meetmethodes die ze zelf kunnen toepassen in de toekomst. Satellietbeelden zijn in het begin ook bekeken, maar al snel werd duidelijk dat de ruimtelijke resolutie veel te grof is om betrouwbare resultaten te kunnen bieden. Ook de beeldresultaten waar betaald voor dient te worden zijn met een resolutie van 10m nog steeds te grof.

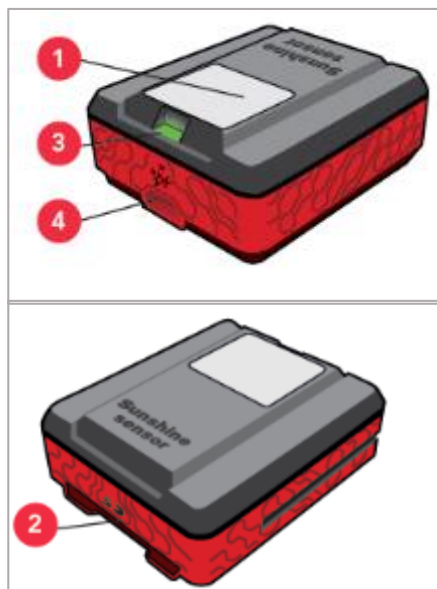
Bijlage 2: Specificaties van de remote sensing instrumenten

2.1 Componenten van de Parrot Sequoia multispectraalcamera en zonne-sensor



Figuur 2a Componenten van de Parrot Sequoia multispectraalcamera. (Parrot, 2013)

1	1.2 MP (1280 x 960 px) monochrome sensoren (rood, groen, Red Edge en NIR)
2	16 MP RGB sensor (4608 x 3456 px)
3	LED-Indicator (knippert als een foto wordt genomen)
4	Sluiterknop (foto maken/ Wi-Fi aanzetten)
5	Micro USB-poort (verbinding voor de zonne-sensor)
6	Micro USB-poort (verbinding voor de drone)



Figuur 2b Componenten van de zonne-sensor. (Parrot, 2013)

1	4 lichtsensoren (voor ieder monochrome sensor) + gps
2	SD kaart poort
3	LED-Indicator (knippert als de gps aan/ uit staat of tijdens kalibratie)
4	USB poort (verbinding voor de multispectraalcamera)

2.2 Spatiële resolutie van de multispectraalcamera

De spatiële resolutie van de multispectraalcamera wordt in Tabel 2 hieronder samengevat voor verschillende hoogtes. De mono band sensoren rood, groen, Red Edge en NIR hebben een lagere spatiële resolutie dan de RGB-sensor.

Tabel 2*Grondresolutie van de Parrot Sequoia multispectraalcamera (Parrot, 2013)*

Hoogte	Mono band	RGB
(m)	(cm/px)	(cm/px)
30	2,82	0,8
40	3,76	1,1
50	4,71	1,4
60	5,65	1,6
70	6,59	1,9
80	7,53	2,2
90	8,47	2,4
100	9,42	2,7
110	10,3	2,9
120	11,3	3,3
130	12,24	3,5
140	13,19	3,7
150	14,13	4,1

Om de gewenste grondresolutie te krijgen maakt de Parrot Sequoia gebruik van de volgende formule:

$$Grondresolutie = \frac{Sw * H * 100}{Fr * imW}$$

Waarvan:

Sw = sensorbreedte van de lens (mm)
 (6,17 mm voor de RGB-sensor en 4,8 mm voor de mono banden)
 H = vlieghoogte (m)
 Fr = brandpuntafstand van de lens (mm)
 (4,88 mm voor de RGB-sensor en 3,98 mm voor de mono banden)
 imW = breedte van de afbeelding (pixels)
 (4608 m voor de RGB-sensor en 1280 m voor de monobanden)
 (Pix4D, z.d.) & (Parrot, 2017)

2.3 DJI Phantom 4 Pro drone

Bereik: 3.500 m
Accuduur: 28 minuten*
Camera: 12 MP RGB**
Gps: ja
(DJI, z.d.)

*Bij normale omstandigheden

**Wordt niet gebruikt in dit onderzoek



Figuur 2c. DJI Phantom 4 Pro drone

2.4 FLIR One Pro warmtebeeldcamera

Thermische resolutie:	160 x 120
Beeldresolutie:	1440 x 1080
Pixelgrootte:	12 μm
Spectraal bereik:	8 – 14 μm
Nauwkeurigheid:	$\pm 3^\circ\text{C}$ of $\pm 5\%$
Geleverde bestandsformaten:	JPEG / MPEG4
Batterijduur:	± 1 uur
Batterij oplaadtijd:	± 40 min.



Figuur 2d. FLIR One Pro (FLIR, 2018)

Bijlage 3: Foto's veldbezoek

Hieronder zijn een aantal impressies van het studiegebied weergegeven. De huidige situatie in de beek kenmerk zich van een ondiep en helder water waar veel oever- en bodemvegetatie aanwezig zijn. Foto's zijn genomen voor de maaiperiode (eind april).



Figuur 3a. Oevervegetatie tot het midden van de beek.
Foto genomen op 10 april 2018 door auteurs.



Figuur 3b. Ondiep water waardoor bodemvegetatie te zien zijn.
Foto genomen op 10 april 2018 door auteurs.



Figuur 3c: Olieachtige waasvorming (kaamlag) als gevolg van afgestorven bacteriën en organisch materiaal.
Foto genomen op 12 februari 2018 door auteurs.

Bijlage 4: Veldwerkplan pilotstudy troebelheidsbepaling met de Parrot Sequoia multispectraalcamera

4.1 Doel

Het doel van dit veldwerk is om multispectraalbeelden in te winnen met behulp van een multispectraalcamera die aan een drone is gekoppeld. Met deze remote sensing data zou het mogelijk zijn om de troebelheid, een maatstaf voor zwevende stof gehalte, van het water te bepalen. Het plan dient er ook toe om verder toe te lichten op welke wijze de multispectraalcamera en drone gebruikt zullen worden en wat voor resultaat verwacht wordt.

4.2 Doel

- De multispectraalcamera is gekoppeld aan een drone en wordt bediend door Jack Schoenmakers, GIS docent van de Hogeschool Van Hall Larenstein;
- Watermonsters van troebelheid en zwevende stof worden genomen door Bart Tromp en William Tjong;
- Dit veldwerkplan is opgesteld voor de afgebakende onderzoekslocatie bij de Lollebeek (zie figuur 4a op de volgende pagina). Dit deel van de beek is circa 700m lang.

Een complete lijst van materialen die gebruikt worden in het veld is hieronder aangegeven.

- DJI Phantom Drone 4 (met iPad mini als bedieningspaneel)
- Parrot Sequoia multispectraalcamera (met de zonne-sensor)
- Reflectiepaneel
- Kaart van het onderzoeksgebied met meetpunten
- Smartphone (met de Rijksdriehoek Coördinatie applicatie)
- Pen, papier en klembord
- 10 x troebelheid monsterflesjes (OME408 standaard)
- 10 x zwevende stof monsterflesjes (OME422 standaard)

4.3 Werkwijze

Multispectraalbeelden inwinnen met drone

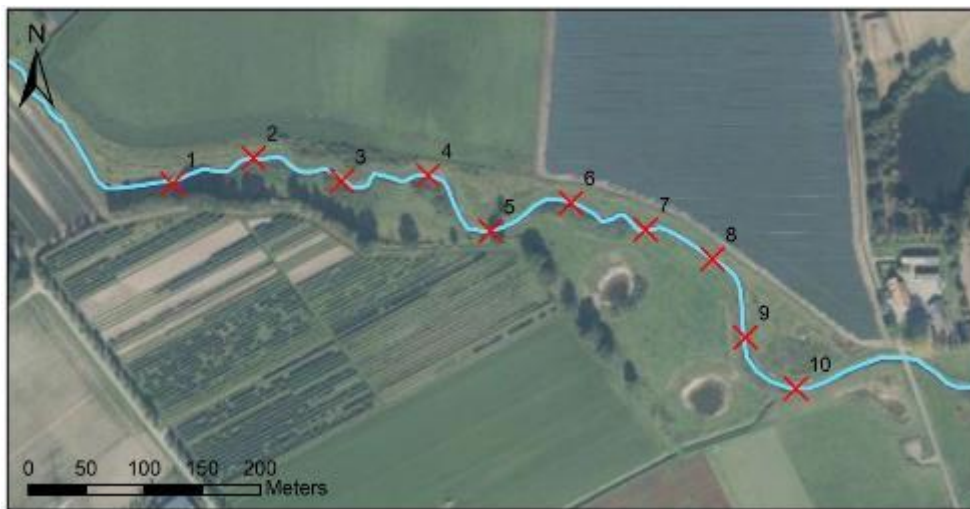
De drone en de camera worden bediend via de iPad mini met behulp van de iOS vliegapplicatie DJI Go Pro (figuur 4b op de volgende pagina). Voor en na het vliegen wordt een radiometrische kalibratie uitgevoerd met een reflectiepaneel. Het reflectiepaneel wordt op zodanige wijze vanuit de multispectraalcamera gefotografeerd zodat er geen (slag)schaduw op het paneel valt. Om dit uit te voeren wordt de camera van de zon af gepositioneerd.

Om het weerspiegelingseffect van de zon (sun-glint) op de sensor zo veel mogelijk te vermijden wordt er rond de namiddag gevlogen. In de vliegapplicatie wordt een vliegmissie ingesteld om de drone te laten vliegen met een vliegsnelheid van 6 m/s en op een hoogte van circa 80 m. Dit is om een overlapping van 80% te krijgen van de multispectraalbeelden. Een overlapping van minimaal 75% is noodzakelijk om een goede orthofoto van de beelden te maken in Pix4D Mapper.

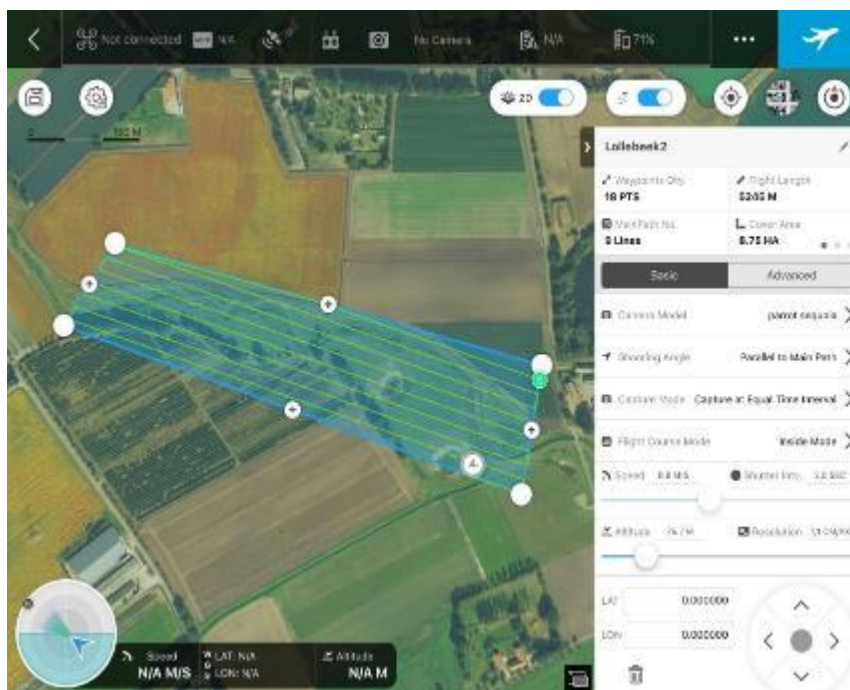
Het veldwerk wordt uitgevoerd gedurende twee sessies. De eerste keer vindt plaats op donderdag 29 maart en dient om de droneapparatuur te testen en om na te gaan of er nog bepaalde voorbereidingen getroffen dienen te worden voor de tweede sessie. Zo kan het mogelijk zijn om de vliegsnelheid en overlapping van beelden aangepast moet worden voor betere resultaten. Tijdens de eerste sessie worden geen monsters genomen voor het laboratorium. Twee weken later, op donderdag 12 april, vindt de tweede sessie plaats. Die dag wordt bijgestaan door analysebureau AWS.

Bemonstering voor laboratoriumanalyse

Tien validatiepunten werden voor het veldwerk in kaart gebracht in QGIS. De Rijksdriehoekskoördinaten (RD) van de punten werden afgeleid. Een smartphone met RD-applicatie is gebruikt om de coördinaten in het veld te herleiden. Troebelheid- en zwevende stoffen watermonsters worden op tien punten genomen (zie figuur 4a). Iedere parameter wordt in een apart genummerd monsterflesje bemonsterd. De gps-posities van deze meetpunten worden eveneens vastgelegd.



Figuur 4a. Studiegebied Lollebeek met 10 validatiepunten



Figuur 4b. Uitgestippelde vliegroute met de DJI Go Pro App. Deze beelden zijn noordgericht.

Bijlage 5: Beeldresultaten Pix4D Mapper

Op pagina's 64- 66 worden de beeldresultaten (figuren 5a- 5f) van de Pix4D Mapper beeldverwerkingssoftware en QGIS bandcombinaties berekeningen weergegeven.

5.1 RGB-orthofoto

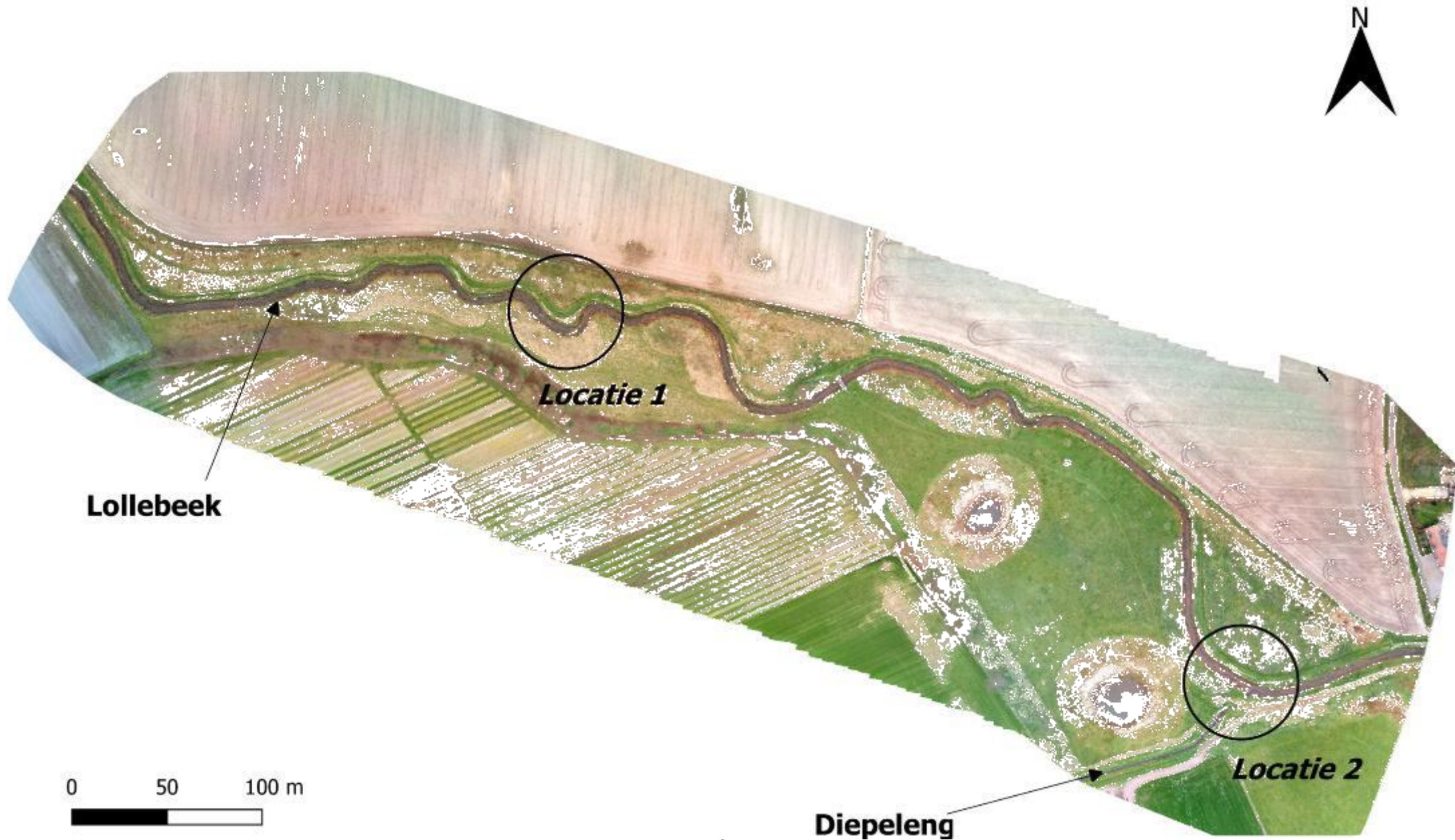
De RGB-orthofoto in figuur 5a is het product van de aan elkaar geplakte RGB-beelden van de Parrot Sequoia multispectraalcamera. Op deze kaart zijn de validatiepunten (w1-w10) aangegeven in het rood. Op de kaart is naast de benedenloop van de Lollebeek ook een deel van de Diepe Leng vastgelegd. Twee locaties zijn op deze kaart te omcirkeld en dienen als referentie te worden gebruikt voor de scenes in figuren 5b, 5c, 5e en 5g. In figuur 5b kunnen zandbanken (of bodemloop) en vegetatieclusters worden waargenomen. Deze elementen zijn in de rest van de beek terug te vinden.

5.2 Reflectiekaarten van de enkelvoudige banden

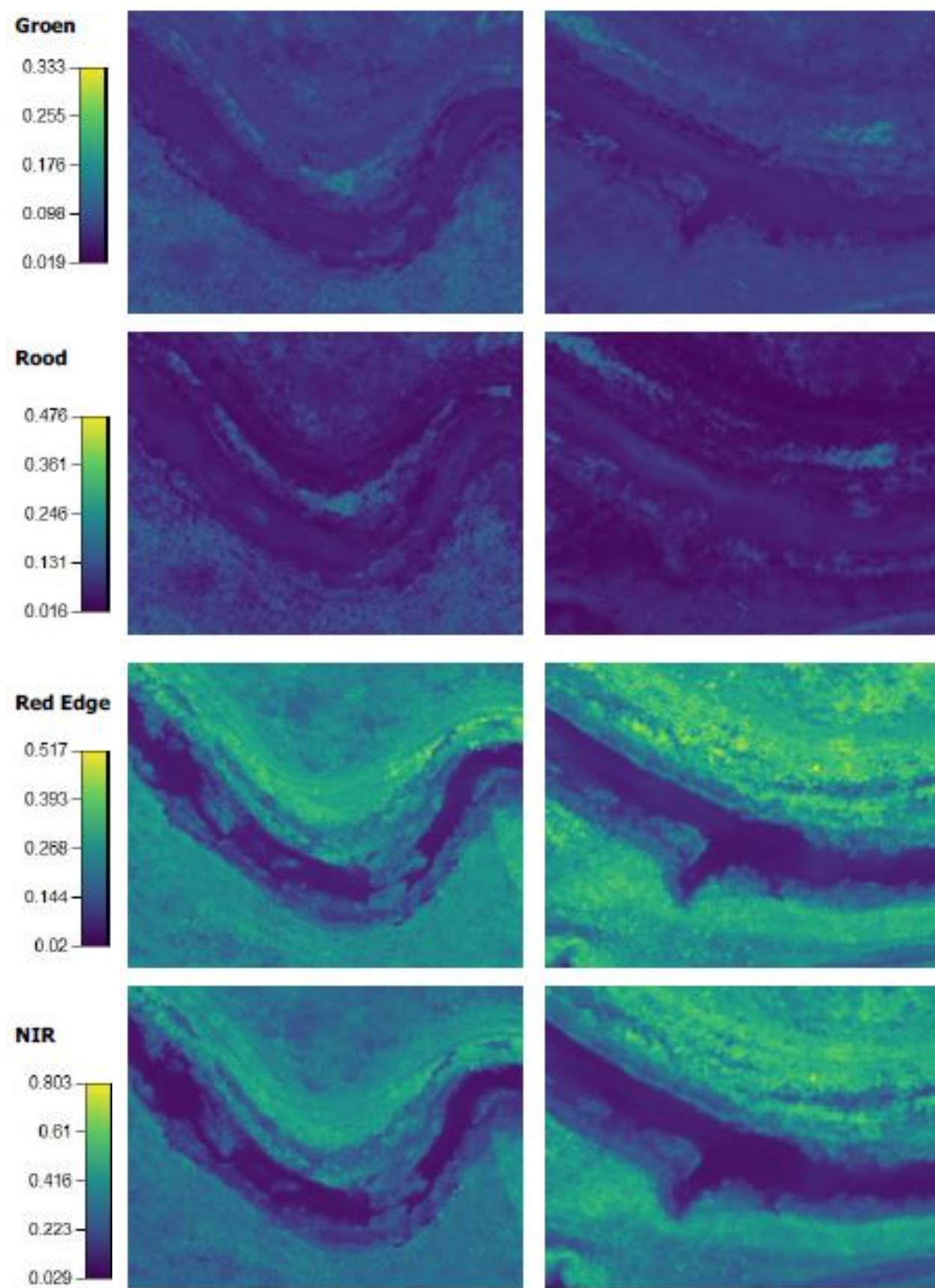
De reflectiekaarten van de enkelvoudige banden zijn in figuur 5c getoond. De Red Edge en NIR reflectiekaarten komen redelijk overeen. Deze kaarten geven de vegetatieclusters in het gebied goed weer. Op de NIR kaart komen meer objecten voor die de desbetreffende band kunnen reflectie vergeleken met de Red Edge kaart. Op de rode reflectiekaart lijken de zandbanken beter in beeld te komen ten opzichte van andere reflectiekaarten. In figuur 5d zijn histogrammen van de enkelvoudige banden weergegeven.

5.3 Reflectiekaarten van de bandratio's en band indices

In figuur 6e zijn de reflectiekaarten van de bandratio's en band indices weergegeven. Door het bereik aan te passen kunnen kenmerken van de watergang onderscheiden worden van landkenmerken. In deze figuur is het bereik aangepast op basis van de percentielen. In de Red Edge/NIR-ratio en NDRE-reflectiekaarten komen relatief veel kenmerken van de watergang terug op het land. In figuur 5f zijn de verdelingen van de reflectiekaarten weergegeven met het volledige bereik. Over het algemeen zijn er meer pixels die landkenmerken (grond en gras) representeren dan kenmerken van de watergang.



Figuur 5a. RGB-orthofoto van de benedenstroomse Lollebeek met tien validatiepunten ($\hat{w}1$ - $\hat{w}10$). Twee locaties staan aangewezen om als referentie te gebruiken in figuren 5b-5d.



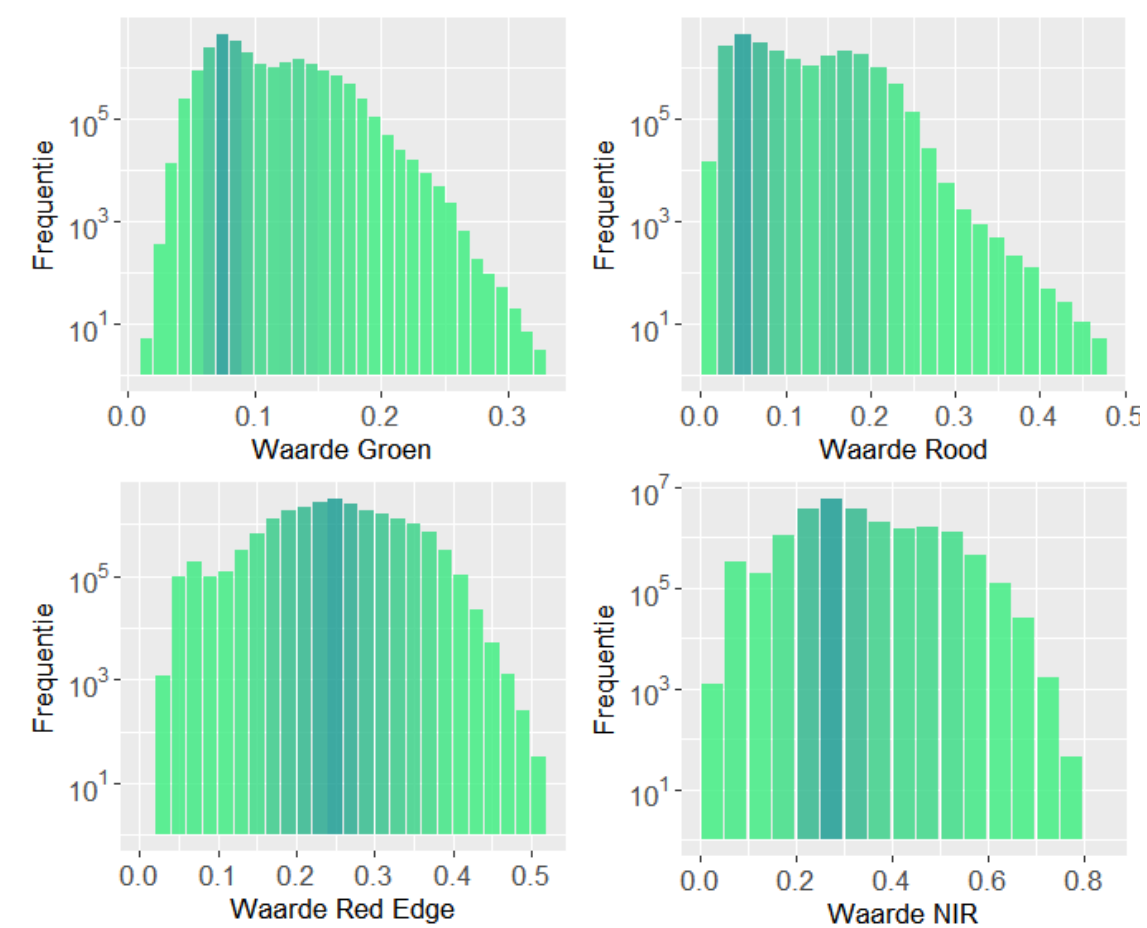
Kaartschaal 1:350

Figuur 5b. Onbewerkte secties van beeldresultaten voor verschillende banden. Deze beelden zijn noordgericht.

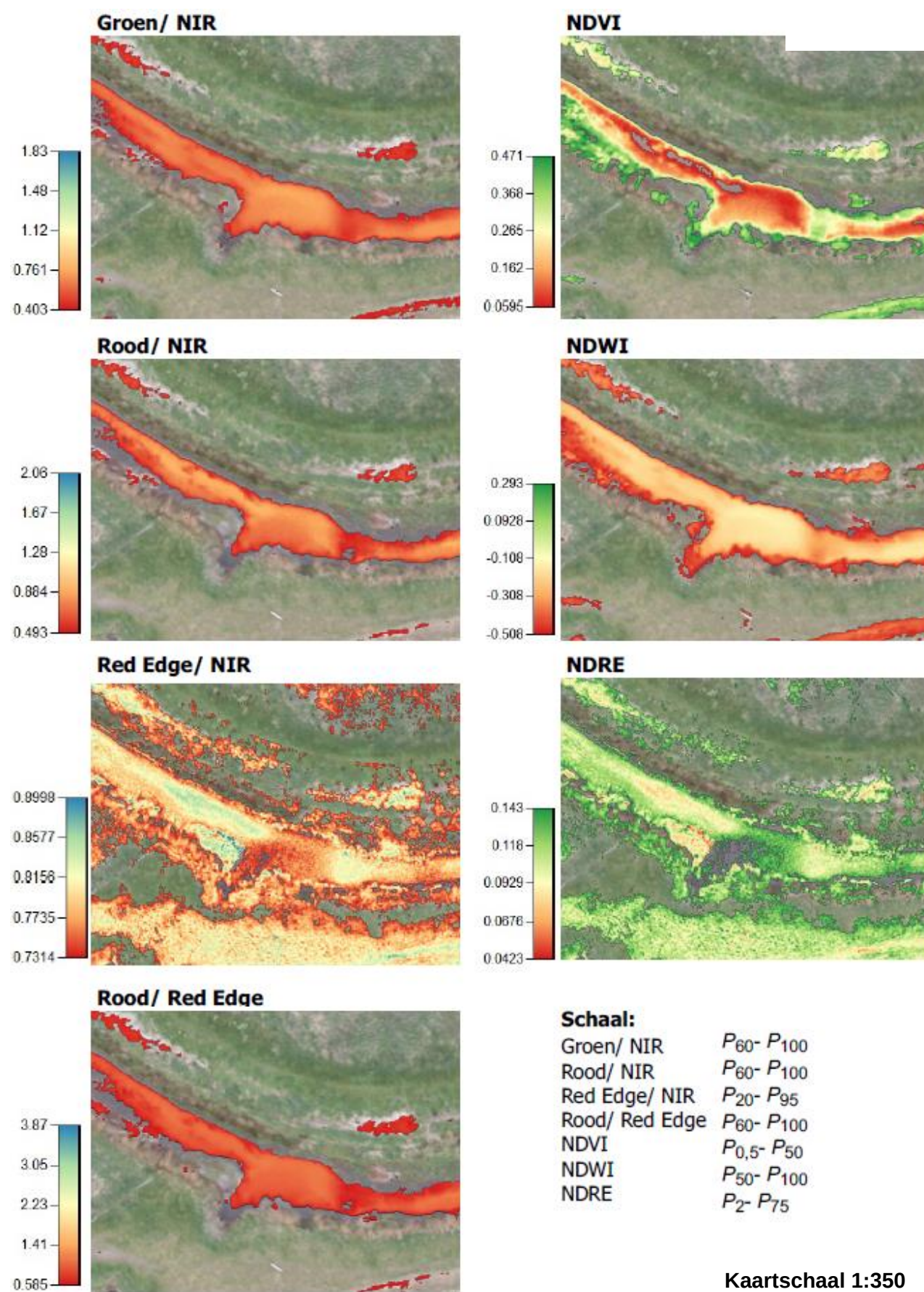


Kaartschaal 1:350

Figuur 5c. Ingezoomde RGB-scenes van de orthofoto. Links voor locatie 1 en rechts voor locatie 2.

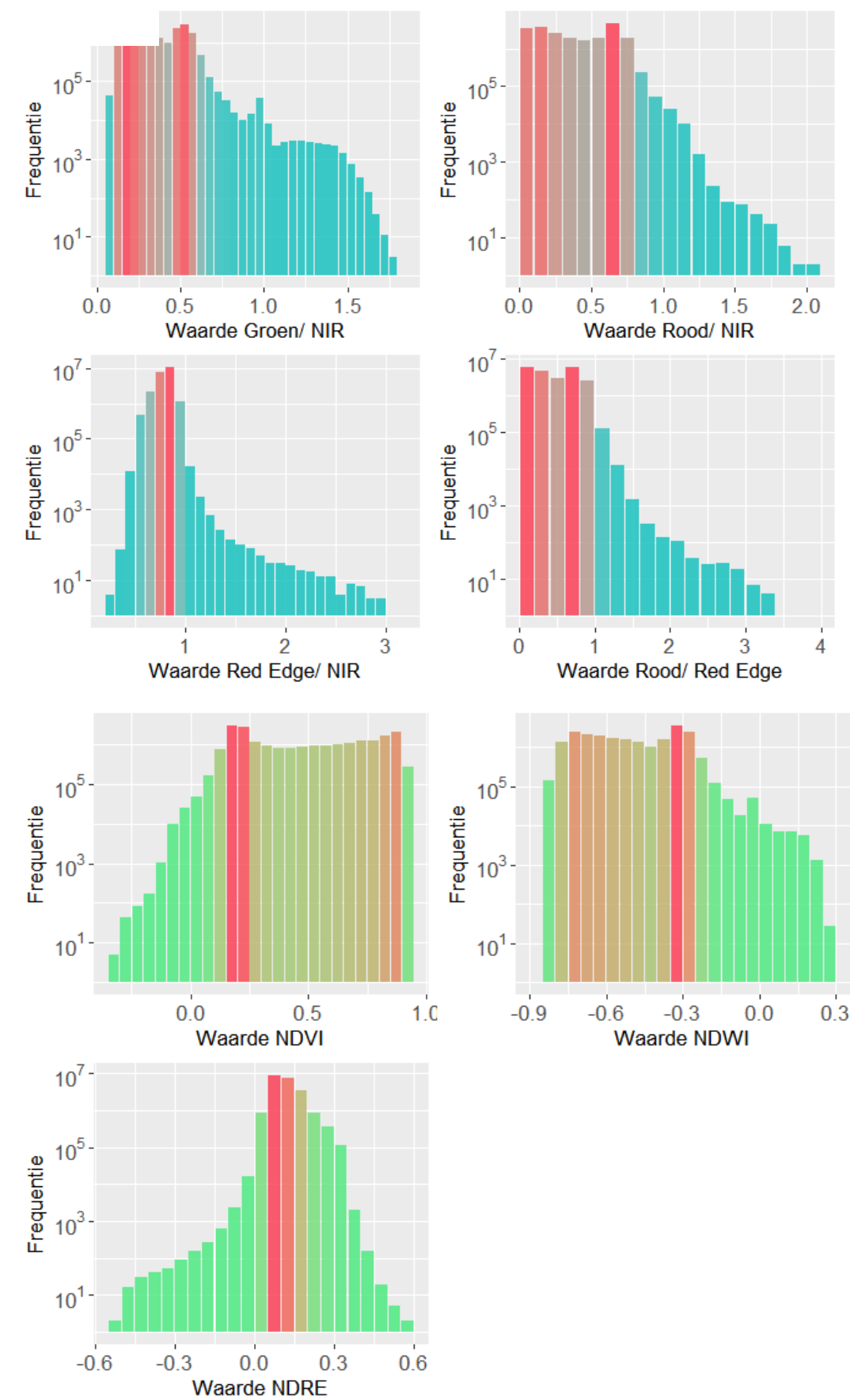


Figuur 5d. Histogrammen van de groene, rode, Red Edge en NIR-reflectiekaarten. Het volledige bereik is bij deze weergave gebruikt.



Figuur 5e.

Aangepaste weergave van de bandratio- en bandindexkaarten op basis van verschillende percentielintervallen. Linker kolom de bandratio's en rechterkolom de bandindices. In deze figuur is slechts ingezoomd op locatie 1. Deze beelden zijn noordgericht.



Figuur 5f.

Histogrammen van de bandratio- en bandindex-reflectiekaarten. Het volledige bereik is bij deze weergave gebruikt.

Bijlage 6: Boxplots van de tien validatiepunten

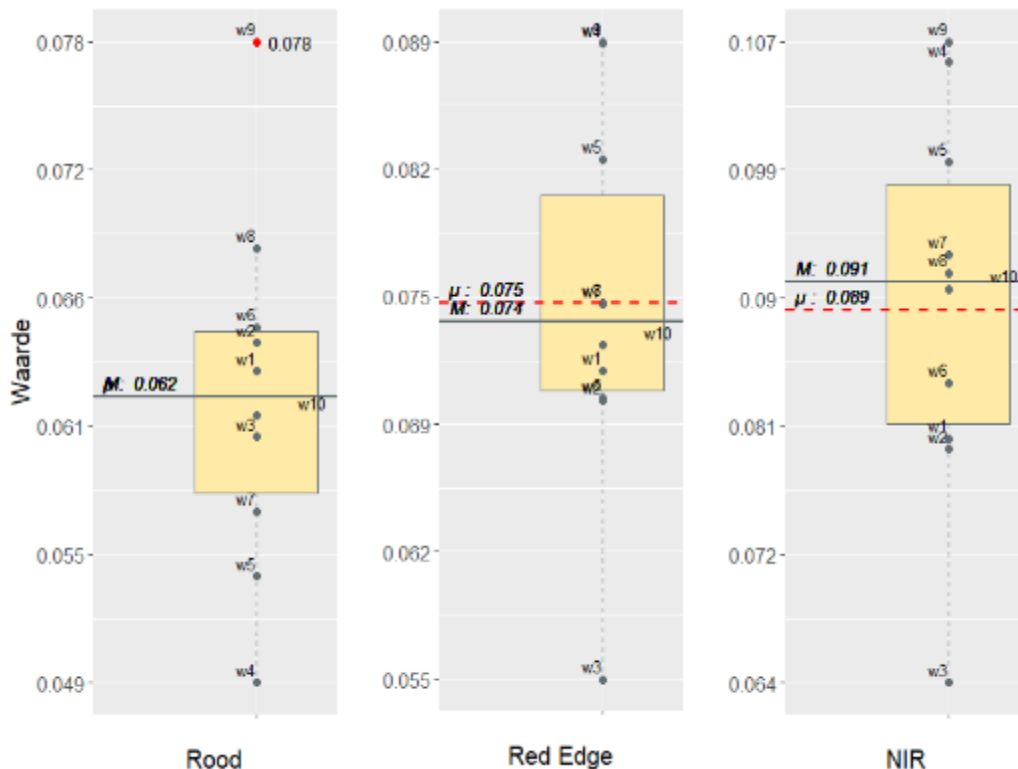
De boxplots van de tien validatiepunten zijn in figuren 6a t/m 6e weergegeven. In de boxplots zijn de uitschieters met rood aangegeven. Verder kunnen het gemiddelde (μ) en de mediaan (M) uit de boxplots worden afgeleid.

6.1 Boxplots van de bandratio, band-index en enkelvoudige band

In de boxplot van de rode band (figuur 6a) is een uitschieter van 0,078 te zien op validatiepunt w9. De Red Edge- en NIR-boxplots (figuur 6a) hebben herkenbare patronen zoals eerder te zien is in de beeldresultaten in bijlage 5. De groen/NIR-bandratio (figuur 6b) heeft een uitschieter van 0,863 op validatiepunt w3. Een aantal lichte uitschieters zijn verder te zien op de meetpunten lager dan de Q1 en hoger dan de Q3. De NDWI (figuur 6c) heeft een uitschieter van -0,076 op meetpunt w3. Dit is vergelijkbaar met de groen/NIR-ratio (figuur 6b) omdat de NDWI (figuur 6c) tevens de groene en NIR-banden gebruikt in de berekening.

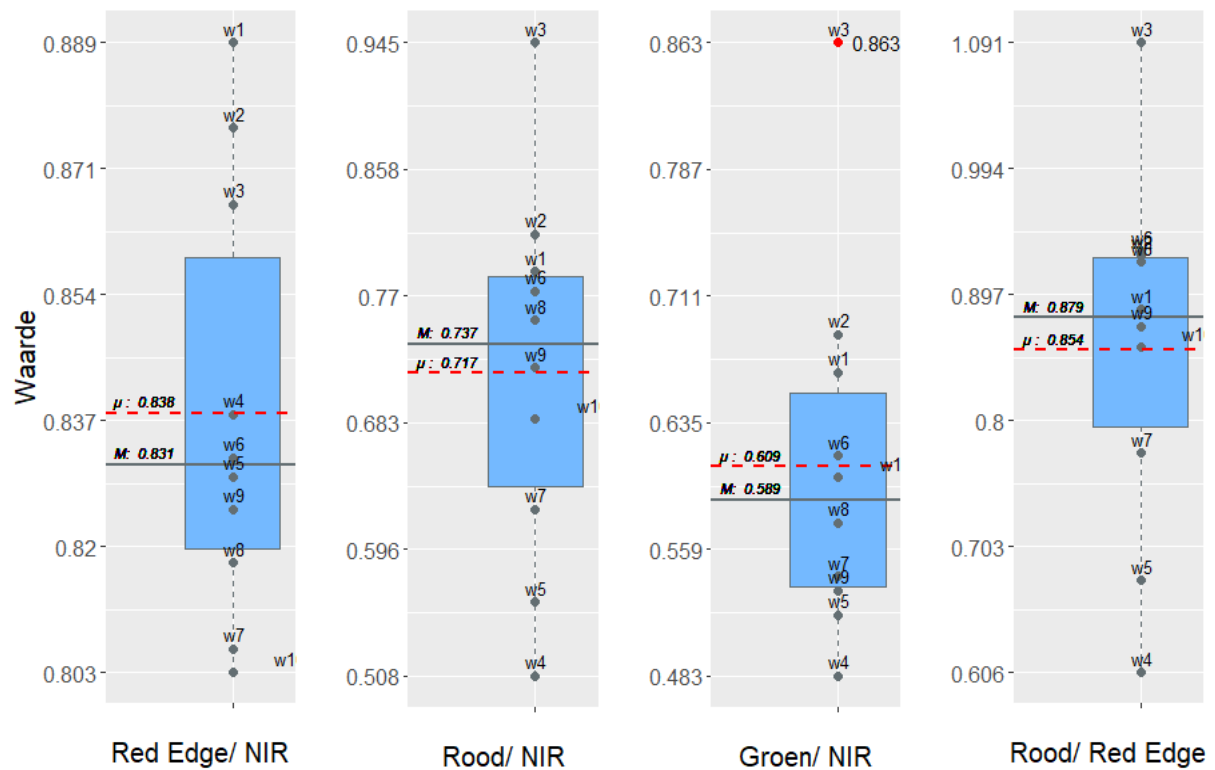
6.2 Boxplots van de watermonster resultaten

Het totaal zwevende stof uit het laboratorium (figuur 6d, rechts) heeft een uitschieter van 15 mg/l op meetpunt w6. Op hetzelfde meetpunt bedraagt de troebelheid 17 NTU (figuur 6d, links). De meeste validatiepunten in de boxplot van het zwevende stof gehalte liggen rondom 9 mg/l. De troebelheid boxplot is daarentegen meer gelijkmatig verdeeld. Verder lijken de waarden uit de enkelvoudige troebelheidsvergelijking relatief veel af te wijken van de laboratoriumresultaten. In de regressie- en correlatieanalyses wordt gekeken in hoeverre de verdeling tussen deze twee variabelen van elkaar verschilt.

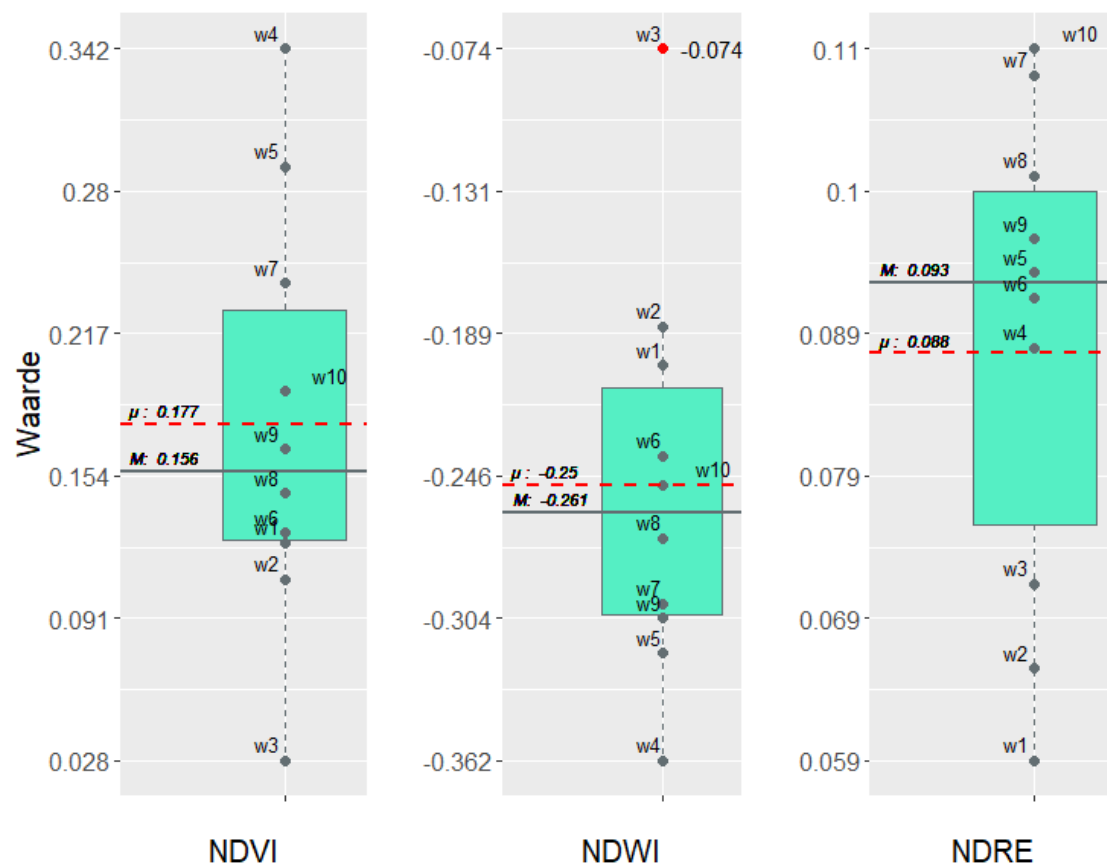


Figuur 6a. Boxplots van de enkelvoudige banden

Remote sensing van regionale watergangen

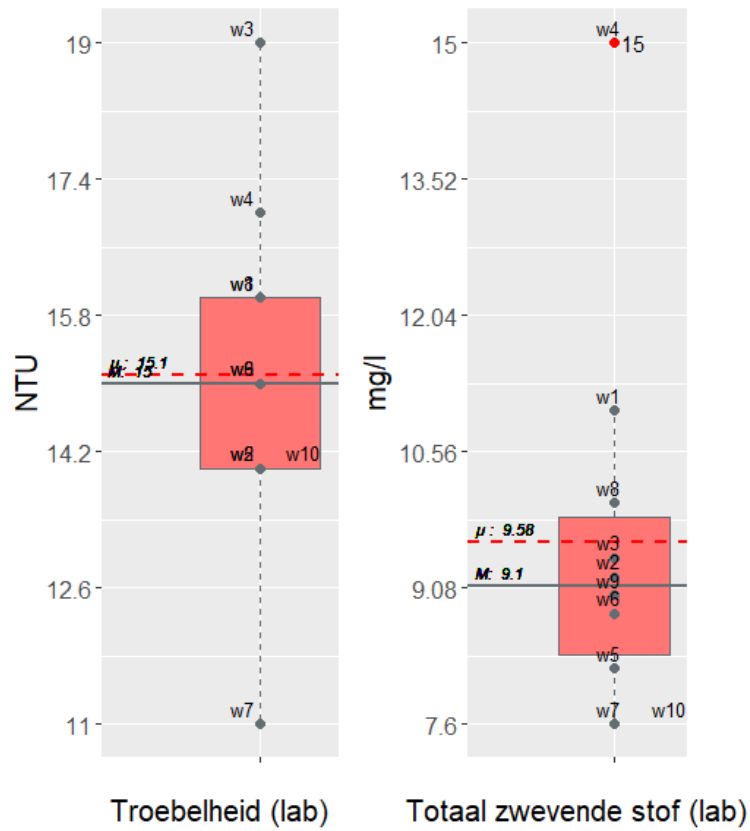


Figuur 6b. Boxplots van de bandratio's



Figuur 6c. Boxplots van de band indices

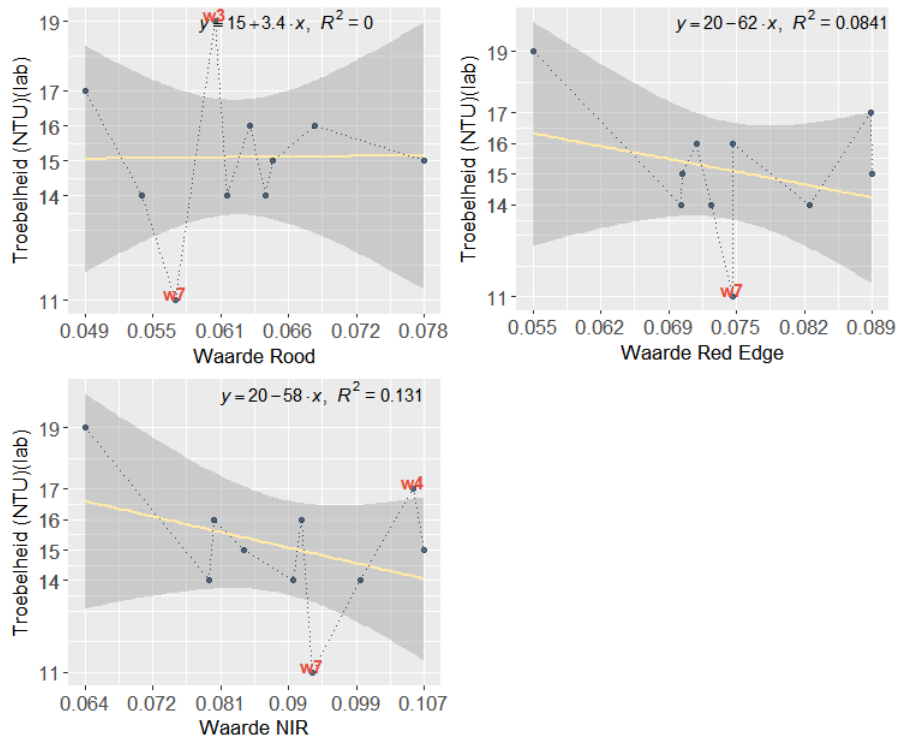
Remote sensing van regionale watergangen



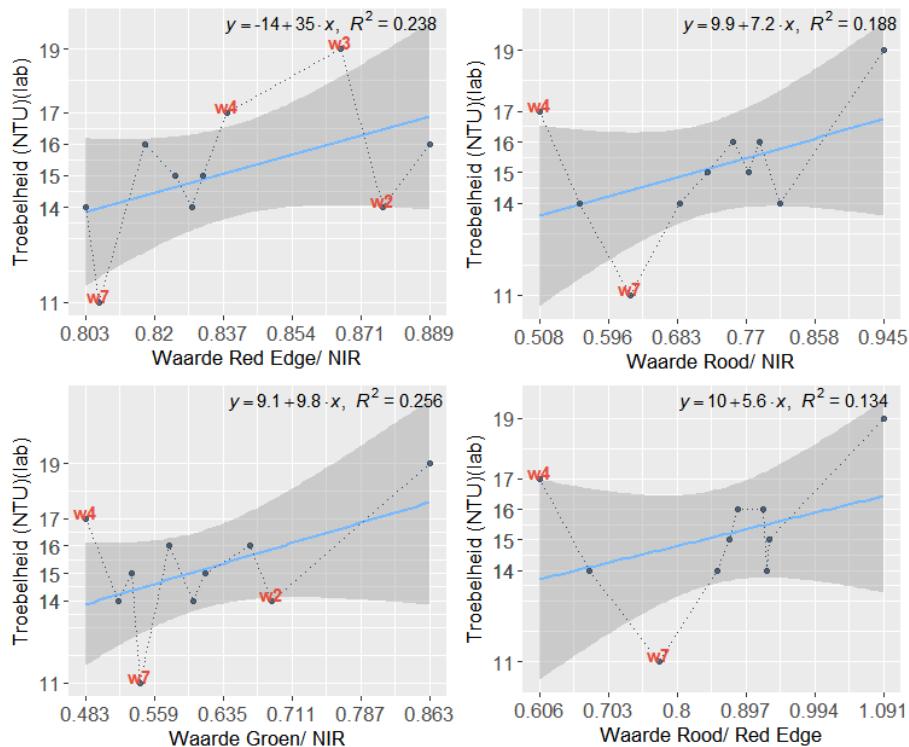
Figuur 6d. Boxplots van de troebelheid en totaal zwevende stof watermonsters

Bijlage 7: Lineaire regressiemodellen van de troebelheid (NTU) met de tien validatiepunten

In de plots van de lineaire regressiemodellen staan de uitschieters (i.e. buiten de 95% betrouwbaarheidsinterval (donkergrijs gebied)) in het rood gelabeld. Verder kunnen uit de plots de functie en de R^2 worden afgeleid.

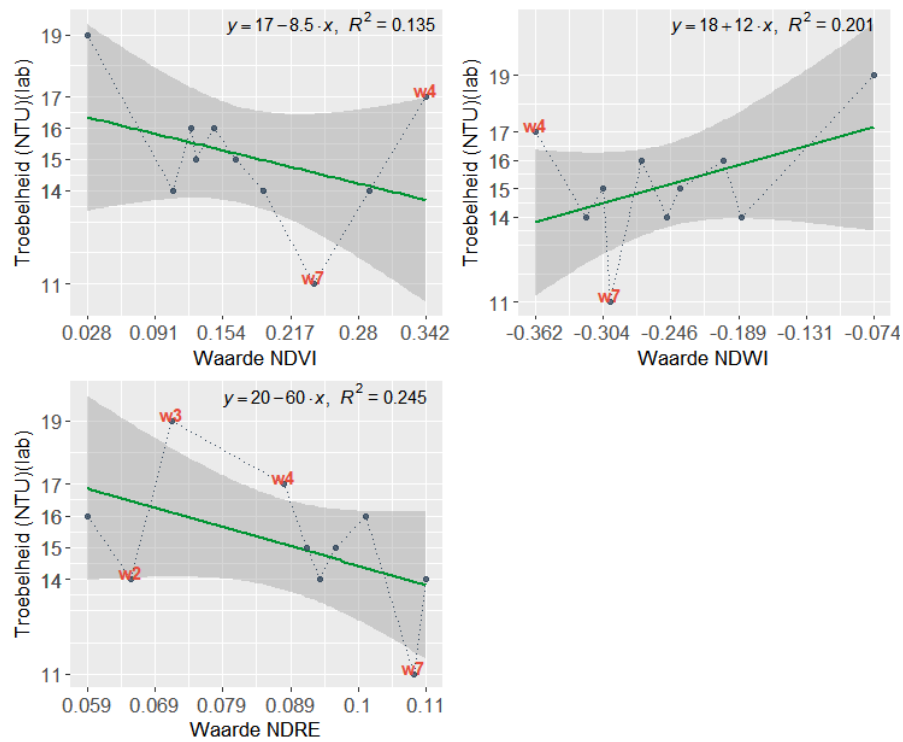


Figuur 7a. Enkelvoudige band als predictor



Figuur 7b. Bandratio als predictor

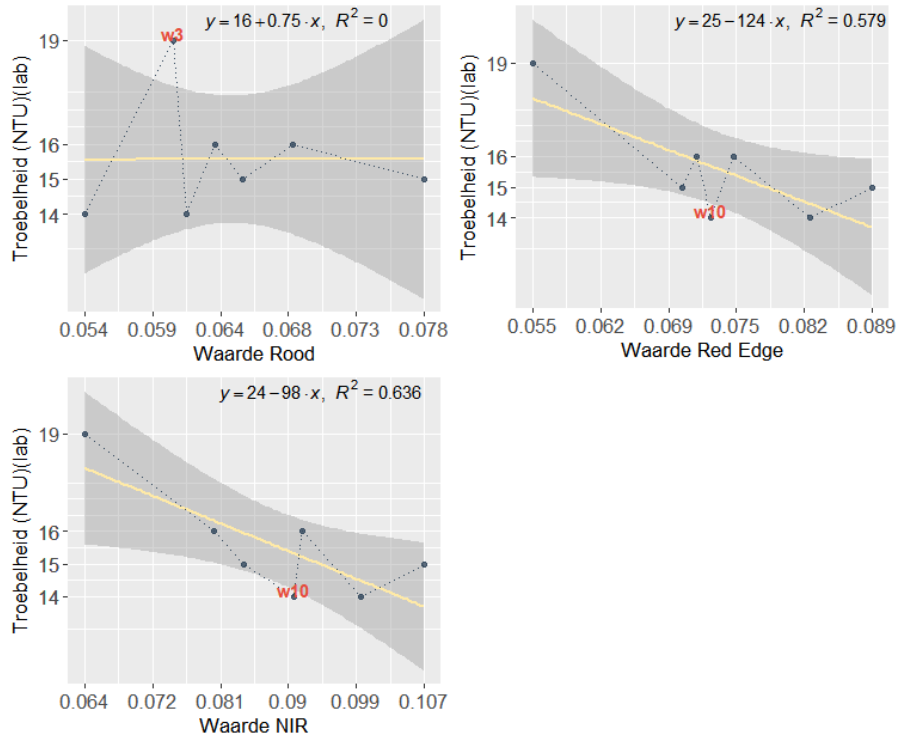
Remote sensing van regionale watergangen



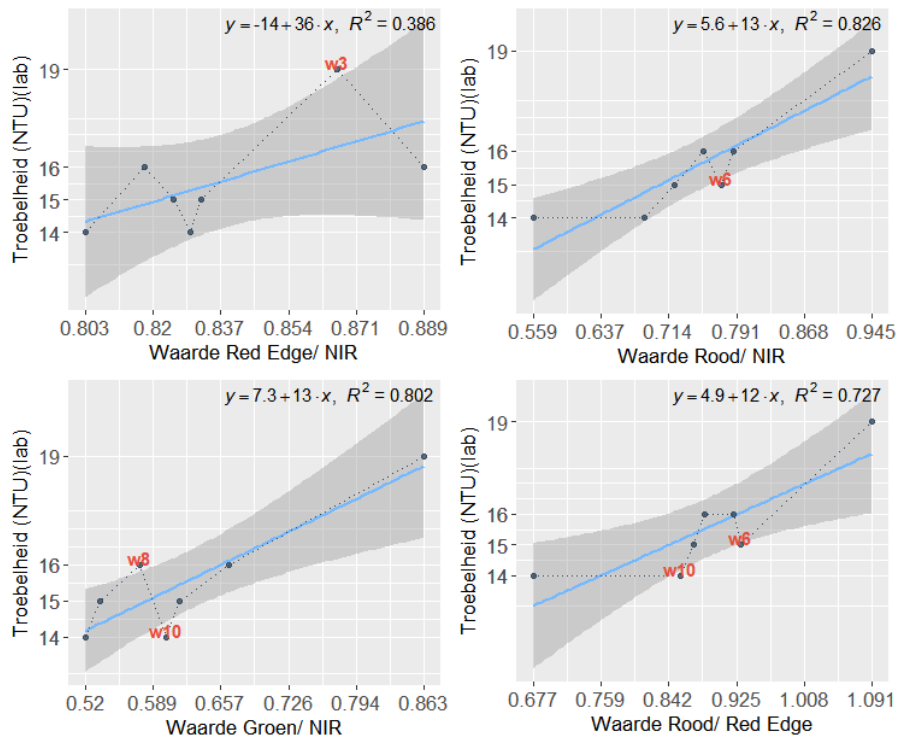
Figuur 7c. Bandindex als predictor

Bijlage 8: Lineaire regressiemodellen van de troebelheid (NTU) met zeven validatiepunten

In de plots van de lineaire regressiemodellen staan de uitschieters (i.e. buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval (donkergrijs gebied)) in het rood gelabeld. In deze plots zijn de validatiepunten w2, w6 en w7 verwijderd. Verder kunnen uit de plots de functie en de R^2 worden afgeleid.

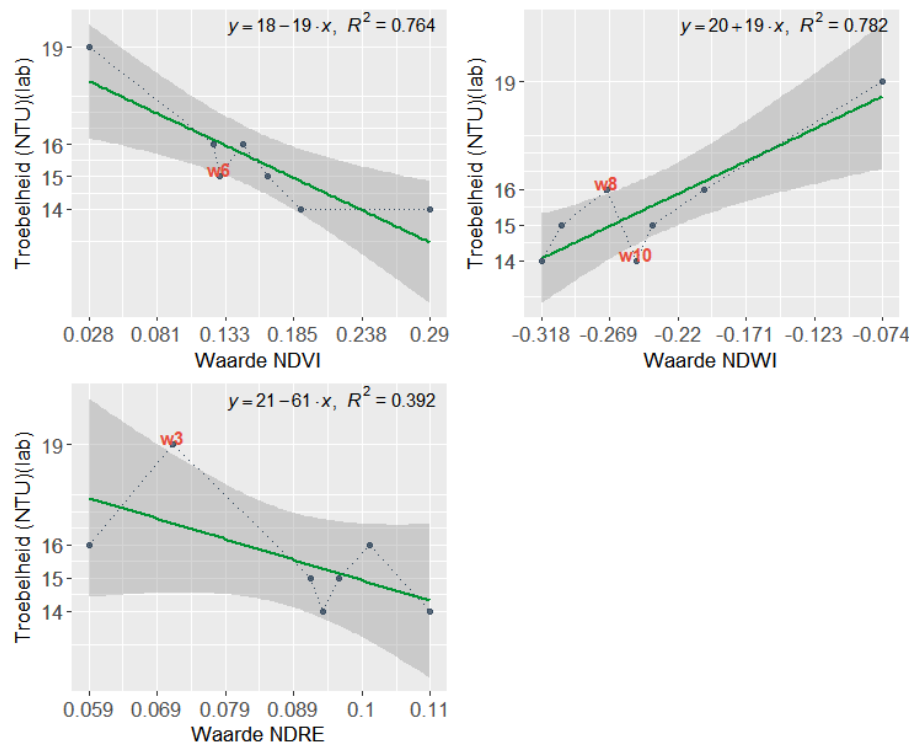


Figuur 8a. Enkelvoudige band als predictor (7 validatiepunten)



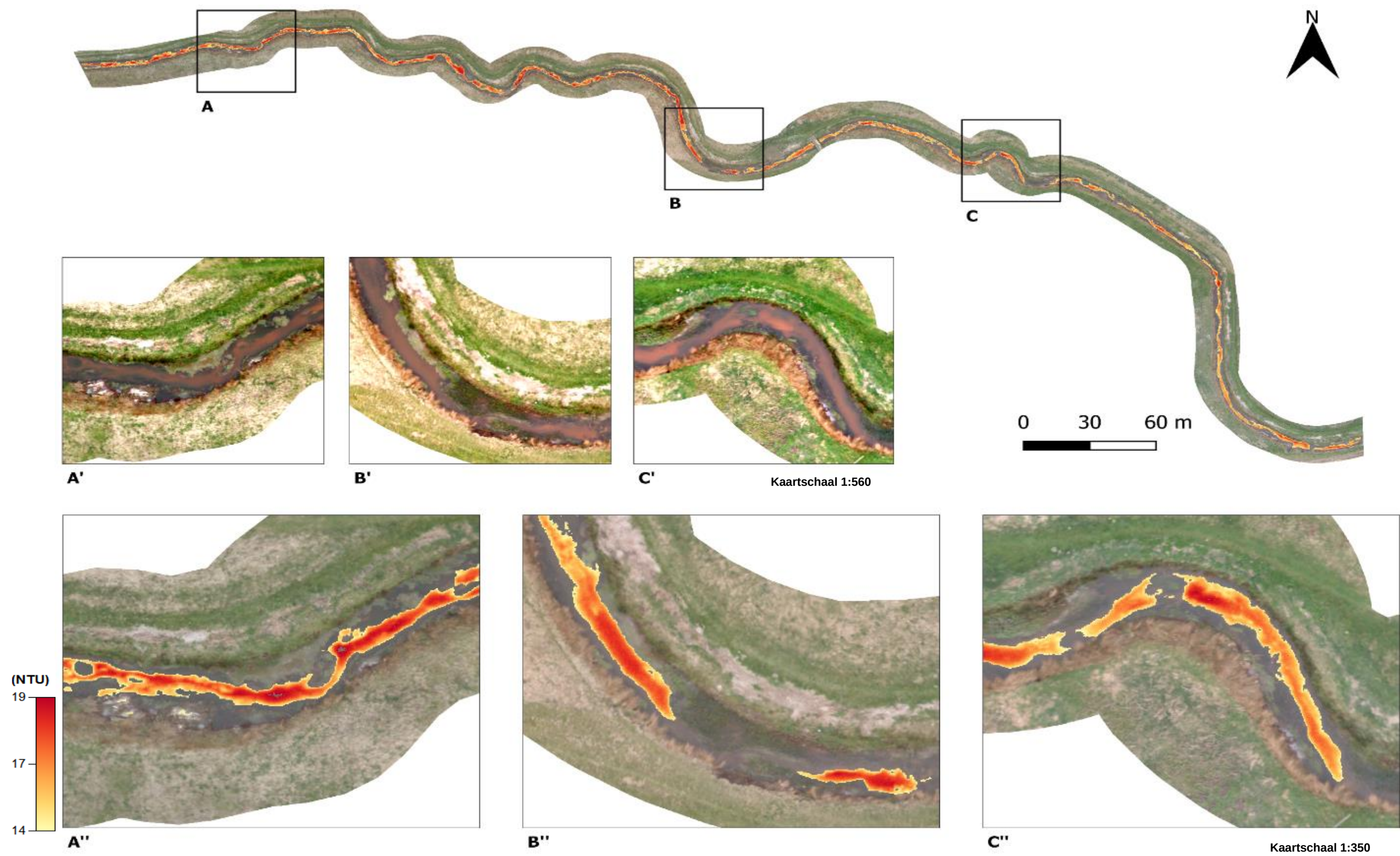
Figuur 8b. Bandratio als predictor (7 validatiepunten)

Remote sensing van regionale watergangen



Figuur 8c. Band-index als predictor

Bijlage 9: Troebelheidskaart (NTU)



Figuur 9. Troebelheidskaart op basis van het Rood/ NIR-predictor regressiemodel ($R^2=0,826$, $RMSE= 0,66$ (NTU)). De RGB-beelden (A' - C') zijn weergegeven met contrastverrijking.

Bijlage 10: Opstelling laboratoriumproef FLIR One Pro

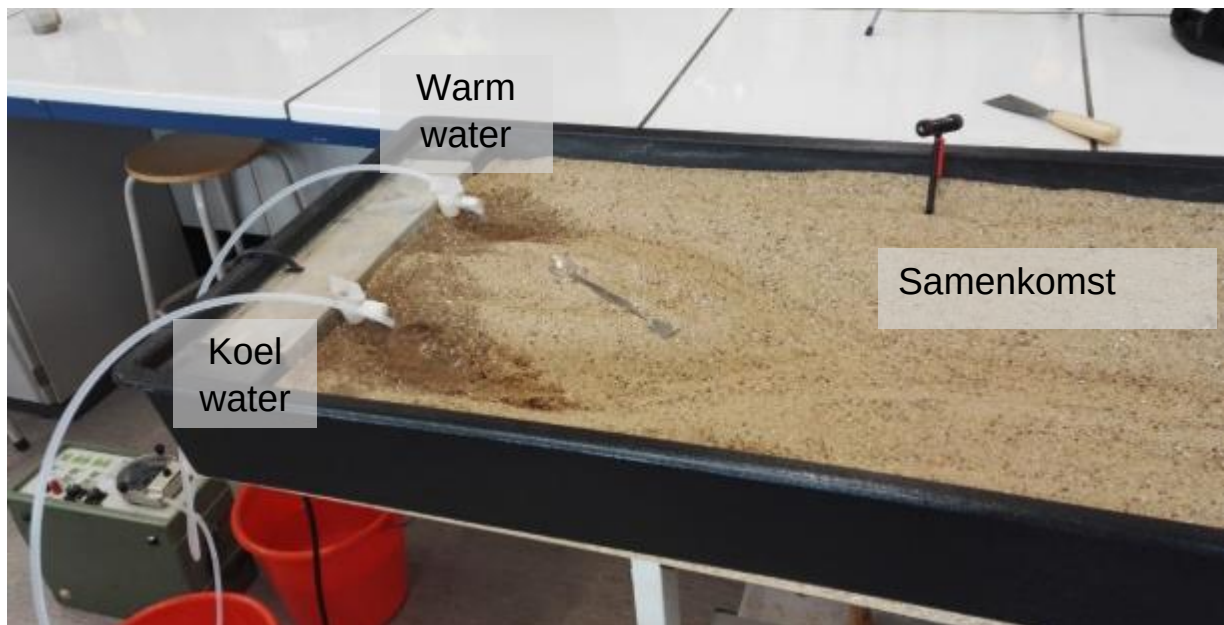
10.1 Doel

Het zandbakmodel dient om de meetresultaten van de FLIR One Pro te valideren. Verschillende toepassingen in de praktijk worden benaderd met deze proef. Het doel is om na te gaan in hoeverre deze veranderingen invloed hebben op de gevonden resultaten. Hiermee kan de betrouwbaarheid en validiteit van de FLIR One Pro worden ingeschat.

10.2 Opstelling

10.2.1 Zandbakmodel

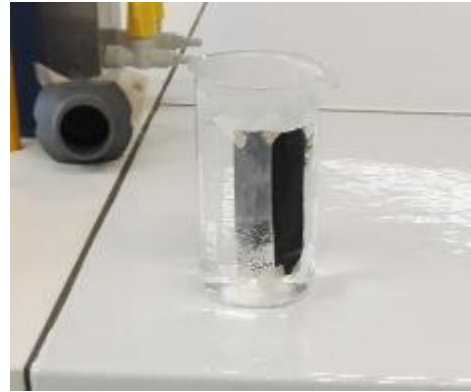
- Het zandbakmodel van Van Hall Larenstein wordt ingedeeld in twee watergangen die samenkomen (zie onderstaande figuur 10a);
- De thermometer (°C, 1 decimaal) meet de temperaturen van de watergangen op vier verschillende punten;
- Aanvoerwater sessie 1 en 2: $\pm 18^{\circ}\text{C}$ en $\pm 65^{\circ}\text{C}$
Aanvoerwater sessie 3 en 4: $\pm 18^{\circ}\text{C}$ en $\pm 35^{\circ}\text{C}$;
- De FLIR One Pro staat op een driepootstatief aan de kant van de monding en meet het volledige model;
- Een persoon blijft bij de smartphone staan, de ander controleert de aanvoerbuizen en voert de temperatuurmetingen uit.



Figuur 10a. Zandbakmodel waarin twee stromingen met verschillende temperaturen samenkomen

10.2.2 Invloed verschillende materialen

- Een maatcilinder wordt tweemaal gevuld met water ($\pm 18^{\circ}\text{C}$ en $\pm 65^{\circ}\text{C}$) (zie figuur 10b);
- Op de maatcilinder wordt een strook van aluminiumfolie en een strook van zwart plastic geplakt;
- Een persoon meet de temperatuur in de maatcilinder op het moment van de opname
- Een persoon maakt beelden met de FLIR One Pro.



Figuur 10b. Maatcilinder met opgeplakte

10.2.3 Invloed troebelheid

- Twee maatcilinders worden tweemaal gevuld met water ($\pm 20^{\circ}\text{C}$ en $\pm 35^{\circ}\text{C}$) (zie figuur 10c);
- Aan een maatcilinder wordt een handvol zand toegevoegd;
- Een persoon meet de temperatuur in de maatcilinders op het moment van de opnames;
- Een persoon maakt beelden met de FLIR One Pro.



Figuur 10c. Maatcilinders met verschillende troebelheid

10.2.4 Materialen

Een lijst van materialen die gebruikt worden is hieronder aangegeven:

- Zandbakmodel van Van Hall Larenstein (bestaande uit een tafel met een kunststof bak, gevuld met zand)
- FLIR One Pro
- Smartphone met USB-C-aansluiting en FLIR One applicatie
- Driepootstatief voor stabiel vasthouden van de smartphone en FLIR One Pro
- Slangenpomp (2x)
- Kunststofbuizen (4x)
- Digitale thermometer
- Maatcilinder (1 liter)
- Aluminiumfolie
- Zwart plastic verpakkingsmateriaal van een afvalzak
- Zand

10.3 Werkwijze

De temperatuur in het model wordt op vier punten gemeten als referentiewaarde. De opnames met de FLIR One Pro worden gedurende enkele minuten gemaakt. Bij de maatcilindermodellen wordt gekeken naar de vastgelegde temperaturen van verschillende soorten materiaal, namelijk een aluminiumfoliestrip en een zwart plastic strip. De opnames bestaan uit slechts één beeld, waardoor de vergelijking betrouwbaar is. De metingen worden tweemaal uitgevoerd: een keer op kraantemperatuur en een keer op $\pm 35^{\circ}\text{C}$. Daarnaast wordt een maatcilinder troebel gemaakt met behulp van zand. Ook hierbij wordt twee keer gekeken naar de resultaten van de FLIR One Pro, op kraanwatertemperatuur en bij verwarmd water op $\pm 35^{\circ}\text{C}$.

10.4 Resultaten

Van het zandbakmodel zijn vier meetsessies gehouden. Alleen de tweede bestaat uit video-opnames, de rest zijn foto-opnames. Uit de resultaten van tabel 10a is af te lezen dat de metingen van de FLIR voor koel water sterk overeenkomen met de geijkte thermometer. Voor warm water geldt dat de afwijking groter is, maar toch kan gesteld worden dat de metingen een duidelijke indicatie aantonen van de temperatuurverschillen.

Tabel 10a

Temperatuurmetingen zandbakmodel (alle data in $^{\circ}\text{C}$)

Sessie	Opname type	Begin-temperatuur Koel water	FLIR meting Koel water	Begin-temperatuur Heet water	FLIR meting Warm water	FLIR meting Samenkomst
Meetsessie 1	Foto's	18,0	18,6	67,0	56,0	33,0
Meetsessie 2	Video	18,0	18,6	67,0	54,5	31,0
Meetsessie 3	Foto's	18,4	18,1	35,1	32,4	24,0
Meetsessie 4	Foto's	18,4	18,1	35,1	32,7	24,1

De glazen maatcilinder met het opgeplakte materiaal is gemeten met twee verschillende watertemperaturen. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 10b. Hieruit is af te leiden dat slechts de gemeten waardes bij het aluminiumfolie afwijken bij een hogere temperatuur van het water. De andere resultaten zijn weliswaar niet overeenkomend, maar komen wel in de buurt van de vastgestelde temperatuur.

Tabel 10b

Temperatuurmetingen beplakte maatcilinder (alle data in $^{\circ}\text{C}$)

Watertemperatuur	Glas	Aluminiumfolie	Donker plastic
63,0	56,0	24,0	53,0
18,7	19,7	20,5	19,5

De laatste proef met de verschillende troebelheden levert duidelijk als resultaat dat de helderheid geen invloed heeft op de betrouwbaarheid van de FLIR One. Dit is te zien in tabel 10c.

Tabel 10c

Temperatuurmetingen helder en troebel water in maatcilinder (alle data in $^{\circ}\text{C}$)

Watertemperatuur	Helder water	Troebel water
19,1	18,9	18,9
33,2	34,0	32,4

Bijlage 11: Veldwerkplan pilotstudy FLIR One Pro

11.1 Doel

Het doel van dit veldwerk is om thermische beelden in te winnen met behulp van de FLIR One Pro thermische camera. Met de thermische beelden zou het mogelijk zijn om temperatuurverschillen van verschillende watergangen waar te nemen. Grote temperatuurverschillen kunnen namelijk duiden op een recente lozing stroomopwaarts in de watergang. Het plan dient er ook toe om verder toe te lichten op welke wijze de FLIR One Pro gebruikt kan worden en wat voor resultaten daaruit komen. Op basis daarvan kan een concluderend advies voor Waterschap Limburg opgeleverd worden om soortgelijke thermische remote sensing instrumenten wellicht in de toekomst vaker te gebruiken.

11.2 Opstelling

- Warmtebeelden van het wateroppervlak worden genomen op 6 april 2018 bij een aantal watergangen rondom het Afleidingskanaal zoals de Venrayse Spurkt, de Loobeek en het nabijgelegen RWZI-afvoerkanaal. Zie figuur 11 voor de meetpunten hiervan.
- Warmtebeelden van het wateroppervlak worden tevens genomen bij de Lollebeek op 12 april 2018. Zie figuur 11 voor de locatie
- De FLIR One Pro thermische camera wordt bediend door Willy Tjong en Bart Tromp

Een lijst van materialen die gebruikt worden in het veld is hieronder aangegeven:

- FLIR One Pro camera;
- Smartphone met USB-C-aansluiting en FLIR One-applicatie;
- Powerbank;
- Digitale thermometer (sonde);
- Uittrekbare arm om de thermometer op verschillende plaatsen boven het water te kunnen houden;
- Pen, papier en klembord;
- Handheld (smartphone) gps (5-10m nauwkeurigheid).

11.3 Werkwijze

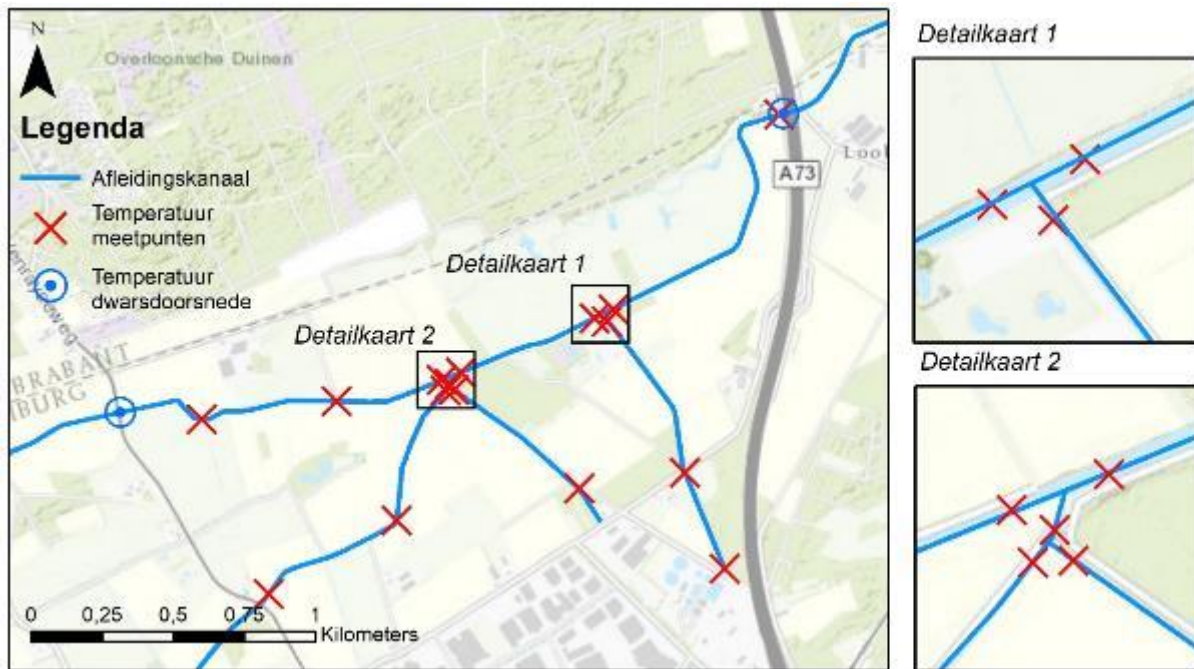
11.3.1 Temperatuurverschillen van de watergangen nabij het Afleidingskanaal

Met de FLIR One Androidapplicatie kan de FLIR One Pro camera bediend worden op een smartphone. Warmtebeelden worden genomen voor en na de instroming richting het Afleidingskanaal. Op dezelfde punten waar de warmtebeelden worden genomen wordt er een puntmeting uitgevoerd met de digitale thermometer. De digitale thermometer wordt circa 10 cm onder het water gedompeld. De meetpunten worden vastgelegd met het gps-apparaat.

Op dezelfde locatie worden bij een paar meetpunten dwarsdoorsneden van de temperatuurverschillen op drie verschillende dieptes van de waterkolom gemeten. Dit wordt met de digitale thermometer uitgevoerd. Een warmtebeeld van het wateroppervlak op dezelfde punten wordt ook genomen. De meetpunten worden tevens vastgelegd met het gps-apparaat.

11.3.2 Temperatuurverschillen bij Lollebeek

Op twee dagen worden ook temperatuurmetingen uitgevoerd bij Lollebeek. De eerste keer zal de FLIR One Pro gebruikt worden volgens de standaardprocedure: handheld. Hierbij worden de van tevoren bepaalde meetlocaties vastgelegd met een gps. De tweede keer wordt gekeken naar de mogelijkheden van dit apparaat om te fungeren als hij is gekoppeld aan een drone. Op deze manier worden de mogelijke gebruiksvormen van dit apparaat vanuit een bredere hoek bekeken.

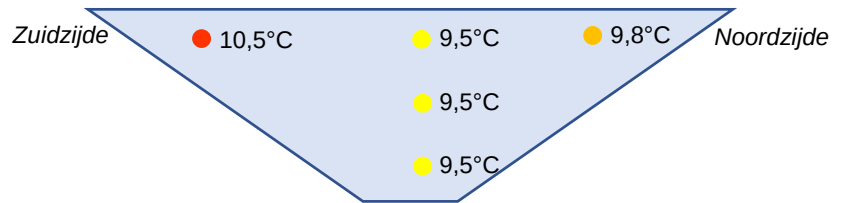


Figuur 11. Meetpunten sonde voor referentietemperatuur

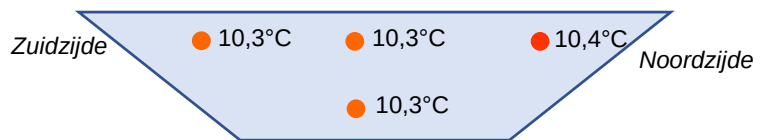
Bijlage 12: Dwarsprofielen temperatuur

NB: Vorm van dwarsprofielen zijn slechts een benadering. Kleuren indiceren relatieve temperatuurverschillen.

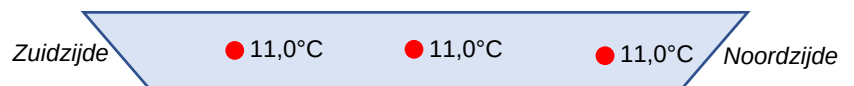
Dwarsprofiel 1:
Afleidingskanaal, bij duiker



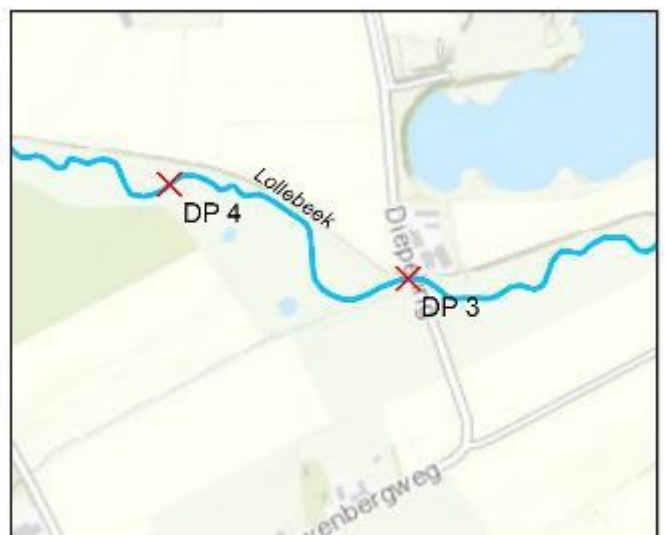
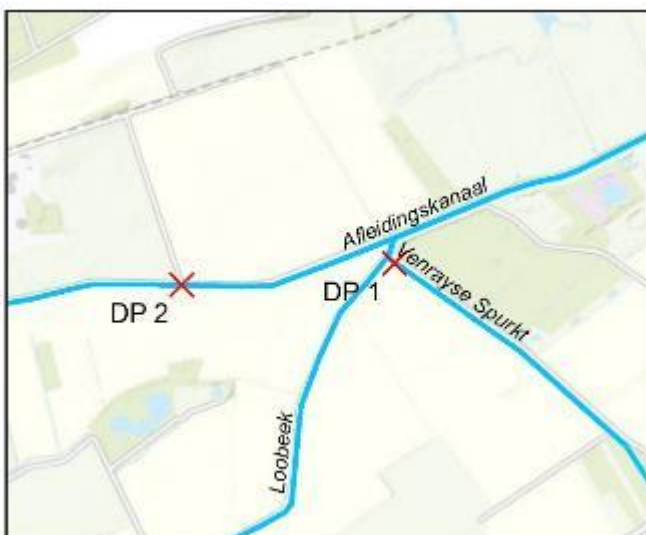
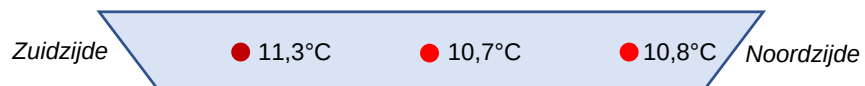
Dwarsprofiel 2:
Afleidingskanaal vanuit voetgangersbrug
(breed profiel, maar vrij ondiep)



Dwarsprofiel 3:
Lollebeek oost, naast weg



Dwarsprofiel 6:
Lollebeek, voetgangersbrug



Figuur 12. Situering meetpunten dwarsprofielen (schaal 1:10.000). Deze kaarten zijn noordgericht.