



Dedicated to innovation in aerospace

PUBLIC

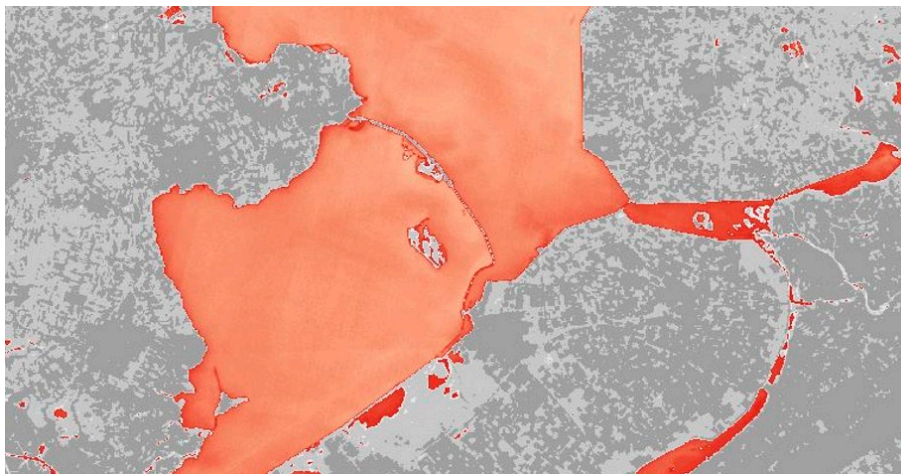
NLR-CR-2021-465 | juli 2022

Thermische waarneming vanuit de lucht en ruimte

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Thermische waarneming vanuit de lucht en ruimte



Probleemstelling

Voor de activiteiten van beleidsvorming, beleidsuitvoering en handhaving binnen het Ministerie van Infrastructuur en Waterhuishouding (IenW) en de hieraan gerelateerde uitvoeringsdiensten (zoals Rijkswaterstaat en KNMI) vormt informatie afgeleid uit aardobservatie een steeds relevantere bron van gegevens. Om te onderzoeken hoe nieuwe technische aardobservatie mogelijkheden kunnen worden benut voert het Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR) als toegepaste kennisinstelling in opdracht van het Ministerie van IenW een Kennisprogramma Aardobservatie uit. Eén van de onderwerpen waaraan in 2021 aandacht is besteed is het gebruik van thermisch infra rood waarnemingen.

Beschrijving van de werkzaamheden

De activiteiten richtten zich op twee hoofdonderwerpen. Als eerste de bruikbaarheid van medium resolutie thermische satellietbeelden voor het monitoren van de watertemperatuur van grote wateroppervlakken, waarbij het IJsselmeer als voorbeeld is genomen. Hierbij is ook aandacht besteed aan

RAPPORTNUMMER

NLR-CR-2021-465

AUTEUR(S)

H.H.S. Noorbergen
M. van Persie
S. Kraan

RUBRICERING RAPPORT

ONGERUBRICEERD

DATUM

juli 2022

KENNISGEBIED(EN)

Ruimtevaarttoepassingen

TREFWOORD(EN)

Aardobservatie
TIR
Drone
Satelliet
Watertemperatuur

algenbloei en aquathermie. Het tweede hoofdonderwerp betreft de mogelijkheden voor het gebruik van hoge resolutie thermische satelliet waarnemingen, in dit geval ingewonnen met behulp van een drone met een thermische camera. Hierbij was er speciale aandacht voor wegen.

Resultaten en conclusies

Met behulp van Landsat satellietwaarnemingen kunnen behoorlijk nauwkeurige temperatuurwaarnemingen worden gedaan aan de oppervlakte van grote waterlichamen (absoluut met standaard deviatie 0.9 °C en relatief met 0.1 °C). Hierbij is men wel afhankelijk van een heldere atmosfeer zonder bewolking. Een relatie tussen watertemperatuur en algenbloei kon niet direct worden gelegd. Een aantal toepassingsmogelijkheden voor aanwending van TIR ten behoeve van aquathermie zijn verkend.

Thermische satellietopnamen zijn op dit moment vrij beperkt beschikbaar in de vorm van 100 m resolutie opnamen van Landsat 8 en 9. Met de in aanbouw zijnde 'Albedo' constellatie bestaande uit 24 satellieten met 4m resolutie TIR sensoren gaat zowel de beschikbaarheid als de resolutie veranderen. Toepassing van dezelfde principes op waterlopen en detectie van lozingen wordt dan mogelijk. Een drone met thermische camera kan details waarnemen van enkele centimeters met relatieve temperatuurmetingen in tienden graden Celsius en absoluut in de orde van 0.5 graden en heeft minder last van atmosferische omstandigheden. Testen laten een relatie zien tussen de temperatuur van het asfaltdek en plasvorming en mogelijk de oppervlaktestructuur, vooral bij perioden van opwarming of afkoeling.

Toepasbaarheid

Toepassingen zijn mogelijk voor monitoring van de temperatuur van grote watervlakken, detectie van lozingen en monitoring van de kwaliteit van asfaltwegen. Aanbevolen wordt om zodra de eerste hoge resolutie Albedo opnamen beschikbaar komen een nieuw experiment op te zetten. Zowel voor monitoring van het IJsselmeer in combinatie met lagere resolutie Landsat 8 en 9 waarnemingen als voor detectie van lozingen in rivieren en andere waterlopen, mogelijk in combinatie met thermische drone waarnemingen. Daarnaast wordt aanbevolen een gestructureerd experiment op te zetten met een thermische drone voor de inspectie van de kwaliteit van wegen.

NLR

Anthony Fokkerweg 2

1059 CM Amsterdam

p) +31 88 511 3113

e) info@nlr.nl i) www.nlr.nl



Dedicated to innovation in aerospace

PUBLIC

NLR-CR-2021-465 | juli 2022

Thermische waarneming vanuit de lucht en ruimte

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

AUTEUR(S):

H.H.S. Noorbergen

NLR

M. van Persie

NLR

S. Kraan

NLR

Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar en/of opdrachtgever.

OPDRACHTGEVER	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
CONTRACTNUMMER	NLR ordernummer 4203303
EIGENAAR	NLR
NLR DIVISIE	Aerospace Systems
VERSPREIDING	Onbeperkt
RUBRICERING TITEL	ONGERUBRICEERD

GOEDGEKEURD DOOR:		DATUM
AUTEUR	H.H.S. Noorbergen	11-07-2022
REVIEWER	M. van Persie	16-03-2022
BEHERENDE AFDELING	M. Keuning	25-08-2022

Samenvatting

Voor de activiteiten van beleidsvorming, beleidsuitvoering en handhaving binnen het Ministerie van Infrastructuur en Waterhuishouding (IenW) en de hieraan gerelateerde uitvoeringsdiensten (zoals Rijkswaterstaat en KNMI) vormt informatie afgeleid uit aardobservatie een steeds relevantere bron van gegevens. Om te onderzoeken hoe nieuwe technische aardobservatie mogelijkheden kunnen worden benut, voert het Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR) als toegepaste kennisinstelling in opdracht van het Ministerie van IenW een Kennisprogramma Aardobservatie uit. Eén van de onderwerpen waaraan in 2021 aandacht is besteed is het gebruik van thermisch infra rood waarnemingen.

De activiteiten richtten zich op twee hoofdonderwerpen. Als eerste de bruikbaarheid van medium resolutie thermische satellietbeelden voor het monitoren van de watertemperatuur van grote wateroppervlakken, waarbij het IJsselmeer als voorbeeld is genomen. Hierbij is ook aandacht besteed aan algenbloei en aquathermie. Ten tweede de mogelijkheden voor het gebruik van hoge resolutie thermische satelliet waarnemingen, in dit geval ingewonnen met behulp van een drone met thermische camera. Hierbij was er speciale aandacht voor wegen.

Geconcludeerd kan worden dat met behulp van Landsat satellietwaarnemingen behoorlijk nauwkeurige temperatuurwaarnemingen kunnen worden gedaan van grote wateroppervlakken. Voor de IJsselmeercasus werd een gemiddelde fout van 0 °C gevonden en een standaard deviatie van 0.9 °C. Relatief kunnen nog gedetailleerdere temperatuurvariaties worden waargenomen in de orde van 0.1 °C. Hierbij is men wel afhankelijk van een heldere atmosfeer zonder bewolking. Een relatie tussen de momentane watertemperatuur en het niveau van algenbloei kon niet worden vastgesteld. De gemeten temporele en ruimtelijke variatie in watertemperatuur kan mogelijk worden gebruikt voor verdere analyses ten behoeve van aquathermie toepassingen.

Thermische satellietopnamen zijn op dit moment vrij beperkt beschikbaar. Belangrijkste bron zijn Landsat 8 en 9 met wekelijks opnamen met 100 m resolutie. De in aanbouw zijnde 'Albedo' constellatie, met 24 satellieten die 4 m resolutie TIR sensoren aan boord hebben, biedt veel belovende vooruitzichten, waarbij met veel meer detail en grotere regelmaat waarnemingen mogelijk zijn. Met hogere resolutie opnamen van toekomstige satellieten of vliegtuigen/drones kunnen dezelfde principes als onderzocht voor het IJsselmeer ook worden toegepast op waterlopen en is ook detectie van lozingen naar verwachting goed mogelijk.

Uit de testen met de ATIR drone kan worden geconcludeerd dat met een drone zeer hoge resolutie (tot enkele centimeters) thermische opnamen kunnen worden gemaakt met relatieve temperatuurmetingen in tienden graden Celsius en absoluut in de orde van 0.5 graden. Doordat de drone relatief laag vliegt zijn de atmosferische omstandigheden minder verstorend. Voor het monitoren van de kwaliteit van wegen laten eerste testen zien dat de temperatuur van het asfaltdek wordt beïnvloed door plasvorming en mogelijk ook door verandering van de oppervlaktestructuur. Dit wordt met name zichtbaar bij perioden van opwarming of afkoeling. Voor praktische bruikbaarheid zijn verdere experimenten nodig.

Aanbevolen wordt om zodra de eerste hoge resolutie Albedo opnamen beschikbaar komen, naar verwachting in 2024, een nieuw experiment op te zetten. Zowel voor monitoring van het IJsselmeer in combinatie met medium resolutie Landsat 8 en 9 waarnemingen als voor detectie van lozingen in rivieren en andere waterlopen, mogelijk in combinatie met thermische drone waarnemingen. Daarnaast wordt aanbevolen een gestructureerd experiment op te zetten met een thermische drone voor de inspectie van de kwaliteit van wegen, zodat er beter inzicht kan worden opgebouwd in de mate waarin- en condities waaronder met thermische waarneming vanuit de lucht informatie over de wegkwaliteit kan worden ingewonnen.

Inhoudsopgave

Afkortingen	5
1 Introductie	6
2 Thermische aardobservatie	7
2.1 Golflengtegebieden en karakteristieken	7
2.2 Huidige en toekomstige satellieten	7
2.3 Vliegtuig en drone sensoren	10
2.4 Toepassingen en geselecteerde casussen	12
2.5 Readiness levels TIR	12
3 Medium resolutie temperatuur IJsselmeer	14
3.1 Testgebied en periode	14
3.2 Luchttemperatuur	14
3.3 In-situ waarnemingen meetstations	15
3.4 Satellietmetingen	16
3.5 Verbetering satellietwaarnemingen	20
3.6 Analyse van de resultaten	23
3.7 Aquathermie	28
3.8 Algenbloei	32
4 Hoge resolutie temperatuur van wegen en waterlopen	38
4.1 Achtergrond	38
4.2 NLR Drone met thermische camera	38
4.3 Grondtest	40
4.4 Testvlucht	40
5 Conclusies en aanbevelingen	46
6 Referenties	48

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
ATIR	Airborne Thermal Infra Red
BNDVI	Blue Normalized Difference Vegetation Index
C	Celsius
CET	Central European Time
GMT	Greenwich Mean Time
HSI	Hyper Spectral Imaging
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterhuishouding
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
LWIR	Long Wave Infra Red
MET	Middle European Time
MWIR	Mid Wave Infra Red
NAP	Normaal Amsterdams Peil
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NLR	Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum
RWS	RijksWaterStaat
SABI	Surface Algal Bloom Index
SWIR	Short Wave Infra Red
TEA	Thermische Energie uit Afvalwater
TED	Thermische Energie uit Drinkwater
TEO	Thermische Energie uit Oppervlaktewater
TIR	Thermal Infra Red
TIRS	Thermal Infra Red Sensor
UTM	Universal Transverse Mercator
WKO	Warmte Koude Opslag

1 Introductie

Voor de activiteiten van beleidsvorming, beleidsuitvoering en handhaving binnen het Ministerie van Infrastructuur en Waterhuishouding (IenW) en de hieraan gerelateerde uitvoeringsdiensten (zoals Rijkswaterstaat en KNMI) vormt informatie afgeleid uit aardobservatie een steeds relevantere bron van gegevens.

De technologische ontwikkelingen op het gebied van waarnemings satellieten en data analyse methodieken gaan snel en het is zinvol steeds te evalueren en onderzoeken hoe nieuwe mogelijkheden benut kunnen gaan worden voor de taken van het Ministerie. In dat licht voert het Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR) als toegepaste kennisinstelling in opdracht van het Ministerie van IenW een Kennisprogramma Aardobservatie uit.

In 2020 heeft het NLR in samenspraak met het Ministerie een analyse gemaakt van de belangrijkste ontwikkelingen in relatie tot de verschillende activiteiten waarmee het Ministerie zich bezig houdt. Voor een vijftal ervan is vervolgens een korte inventarisatie gemaakt [RD 1]. Voor twee van deze onderwerpen is besloten om 2021 een verdere verdieping uit te voeren, te weten de integriteit van aardobservatie data en het gebruik van thermisch infra rood waarnemingen. In dit rapport worden de resultaten van het laatste onderwerp beschreven. De resultaten van de integriteit van aardobservatie data zijn beschreven in een apart rapport [RD 2].

De activiteiten richtten zich op twee hoofdonderwerpen. Als eerste de bruikbaarheid van medium resolutie thermische satellietbeelden voor het monitoren van de watertemperatuur van grote wateroppervlakken, waarbij het IJsselmeer als voorbeeld is genomen. Ten tweede de mogelijkheden voor het gebruik van hoge resolutie thermische satelliet waarnemingen, in dit geval gesimuleerd met behulp van een drone met thermische camera. Hierbij was er speciale aandacht voor waterlopen en wegen.

Bij de uitvoering van de activiteiten is er regelmatig contact geweest met Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening.

Dit rapport vormt een beknopt verslag van de uitgevoerde activiteiten, waarin de belangrijkste werkzaamheden en bevindingen zijn vastgelegd. Na deze introductie wordt in hoofdstuk 2 een geactualiseerd overzicht gegeven van thermische satellietwaarneming in relatie tot de IenW beleidsterreinen. Hoofdstuk 3 beschrijft de waarneming van de watertemperatuur van het IJsselmeer met satellietbeelden. Hoofdstuk 4 gaat in op de waarneming van de warmte van waterlopen en wegen met drone opnamen. In hoofdstuk 5 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

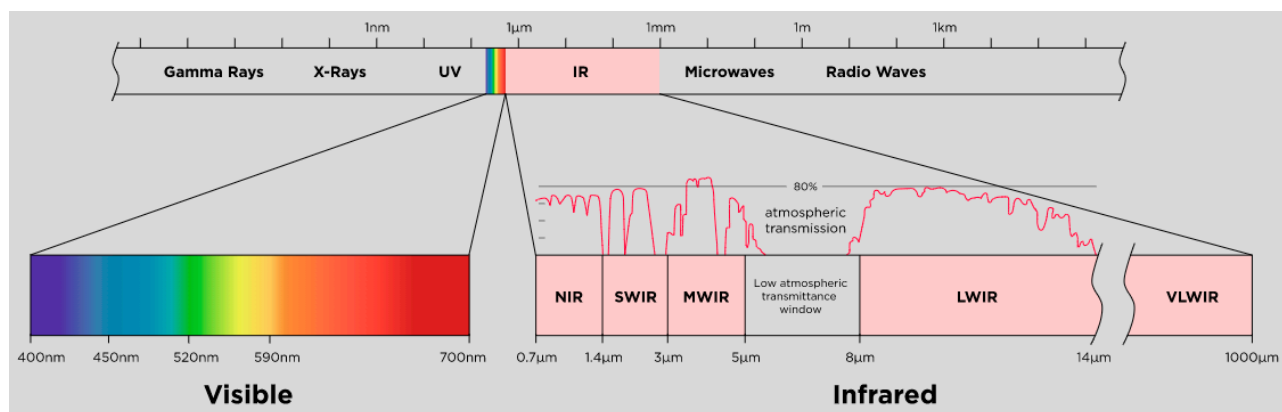
2 Thermische aardobservatie

2.1 Golflengtegebieden en karakteristieken

Thermisch infrarood waarnemingen worden gedaan in het golflengtegebied wat begint op $\pm 6 \mu\text{m}$ en loopt tot $\pm 15 \mu\text{m}$, vooral samenhangend met straling die wordt uitgezonden ten gevolge van de temperatuur van objecten.

Infrarood waarnemingen worden onderscheiden in verschillende golflengte-deelgebieden, samenhangend ook met de atmosferische vensters. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de NIR, SWIR, MWIR en LWIR golflengtegebieden.

Zie Figuur 1 en Tabel 1.



Figuur 1: Het thermische golflengtegebied als onderdeel van het bredere spectrum en onderverdeeld in deelgebieden

Tabel 1: Infrarode golflengtegebieden en hun belangrijkste karakteristieken

Afkorting	Naam	Spectrale golflengte	Commentaar
NIR	Near InfraRed	0.7-1.4 μm	Net naast het normale rood, veel reflectie door vegetatie
SWIR	ShortWave InfraRed	1.4-3 μm	Gevoeligheid voor vochtgehalte
MWIR	MidWave InfraRed	3-8 μm	Emissie van zeer warme objecten en reflectie van zonlicht
LWIR	LongWave InfraRed	8-15 μm	Emissie van het aardoppervlak en objecten

Deze studie richt zich met name op het meten van temperaturen, waarvoor het LWIR spectrale golflengtegebied het meest relevant is.

2.2 Huidige en toekomstige satellieten

Er is slechts een beperkt aantal civiele satellieten dat waarnemingen verzamelt in het LWIR golflengtegebied. En tot nu toe leveren de meeste hiervan beelden in een tamelijk lage ruimtelijke resolutie. Eén categorie vormen de satellieten die gericht zijn op meteorologische en klimatologische toepassingen. Deze hebben een resolutie in de orde van 1000 tot 500 meter. Een tweede categorie vormen satellieten die meer gericht zijn op het monitoren van ontwikkelingen in landschap en natuur, in de orde van 120 tot 20 meter. Een derde categorie vormen initiatieven voor satellieten die gericht zijn op hoge resoluties in de orde van 4 meter. Zie Tabel 2.

Tabel 2: Overzicht van huidige en toekomstige satellieten met MWIR/LWIR waarnemingscapaciteit

Satellite	Instrument	Resolution (m)	Revisit	Spectral bands	Status	Agency/databroker/price	Further details
Low spatial resolution							
Meteosat-11 (MSG)	SEVIRI	3000	0.01 day (15 min)	1 MWIR and 5 LWIR	operational	ESA / free of cost	Three similar satellites
NOAA-19	AVHRR/3	1100	0.5 day	1 MWIR and 2 LWIR	operational	NOAA / free of cost	NOAA-18 is also in operation
Aqua	MODIS	1000	daily	6 MWIR and 10 LWIR	operational	NASA/USGS/free of cost	
GCOM-C	SGLI	1000	daily	LWIR (10.8-12 μ m)	operational	JAXA	
Sentinel-3	SLSTR	1000	0.9 day	1 MWIR and 4 LWIR	operational	ESA / free of cost	duo-constellation, spectral band F=Fire
Terra	MODIS	1000	daily	6 MWIR and 10 LWIR	operational	NASA/USGS/free of cost	
PhiSat-1	Hyperscout-2	490		3 LWIR	operational	Cosine (ESA/NSO)	
Suomi-NPP	VIIRS	375 - 750	0.5 day	375 m: 1 MWIR and 2 LWIR 750 m: 2 MWIR and 3 LWIR	operational	NASA/NOAA / free of cost	Higher level products are produced to 500 m and 1000 m / also night time imagery
EarthCare	MSI	500		3 LWIR	future	ESA/JAXA	
WildFireSat		400	NRT	1 MWIR and 1 LWIR	future (2025)	Canadian Space Agency	Presumably over Canadian territory only
Medium spatial resolution							
Landsat-5	TM	120	16 days	1 LWIR	mar1984 - nov2011	NASA/USGS/free of cost	
Landsat-7	ETM+	60	16 days	1 LWIR	Operational (start apr1999)	NASA/USGS/free of cost	from 31-5-2003 SLC problem
Landsat-8	TIRS	100	16 days	2 LWIR	Operational Start apr2013	NASA/USGS/free of cost	
Landsat-9	TIRS	100	16 days (8 days offset with L8)	2 LWIR	Operational start feb2022	NASA/USGS/free of cost	
Terra	ASTER	90		5 TIR bands from 8 μ m until 12 μ m	operational	METI-Japan/NASA / free of cost	
Satelogic	Aleph-1	90		1 LWIR	Operational (built up)	Commercial	constellation (25 sats)
HyspIRI	HyTES-TIR	60		256 LWIR	future	NASA	
HyTI		60		50 LWIR	future	University of Hawaii	
TRISHNA		50	3 days	4 LWIR bands	future (2024)	CNES/ISRO	
LSTM		50	sub-weekly		future	ESA/Airbus Spain	Two satellites, day and night
ISS	ECOSTRESS	46			future (2023)	NASA	
Obzor-O N1/N2	IK-radiometer	40		1MWIR and 2 LWIE	future	ROSKOSMOS	
Resurs-PM	BIK-SD 1	20-23.5		6 MWIR / LWIR	future	ROSKOSMOS	

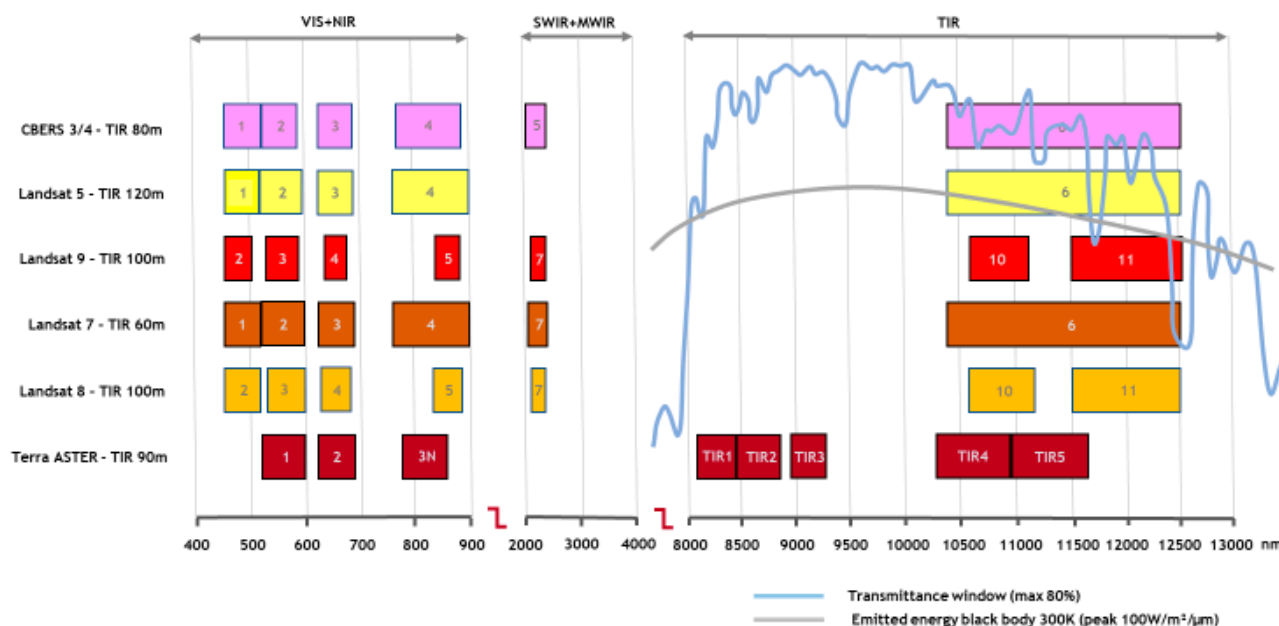
Satellite	Instrument	Resolution (m)	Revisit	Spectral bands	Status	Agency/databroker/price	Further details
High spatial resolution							
Satellite Vu	DarkCarb	4	daily	1 MWIR (3.7-5 μm)	future (2022)	commercial	constellation of 7 satellites
Albedo		4	daily	1 LWIR (7.5-13.5 μm)	future (2024)	Albedo Space	Constellation of 24 satellites

In het algemeen beschouwd laat het overzicht zien dat de TIR opnametechnieken vooral door overheidsprogramma's van de ruimtevaartlanden van het eerste uur worden ontwikkeld: USA, Rusland, Japan, India en de EU. Nieuwe initiatieven worden ook ondernomen door een aantal commerciële bedrijven.

De nu hoogste geplande TIR resolutie is 3 tot 4 meter, Satellite Vu en Albedo, opvallend en interessant vanwege de hoge resolutie en de korte termijn waarin deze satelliet constellaties gaan worden opgebouwd.

Vanaf februari 2022 is de beschikbaarheid van kostenvrije, medium resolutie TIR (100 m) aanmerkelijk uitgebreid met de toevoeging van Landsat-9. Zowel Landsat-8 als Landsat-9 hebben een zogenaamde revisit cycle van 16 dagen en er wordt voor gezorgd dat er 8 dagen faseverschil is tussen beide cycli. Dit gegeven plus het gegeven dat op de Nederlandse breedtegraad een willekeurig gebied vrijwel altijd wordt bedekt door twee naast elkaar liggende Landsat opnamestroken (Landsat paths) betekent dat een Nederlands gebied eens per 7 dagen door een Landsat satelliet wordt opgenomen én dat bij een opname op een bepaalde dag er altijd een TIR opname is op de dag ervoor of erna.

Een aantal TIR satellieten uit de tabel "Huidige en toekomstige TIR satellieten" zijn in Figuur 2 in beeld gebracht en worden onderling vergeleken voor wat betreft de thermische banden.



Figuur 2: Vergelijking van thermische spectrale banden voor een aantal satellieten

Het visuele golflengtegebied is meegenomen omdat die banden vaak hogere resolutie hebben dan de TIR banden en behulpzaam zijn bij de oriëntatie. SWIR en MWIR zijn meegenomen omdat vanaf 2 á 3 μm emissie al enigszins tot uiting komt bij objecten met zeer hoge temperaturen. Een voorbeeld hiervan is de verbranding van graanrestanten op het veld zoals dat nog veel in Oost Europa gebeurt, dit is goed waarneembaar met Landsat band 7 (en ook met band 5). In het TIR golflengte gebied tussen 8 en 13 μm nemen de meeste satellieten waar in het gedeelte tussen 10.5 en 12.5 μm , de oudere sensoren in een breed bereik met één TIR band, de nieuwere sensoren in twee TIR banden. Wat opvalt is

dat in het gebied tussen 9.5 en 10.5 μm geen thermische banden voorkomen. Dat komt vanwege hoge absorptie door ozon in dit golflengtegebied. ASTER is het enige instrument dat ook meet in het gebied tussen 8 en 9.5 μm .

In de figuur is de transmissiecurve in het TIR bereik opgenomen, de lichtblauwe curve. Het is enigszins lastig om meerdere verticale schalen in één figuur weer te geven, daarom hierbij de opmerking dat de maximale transmissie in het TIR ligt om en nabij 80%. De ozon absorptie bij 9.5 μm is herkenbaar, in deze figuur echter niet zo geprononceerd als kennelijk wordt ervaren (bij de keuze voor TIR banden). Er bestaan overigens ook wel transmissiecurven waarbij de transmissie bij 9.5 μm terugloopt tot 30 á 40%.




Bij de grijze curve hoort een verticale schaalverdeling in eenheden $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$. Bij de emissie curve van een perfecte straler, een zogenaamde blackbody, ligt bij 300 graden Kelvin de piek op $100 \text{ W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$. Radiantiepieken worden hoger bij toename van temperatuur maar verschuiven dan ook naar de kortere golflengten, zie ook het voorbeeld van de verbranding van de graanresten.

2.3 Vliegtuig en drone sensoren

Thermische sensoren kunnen ook worden gebruikt vanuit vliegtuigen en drone. Voordeel is dat de ruimtelijke resolutie veel hoger is en er meer flexibiliteit is om het moment, de duur en de locatie van de opnamen te kiezen.

Bij drones speelt wel de eis van miniaturisering, wat een beperking van de kwaliteit met zich mee kan nemen. Tabel 3 geeft een indruk van enkele camera's die aan boord van een drone kunnen worden gebruikt.

Tabel 3: Voorbeelden van drone thermische sensoren

	Optris PI 640 ¹	FLIR Vue Pro R 640 ²	Xenics Gobi+ 640 ³
			
Achtergrond, toepassingen	Industry, drones	drone	Machine vision
Spectrale band TIR (8-12um)	7.5-13 µm	7.5-13.5 µm	8-14 µm
Resolutie en frequentie	640x480 32 Hz / 120x480 120 Hz	640x512 30 Hz	640x480 60 Hz
Gevoeligheid NETD	75mK ±2%	5%	55 mK
Gewicht	320 gr	325-400 gr	263 gr
Afmeting	46x56x90 mm	45x57x62 mm	49x49x79 mm
Power consumptie	USB powered, of extern 24 V	4.8-6V, evt converter 4-30V	12V
Interfacing – control	USB2 Via pi-connect of evocortex API	Beperkt. Mini-USB. MAVlink ⁴ . Configuratie via app mobiele telefoon. Keuze tussen control of streaming, waarbij herstart nodig is bij switchen	GigE protocol met API Camlink protocol (niet zo handig)
Interfacing – video and metadata	Frames plus system metadata. External (platform data not directly supported)	MAVlink, evt HDMI converter Frames + Platform metadata	GigE VIsion / CameraLink
Software	PI Connect Evocortex?	FLIR Vue Pro APP	Xeneth
Data opslag	Niet in camera Via evocortex	MicroSD, tif/jpg,MJPEG/H.264	Niet in camera
Streaming	Via evocortex, encoder nodig	HDMI met encoder (geen simultane opslag mogelijk)	Streaming GigE, encoder nodig
Prijs	€ 6800	€ 5000	~ € 12000
Kalibratie ⁵	Is radiometrisch gecalibreerd en kan worden hercalibreerd	R versie is absoluut gecalibreerd	Is radiometrisch gecalibreerd en kan worden hercalibreerd
Type Shutter (global – rolling)	global	?	Rolling
Lens (meerdere FOV mogelijk)	12/15/33/60/90deg	32/45/69 deg	10/18/25/40/50 mm
Robuustheid	Ruggedized, IP67	Semi-ruggedized?	Semi-ruggedized, is wel kastje, IP40

¹ <https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640>

² <https://www.flir.com/products/vue-pro-r/?model=436-0024-00>

³ <https://www.xenics.com/products/gobi-640-series/>

⁴ MAVlink is een veelgebruikt en laagdrempelig autopilot protocol voor UAV en camera control en ook video transfer.

⁵ Absolutie thermische kalibratie is vooral relevant om multi-temporele opnamen met elkaar te kunnen vergelijken en absolute temperaturen te kunnen bepalen. In eerste fase niet noodzakelijk, later wel relevant.

2.4 Toepassingen en geselecteerde casussen

In de in 2020 voor IenW uitgevoerde korte inventarisatie van thermische satellietwaarneming [RD 1] is ook een overzicht gegeven van mogelijke toepassingen. De belangrijkste toepassingen die hier werden genoemd zijn:

- Landbouw – verdampingskaarten, stress in gewassen, verzilting (zoute kwel).
- Water resource management – drinkwater, landbouw, sanitatie, industrie, vrije tijd.
Thermische vervuiling – koelwaterlozing industrie, opwarming oppervlaktewater.
- Monitoren in stedelijk gebied – heat islands.
- Zeestroming t.g.v. temperatuurverschillen – onder andere t.b.v. zeestraten, navigatie/efficiëntie.
- Dijkbewaking – kwel, inklinking, materiaalverschillen in het dijklichaam.
Mineralen en bodemsoorten (bij voorkeur i.c.m. HSI) – begaanbaarheid terrein.
- Natuurbranden.

In overleg met vertegenwoordigers van het Ministerie en Rijkswaterstaat is besloten tot nadere verdieping in twee casussen.

- Watertemperatuur monitoring van het IJsselmeer. Rijkswaterstaat regelt het monitoren van de watertemperatuur van de grote binnenwateren en registreert zowel variaties in de tijd als ruimtelijke variaties. Hiertoe zijn er op een aantal locaties vaste meetstations geplaatst. Het is interessant na te gaan hoe goed satellietmetingen overeenkomen met de metingen van deze stations en in hoeverre satellietmetingen een beter inzicht kunnen geven over de ruimtelijke variatie van de temperatuur. Aandachtspunt hierbij was of het ook mogelijk zou zijn algenbloei te detecteren. Daarnaast heeft Rijkswaterstaat interesse in het monitoren van de watertemperatuur van waterlopen als rivieren en kanalen. Dit ook in relatie tot lozingen van afvalwater en koelwater. De ruimtelijke resolutie van de satellietbeelden hiervoor (100 m) is op dit moment echter een beperking. Rijkswaterstaat heeft in 2014 onderzoek laten doen naar de mogelijkheid om met satellietbeelden informatie te verzamelen over een aantal brede waterlopen [RD 3]. Het NLR heeft zich geconcentreerd op het IJsselmeer.
- Monitoring van de kwaliteit van het wegdek met behulp van thermische metingen. De gedachte hierbij is dat slechte plekken in het wegdek leiden tot enerzijds plasvorming en anderzijds een andere structuur van het asfalt, welke invloed kunnen hebben op het thermische gedrag van het wegoppervlak. Om dit te kunnen meten is wel een hogere ruimtelijke resolutie nodig. Het NLR was in het kader van een ander project bezig met de ontwikkeling van een drone met thermische camera. Deze is ingezet om testopnamen te maken en deze te evalueren.

De resultaten van beide casussen zijn beschreven in hoofdstukken 3 en 4.

2.5 Readiness levels TIR

Readiness levels zijn te onderscheiden in:

- TRL Technology Readiness Level.
- ARL Application Readiness Level.
- SRL Stakeholders/Societal Readiness Level.

TRL is een rangschikking in hoeverre een techniek gereed is, volwassen is, voor gebruik. ARL speelt zich af in de fase van onderzoek naar een nieuwe techniek. SRL is een rangschikking die aangeeft hoe ver gevorderd het gebruik in

organisaties is. Alle drie Readiness rangschikkingen bestaan uit 9 levels. In het algemeen omvatten level 1 t/m 3 de uitzoekfase, level 4 t/m 6 de ontwikkelfase, level 7+8 de demonstratie fase en level 9 de uitrol fase. Het hoeft niet altijd persé zo te zijn dat alle levels van 1 t/m 9 in de volgorde TRL, ARL, SRL doorlopen moeten worden.

Van TRL in Space bestaat een algemene uitleg van NASA: [Technology Readiness Level | NASA](#)

Van ARL in de aardobservatie bestaat een algemene toelichting van NASA: [Applied Sciences Program: Decision Support through Earth Science Results Step 1 Review Board ——— Cooperative Agreement Notice Released: Sept. 17, 2004 \(nasa.gov\)](#)

SRL wordt in het algemeen als volgt omschreven (door de overheid, Staatscourant): [Staatscourant 2021, 45632 | Overheid.nl > Officiële bekendmakingen \(officielebekendmakingen.nl\)](#), zie paragraaf 7.2.2.

Het onderkennen en indelen van specifieke thermisch infrarood (TIR) toepassingen in een van de levels van TRL, ARL en SRL is niet altijd eenvoudig. Voor zover bekend bestaan er geen kant en klare concreet ingevulde readiness levels t.a.v. TIR. Hieronder is een poging gedaan om TIR toepassingen, voor zover vanuit de lucht (dus vanuit drone, vliegtuig of satelliet), in te delen in TRL en ARL. SRL is achterwege gelaten omdat die levels beter kunnen worden bepaald door de gebruiker zélf. De bepaling van het TRL en ARL level in onderstaande tabel is een objectieve bezigheid, hetzij door interpretatie van de auteur, hetzij door de opgave van de betreffende marktpartij. En uiteraard is de bepaling tijdsafhankelijk; bij minder actuele informatie kan de huidige TRL en ARL inmiddels zijn opgehoogd.

TIR toepassing	Drone	Vliegtuig/helikopter	Satelliet
Bewaking		TRL3 / ARL3	
Bodemvocht			TRL9 / ARL5
Detectie dieren	TRL9 / ARL7		
Hitte stress en waterkwaliteit			TRL9 / ARL4
Opsporing en Redding personen	TRL9 / ARL8	TRL9 / ARL9	
Piping & kwel detectie	TRL2 / ARL2	TRL7 / ARL7	
Thermal heat islands			TRL9 / ARL4
Thermografie (isolatie daken)	TRL9 / ARL7		
Verdamping gewas	TRL5 / ARL2		TRL9 / ARL6
Warmtelozing water	TRL8 / ARL8		
Waterkeringen (droog/nat)	TRL7 / ARL7		
Weerverwachting/weermodellen			TRL9 / ARL8
Zonnepanelen inspectie	TRL9 / ARL7		

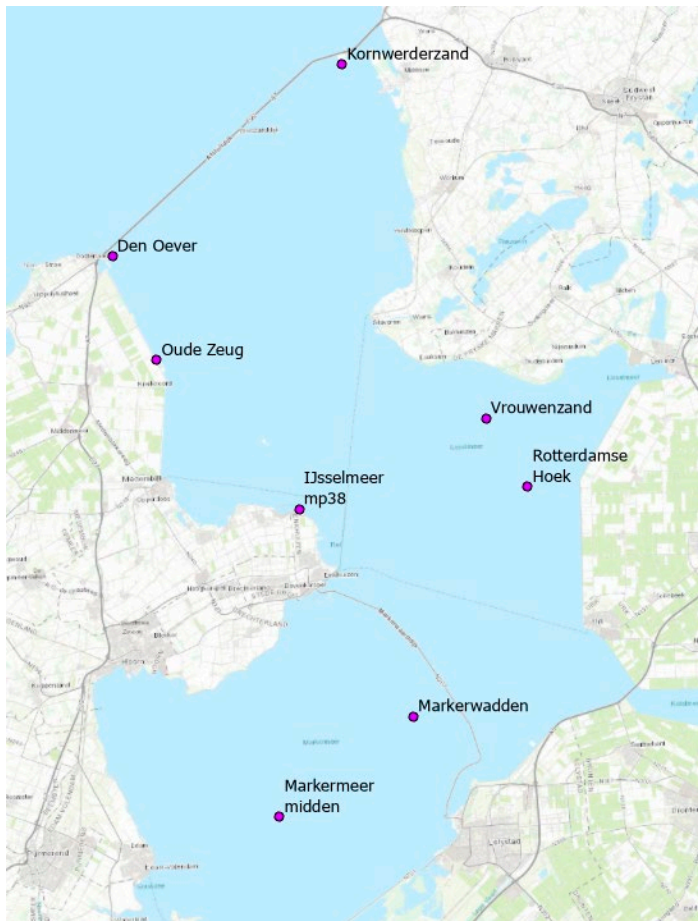
Enkele opmerkingen bij de bovenstaande tabel:

- Bij de satelliet is TRL vaak hoger aangegeven dan ARL. Dat heeft veelal te maken met niet toereikende ruimtelijke- en temporele resolutie van satellieten.
- De toepasbaarheid van TIR vanuit drones wordt nu nog enigszins beperkt doordat sensoren nog in ontwikkeling zijn maar vooral door het beperkte operationele oppervlak wat kan worden opgenomen.
- Mogelijk gaat, als in de toekomst hogere resolutie vanuit de satelliet kan worden verkregen, de keus van platform tussen drone en satelliet worden gemaakt en raken vliegtuigen en helikopters op de achtergrond (maar verdwijnen niet).

3 Medium resolutie temperatuur IJsselmeer

3.1 Testgebied en periode

Als testgebied is het hele IJsselmeer gekozen. Een overzicht hiervan is gegeven in Figuur 3. Hierin zijn ook de vaste meetstations weergegeven.

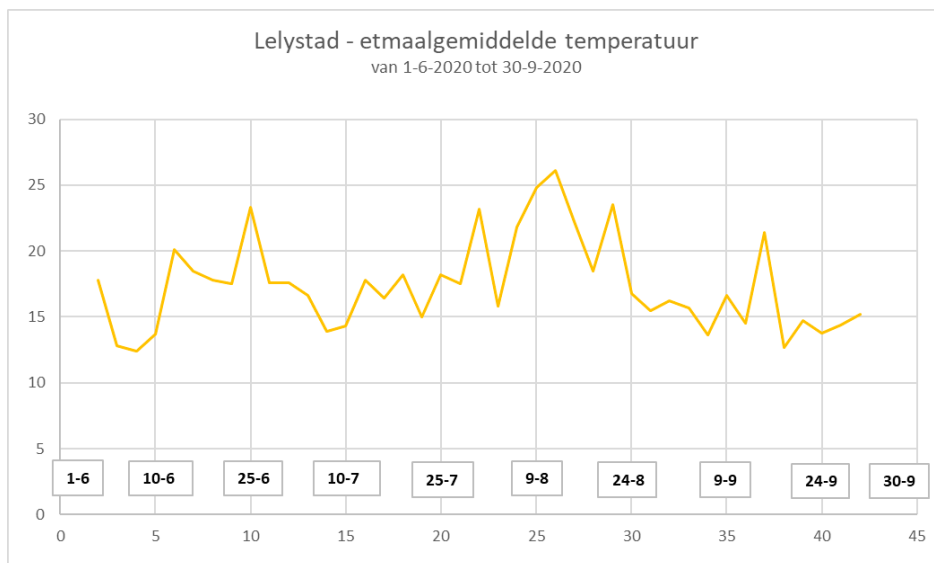


Figuur 3: Overzicht van het IJsselmeergebied en de temperatuur meetstations

Er is een analyse gemaakt voor de periode van 1 juni 2020 tot 30 september 2020. In deze periode trad een warme periode op waarin een grote kans op algenbloei aanwezig is en er waren ook voldoende onbewolkte satellietopnamen beschikbaar, 8 opnamen verspreid over de periode.

3.2 Luchttemperatuur

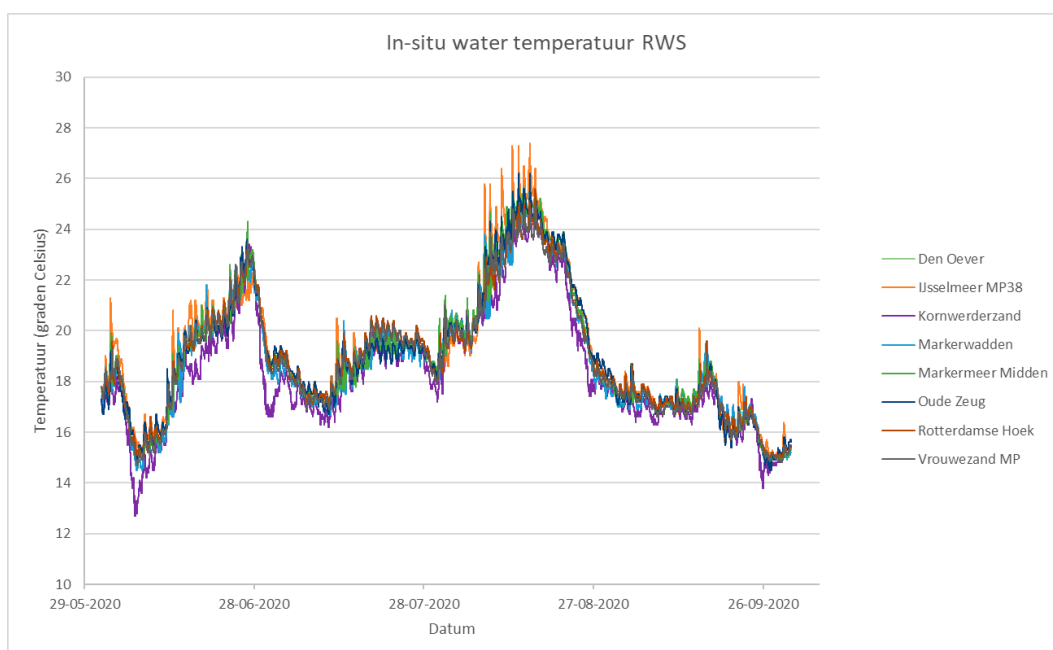
Vanuit het KNMI zijn historische gegevens over de luchttemperatuur beschikbaar van 34 automatische weerstations (op land) in Nederland. Hieruit is Lelystad genomen vanwege de ligging het dichtst bij Marker- en IJsselmeer. De gegevens betreffen etmaalgemiddelde luchttemperatuur over een dag. De gegevens per drie dagen voor de casus periode zijn weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Verloop van de luchttemperatuur over de testperiode (etmaalgemiddelde Lelystad)

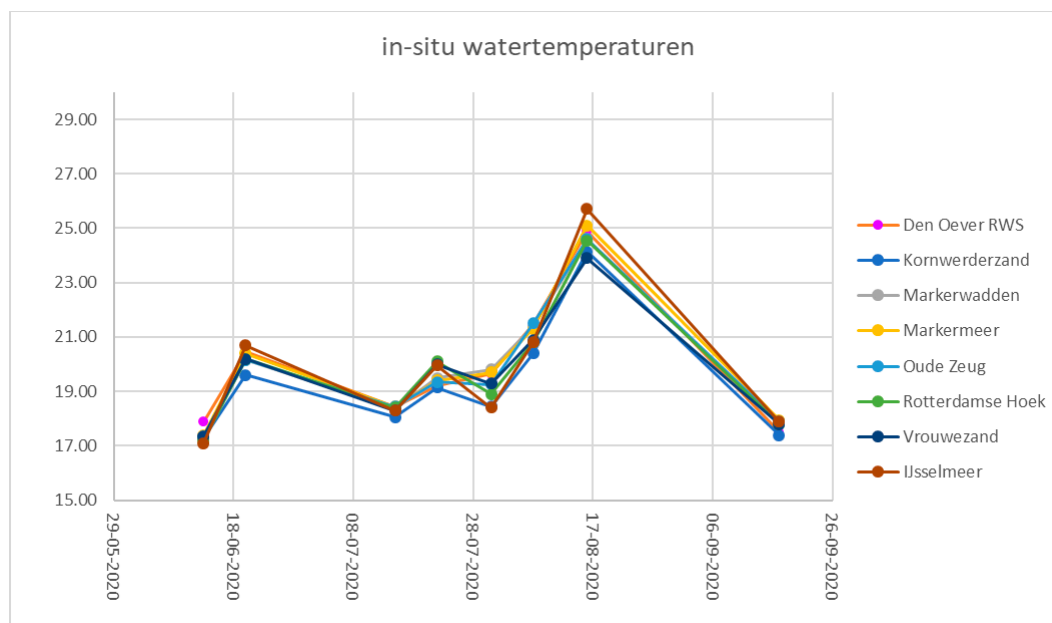
3.3 In-situ waarnemingen meetstations

Op en rond Marker- en IJsselmeer zijn een aantal meetstations opgesteld waar vanaf de watertemperatuur wordt gemeten. Deze metingen zijn continu, 24/7, en de data wordt beschikbaar gemaakt in 10 minuten gemiddelden. Er wordt gemeten op een diepte van meestal -150 cm ten opzichte van NAP. De onzekerheid van deze metingen is 0.1 °C. Voor de acht opnamemomenten van satellietbeelden zijn de RWS watertemperaturen genomen. De csv file van RWS geeft de tijd aan in CET (of MET/CET zoals er staat) en de satellietopnamen zijn in GMT. Daar zit een uur tussen: $GMT = CET + 1$. De tijden van de satellietbeelden liggen tussen 10:30 GMT en 10:40 GMT. Daarom zijn de tijden van 11:30 en 11:40 CET uit de csv file genomen en de temperatuurwaarden van deze tijden zijn gemiddeld. Een overzicht van de in-situ metingen voor de periode van de casus is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Overzicht van de In-situ watertemperatuur metingen van RWS voor de verschillende meetstations

Uit de meetseries van de 8 meetstations zijn de waarden voor de 8 momenten van de Landsat 8 waarnemingen (zie ook paragraaf 3.4) weergegeven in Figuur 6 en Tabel 4.



Figuur 6: In-situ metingen van de 8 meetstations op de overkomstmomenten van Landsat 8

Tabel 4: In-situ metingen van 9 meetstations op de overkomstmomenten van Landsat 8. (in deze tabel staan twee locaties Kornwerderzand, in de verdere analyses is alleen Kornwerderzand WDW02 meegenomen, zie ook paragraaf 3.4)

RWS in-situ metingen	Den Oever DENOV02 -150 638103/5866915	Kornwerderzand WDZD02 -150 656296/5882117	Kornwerderzand buiten -265 656547/5882595	Markerwadden MPL -120 661942/5830495	Markermeer midden mpl -120 651333/5822549	Oude Zeug -150 641615/5858677	Rotterdamse Hoek -150 670972/5848676	Vrouwezand meetpaal -150 667658/5854080	IJsselmeer meetpaal 38 -150 652873/5846900
13-06-2020	17.90	17.30	17.60	17.30	17.40	17.35	17.20	17.35	17.10
20-06-2020	20.45	19.60	20.20	20.15	20.40	20.15	20.20	20.20	20.70
15-07-2020	18.45	18.05	18.70	18.35	18.45	18.45	18.40	18.30	18.30
22-07-2020	19.20	19.15	19.30	19.50	19.40	19.35	20.10	20.00	19.95
31-07-2020	19.65	18.45	19.95	19.80	19.70	19.25	18.90	19.30	18.40
07-08-2020	21.45	20.40	21.20	21.40	21.30	21.50	20.80	20.90	20.80
16-08-2020	24.90	24.15	24.20	24.60	25.10	24.60	24.55	23.90	25.70
17-09-2020	17.50	17.40	17.85	17.90	17.95	17.90	17.80	17.80	17.90

De figuur en tabel laten zien dat de karakteristiek van de temperatuur variatie over de tijd voor de verschillende meetpunten vergelijkbaar is, maar wel kleine verschillen laat zien. Over de periode van de casus varieert de watertemperatuur tussen de 17 en 25 °C, in totaal dus 8 graden. Op een bepaald meetmoment is de variatie van de watertemperatuur tussen de meetstations in de orde van 0.6 tot 1.6 graden.

3.4 Satellietmetingen

Voor de satellietmetingen is gebruik gemaakt van de Landsat 8 satelliet [RD 4], een Amerikaanse satelliet waarvan de data worden beheerd door United States Geological Survey (USGS). Landsat 8 maakt deel uit van een serie van vergelijkbare satellieten die onafgebroken metingen hebben uitgevoerd sinds 1972. Naast multispectrale metingen verzamelt de satelliet ook thermische metingen. De specificaties hiervan hebben iets gevarieerd door de tijd heen. Landsat 8 neemt waar in twee thermische banden (10.6-11.9 μm en 11.5-12.51 μm) met een ruimtelijke resolutie van 100 meter. De satelliet heeft een banenpatroon waarbij een willekeurig gebied op aarde één maal per 16 dagen wordt

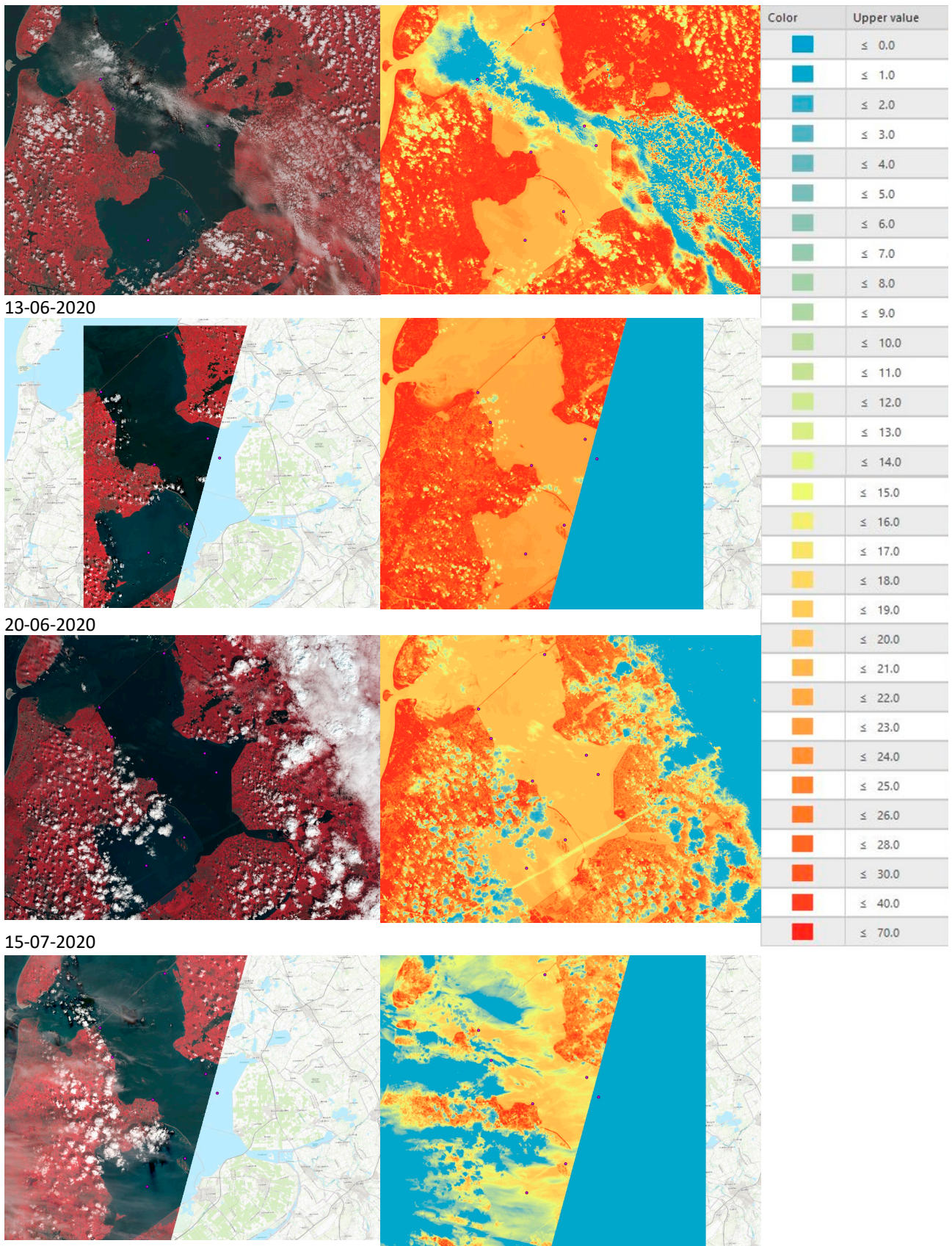
opgenomen, maar door overlap van de opnamestroken is er in Nederland gemiddeld eens per 8 dagen een opname beschikbaar. Daarbij is de opname alleen bruikbaar als het onbewolkt weer is. Overigens is in het najaar van 2021 Landsat 9 gelanceerd, waardoor de opnamefrequentie vanaf begin 2022 is verdubbeld (zie ook paragraaf 2.2).

De gebruikte Landsat 8 opnamen voor de casus zijn weergegeven in Tabel 5. Er is hierbij gebruik gemaakt van het TIRS instrument dat waarneemt in twee thermische banden, band 10 en band 11. De productkeuze was voor het collection2/level2 surface temperature product genaamd *_ST_B10.TIF. Bij dit product zijn de sensordata radiometrisch gekalibreerd, is een atmosfeercorrectie toegepast, en zijn de meetwaarden al omgerekend naar temperaturen. Daarnaast is de sensordata geometrisch orthogerectificeerd naar een UTM projectie met pixels van 100 m. Er is een combinatie (middeling) gemaakt van de banden 10 en 11 en de eenheden zijn digitale nummers in unsigned integer 16 bit. Voor het omrekenen naar graden Kelvin moet een gain en een offset worden genomen die in de metadata is meegegeven. Tenslotte wordt vaak een translatie toegepast van Kelvin naar Celsius.

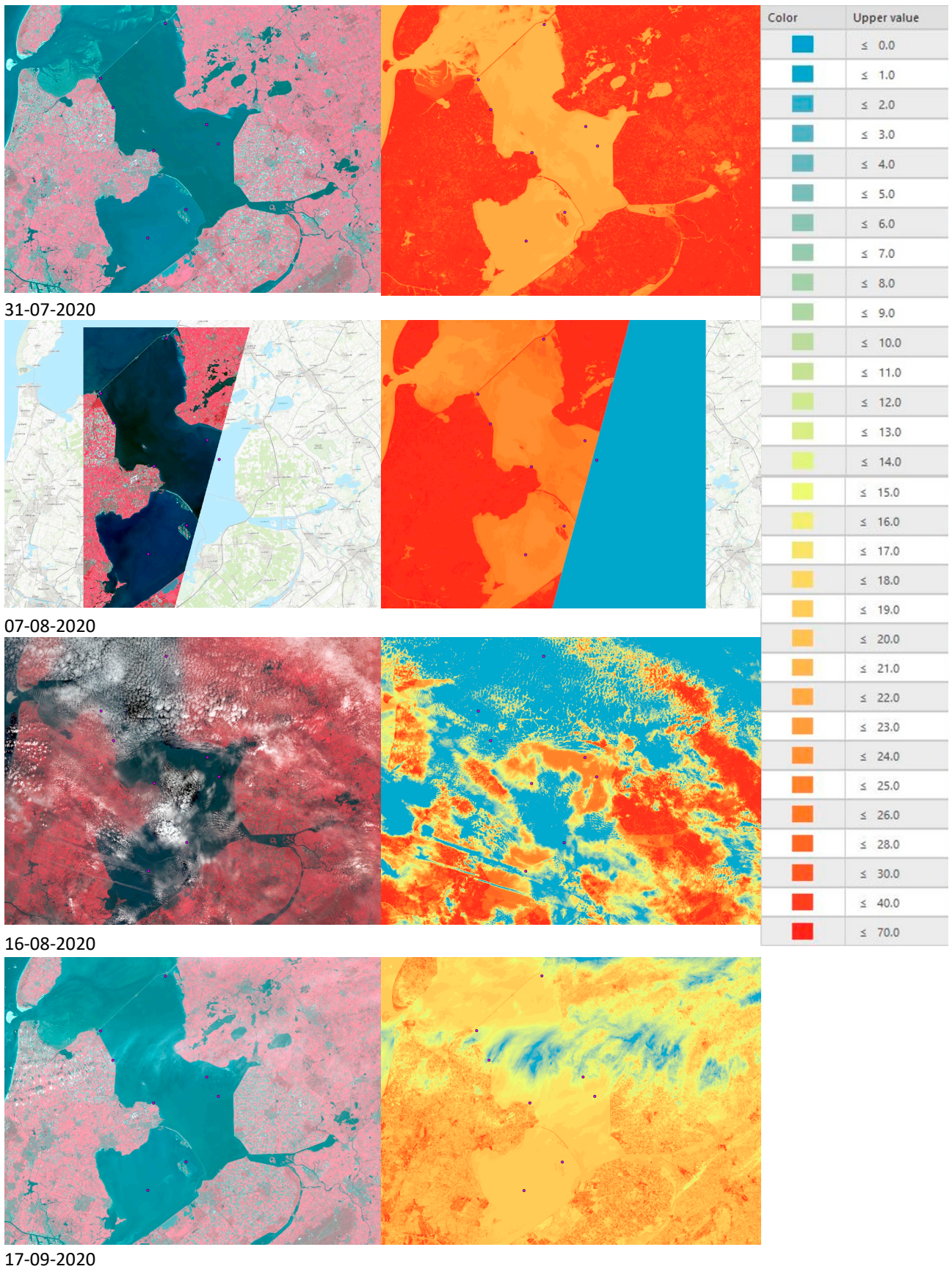
Tabel 5: Overzicht van gebruikte Landsat 8 satellietopnamen

Landsat 8 opname datum (en tijd)
13-6-2020 (10:33 GMT)
20-6-2020 (10:39 GMT)
15-7-2020 (10:33 GMT)
22-7-2020 (10:40 GMT)
31-7-2020 (10:33 GMT)
07-8-2020 (10:40 GMT)
16-8-2020 (10:33 GMT)
17-9-2020 (10:34 GMT)

Een overzicht van de berekende temperatuurbeelden voor alle 8 datums is weergegeven in Figuur 7 en Figuur 8. De oppervlakte temperaturen van alle beelden hebben een eenduidige temperatuur kleurcodering meegekregen waarbij tussen 0 °C en 26 °C één graad intervallen een eigen kleur krijgen en vanaf 26 °C een kleur geldt voor grotere intervallen. Te zien is hoe groot de invloed van ook nog dunne bewolking op de temperatuur is.



Figuur 7: Overzicht van Landsat 8 beeld (false colour banden) en berekende oppervlakte temperatuur in °C (deel-1)



Figuur 8: Overzicht van Landsat 8 beeld (false colour banden) en berekende oppervlakte temperatuur in °C (deel-2)

Voor de locaties van de meetpunten zijn vanuit de Landsat 8 beelden de temperatuurwaarden uitgelezen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6. De lege velden betekenen dat daarvan geen gegevens beschikbaar zijn, als gevolg van bewolking of beeldbedekking (niet alle stations vallen altijd binnen een satellietstrook). 'Kornwerderzand buiten -265' is niet meegenomen in de satellietopnamen omdat de locatie in het sluisgedeelte is en er daardoor nogal snel mixed pixel effecten optreden. Bovendien is Kornwerderzand WDZD02 niet veraf zodat dat punt prima als enige punt kan worden genomen.

Tabel 6: Landsat 8 temperatuur metingen op de locaties van de 8 meetstations

Landsat-8 metingen	Den Oever DENOVRO2 -150 638103/5866915	Kornwerderzand WDZD02 -150 656296/5882117	Kornwerderzand buiten -265 656547/5882595	Markerwadden MPL -120 661942/5830495	Markermeer midden mpl -120 651333/5822549	Oude Zeug -150 641615/5858677	Rotterdamse Hoek -150 670972/5848676	Vrouwezand meetpaal -150 667658/5854080	IJsselmeer meetpaal 38 -150 652873/5846900
13-06-2020		18.75		19.10	19.90		18.55	17.10	17.80
20-06-2020	20.90	20.20		20.80	21.00	20.00		20.50	21.00
15-07-2020	19.10	18.20		19.05	18.00	18.30	18.50	18.10	18.90
22-07-2020	17.50	15.40		17.30	15.20			16.40	18.50
31-07-2020	20.60	19.40		20.75	20.20	21.25	19.50	19.80	20.00
07-08-2020	23.40	24.90		23.30	23.10	24.10	22.90	23.70	23.20
16-08-2020							23.50	23.40	
17-09-2020		14.50		17.70	17.60		15.30		

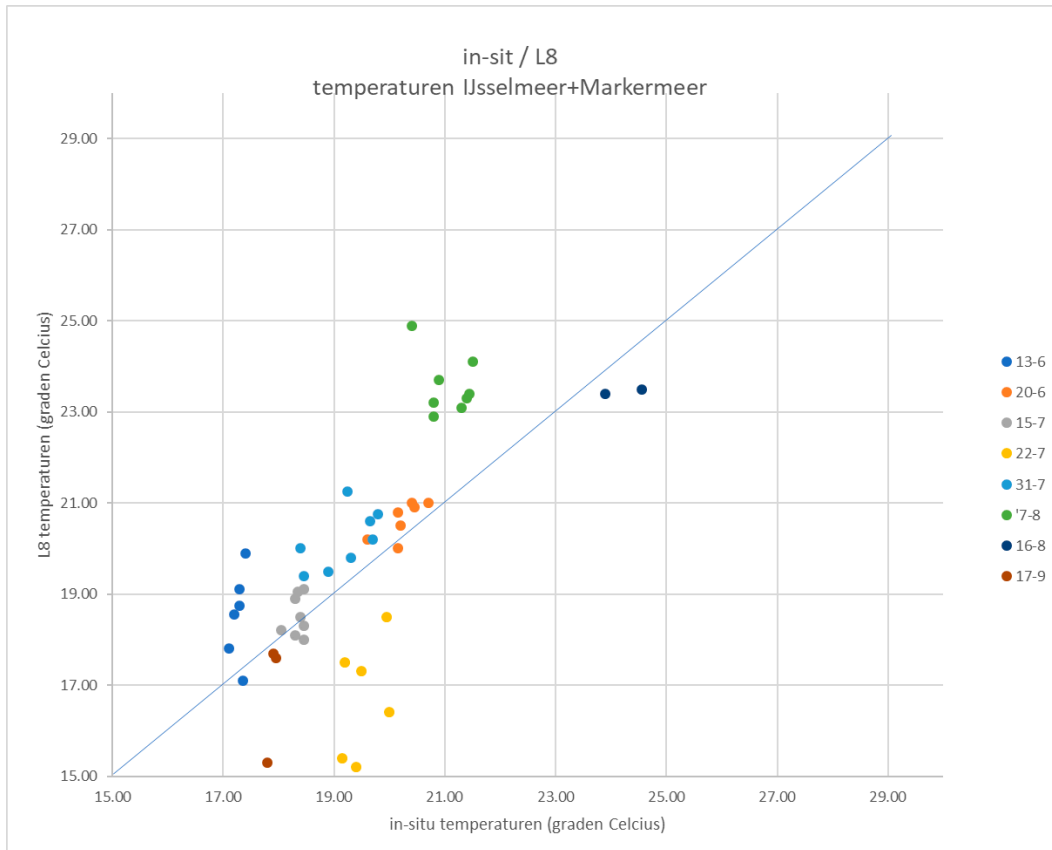
3.5 Verbetering satellietwaarnemingen

Er is een vergelijking gemaakt tussen de in-situ (RWS) en de satelliet (L8) gebaseerde watertemperatuur metingen. De verschillen tussen de RWS en de L8 temperatuur metingen zijn weergegeven in Tabel 7. Hierbij is 'RWS minus L8' genomen, d.w.z. bij bijvoorbeeld een negatieve verschilwaarde was de temperatuur van de RWS in-situ meting lager dan die van de satelliet meting.

Tabel 7: Overzicht van de verschillen tussen de in-situ en Landsat 8 satelliet temperatuur metingen

Verschillen tussen in-situ en L8 metingen	Den Oever DENOVRO2 -150 638103/5866915	Kornwerderzand WDZD02 -150 656296/5882117	Kornwerderzand buiten -265 656547/5882595	Markerwadden MPL -120 661942/5830495	Markermeer midden mpl - 120 651333/5822549	Oude Zeug -150 641615/5858677	Rotterdamse Hoek -150 670972/5848676	Vrouwezand meetpaal -150 667658/5854080	IJsselmeer meetpaal 38 - 150 652873/5846900	gemiddelde	standaard deviatie
13-06-2020		-1.45		-1.80	-2.50		-1.35	0.25	-0.70	-1.26	0.95
20-06-2020	-0.45	-0.60		-0.65	-0.60	0.15		-0.30	-0.30	-0.39	0.28
15-07-2020	-0.65	-0.15		-0.70	0.45	0.15	-0.10	0.20	-0.60	-0.18	0.44
22-07-2020	1.70	3.75		2.20	4.20			3.60	1.45	2.82	1.17
31-07-2020	-0.95	-0.95		-0.95	-0.50	-2.00	-0.60	-0.50	-1.60	-1.01	0.54
07-08-2020	-1.95	-4.50		-1.90	-1.80	-2.60	-2.10	-2.80	-2.40	-2.51	0.88
16-08-2020							1.05	0.50		0.78	0.39
17-09-2020		2.90		0.20	0.35		2.50			1.49	1.41
gemiddeld	-0.46	-0.14		-0.51	-0.06	-1.08	-0.10	0.14	-0.69	-0.36	
standaarddev.	1.34	2.77		1.40	2.16	1.44	1.67	1.89	1.30	1.74	

De verschillen zijn ook inzichtelijk te maken in een scattergram, waarin beide metingen tegen elkaar zijn uitgezet in een grafiek, zie Figuur 9.



Figuur 9: Scattergram van de in-situ en Landsat 8 satelliet temperatuurmetingen voor de meetstation locaties

Idealiter zouden de temperaturen van L8 en RWS in het scattergram op de blauwe diagonale lijn moeten liggen. Zes van de acht clusters (gekleurd per datum) gaan in de richting van de blauwe lijn maar er zijn ook twee clusters die duidelijk verder van de blauwe lijn af liggen. Te weten 22-7 en 7-8. Binnen deze clusters zitten bovendien de grootste 'outliers', samen met de cluster van 17-9 waarin ook een punt met grote afwijking zit. Uit het scattergram is ook af te leiden dat de meeste clusters aan de linker bovenkant van de blauwe lijn zitten, m.a.w. de L8 temperaturen zijn relatief vaak iets hoger dan de RWS temperaturen. Alleen 22-7 geeft een ander beeld; lagere L8 temperaturen dan die van de in-situ temperaturen. Dat kan te maken hebben met de weersomstandigheden op 22-7-2020; nogal veel haze en bewolking (boven het water vooral haze). Verder is goed te zien op welke opnamedata de verschillen dicht bij elkaar zitten en op welke opnamedata niet.

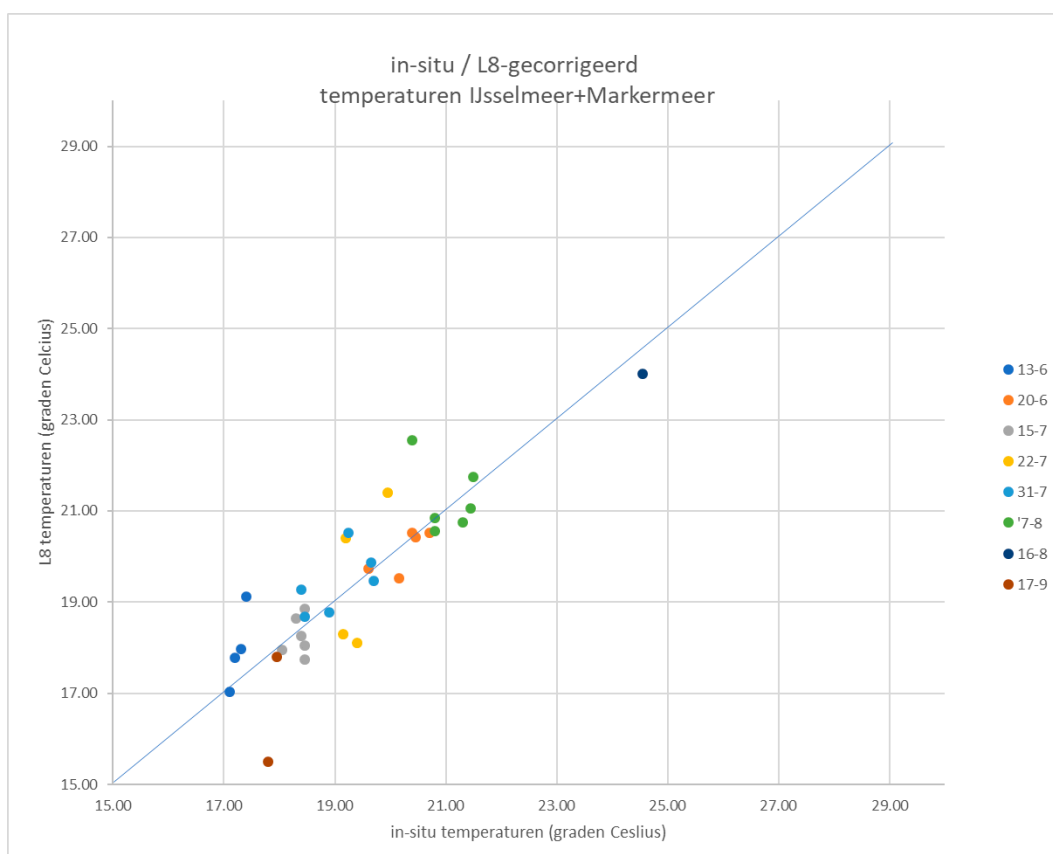
Op basis van deze verschillen is besloten twee van de in-situ meetstations te gebruiken als referentiestations voor de satellietbeelden. Aan de hand van de verschillen die met deze stations worden gevonden, wordt een extra correctie bepaald en toegepast op de satellietbeelden. Het resultaat hiervan kan worden beoordeeld aan de hand van de metingen van de andere 6 meetstations. Op deze manier kunnen systematische onnauwkeurigheden, vooral ten gevolge van de onnauwkeurigheid van de atmosfercorrectie, worden gecompenseerd.

Voor de selectie van de referentie meetstations is als criterium genomen dat er op zoveel mogelijk tijdstippen satellietmetingen voor een station zijn. Daarnaast dat de stations zo goed mogelijk verspreid liggen over het gebied. Verder is er ook gekeken naar de karakteristieken van afwijkingen. Op basis hiervan is ervoor gekozen om de meetstations Markerwadden en Vrouwenzand te gebruiken als referentie station en alle andere metingen aan de hand hiervan een extra correctie te geven. Daartoe zijn van Markerwadden en Vrouwenzand de verschillen per datum genomen (uit tabel 7) en deze verschillen zijn gemiddeld. Dat levert de volgende gemiddelde verschillen op:

13-06-2020	0.78
20-06-2020	0.48
15-07-2020	0.25
22-07-2020	-2.90
31-07-2020	0.73
07-08-2020	2.35
16-08-2020	-0.50
17-09-2020	-0.20

Deze gemiddelde verschilwaarden worden vervolgens bij de 6 andere meetstationwaarden opgeteld dan wel afgetrokken. De aldus gegenereerde gecorrigeerde temperatuurwaarden kunnen opnieuw van de in-situ temperatuurwaarden worden afgetrokken en dat levert een nieuwe verschiltabel op (zie tabel 8).

Een scattergram van de overgebleven verschillen is weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10: Scattergram van de verschillen tussen de in-situ en extra gecorrigeerde Landsat 8 temperatuur metingen

Te zien is dat ten opzichte van Figuur 9 de waarden dichter bij elkaar zijn komen te liggen. Dat is ook te zien in de resterende verschillen voor de andere 6 meetpunten, die zijn weergegeven in Tabel 8. De gemiddelde fout voor de 6 punten is gedaald van -0.36 naar -0.02 graden en de standaarddeviatie gaat van 1.74 naar 0.91 graden.

Tabel 8: Overzicht van de verschillen tussen de in-situ en extra gecorrigeerde Landsat 8 satelliet temperatuur metingen

Verschillen tussen in-situ en LB metingen	Den Oever DENOVR02 -150 638103/5866915	Kornwerderzand WDZD02 -150 656296/5882117	Kornwerderzand buiten -265 656547/5882595	Markerwadden MPL -120 661942/5830495	Markermeer midden mpl - 120 651333/5822549	Oude Zeug -150 641615/5858677	Rotterdamse Hoek -150 670972/5848676	Vrouwezand meetpaal -150 667658/5854080	IJsselmeer meetpaal 38 - 150 652873/5846900	gemiddelde	standaard deviatie
13-06-2020		-0.68			-1.73		-0.57		0.08	-0.73	0.74
20-06-2020	0.03	-0.12			-0.13	0.63			0.18	0.12	0.31
15-07-2020	-0.40	0.10			0.70	0.40	0.15		-0.35	0.10	0.43
22-07-2020	-1.20	0.85			1.30				-1.45	-0.13	1.40
31-07-2020	-0.23	-0.22			0.22	-1.28	0.13		-0.88	-0.38	0.59
07-08-2020	0.40	-2.15			0.55	-0.25	0.25		-0.05	-0.21	1.00
16-08-2020							0.55			0.55	
17-09-2020		2.70			0.15		2.30			1.72	1.37
gemiddeld	-0.28	0.07			0.15	-0.13	0.47		-0.41	-0.02	
standaarddev.	0.60	1.48			0.95	0.85	0.97		0.63	0.91	

De resulterende meetwaarden voor de 6 meetlocaties zijn weergegeven in Tabel 9.

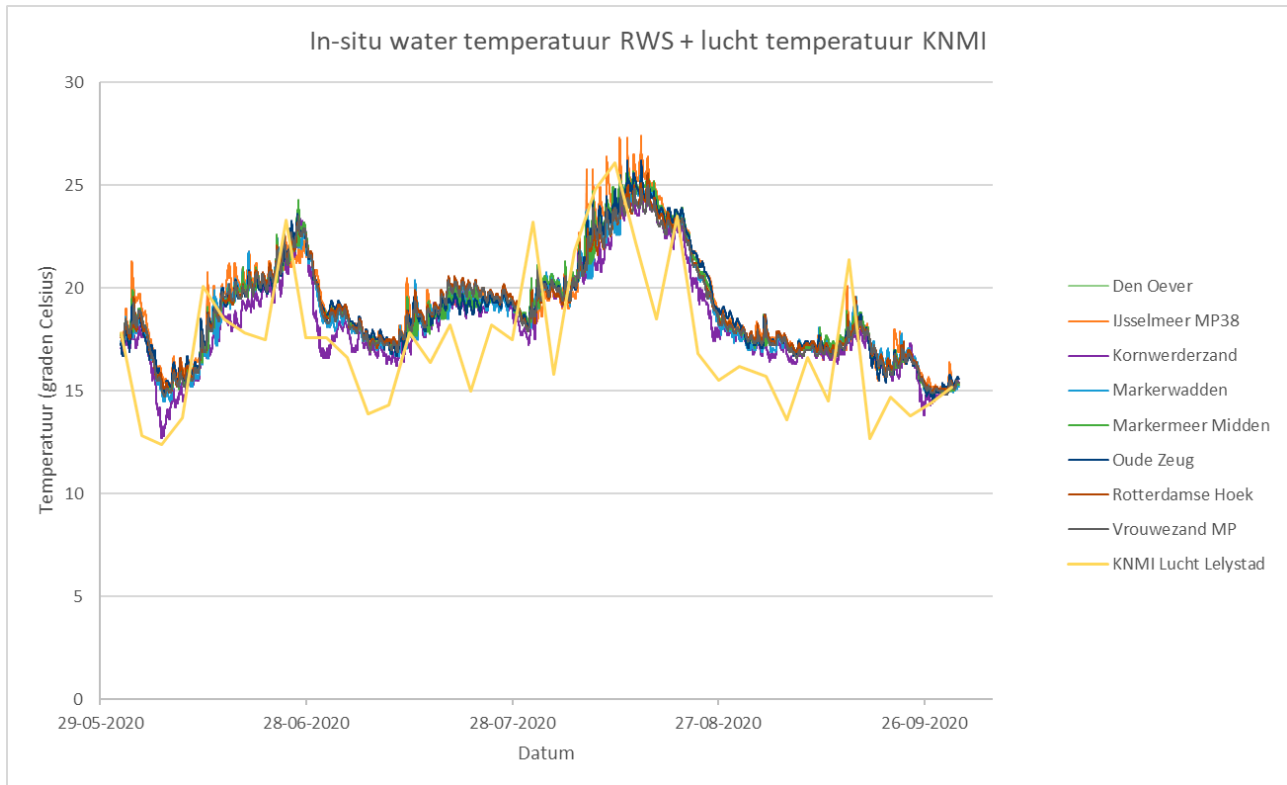
Tabel 9: Resulterende Landsat 8 satelliet temperatuurmetingen na extra correctie

Landsat-8 gecorrig. metingen	Den Oever DENOVR02 -150 638103/5866915	Kornwerderzand WDZD02 -150 656296/5882117	Kornwerderzand buiten -265 656547/5882595	Markerwadden MPL -120 661942/5830495	Markermeer midden mpl -120 651333/5822549	Oude Zeug -150 641615/5858677	Rotterdamse Hoek -150 670972/5848676	Vrouwezand meetpaal -150 667658/5854080	IJsselmeer meetpaal 38 -150 652873/5846900
13-06-2020		17.98			19.13		17.78		17.03
20-06-2020	20.43	19.73			20.53	19.53			20.53
15-07-2020	18.85	17.95			17.75	18.05	18.25		18.65
22-07-2020	20.40	18.30			18.10				21.40
31-07-2020	19.88	18.68			19.48	20.53	18.78		19.28
07-08-2020	21.05	22.55			20.75	21.75	20.55		20.85
16-08-2020							24.00		
17-09-2020		14.70			17.80		15.50		

3.6 Analyse van de resultaten

Algemene karakteristiek

Als eerste kijken we naar het verloop van de watertemperatuur van de meetstations over de meetperiode. In Figuur 11 zijn de dagelijks gemeten temperaturen voor de verschillende meetstations weergegeven en is hierbij tevens in geel de luchttemperatuur (gemiddelde over een etmaal op locatie Lelystad) geplot.



Figuur 11: Overzicht van de in-situ watertemperaturen van de meetstations en de luchttemperatuur van Lelystad

De luchttemperaturen laten het karakter zien van het weer gedurende de meetperiode van 1-6-2020 tot 30-9-2020. Juni begon met twee warme dagen, daarna een paar weken koeler en vanaf 22 juni werd het warm met de eerste tropische dag van 2020 op 26 juni. De laatste dagen van juni waren koel en dat zette zich voort in de eerste helft van juli. In de tweede helft van juli was het iets warmer maar pas echt warm werd het helemaal tegen het einde van de maand op 31 juli. Augustus begon wisselvallig en vanaf 5 augustus startte een hittegolf die aanhield tot 16 augustus. Daarna twee relatief koelere dagen (maar nog altijd rond de 25 °C) en vervolgens nog drie tropische dagen op 19 t/m 21 augustus. Het eind van de maand was koeler met temperaturen rond de 20 °C. September kende normale temperaturen maar tussen 13 en 17 september was een warme periode met nog een tropische dag op 15 september.

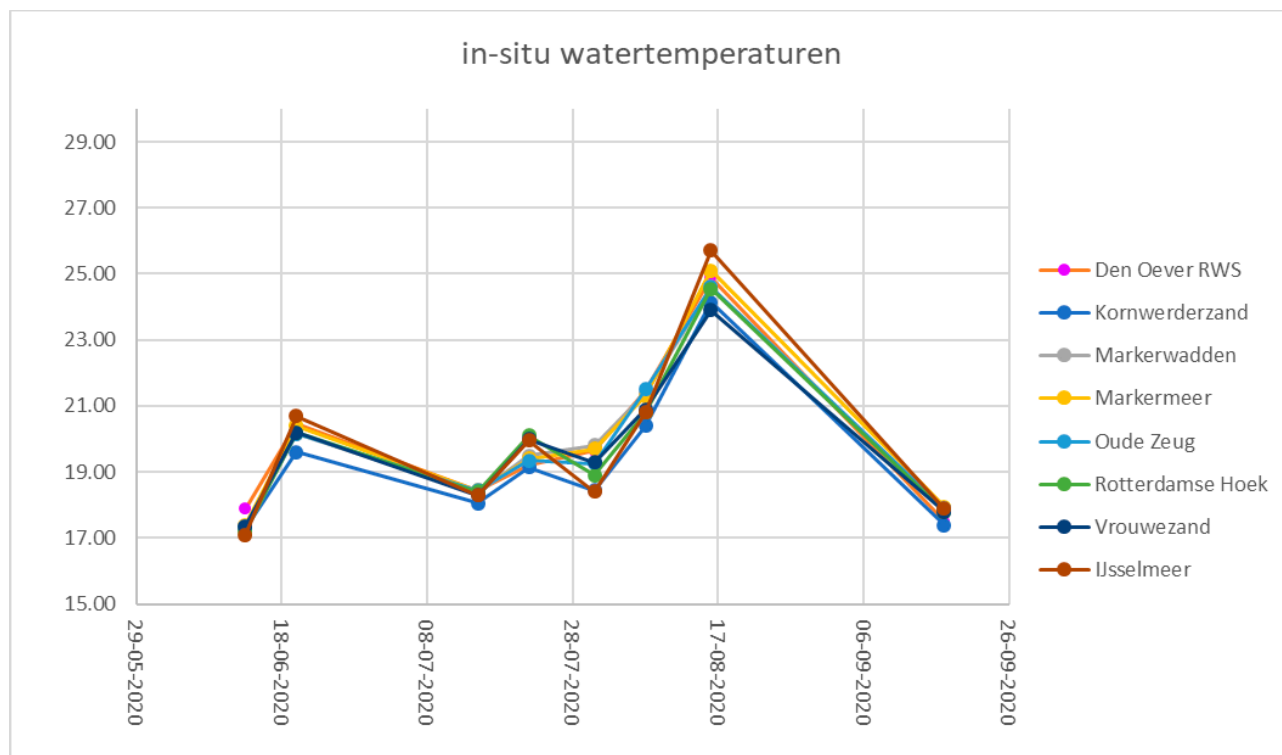
Te zien is ook dat de karakteristiek van de watertemperaturen vergelijkbaar is met die van de luchttemperatuur. De etmaalgemiddelde luchttemperatuur fluctueert wel meer dan de watertemperatuur. Dat is in overeenstemming met het gegeven dat land relatief snel opwarmt en afkoelt en dat water relatief langzaam opwarmt en afkoelt. En in verband hiermee is ook te zien dat hogere watertemperaturen enkele dagen later zijn te zien na een periode van hogere luchttemperaturen. Opvallend is dat de watertemperaturen gemiddeld iets hoger liggen dan de luchttemperatuur. Merk op dat het bij de watertemperatuur gaat om het water aan het oppervlak, dus het bovenste deel van de waterkolom op maximaal 1.5 m diepte gemeten.

In het algemeen bezien kan worden gevolgd dat er op 13-6-2020 nog betrekkelijk lage watertemperaturen werden gemeten in Marker- en IJsselmeer. Op 20-6-2020 waren de watertemperaturen duidelijk opgelopen, met zo'n 3 °C, om halverwege juli weer terug te vallen naar lagere temperaturen. Daarna een geleidelijke stijging tot naar de piek op 16-8-2020. De grootste daling in watertemperatuur is waarneembaar tussen 16-8-2020 en 17-9-2020.

Meetfrequentie

De satellietmetingen voor de meetstations zijn nogmaals weergegeven in Figuur 12. Het gaat hierbij om metingen op 8 momenten tijdens de casus periode van 4 maanden. Een vergelijking met de hoog frequente in-situ metingen leert

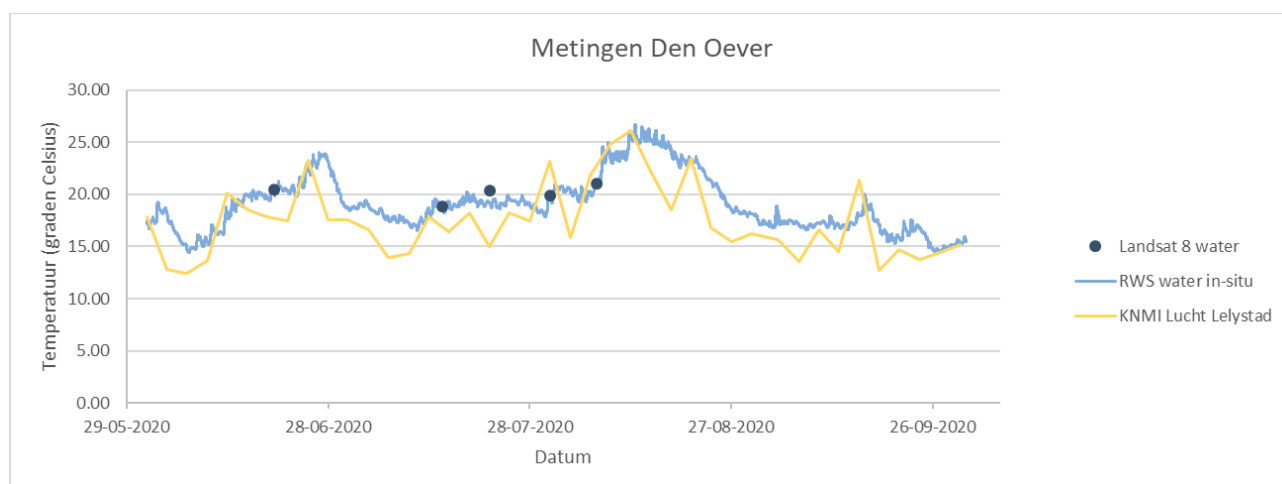
dat de variatie van de watertemperatuur een hogere frequentie heeft dan de regelmaat waarmee op dit moment met de Landsat satelliet kan worden gemeten. Variaties in de orde van 1 a 2 graden kunnen optreden in een tijdsbestek van enkele dagen.



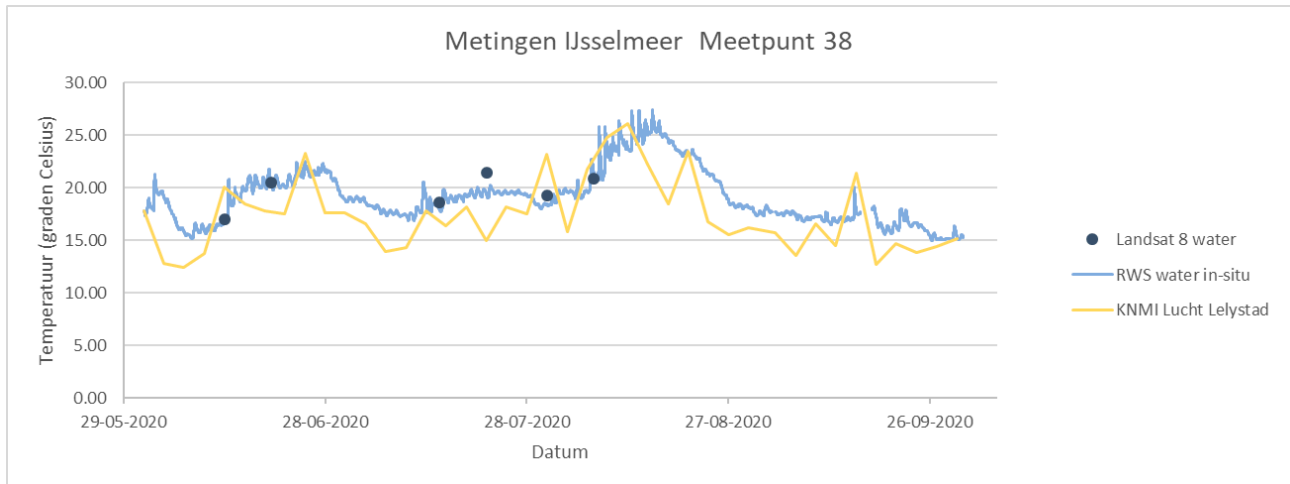
Figuur 12: In-situ metingen van de 9 meetstations op de overkomstmomenten van Landsat 8

Nauwkeurigheid satellietmetingen

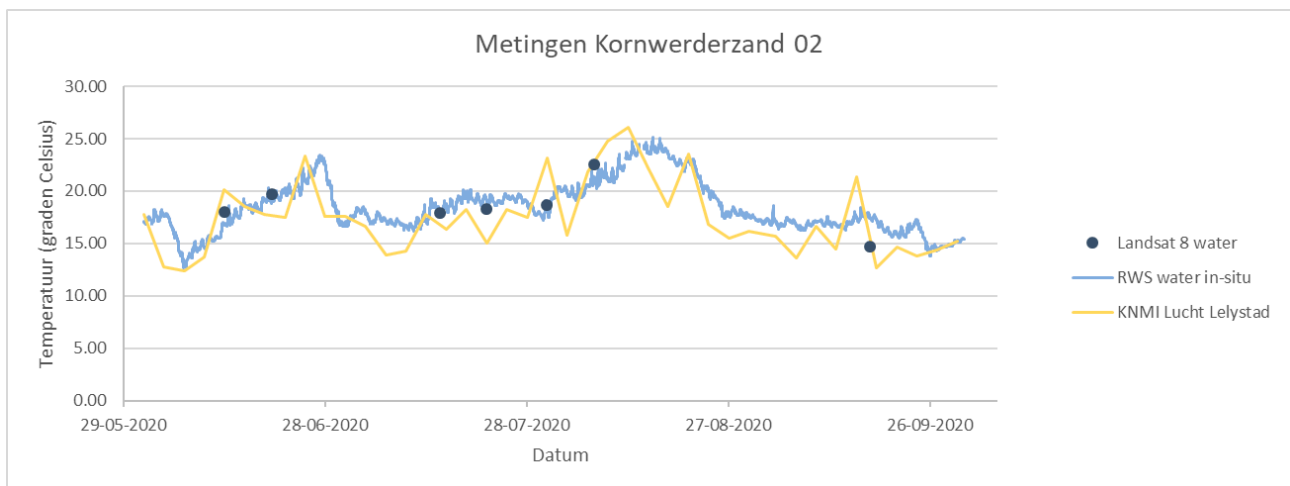
In Figuur 13 tot en met Figuur 18 is voor zes meetlocaties een grafiek gegeven met daarin de in-situ, satelliet en lucht temperaturen. De twee andere meetlocaties zijn gebruikt als referentiestation om de satellietdata te verbeteren en dus niet meegenomen in de analyse van de resultaten.



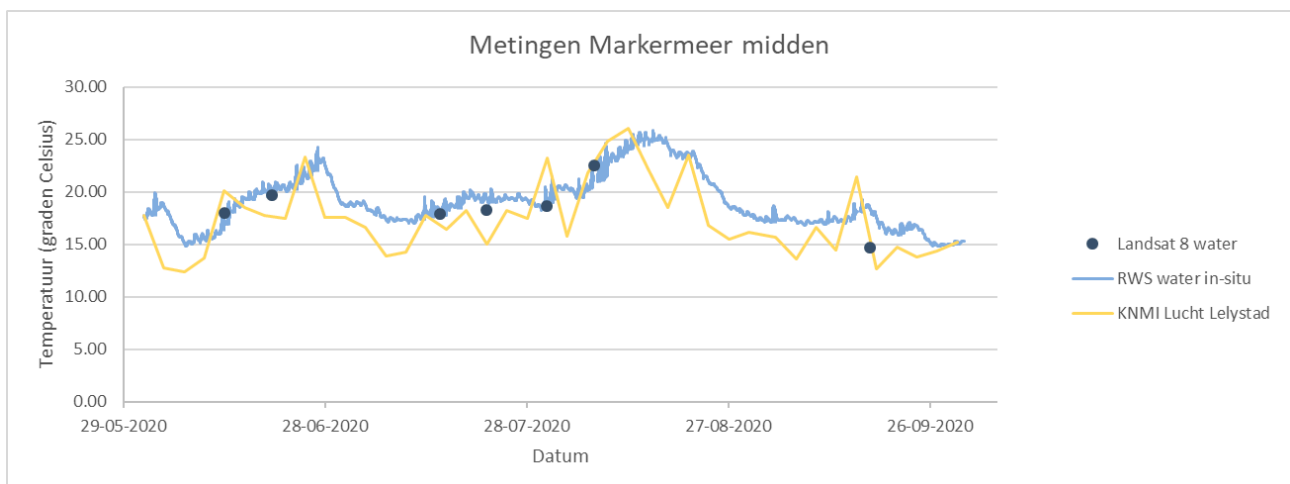
Figuur 13: In-situ, satelliet- en lucht- temperatuurmetingen voor locatie Den Oever



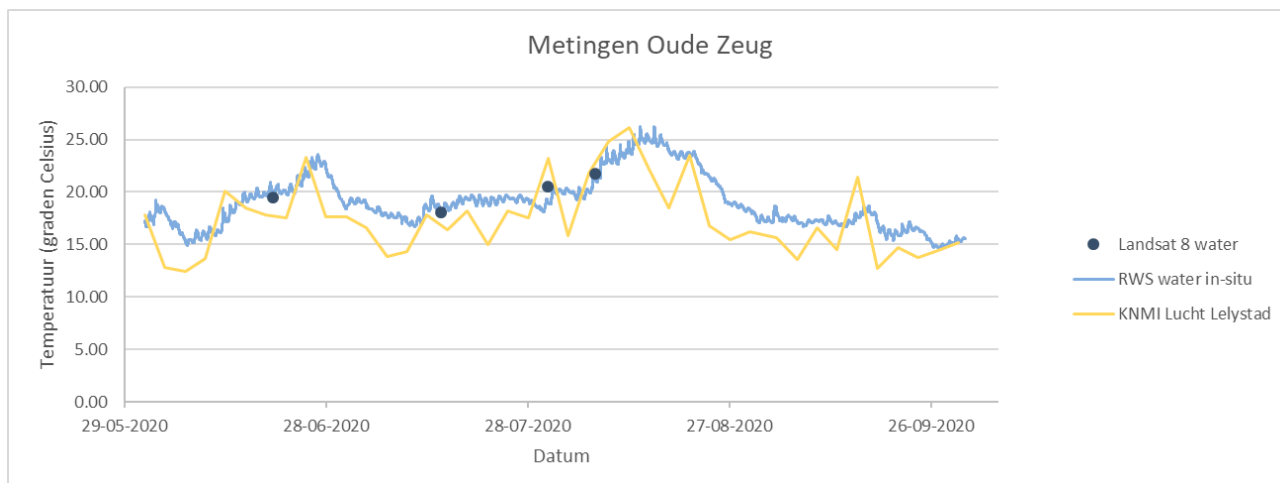
Figuur 14: In-situ, satelliet- en lucht- temperatuurmetingen voor locatie Meetpunt 38



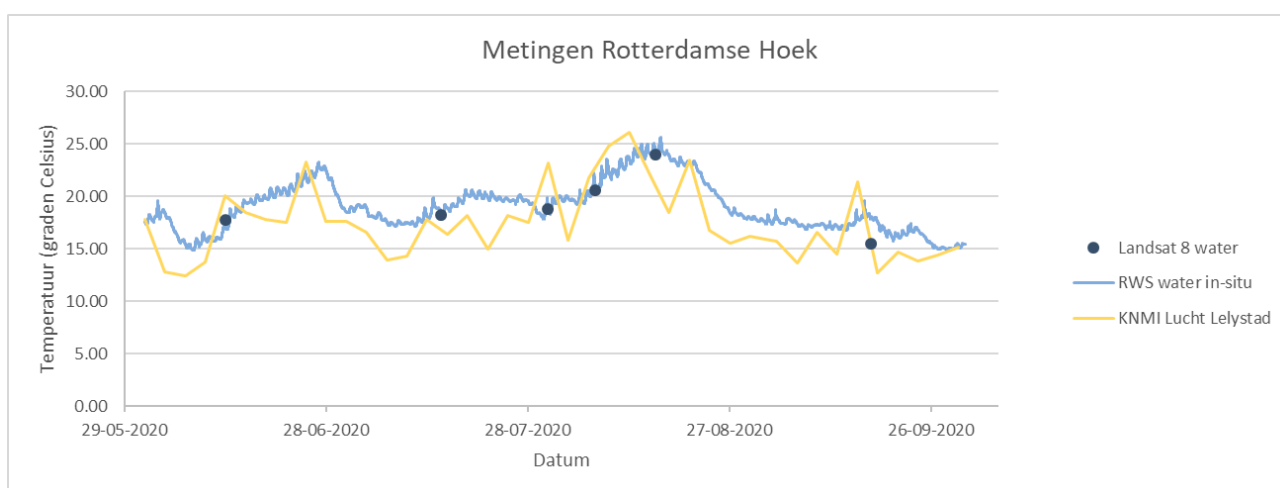
Figuur 15: In-situ, satelliet- en lucht- temperatuurmetingen voor locatie Kornwerderzand 02



Figuur 16: In-situ, satelliet- en lucht- temperatuurmetingen voor locatie Markermeer midden



Figuur 17: In-situ, satelliet- en lucht- temperatuurmetingen voor locatie Oude Zeug



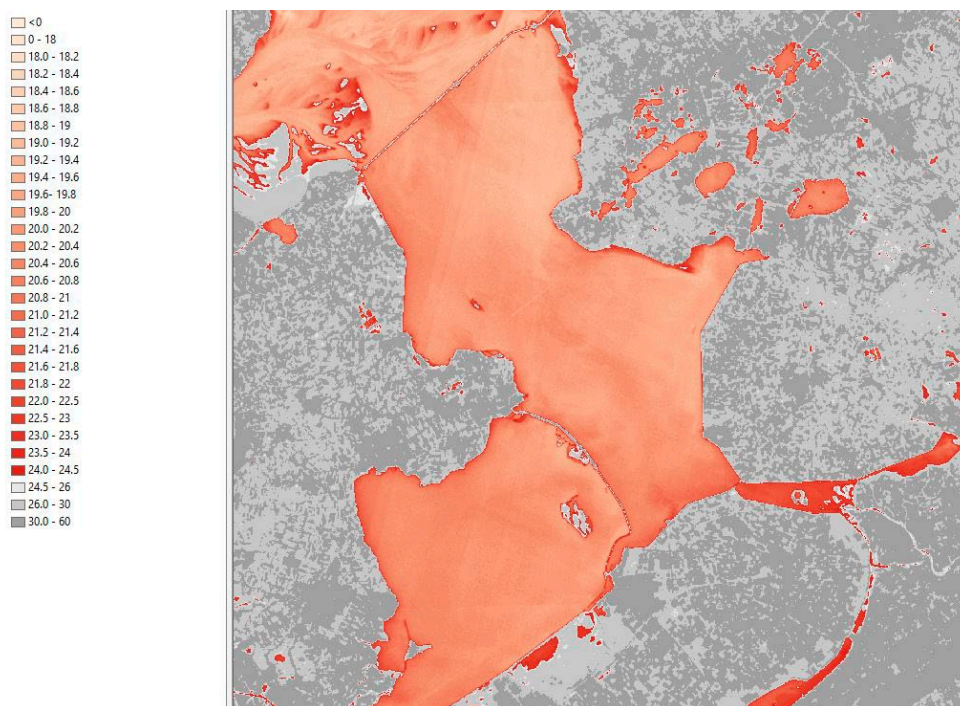
Figuur 18: In-situ, satelliet- en lucht- temperatuurmetingen voor locatie Rotterdamse Hoek

Over het algemeen is te zien dat de satelliet temperatuurmetingen behoorlijk goed in lijn liggen met de in-situ metingen. De afwijkingen zijn veel kleiner dan de variatie van de temperatuur gedurende meetperiode. Uit de methode van extra correctie aan satellietbeelden, zoals uiteengezet in paragraaf 3.5, volgt de conclusie dat de gemiddelde afwijking van de satellietmetingen over de 6 locaties $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ is en de standaarddeviatie $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$. De nauwkeurigheid van de satelliet temperatuurmetingen is afhankelijk van de atmosferische situatie. Vooral in geval van hazy treden grotere verschillen op.

Bij het vergelijken van satellietwaarnemingen en RWS watertemperaturen is er vanuit gegaan dat de satellietwaarnemingen direct aan het oppervlak van het water vergelijkbaar zijn met de in-situ metingen die veelal op 150 cm diepte worden gedaan. Navraag bij RWS, Informatiepunt Leefomgeving, leert dat de temperatuurverschillen in de waterkolom weliswaar variëren met het seizoen en de instraling, maar dat bij een bemonsteringshoogte van NAP - 150 cm men er vanuit mag gaan dat het verschil met de oppervlaktetemperatuur verwaarloosbaar is. Overigens geldt dit voor het IJsselmeer omdat hier sprake is van menging door stroming en/of golven. In andere wateren zoals grote plassen kan er wel degelijk stratificatie zijn, dus een warmere bovenlaag in de zomer en een koudere bovenlaag in de winter.

Temperatuurspreiding

De relatieve nauwkeurigheid van de metingen binnen één beeld is hoger dan de absolute nauwkeurigheid. Het kwantificeren van de metingen vindt plaats in tienden van graden en in de beelden is ook te zien dat variaties over de wateroppervlakten in deze orde van grootte zijn waar te nemen. Zie ook Figuur 19.



Figuur 19: Gedetailleerde satelliet gebaseerde temperaturen op 31-07-2020 met zichtbare ruimtelijke variaties

Voordeel van de satellietopnamen is dat een dekkend netwerk van metingen wordt verkregen in plaats van metingen op enkele locaties. Kracht van de in-situ metingen is dat de temporele frequentie veel hoger is. In die zin vullen beiden meetmethodieken elkaar aan. De satellietbeelden kunnen worden gebruikt om inzicht te verkrijgen in de ruimtelijke thermische processen. Op basis hiervan kan het netwerk van in-situ meetpunten ook worden verbeterd.

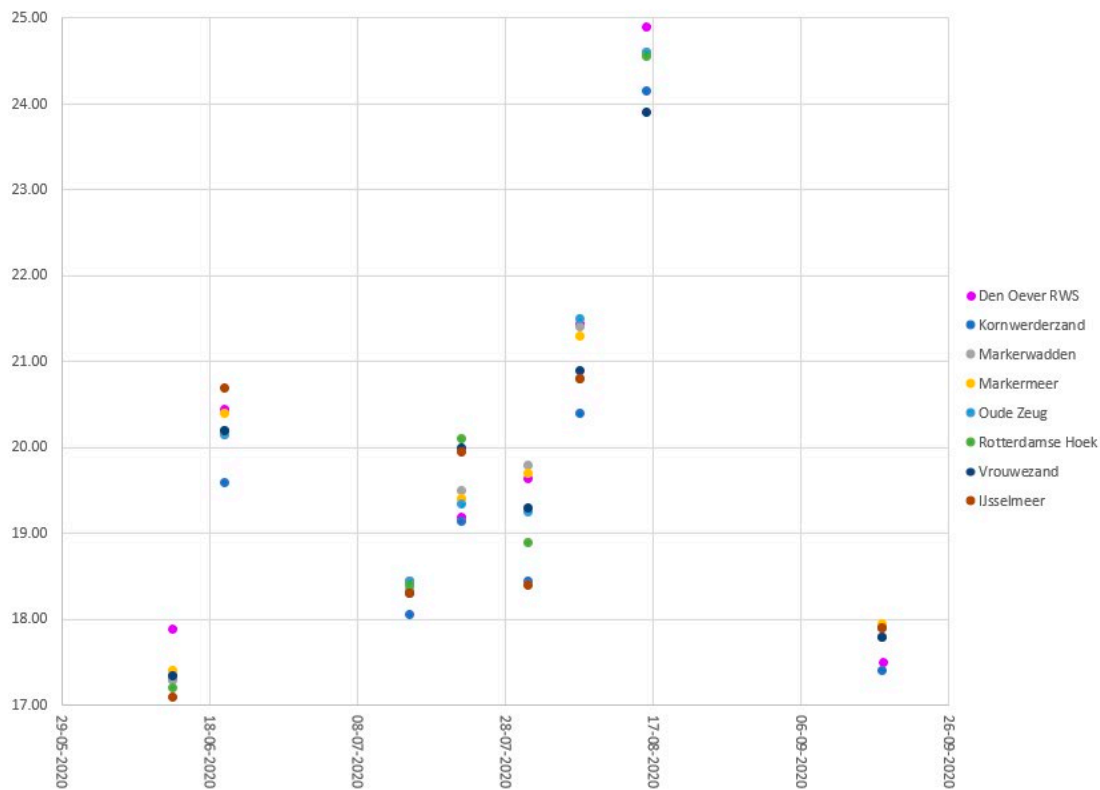
Waterlopen

Door Rijkswaterstaat is ook een test uitgevoerd om met behulp van Landsat TIR opnamen informatie in te winnen van waterlopen en mogelijke lozingen hierin (werk van Tom de Boer, 2014 [RD3]). De beperkte ruimtelijke resolutie van 100 m pixels bleek hierin vooral een beperking. Snel is er daardoor sprake van mixed pixels waaraan ook delen van de oevers bijdragen en de temperatuur hierdoor wordt vertekend. Binnen het kader van het uitgevoerde project was het helaas niet mogelijk een test met drone opnamen te doen.

3.7 Aquathermie

In Figuur 20 zijn de in-situ temperatuurmetingen van alle meetstations gerangschikt in de tijd. Dit toont de temperatuur spreiding tussen de meetstations per opnamedatum. De spreiding per datum, dus de ruimte tussen de gekleurde bolletjes, zit meestal in een bereik van 1 á 1.5 °C. Wat daarnaast opvalt is dat de verdeling van de verticale puntenkolom vaak te zien geeft dat op de westelijke meetstations hogere watertemperaturen worden gemeten dan op de oostelijke meetstations. Zo zitten Den Oever, Oude Zeug en IJsselmeer mp38 vaak in de hogere temperaturen

en Kornwerderzand en Vrouwenzand in de lagere temperaturen. Dit zou te maken kunnen hebben met wind en golven (vanuit het westen). De temperatuurverschillen kunnen optreden binnen een dag of gedurende een langere periode (seizoen), beiden te zien in figuur 7. Ook kunnen temperatuurverschillen optreden tussen verschillende locaties, bijvoorbeeld aan de ene of aan de andere kant van een groot waterlichaam.



Figuur 20: In-situ temperatuurmetingen van alle meetstations uitgezet tegen de tijd

Voor de grotere waterlichamen zoals IJsselmeer en Markermeer is de 100 meter TIR resolutie van de Landsat-8 en 9 satellieten interessant om bij te dragen aan de mogelijkheden van aquathermie. Aquathermie is de techniek waarmee warmte of koude wordt gegenereerd uit water. Dat kan oppervlaktewater zijn (TEO), afvalwater (TEA) of drinkwater (TED). De techniek komt er, samengevat, op neer dat warm of koud water wordt bewaard om later te worden gebruikt als er respectievelijk warmtevraag of koelbehoefte is. Het bewaren gebeurt onder de grond in een zogenaamd warmte- en koude opslagsysteem (wko).

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen een gesloten wko en een open wko. Bij een gesloten wko wordt een buizenstelsel gebruikt, gevuld met water. Wanneer het water in het buizenstelsel warm is dan kan deze warmte dieper onder de grond worden afgestaan aan een watervoerende laag, een zogenaamde aquifer. De aquifer kan haar warmte later uitwisselen met het buizenstelsel waarna het verwarmde water weer omhoog wordt gepompt. Bij een gesloten wko wordt dus geen water in de bodem opgeslagen, alleen warmte. Een gesloten wko wordt vaak plaatselijk (op kleinere schaal) toegepast.

Bij een open wko wordt warm oppervlaktewater in de diepere bodemlagen gepompt. Zo'n opslagplaats wordt ook wel warme bron genoemd. Op voldoende diepte blijft de watertemperatuur hoog. Op een later moment kan het warme water weer omhoog worden gepompt. Afgekoeld of koel water kan eveneens naar een diepere bodemlaag worden gevoerd, daar wordt dan een zogenaamde koude bron gemaakt. Warme bron en koude bron zitten uiteraard op verschillende plaatsen in de bodemlaag. Een open wko komt meer in beeld bij grotere aquathermie toepassingen (op uitgebreidere schaal).

Thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), het onderzoeken van de mogelijkheid om warmte (of koude) te winnen, is te ondersteunen met gegevens/informatie van TIR satellieten. Daarbij valt te denken aan vijf toepassingsgebieden:

1. Grote en kleinere waterlichamen met relatief stilstaand water. Zoals de Nederlandse meren maar wellicht ook kleinere zandputten (de grens hierbij ligt bij de 100 m resolutie van de TIR satelliet). Hierbij gaat het om relatief langzame opwarming of afkoeling dus over langere perioden, typisch de opwarming gedurende de zomermaanden en de afkoeling gedurende de wintermaanden. De temperatuurverschillen in oppervlaktewater tussen zomer en winter kunnen oplopen tot enkele tientallen graden. Maar ook op één moment (zomer of winter) zijn er in deze waterlichamen temperatuurverschillen binnen de waterkolom. Er treedt temperatuur stratificatie op door zout in de diepere lagen en door het opwellen van koud grondwater. Ook binnen de waterkolom kunnen er daardoor temperatuurverschillen tot aan 10 graden zijn.
2. Rivieren. Het debiet van een rivier, dus de hoeveelheid water (m³/sec) die op een bepaald punt langs een locatie stroomt kan worden gebruikt door op een bepaald moment warm of koud water 'af te tappen' en ondergronds op te slaan. Dit gebeurt nu door een aantal steden langs rivieren, vaak nog als proef, om daarmee plaatselijke energievoorziening in woonwijken te realiseren. Ook hierbij wordt gebruik gemaakt van de watertemperatuur die tot stand komt na langere tijd.
3. Het in kaart brengen van de ruimtelijke verspreiding van temperatuur in oppervlaktewater van grote waterlichamen, het lokaliseren van zogenaamde 'hotspots' of 'coldspots' (bijvoorbeeld koudelozingen) en het vaststellen van bepaalde wetmatigheden in de tijd. TIR satellietopnamen in een tijdreeks kunnen hiervoor informatie verschaffen.
4. Monitoren of warmteonttrekking aan oppervlaktewater ongewenste ecologische effecten kan hebben doordat er op de plaatsen waar warm water wordt onttrokken koud water wordt 'teruggeleverd' aan waterlichamen, zogenaamde koudelozingen.
5. Vanuit verschillen tussen warm en koud oppervlaktewater, horizontale stromingen detecteren voor gebruik in warmte-kraftcentrales die aan de oevers van grote waterlichamen zouden kunnen staan. TIR satellietopnamen kunnen informatie geven over de temperatuur gradiënten in grote wateroppervlakken [RD 8].

Ad 1.

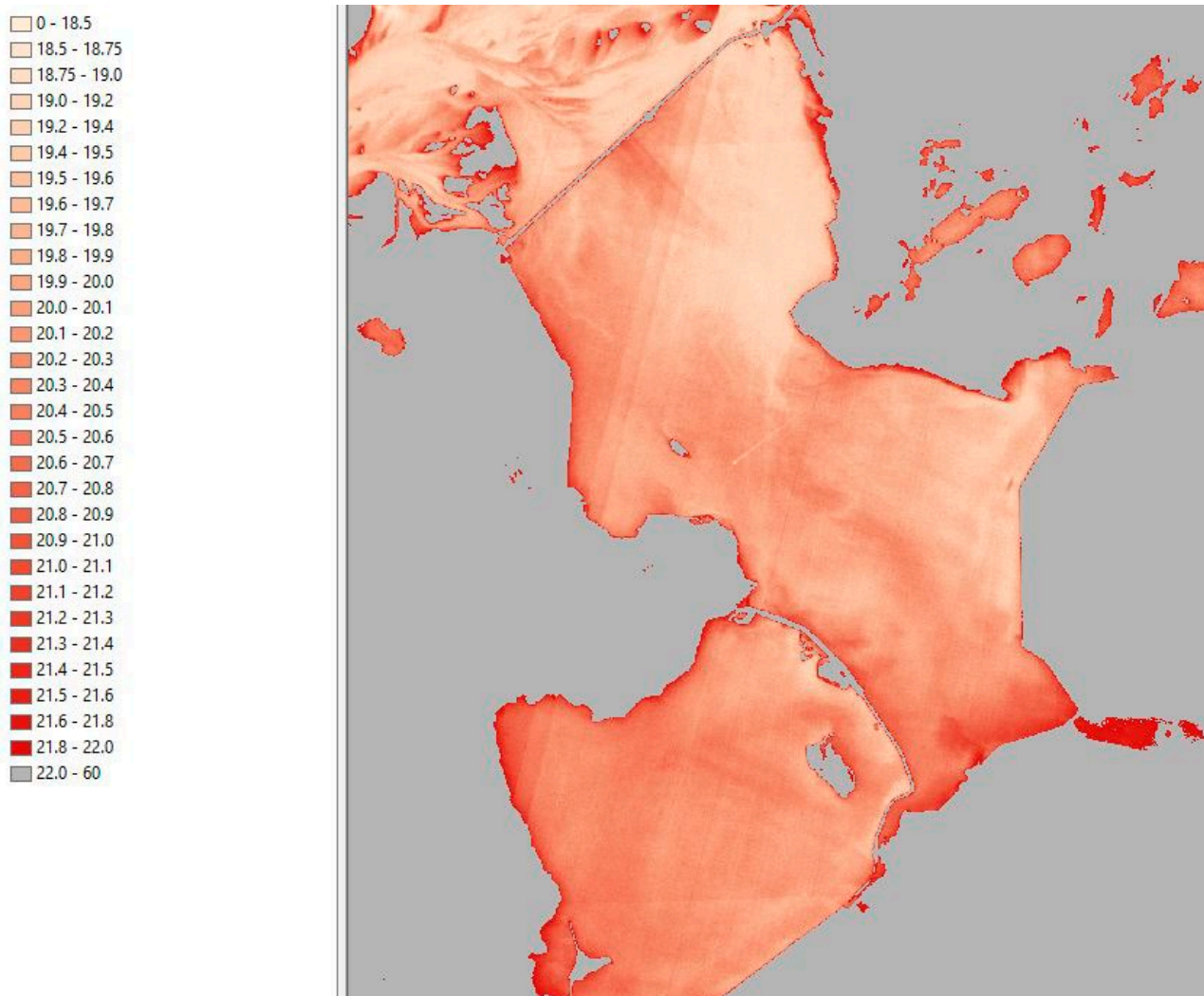
Dit is te volgen via tijdreeksen. Tijdreeksen binnen een jaar om de seizoen variaties te volgen en tijdreeksen van meerdere jaren om langere termijn effecten te volgen. De tijdserie van acht Landsat opnamen van 2020, zoals beschreven in dit document, is een voorbeeld van een tijdserie met seizoen variaties.

Ad 2.

Hierbij kan worden gedacht aan TIR monitoring op de lokaties waar water wordt ingelaten/onttrokken om vast te stellen wanneer er gunstige watertemperaturen optreden.

Ad 3.

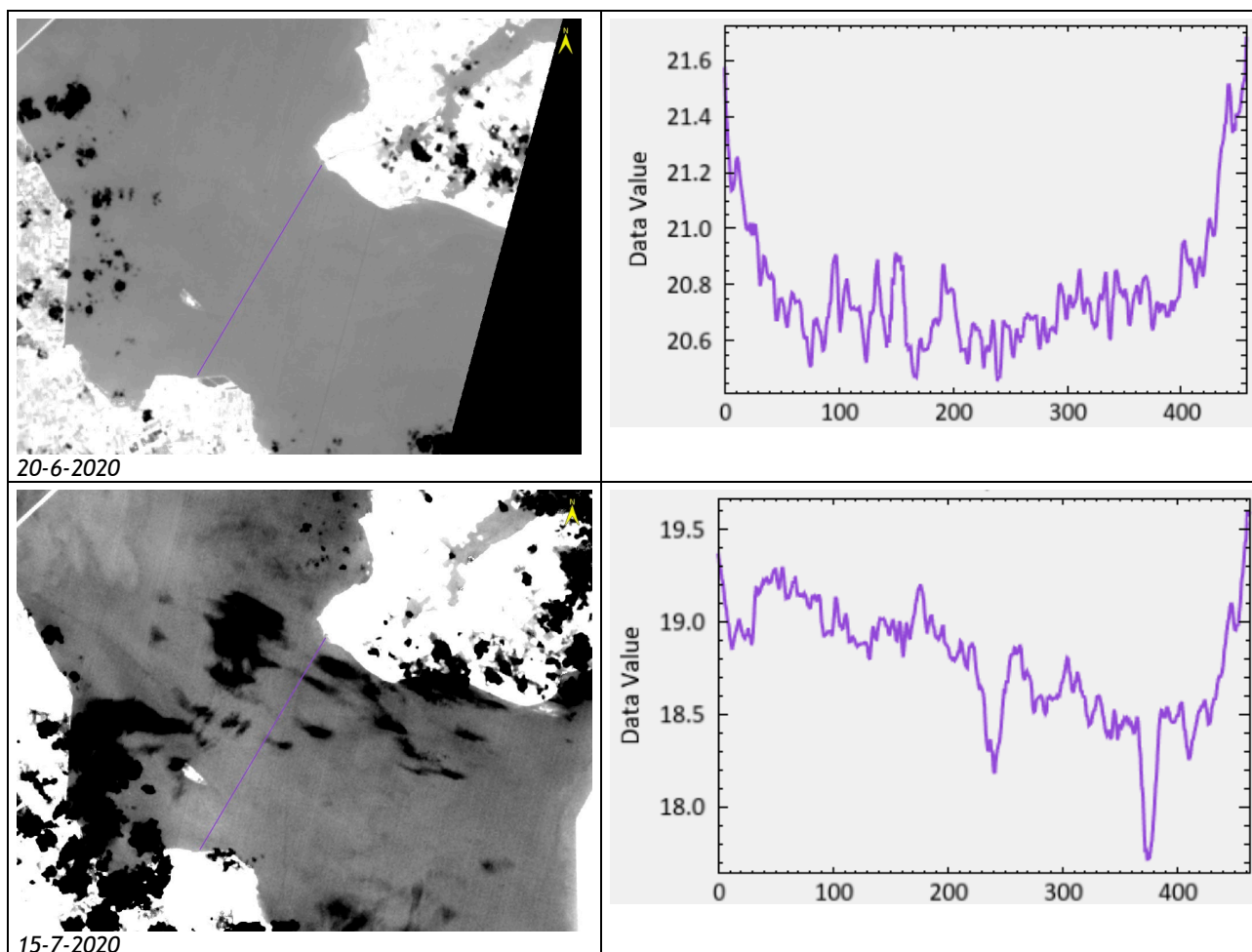
Bij het in visualiseren van tijdseries wordt een wat ruimer temperatuur bereik genomen om de uitersten in temperatuur in de gehele tijdserie mee te kunnen nemen. Zo zijn de plaatjes van de acht Landsat TIR opnamen van 2020 tot stand gekomen (Figuur 7 en Figuur 8). Bij individuele opnamen kan natuurlijk ook gericht worden gevisualiseerd door binnen de uiterste waarden van de betreffende opname te blijven. Hierdoor is de ruimtelijke verspreiding van de temperatuur nauwkeuriger te zien. Zie Figuur 19 en de nog verder opgeschaalde waarden in Figuur 21. Dezelfde opnamedatum maar twee verschillende temperatuur bereiken.



Figuur 21: Landsat TIR beeld van 31-07-2020 met een schaling van de temperatuur tussen 18.5 en 22 graden

Ad 5.

Een aantal temperatuur gradiënten op de dwarsdoorsnede/profiel Medemblik – Stavoren uit de Landsat opnamen is sterk vergroot weergegeven in Figuur 22. De gradiënten die zijn waar te nemen liggen in de orde van één graad Celsius. Het is lastig te bepalen in welke mate de gradiënt wordt veroorzaakt door de watertemperatuur en in welke mate door de effecten van haze in de temperatuur. Aan de oevers bij Medemblik en Stavoren kan de hogere temperatuur deels worden veroorzaakt door radiantie vanaf het land.



Figuur 22: Sterk uitvergroete temperatuurgradiënten langs het transect Medemblik – Stavoren

Interessante informatie omtrent aquathermie is te vinden in de potentiekaart aquathermie [RD 5] die is samengesteld door NAT (Netwerk Aqua Thermie), STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer), Deltares, Syntraal, KWR en Rijkswaterstaat.

3.8 Algenbloei

In combinatie met de thermische analyse is er ook gekeken of er algenbloei is te herkennen vanuit de satellietopnamen. Hogere watertemperaturen vormen gunstiger condities voor de snelle ontwikkeling van algen, grotere concentraties hiervan worden aangeduid als algenbloei. Algenbloei is vooral te herkennen in de optische zichtbaar licht- en nabij infrarood banden van de satellietopnamen. Interessant is om na te gaan of er een correlatie is te vinden met de waargenomen watertemperatuur.

Er is gekeken of algenbloei is te herkennen in enkele van de acht Landsat-8 opnamen, namelijk degenen met de hogere watertemperaturen. De opname van 16-8-2020 is zwaar bewolkt en minder geschikt. Dus is gekeken naar 7-8-2020 en naar 20-6-2020. In aanvulling op deze beelden is ook gekeken of er Sentinel-2 opnamen beschikbaar waren vlak voor of vlak na de bovengenoemde data. Daartoe zijn Sentinel-2 opnamen van 24-6-2020, 26-6-2020, 31-7-2020, 5-8-2020, 2-9-2020, 14-9-2020, 19-9-2020 en 22-9-2020 gebruikt.

Algenbloei is in theorie vast te stellen met combinaties van verschillende spectrale banden, zogenaamde indices, te weten:

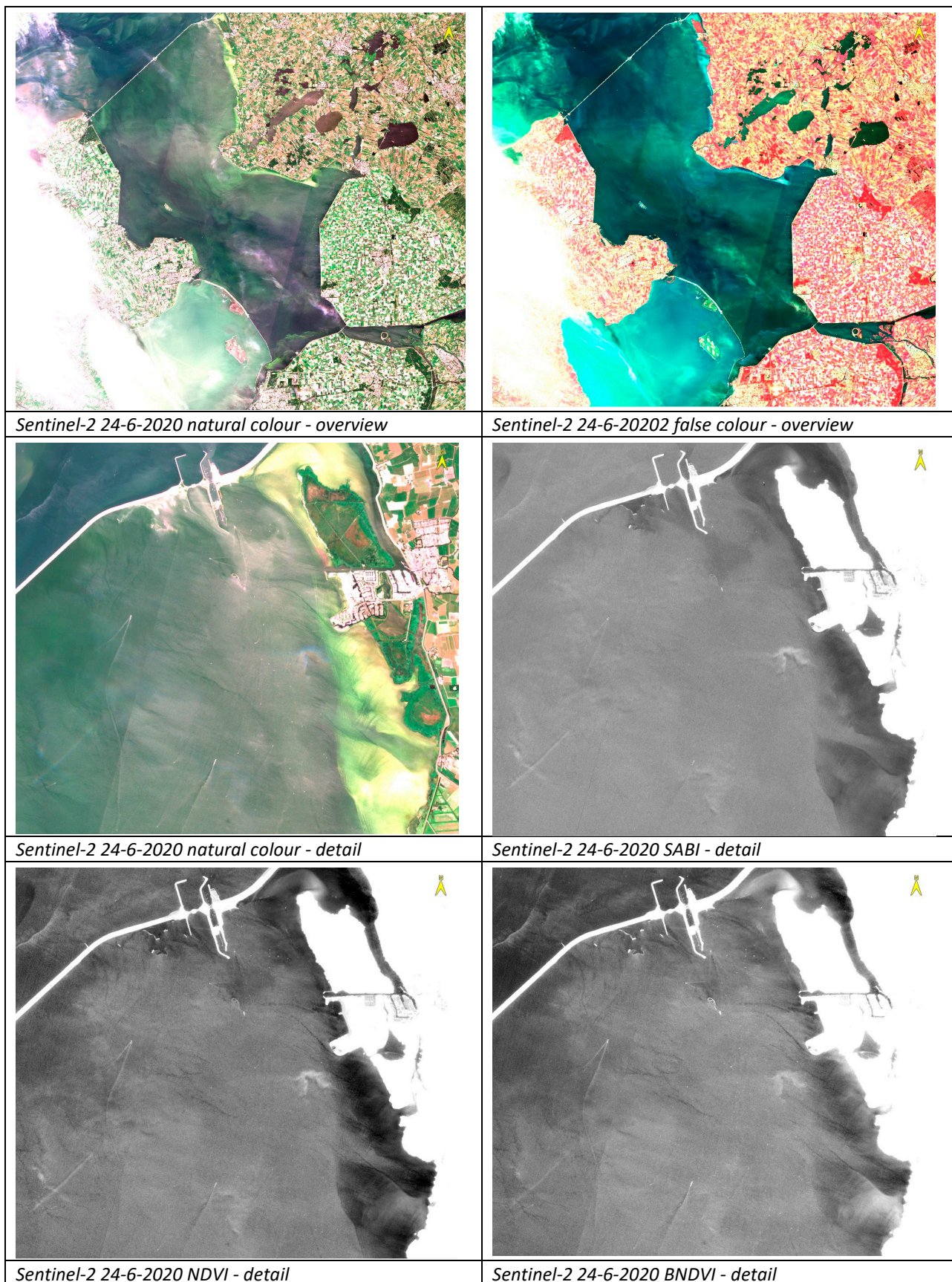
- SABI, Surface Algal Bloom Index (NIR-R/B+G)
- NDVI, Normalized Difference Vegetation Index (NIR-R/NIR+R)
- BNDVI, Blue Normalized Difference Vegetation Index (NIR-B/NIR+B)

De NDVI is de bekende index die ook voor vegetatie op land wordt gebruikt. NIR-R en NIR+R, en vervolgens de ratio ervan, bepalen het grootste onderscheid in de reflectie van vegetatie die op zijn hoogst is in het NIR en op zijn laagst in R. De ratio komt altijd uit op een waarde tussen -1 en +1.

De SABI maakt ook gebruik van het verschil tussen NIR en R (in de teller) en gebruikt tevens de optelling van B en G (in de noemer) om daarmee de ratio te berekenen. B geeft een maat voor de helderheid van het water en G geeft een maat voor algenbloei in de waterkolom. Van de SABI wordt verwacht dat deze minder gevoelig is voor atmosferische effecten [RD 6].

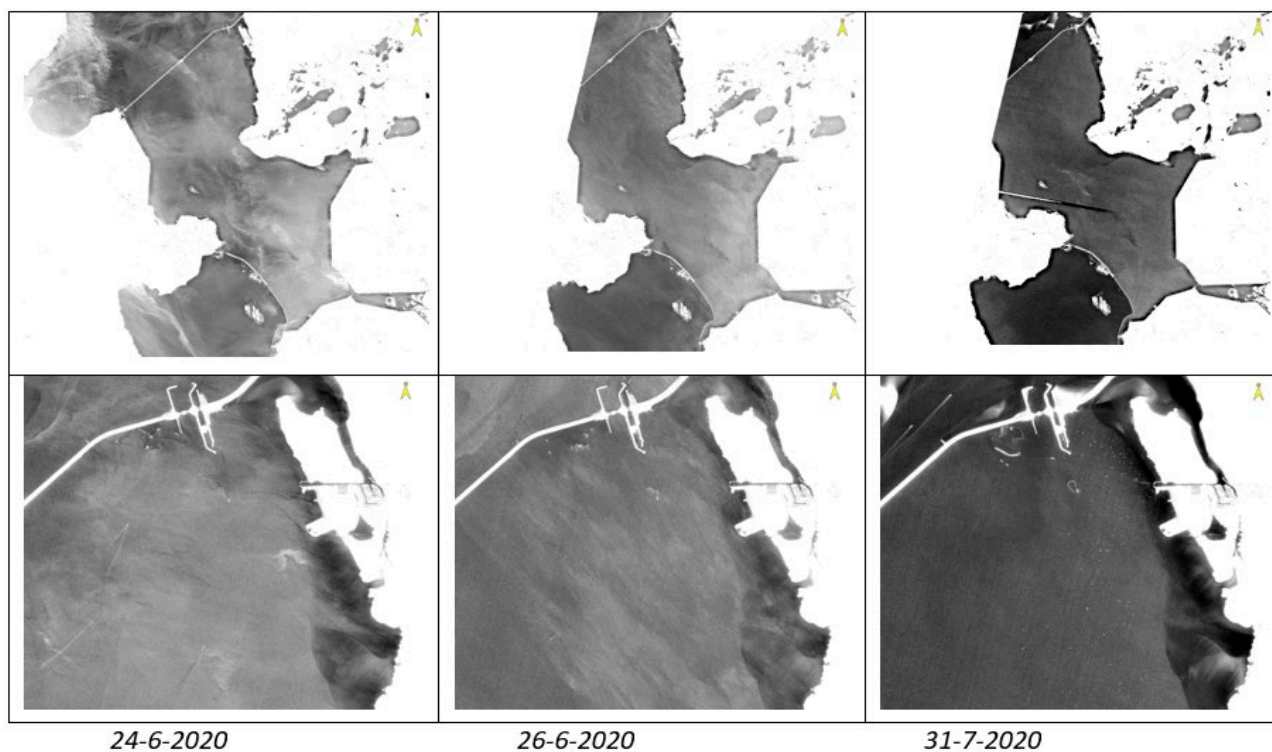
De BNDVI is een vegetatie index waarbij de rode band (R) is vervangen door de blauwe band (B). Hierbij wordt de NIR reflectie dus niet gehouden tegen de laagst mogelijk R reflectie maar tegen de helderheid in het water wat in B tot uiting komt.

Er is een eerste visuele analyse gedaan in enkele opnamen, gericht op de aanwezige verschijnselen in IJsselmeer en Markermeer van algenbloei, sedimentatie, ondiepten, helder water en bewolking/haze. Figuur 23 laat zien, als voorbeeld, hoe de Sentinel opname van 24-6-2020 toont in natural colour en false colour en hoe deze toont als NDVI, BNDVI en SABI.



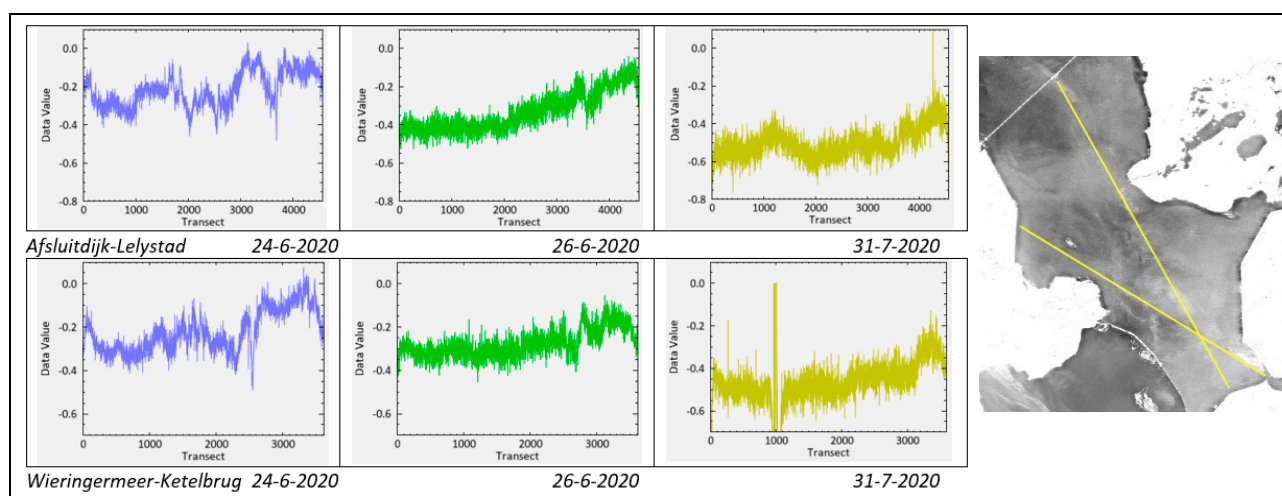
Figuur 23: Sentinel-2 in natuurlijke en false colour representatie en afgeleide SABI, NDVI en BNDVI indices

Uit vergelijking tussen SABI, NDVI en BNDVI is voornamelijk geconstateerd dat de NDVI iets minder snel verzadigd raakt en nuances in het water daardoor iets beter laat zien. Daarom is voor de tijdreeks analyse de NDVI gebruikt. Figuur 24 geeft voor drie beelden van 24-6-2020, 26-6-2020 en 31-7-2020 de NDVI weer, alle drie op dezelfde manier geschaald tussen waarden van -0.8 en 0.1.



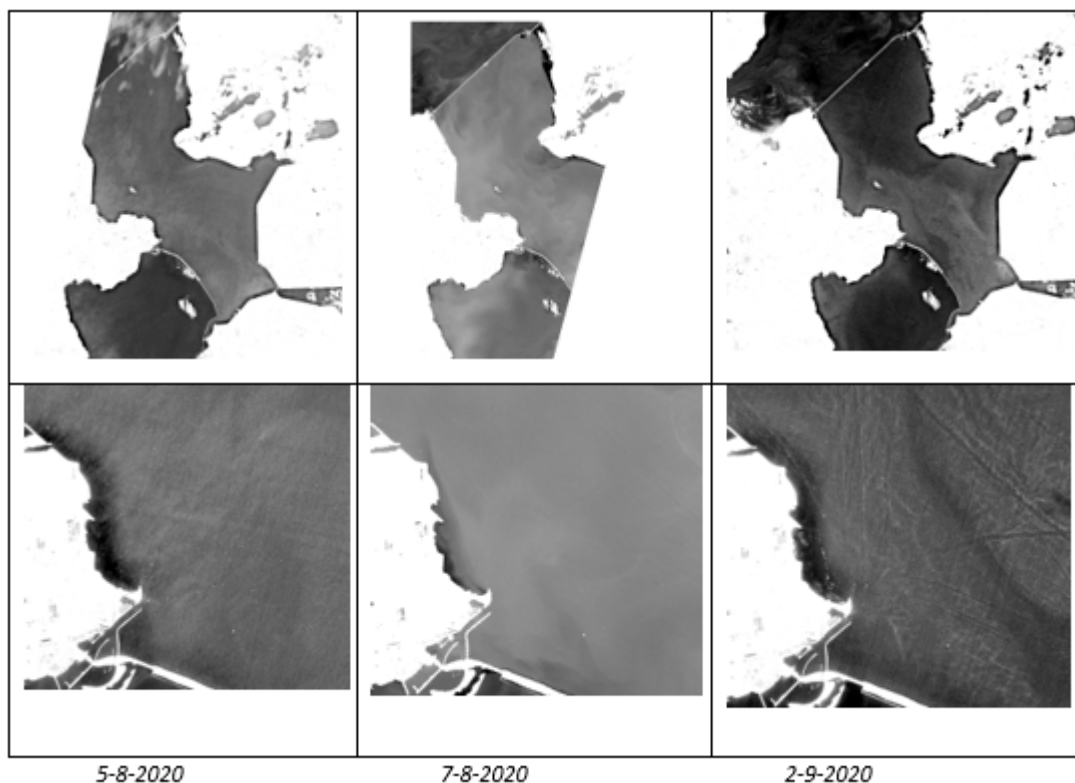
Figuur 24: Geschaalde NDVI Sentinel-2 beelden voor 3 opeenvolgende datums (tussen -0.8 en 0.1)

Te zien is dat de NDVI waarden afnemen in de tijd. Daarnaast dat met name op de beelden in juni er veel ruimtelijke variatie bestaat van het NDVI niveau. Dit kan samenhangen met de hoeveelheid algen in het water. Hogere waarden duiden op hogere concentraties algen. Om de variatie te illustreren zijn ook de waarden langs twee profielen over het meer in grafieken weergegeven. Zie Figuur 25.

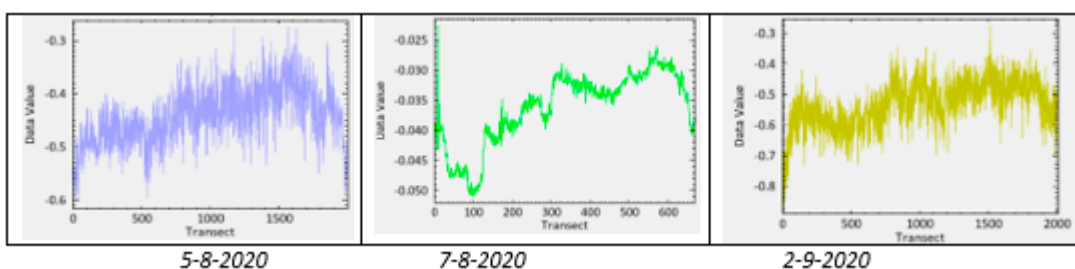


Figuur 25: Grafieken die NDVI waarden weergeven op de drie datums langs twee profielen Afsluitdijk-Lelystad en Wieringermeer-Ketelbrug

Hetzelfde is gedaan voor de periode 5-8-2020, 7-8-2020 en 2-9-2020. Van de onderstaande NDVI beelden zijn de twee Sentinel beelden (5-8 en 2-9) op dezelfde manier geschaald, te weten tussen NDVI waarden -0.8 en 0.1. De Landsat opname is van 7-8-2020. Hoewel het verloop van het spectrale profiel analoog is aan dat van de beide Sentinel opnamen zit er een factor 10 verschil in de NDVI data waarden langs het transect Stavoren-Enkhuizen. Nader achtergrondonderzoek is nodig om dit verschil te duiden, het maakt in elk geval wederom het belang duidelijk van een goede kalibratie tussen verschillende sensoren. Zie Figuur 26 en Figuur 27.



Figuur 26: Geschaalde NDVI Sentinel-2 en Landsat opnamen



Figuur 27: Grafieken die NDVI waarden weergeven op de drie datums langs het profiel Stavoren Enkhuizen

Het afnemen van de watertemperatuur in de periode vanaf begin augustus naar begin september is enigszins terug te zien in de NDVI beelden, d.w.z. wanneer de twee Sentinel opnamen worden vergeleken. Het NDVI profiel tussen Stavoren en Enkhuizen laat op 2-9-2020 waarden zien die ongeveer 0.1 lager liggen dan de waarden van 5-8-2020. Anderzijds zijn in de opname van 2-9-2020 wel verschijnselen te zien die typisch zijn voor algenbloei, namelijk de 'sporen' die worden getrokken in het oppervlaktewater door de scheepvaart. Windstille omstandigheden kunnen hierbij een rol hebben gespeeld, historische weergegevens van het KNMI wijzen uit dat op 2-9-2020 op station

Stavoren op het tijdstip van satellietoverkomst een windsnelheid werd gemeten van 3 m/s wat laag is (een van de laagste waarnemingen in de maanden augustus en september 2020).

Een voorlopige conclusie is dat het vaststellen van een direct verband tussen watertemperatuur en algenbloei met deze dataset van twee Landsat opnamen en acht Sentinel opnamen nog niet voldoende kon worden gedaan. Algenbloei wordt veeleer aangedreven door de aanwezigheid van voedingstoffen in het water en door de juiste belichtingsomstandigheden. Of temperatuur een (mede-)bepalende rol speelt is de vraag.

4 Hoge resolutie temperatuur van wegen en waterlopen

4.1 Achtergrond

Thermische waarnemingen met behulp van bemande of onbemande vliegende platformen hebben het voordeel dat ze opnamen met een veel hoger ruimtelijk detail kunnen leveren en daarnaast veel flexibeler kunnen worden verzameld voor wat betreft tijd en locatie. Een beperking is dat een relatief klein gebied in één keer kan worden waargenomen. Dat hangt ook weer samen met de vlieghoogte van het platform. Vliegtuigen hebben een wat groter bereik en voetafdruk. Voor kleinere drones is dit beperkter, maar de flexibiliteit is vaak groter. Door de hoge resolutie zijn er met vliegende platformen andere toepassingen dan met satellieten. Daarnaast kunnen beide bronnen elkaar ook aanvullen, waarbij satellieten meer het overzicht bieden en vliegtuigen of drones gebruikt worden om opvallende zaken nader te inspecteren door in te zoomen in detail en in de tijd.

In de gesprekken met Rijkswaterstaat kwam naar voren dat men naast interesse in de temperatuur van waterlichamen, mede in relatie tot lozingen [RD7], ook interesse heeft in de temperatuur van het oppervlak van wegen. Dit tegen de achtergrond van het onderhoud van wegen, waarbij er dan de aanname is dat slechtere plekken in het asfalt resulteren in een andere oppervlakte structuur en/of plassen, waardoor de temperatuur van deze delen van het wegdek afwijkt van andere delen die in goede staat zijn.

Het NLR was in het kader van een ander project bezig met de ontwikkeling van een drone met thermische camera. Besloten is om in het kader van dit project ook enkele testen te doen om gedetailleerde opnamen te maken van enkele wegen en eventueel waterlopen. Er zijn twee testen uitgevoerd, eerst een looptest waarbij met de camera in de hand een traject over het NLR terrein is gelopen. Vervolgens een testvlucht, waarbij met de drone op verschillende hoogten opnamen zijn gemaakt van de landingsbaan van het NLR Drone Test Center en enkele akkers, een weg en een sloot in de omgeving ervan.

4.2 NLR Drone met thermische camera

Het NLR ATIR (Airborne Thermal Infra Red) system bestaat uit een Optris PI 640 camera gemonteerd op een gimbal en een Raspberry PI processing unit, GPS/INS positioneringssysteem, datalink en power in een box. De box en camera vormen een zelfstandige module die kan worden geïntegreerd onder een drone. Voor de test is gebruik gemaakt van een DJI Matrice Hexacopter van het NLR Drone Test Center, welke kan worden geopereerd tot een hoogte van 500 m en een payload kan meenemen van 6kg. De specificaties van de Optris PI 640 camera zijn weergegeven in Tabel 10. Een overzicht van de DJI Matrice Hexacopter is gegeven in Figuur 28.

Tabel 10: Specificaties van de gebruikte thermische camera Optris 640 PI

Specificatie	Optris PI 640
	
Achtergrond, toepassingen	Industry, drones
Spectrale band TIR (8-12um)	7.5-13um
Resolutie en frequentie	640x480 32 Hz / 120x480 120 Hz
Gevoeligheid NETD	75mK ±2%
Gewicht	320gr
Afmeting	46x56x90 mm
Power consumptie	USB powered, of extern 24V
Interfacing – control	USB2. Via pi-connect of evocortex API
Interfacing – video and metadata	Frames plus system metadata.
Software	PI Connect
Data opslag	Niet in camera, Via evocortex
Streaming	Via evocortex, encoder nodig
Kalibratie ⁶	Is radiometrisch gecalibreerd en kan worden hercalibreerd
Type Shutter (global – rolling)	global
Lens (meerdere FOV mogelijk)	12/15/33/60/90deg
Robuustheid	Ruggedized, IP67

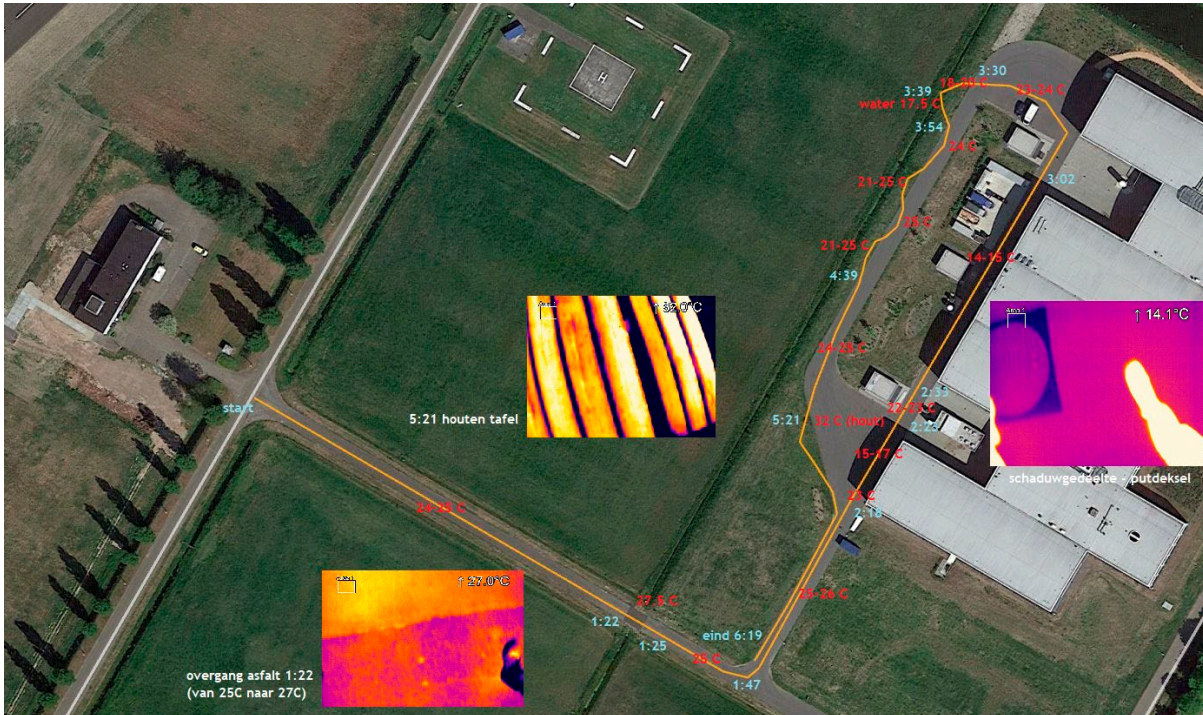


Figuur 28: De NLR DJI Matrice Hexacopter

⁶ Absolutie thermische kalibratie is vooral relevant om multi-temporele opnamen met elkaar te kunnen vergelijken en absolute temperaturen te kunnen bepalen. In eerste fase niet noodzakelijk, later wel relevant.

4.3 Grondtest

Op 20-4-2021 is een eerste opname gedaan met de ATIR camera, 'hand-held and by feet', dus door rond te lopen met de camera in de hand. De gelopen track met insets is weergegeven in Figuur 29.



Figuur 29: ATIR thermische opnamen gedurende rondgang over het NLR terrein

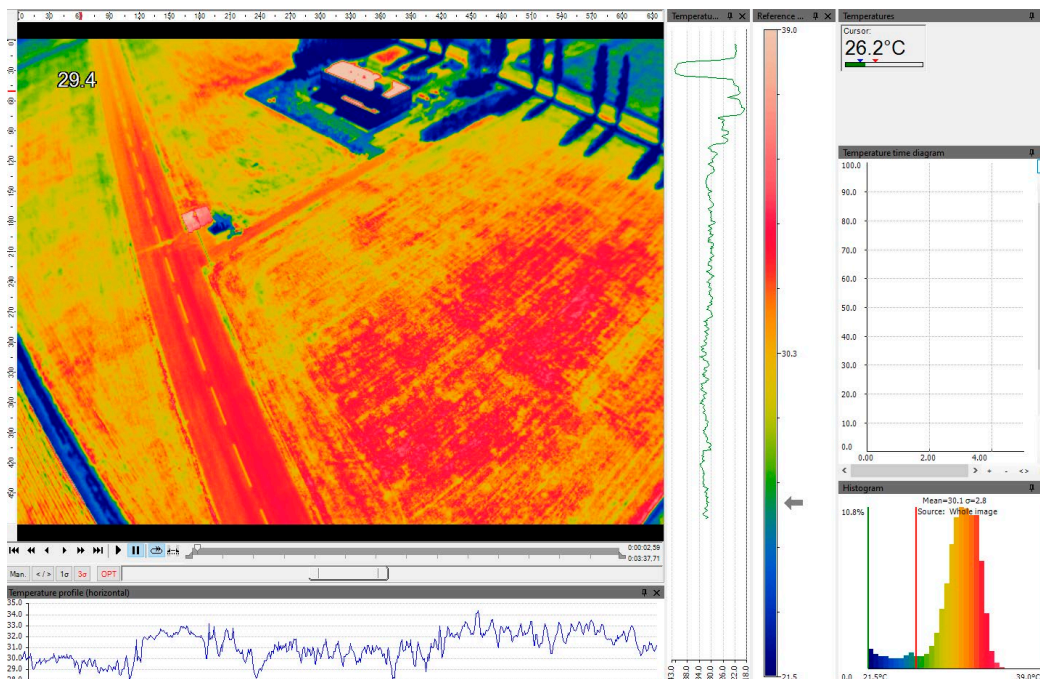
In de figuur zijn in lichtblauw de cijfers van de tijd tijdens de rondgang weergegeven en in rood de gemeten temperaturen.

Na de start, eerst een stukje oud asfalt met strooilaag tot aan 1:22. Dan komt er een klein stukje glad zwart asfalt en op 1:25 gaat dat weer over op het oudere asfalt. De temperaturen lopen hier zo'n 2.5 °C uiteen (zie inzet linksonder). Vervolgens glad zwart asfalt (1:47) en later (2:18) over beschaduwde delen achter de hallen. Er is zo'n 8 á 9 graden verschil tussen beschaduwde en onbeschaduwde. En passant nog een putdeksel opgenomen (zie inzet rechts). Op 3:30 het gras in, hier vooral veel variatie in temperatuur. Je ziet hier heel goed of het wat kalere grond is, stro-laag of vers gras. Ook nog even boven een smal slootje gestaan (3:39), de temperatuur hiervan was nog niet eens erg laag (17.5 °C). De houten picknick tafel op 5:21, zie inzet midden, liep het meest op in temperatuur (32 °C).

4.4 Testvlucht

Op 16-6-2021 is een testvlucht uitgevoerd, waarbij met de drone opnamen zijn gemaakt van de landingsbaan van het NLR Drone Test Center en enkele akkers, een weg en een sloot in de omgeving ervan. De test is uitgevoerd in een tijdvenster van 10:00 tot 15:00 uur. Er is gevlogen op drie verschillende hoogtes, namelijk 100 m, 300 m en 500 m.

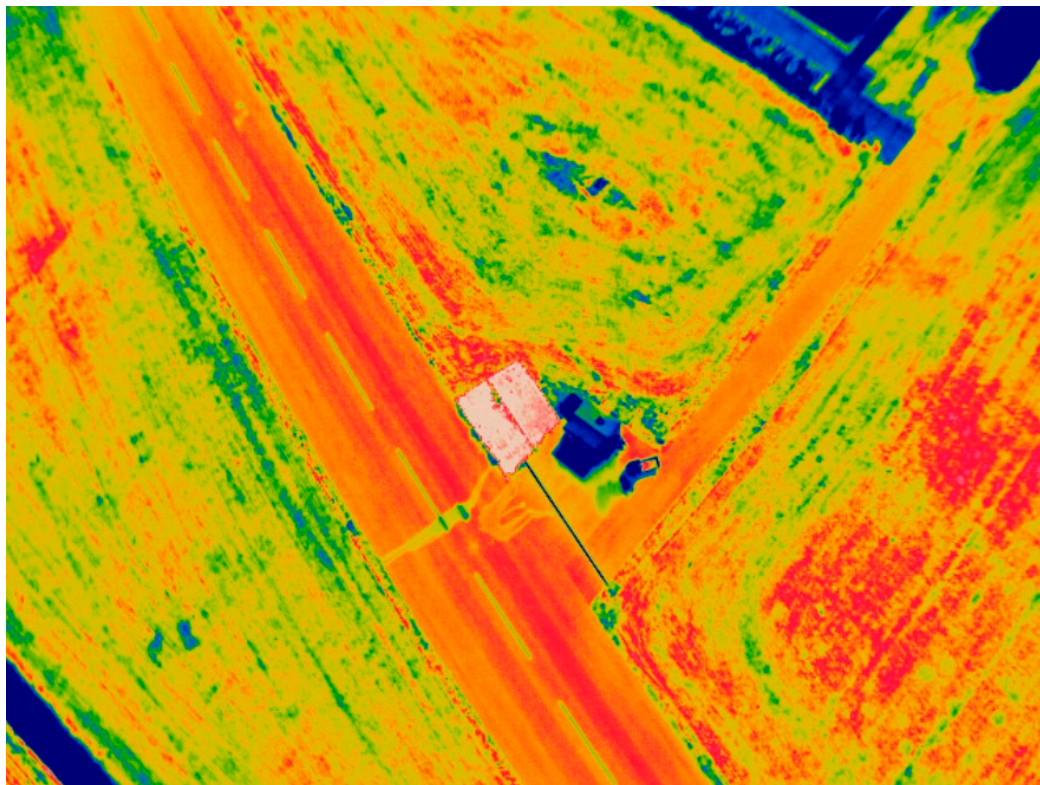
Figuur 30 geeft een overzicht van het testgebied en van de Optrix PIX Connect software waarmee de data eenvoudig kan worden gevisualiseerd.



Figuur 30: Overzicht van de waargenomen omgeving en de PIX Connect display omgeving

In het beeld is de landingsbaan te zien met daaromheen weilanden en rechts een gebouw en een weg. De temperatuur wordt weergegeven via een rainbow look-up-table; in blauw de lagere temperaturen, in rood de hogere temperaturen. De maximum en minimum temperatuur op de balk variëren mee met de inhoud van het beeld.

Figuur 31 toont een verticale opname genomen op het startpunt op 100 m hoogte om 10:44:01 uur.

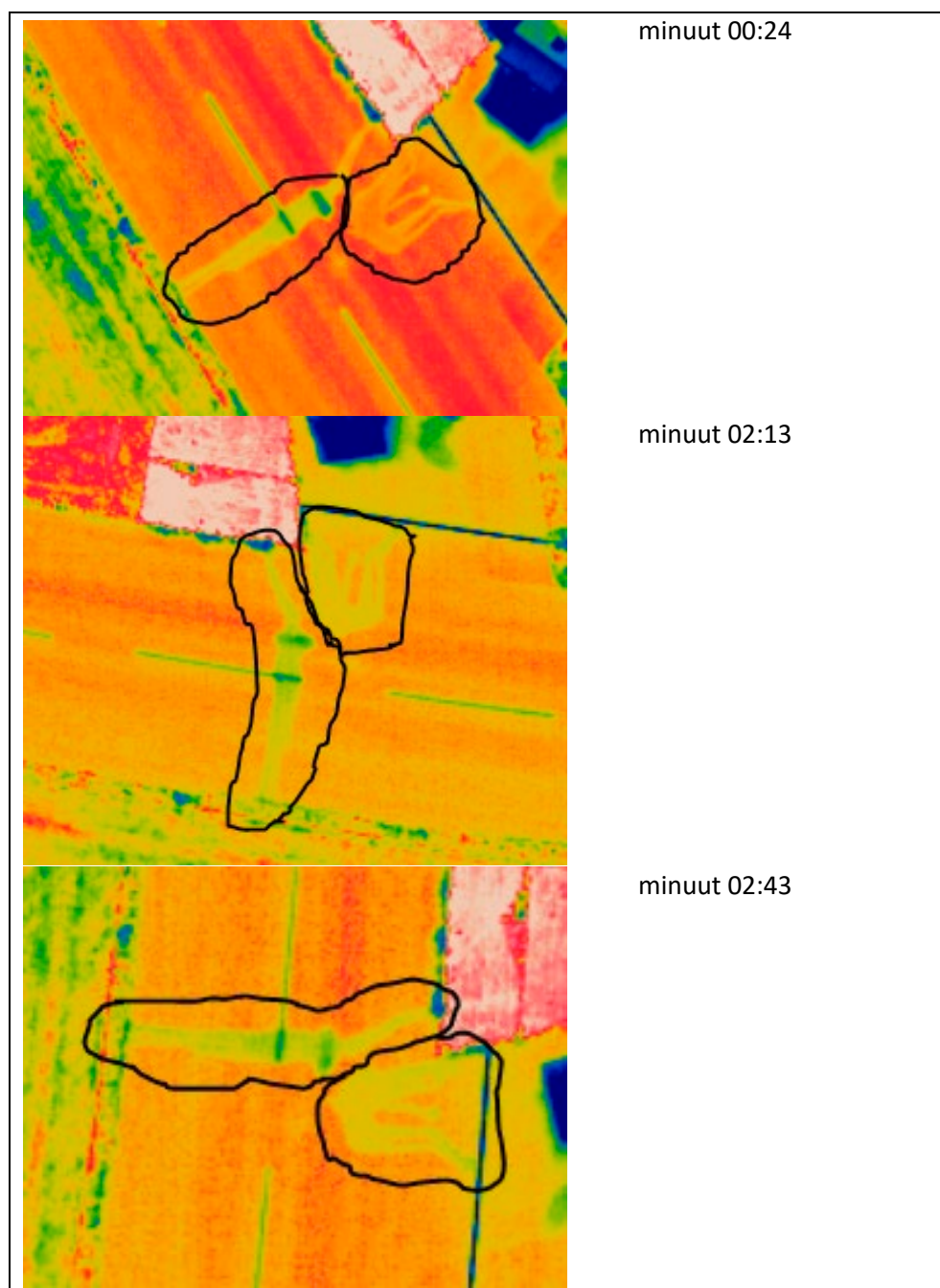


Figuur 31: Verticale opname genomen vanaf 100 m hoogte op het startpunt om 10:44:01 uur

Bovenin het beeld (donkerblauw) het gebouw van het Drone Centre. In het midden van het beeld de controle wagen, het dak is groen-blauw (28 tot 29 °C), het kleine donkerblauwe vierkantje op het dak is de airco-unit (24.5 °C), de luifel in blauw is 26.5 °C en de schaduw in donkerblauw is 22 tot 24 °C. De twee witte vlakken tussen de wagen en de landingsbaan zijn kunstgras, deze hebben de hoogste temperatuur van 37 tot 39 °C.

Het asfalt van de vliegbaan varieert enigszins; oranje en rode stroken in de lengte van de baan (oranje 32 tot 33 °C en rood 33 tot 34 °C). De witte markeringen in het midden van de baan zijn 30 °C.

Kort voor de overkomst van de drone is er een proef uitgevoerd waarbij warm en koud water over het asfalt is gegoten. Vervolgens is het weggedeelte op verschillende tijden door de TIR camera vastgelegd om te zien wat de temperatureffecten op het asfalt zijn, zie Figuur 32.



Figuur 32: Thermische opnamen van het warme en koude water over het asfalt op verschillende tijdstippen

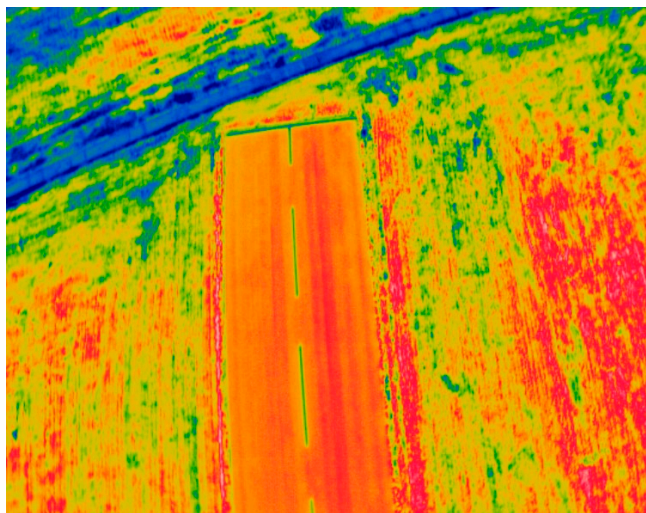
Op het eerste plaatje van minuut 00:24 is zwart omkaderd links, is het koude water. Op de groene vlek rechts is de emmer uitgegoten. Hier is de temperatuur 28.5 °C, dus zo'n 5.5 °C lager dan het asfalt ernaast. Waar het water zijdelings is weggelopen (naar links) is het asfalt 31 tot 32 °C, d.w.z. 1 tot 2 graden lager dan het asfalt ernaast. Aardig detail is dat waar het koude water op de witte markering terecht is gekomen, daar de temperatuur nog wat lager is dan op het asfalt; 28.5 °C, dus ook weer 1 tot 2 graden lager dan de witte markering ernaast die droog is. Zwart omkaderd, rechts, is het warme water. De vlek op het asfalt geeft een temperatuur te zien tussen 32.5 en 33 °C. Dat is 0.5 tot 1 graad lager dan het asfalt ernaast. Dus warm of koud water heeft wel invloed en is onderscheidbaar. De gemeten temperaturen zijn samengevat in Tabel 11.

Tabel 11: Gemeten temperatuur van de baan en het op de baan gegooid koude en warme water

	00:24 minuut	02:13 minuut	02:43 minuut
asfalt baan	33-34 °C	33-34 °C	33-34 °C
emmer koud water (groene vlek)	28.5 °C	30 °C	30 °C
koud water op asfalt	31-32 °C	32 °C	31.5-32 °C
warm water op asfalt	32.5-33 °C	32.5-33 °C	32-32.5 °C

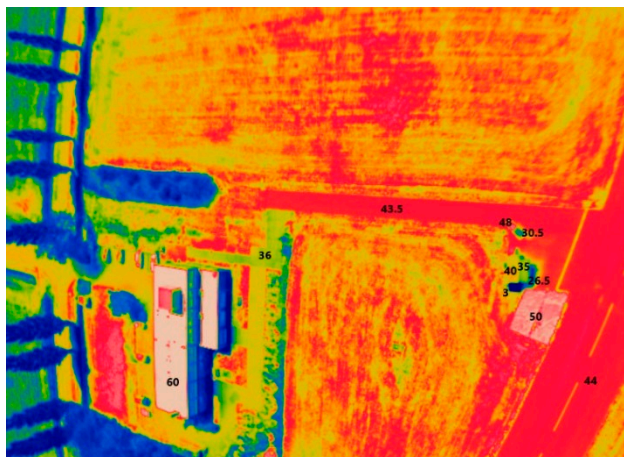
De tabel laat zien dat als er enige tijd verloopt tussen TIR waarnemingen, zo'n twee minuten, de opwarming meetbaar is. De tabel laat ook zien dat in kortere tijd tussen de waarnemingen ook 'ruis-aspecten' kunnen meespelen zoals stand van de camera en de nauwkeurigheid van de temperatuur meting. Uit deze vergelijking komt een nauwkeurigheid van ongeveer 0.5 °C.

Een uur later op 11:40:54 is opnieuw een opname gemaakt, wederom op 100 m hoogte. Zie Figuur 33. De landingsbaan is inmiddels opgelopen in temperatuur, 37.5 °C voor de oranje delen en 38.5 °C voor de rode delen. Dat is een toename van 5 °C in temperatuur t.o.v. 10:44:01.



Figuur 33: Opname van de landingsbaan op 11:40:54

Weer twee uur later op 13:48:07 is er opnieuw een opname gemaakt op 100 m hoogte. Zie Figuur 34. De temperatuur van het asfalt op de landingsbaan is verder opgelopen. Nu naar 44 °C. Dus gedurende twee uur is de temperatuur met 6 °C verder opgelopen. In het plaatje hieronder een aantal temperaturen die zijn vastgesteld in de opname van 13:48:07.



Figuur 34: Opname van de landingsbaan op 13:48:07

Vergelijking ATIR met Satelliet TIR

Op de datum van de ATIR drone opname van 16-6-2021 zijn er ook twee satellietopnamen gemaakt, waarvan één thermische. Het is interessant een vergelijking te maken tussen de opnamen. Er is een Sentinel-2 opname (optische banden) en er is een Landsat-8 opname waaronder ook TIR. Het opnametijdstip van Landsat-8 is 16-6-2021, 10:33:18 GMT dus 12:33:18 LT.

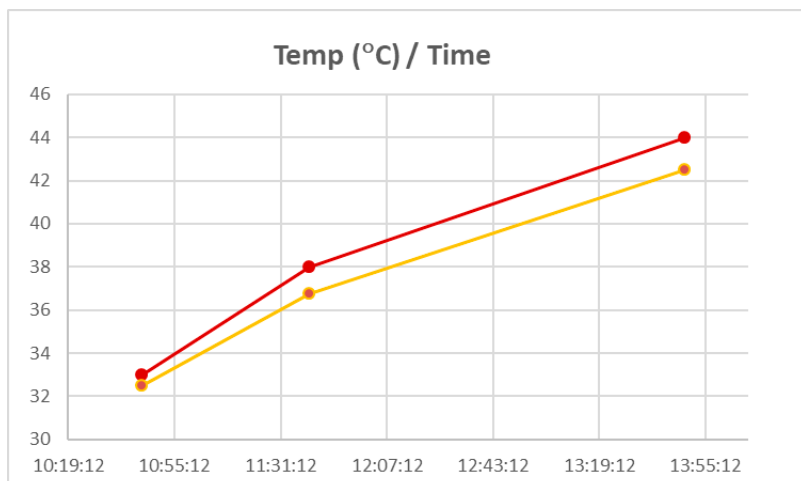
De L8 opname is geprocessed naar een zogenaamd collection2/level2 product. Hierbij zijn de twee L8 TIR banden samengenomen, gemiddeld, omgerekend naar surface temperature en geresampled naar 30 m pixelsize. De oorspronkelijke pixelsize is 100 m. In Figuur 35 is een uitsnede te zien van de vliegstrip bij het Drone Centre.



Figuur 35: Landsat-8 TIR, Sentinel natuurlijke kleuren, Open Streetmap en mengvormen van NLR landingsbaan

Het Landsat TIR beeld past geometrisch goed op de kaart (Open Street Map) en op de Sentinel-2 opname van dezelfde datum. De Sentinel-2 opname heeft 10 m resolutie. Te zien is dat de landingstrip als een gebiedje met hogere temperaturen terugkomt in de L8 TIR opname.

Ondanks dat de resolutie en opgenomen gebied van drone opname respectievelijk veel hoger en veel kleiner is dan de Landsat opname is enige vergelijking toch wel mogelijk, vooral dankzij de goede geometrische passing. De gemeten temperaturen met de ATIR drone op de landingsbaan laten een tamelijk lineair verloop zien ten opzichte van de tijd, zie Figuur 36.



Figuur 36: Met ATIR gemeten temperaturen over de tijd van de NLR landingsbaan

In rood de gemeten temperaturen ter hoogte van de controlewagen, in oranje de gemeten temperaturen aan het uiteinde (noordoost) van de baan. De rode grafiek toont puntmetingen, dus hierbij is een punt vlakbij de controlewagen gekozen (op de landingsbaan). De oranje grafiek bevat meetwaarden door in de Optris PIX Connect een window te kiezen en daarvan het gemiddelde te bepalen. Het window komt overeen met het gebied van een satellietpixel op de grond. Het was goed mogelijk dit te doen voor alle drie de tijdstippen (op het noordoosten van de baan). Uit het lineaire verloop van de oranje grafiek kan worden afgeleid dat de temperatuur van de baan omstreeks 12:33, de overkomsttijd van Landsat, ongeveer 39 °C is.

Van het Landsat 8 beeld zijn de waarden van de 4 30x30 m pixels die over het noordoostelijke deel van de landingsbaan liggen bemonsterd. Zie Figuur 37. De gemiddelde temperatuur ervan komt uit op 40 °C.



Figuur 37: Bemonsterde Landsat 8 TIR pixels boven de landingsbaan

Voorlopige conclusie is dat de gemeten temperatuur door de Landsat-8 satelliet (40 °C) behoorlijk overeen komt met de gemeten temperatuur door de ATIR camera op de drone (39 °C), dus 1 graad verschil.

Verdere vergelijking van andere plaatsen/objecten zou nu de volgende stap moeten zijn en daarna zou kunnen worden gedacht aan validatie.

5 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde activiteiten worden de volgende conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

Geconcludeerd kan worden dat met behulp van Landsat satellietwaarnemingen behoorlijk nauwkeurige temperatuurwaarnemingen kunnen worden gedaan van grote wateroppervlakken. Voor de IJsselmeercasus werd een gemiddelde fout van 0 °C gevonden en een standaard deviatie van 0.9 °C. Hierbij is gebruik gemaakt van de in-situ metingen van twee referentiestations, waardoor een verbetering van de atmosferecorrectie kon worden bereikt en daarmee een verbetering van de nauwkeurigheid met een factor 2.

Relatief kunnen nog gedetailleerdere temperatuurvariaties worden waargenomen in de orde van 0.1 °C.

Belangrijk is wel dat de waarnemingen met zo helder mogelijk weer kunnen worden gedaan. Atmosferische haze beïnvloedt anders de nauwkeurigheid.

Er is onderzocht of er een relatie is te vinden tussen algenbloei en de watertemperatuur. Dat kon in deze dataset, met beperkte informatie over de daadwerkelijke algengroei, niet worden vastgesteld. Een sterk verband lijkt niet te bestaan.

Er is kort ingegaan of de informatie over de temperatuurvariatie in het IJsselmeer bruikbaar is om analyses te voeren ten aanzien van de mogelijkheden van aquathermie. De metingen zijn in principe nauwkeurig genoeg om hiervoor relevante informatie te verstrekken.

Thermische satellietopnamen zijn op dit moment vrij beperkt beschikbaar. Belangrijkste bron zijn Landsat 8 en 9 met TIR opnamen eens per 7 dagen (én bij een opname op een bepaalde dag altijd een tweede opname op de dag ervoor of erna) met 100 m resolutie. De in aanbouw zijnde 'Albedo' constellatie van 24 satellieten met 4 m resolutie TIR sensoren biedt veel belovende vooruitzichten, waarbij met veel meer detail en grotere regelmaat waarnemingen mogelijk zijn.

Uit de testen met de ATIR drone kan worden geconcludeerd dat met een drone zeer hoge resolutie (tot enkele centimeters) thermische opnamen kunnen worden gemaakt met relatieve temperatuurmetingen in tienden graden Celsius nauwkeurig. Absoluut kan vrij eenvoudig een kalibratie plaatsvinden met een referentie object, waardoor naar schatting een nauwkeurigheid van 0.5 graden goed mogelijk is. Doordat de drone relatief laag vliegt zijn de atmosferische omstandigheden minder verstorend.

Eerste testen laten zien dat de temperatuur van het asfaltdek beïnvloed wordt door plasvorming en mogelijk ook verandering van de oppervlaktestructuur. Dit wordt met name zichtbaar bij perioden van opwarming of afkoeling. Voor praktische bruikbaarheid zijn verdere experimenten nodig.

Met hogere resolutie opnamen van toekomstige satellieten of vliegtuigen/drones kunnen dezelfde principes als onderzocht voor het IJsselmeer ook worden toegepast op waterlopen en is ook detectie van lozingen naar verwachting goed mogelijk.

Aanbevolen wordt om zodra de eerste hoge resolutie Albedo opnamen beschikbaar komen een nieuw experiment op te zetten. Zowel om deze waarnemingen in combinatie met medium resolutie Landsat 8 en 9 waarnemingen te combineren voor monitoring van de temperatuur van het IJsselmeer, als om een casus uit te voeren met het

detecteren van lozingen in rivieren en andere waterlopen. Hierbij zouden ook opnamen met een thermische drone kunnen worden betrokken.

Daarnaast wordt aanbevolen om een gestructureerd experiment op te zetten met een thermische drone voor de inspectie van de kwaliteit van wegen, zodat er beter inzicht kan worden opgebouwd in de mate waarin- en condities waaronder thermische waarneming vanuit de lucht het mogelijk maakt om informatie over de wegkwaliteit in te winnen.

6 Referenties

- RD 1 Persie, M. van, Noorbergen, H.H.S., Plugge, D., 2021, *Programma Aardobservatie - Resultaten 2020*, NLR rapport NLR-CR-2020-493, Amsterdam.
- RD 2 Persie, M. van, Engwerda, H.J.A, Noorbergen, H.H.S, 2021, *Integriteit van Aardobservatie data*, NLR rapport NLR-CR-2021-325, Amsterdam.
- RD 3 Boer, T. de, 2014, *Assessing the Accuracy of Water Temperature Determination and Monitoring of Inland Surface Waters Using Landsat 7 ETM+ Thermal Infrared Images. A Case Study on the Rhine River, North Sea Canal, and Hollands Diep.*
- RD 4 USGS, 2019-11, *Landsat 8 Data Users Handbook, version 5.0*, geraadpleegd op 2021-11-26, van https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf
- RD 5 Potentiekaart Aquathermie, [Potentiekaart - Aquathermie \(geoapps.nl\)](https://www.geoapps.nl/), laatst geraadpleegd 2022-02-28.
- RD 6 F. Alawadi, 2010, *Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI)*, SPIE Volume 7825.
- RD 7 Bijstra, D, Jong, S.P. de, 2006, *Rapportage meetcampagne warmtelozingen zomer 2004.*
- RD 8 Calkoen, C, Wensink, H (BMT-ARGOSS), Noorbergen, H.H.S, Dost, R (NLR), Naije, M, Schrama, E (TU Delft), 2011, *PROCSY Pluggable Refined Ocean Current System.*



Dedicated to innovation in aerospace

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het onderzoekscentrum Koninklijke NLR werkt op objectieve en onafhankelijke wijze met zijn partners aan een betere wereld van morgen. NLR biedt daarbij innovatieve oplossingen en technische expertise en zorgt voor een sterke concurrentiepositie van het bedrijfsleven.

NLR is ruim 100 jaar een kennisorganisatie met de diepgewortelde wil om te blijven vernieuwen en zet zich in voor een duurzame, veilige, efficiënte en effectieve lucht- en ruimtevaart.

De combinatie van diepgaand inzicht in de klantbehoefte, multidisciplinaire expertise en toonaangevende onderzoeksfaciliteiten, maakt snel innoveren mogelijk. NLR vormt in binnen- en buitenland de spilfunctie tussen wetenschap, bedrijfsleven en overheid, en overbrugt de kloof tussen fundamenteel onderzoek en toepassingen in de praktijk. Daarnaast werkt NLR als Groot Technologisch Instituut ruim tien jaar in de TO2-federatie samen aan toegepast onderzoek in Nederland.

Vanuit de hoofdvestigingen in Amsterdam en Marknesse en twee satellietvestigingen, draagt NLR bij aan een veilige en duurzame maatschappij en werkt met partners in vele (defensie)programma's, onder andere aan complexe composieten constructies voor verkeersvliegtuigen en aan doelgericht gebruik van het F-35-jachtvliegtuig. Daarnaast geeft NLR invulling aan Nederlandse en Europese (klimaat)doelstellingen conform de Luchtvaartnota, de European Green Deal, Flightpath 2050, en door deelname aan programma's zoals Clean Sky en SESAR.

Voor meer informatie bezoek: www.nlr.nl

Postal address

PO Box 90502
1006 BM Amsterdam, The Netherlands
e) info@nlr.nl i) www.nlr.org

Royal NLR

Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam, The Netherlands
p) +31 88 511 3113

Voorsterweg 31
8316 PR Marknesse, The Netherlands
p) +31 88 511 4444