

Beregeningsmonitor

Pilot Rapport



Colofon

Partners

*HydroLogic
eLEAF*

Auteurs

*Glenn Morvan
Joost Brombacher*

Uitvoerders

*Glenn Morvan
Joost Brombacher
Steven Wonink
Henk Pelgrum
Maarten Spijker*

Opdrachtgevers

*Hoogheemraadschap de
Stichtse Rijnlanden
Waterschap Vallei en Veluwe
Waterschap Hunze en Aa's
Waterschap Zuiderzeeland
Waterschap Scheldestromen
Hoogheemraadschap
van Rijnland
STOWA*

Datum

08-05-2020

Contact

*Glenn Morvan
glenn.morvan@hydrologic.com
06 34099218*

VOORWOORD

Op 26 september 2019 zijn tijdens een workshop de wensen, kansen en uitdagingen van de Beregeningsmonitor Pilot besproken. In de maanden na de workshop zijn HydroLogic en eLEAF aan de slag gegaan om een pilotonderzoek uit te voeren waarin verschillende methodes getoetst zijn voor een gebied binnen het beheersgebied van waterschap Scheldestromen. De resultaten van dit pilotonderzoek zijn tijdens een tweede workshop gedeeld met alle deelnemende organisaties. In voorliggend rapport zijn de resultaten van dit pilotonderzoek voor u uiteengezet en zijn de mogelijkheden voor vervolg geschetst.

INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding	1
2.	Data	2
2.1	Beregeningsdata	2
2.2	Satellietdata.....	2
2.3	Landgebruiksdata	5
3.	Methodes	6
3.1	Direct monitoren.....	6
3.1.1	Optische observaties.....	6
3.1.2	Radar observaties	8
3.2	Indirect monitoren	10
4.	Resultaten	11
4.1	Direct monitoren.....	11
4.1.1	Optische observaties.....	11
4.1.2	Radar observaties	15
4.2	Indirect monitoren	17
5.	Discussie.....	20
5.1	Algemeen	20
5.1.1	Referentiedata	20
5.1.2	Satellietdata	20
5.2	Direct monitoren.....	22
5.2.1	Optische observaties.....	22
5.2.2	Radar observaties	22
5.3	Indirect monitoren	22
6.	Conclusies	23
6.1	Direct monitoren.....	23
6.1.1	Optische observaties.....	23
6.1.2	Radar observaties	23
6.2	Indirect monitoren	23
6.3	Algemeen	24
7.	Vervolgstappen	25
8.	Bronvermelding.....	26

1. INLEIDING

Met de verwachte klimaatverandering zullen droge periodes in Nederland in de toekomst vermoedelijk vaker voor gaan komen (Wolters, van den Born, Dammers, & Reinhard, 2018). Hierdoor zullen waarschijnlijk ook maatregelen zoals beregeningsverboden getroffen moeten worden door waterschappen. Het handhaven van dergelijke beregeningsverboden is echter een complexe en tijdrovende klus. Het doel van de beregeningsmonitor is om doormiddel van satellietdata inzicht te vergaren in waar en wanneer beregend wordt en waterschappen daarmee te assisteren in het monitoren van beregeningsverboden.

Op donderdag 26 september 2019 is op het kantoor van HydroLogic in Amersfoort een workshop gehouden in het kader van de Onderzoekspilot Beregeningsmonitor. Hierbij waren afgevaardigden van alle deelnemende organisaties (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, Waterschap Vallei en Veluwe, Waterschap Hunze en Aa's, Waterschap Zuiderzeeland, Waterschap Scheldestromen, Hoogheemraadschap van Rijnland en STOWA) aanwezig. Het hoofddoel van deze workshop was om samen met de deelnemende organisaties te bepalen hoe een beregeningsmonitor het beste zou kunnen helpen bij het handhaven van beregeningsverboden in Nederland en aan de hand hiervan een use-case uit te werken voor de Beregeningsmonitor. Daarnaast was deze workshop bedoeld om informatie bij de deelnemende organisaties op te halen over beschikbare data over wanneer en waar is beregend. Deze informatie is nodig voor de kalibratie en validatie van de beregeningsmonitor.

De conclusie van de workshop was dat het primaire doel van de pilot zou moeten zijn om de technisch-economische haalbaarheid te onderzoeken voor het vaststellen waar en wanneer is beregening heeft plaatsgevonden doormiddel van satellietdata en zo ondersteuning te bieden bij het toezichthouden en de handhaving van beregeningsverboden. Naar aanleiding van de workshop en de aangeleverde beregeningsdata is daarnaast in overleg met u besloten om het pilotonderzoek uitsluitend uit te voeren voor het pilot gebied 'Tholen en Sint Philipsland' in het beheersgebied van waterschap Scheldestromen omdat dit het enige gebied was waarvoor beregeningsdata met zowel de locatie en tijd van beregening beschikbaar is.

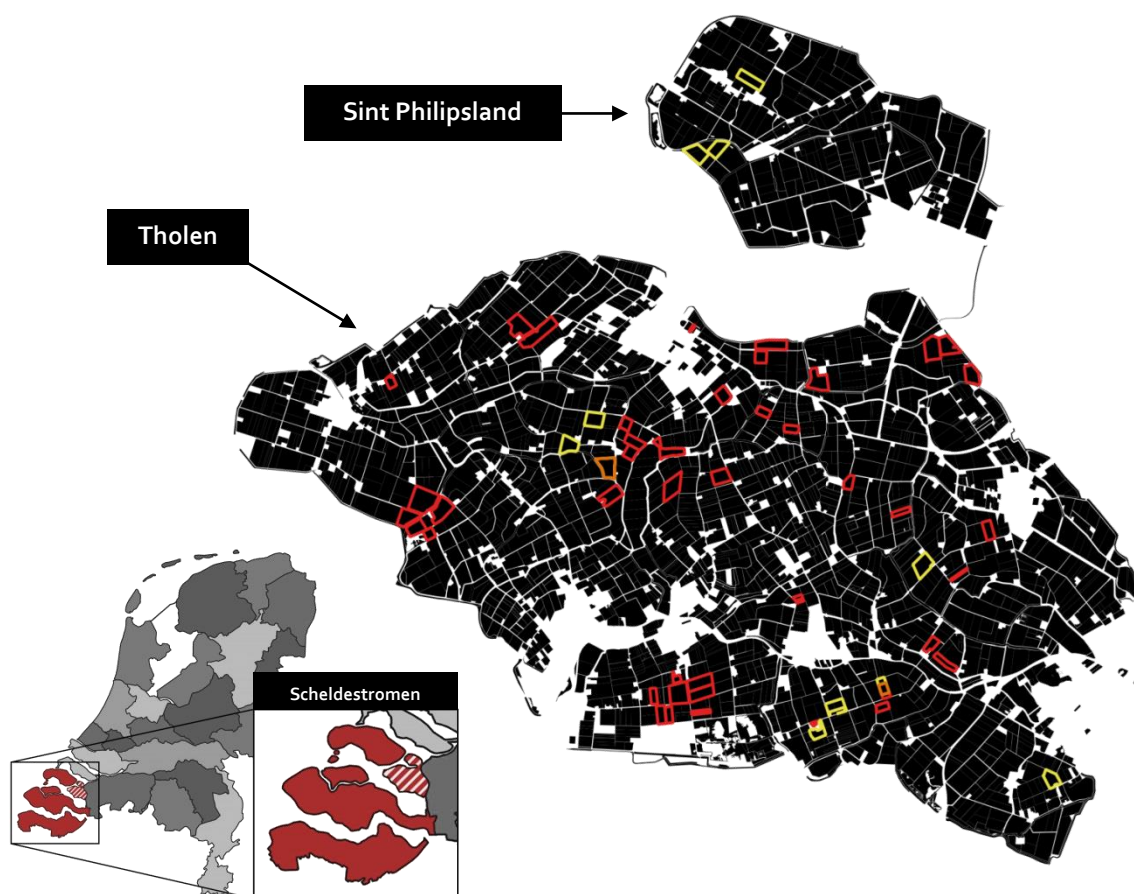
Om dit vraagstuk te beantwoorden hebben eLEAF en HydroLogic verschillende methodes getoetst die in potentie zouden kunnen vaststellen waar wel en niet beregend is in het pilotgebied. Deze methodes lopen uiteen van optische en op radar-gebaseerde directe monitoring van gewassen tot het monitoren van indirecte gevolgen van beregening. In voorliggend rapport wordt allereerst de gebruikte data uitgebreid beschreven waarna de bijbehorende methodes voor data-analyse uiteen zijn gezet gevolgd door de resultaten. In Hoofdstuk 5 en 6 zijn de discussie en conclusie van de resultaten van het pilotonderzoek voor u uitgewerkt. Ten slotte worden in Hoofdstuk 7 de vervolgstappen voor de implementatie van de beregeningsmonitor in Nederland beschreven.

2. DATA

Voor de verschillende methodes die in het pilot onderzoek van beregeningsmonitor zijn beproefd, zijn verschillende databronnen gebruikt. Deze bronnen zijn onderverdeeld in beregenings-, satelliet- en landgebruiksdata. In voorliggend hoofdstuk volgt een uitgebreidere beschrijving per databron.

2.1 BEREGENINGSDATA

Voor de pilot heeft het waterschap Scheldestromen beregeningsdata aangeleverd. Deze is in het pilotonderzoek gebruikt voor de kalibratie en validatie van de beregeningsmonitor. De beregeningsdata van waterschap Scheldestromen is afkomstig van registraties van agrariërs als gevolg van een zoetwatervoorziening die door waterschap Scheldestromen is opgezet voor de twee gebieden. De locaties van de aangeleverde registraties zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. Sint Philipsland en Tholen, de onderzoeksgebieden van de beregeningsmonitor pilot in het waterschap Scheldestromen inclusief locatieaanduiding van velden waar in het jaar 2018 (rood/oranje) en 2019 (geel/oranje) beregening is geregistreerd.

Voor elke beregeningsregistratie is bekend hoeveel water er is opgepompt door de afnemer. Deze volumes zijn gebruikt om per veld het opgebrachte water in mm/d te benaderen. Er is geen rekening gehouden met eventuele verliezen bij het oppompen of beregenen.



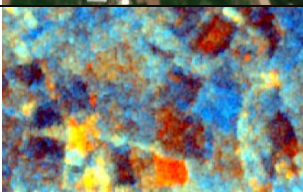
2.2 SATELLIETDATA

Voor de pilot zijn verschillende bronnen voor satellietdata geraadpleegd. Er is gekozen om gratis verkrijgbare satelliet data te gebruiken, mede vanuit een kostentechnisch oogpunt, maar voornamelijk omdat publiekelijk verkrijgbare satellietdata van de ESA en NASA zeer geschikt zijn voor projecten als de beregeningsmonitor. Beiden ruimtevaart organisaties hebben zich gecommitteerd aan het opleveren van

hoge resolutie aardobservatie satellieten en beschikken over geavanceerde apparatuur. Verderop in dit rapport (hoofdstuk 5.1.2) zal er een overzicht over de algemene beschikbaarheid van satellietdata worden gegeven en wordt besproken of commerciële data van toegevoegde waarde kan zijn voor een operationele beregeningsmonitor.

De satellietdata die voor dit onderzoek is gebruikt is afkomstig van drie bronnen, namelijk Landsat 8, Sentinel-2 en Sentinel-1. Tabel 1 geeft een overzicht van de eigenschappen per satelliet.

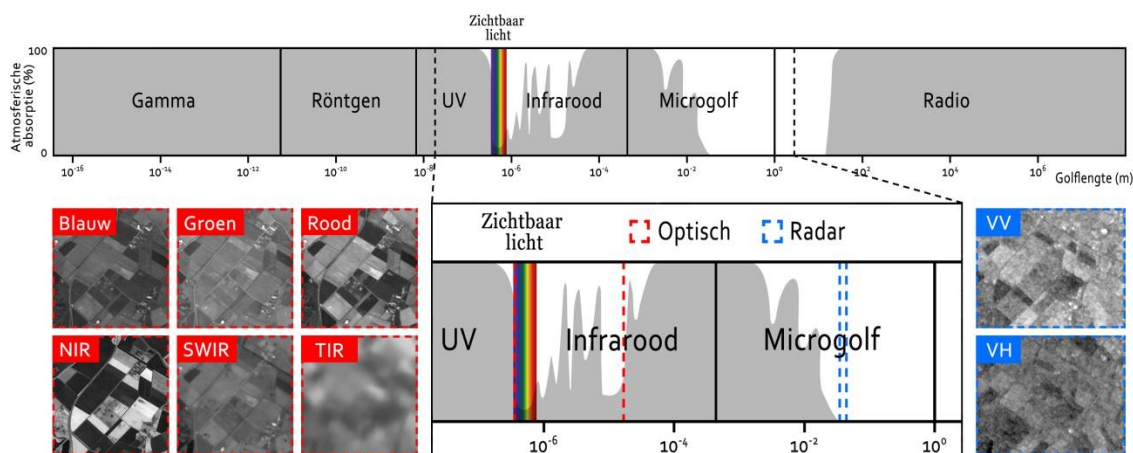
Tabel 1: Lijst van gebruikte satellieten voor het uitvoeren van de beregeningsmonitor pilot.

Platform	Observaties	Resolutie	Frequentie	Voorbeeld
Landsat 8	Zichtbaar licht (RGB)	30 m	16 dagen (mits onbewolkt)	
	Nabij infrarood (NIR)	30 m		
	Kortgolf infrarood (SWIR)	30 m		
	Thermisch infrarood (TIR)*	100 m		
Sentinel-2	Zichtbaar licht (RGB)	10 m	5 dagen (mits onbewolkt)	
	Nabij infrarood (NIR)	10 m		
	Kortgolf infrarood (SWIR)	20 m		
Sentinel-1	C-band SAR (VV,VH)	10 m	1-12 dagen (afhankelijk van gebied/breedte graad)	

Het grootste onderscheid tussen de verschillende satellieten heeft te maken met de manier waarop ze de aarde observeren. Het gros van de aardobservatie satellieten observeert het zichtbare deel van het elektromagnetische spectrum (zie Figuur 2), simpelweg omdat het overgrote deel van de inkomende straling dat het aardoppervlak bereikt (en wordt gereflecteerd) uit zichtbaar licht bestaat. Hierdoor zijn de sensoren van dit soort satellieten relatief klein en goedkoop. Naast zichtbaar licht zijn er verschillende satellieten die straling met grotere golflengtes meten, zoals nabij, kortgolf en thermisch infrarode straling. Over het algemeen, hoe groter de golflengte, hoe zwakker de uitkomende straling, dus hoe groter en duurder de sensoren. Zelfs microgolven, die grofweg een golflengte van 1 mm tot 100 cm hebben, worden door verschillende aardobservatie satellieten waargenomen. Het belangrijke verschil tussen microgolven en kortgolvlige straling (zichtbaar licht tot thermisch infrarood) is dat microgolven met een golflengte vanaf grofweg 5 cm niet worden gereflecteerd door bewolking, wat het mogelijk maakt om ongeacht het weer het aardoppervlak te observeren.

Landsat 8 en Sentinel-2 beschikken beiden over vergelijkbare apparatuur en observeren het zichtbare deel tot het kortgolvlige infrarode deel van het spectrum. Landsat 8 observeert daarnaast ook thermisch infrarode straling, maar deze observaties hebben een lagere resolutie van 100 m. In vergelijking tot Landsat 8 biedt Sentinel-2 zowel een hogere ruimtelijke als temporele resolutie. De hogere temporele resolutie wordt veroorzaakt door het feit dat twee identieke Sentinel-2 satellieten in een baan rond de aarde zijn gebracht. Omdat Landsat 8 en Sentinel-2 vergelijkbare observaties verrichten zijn voor de pilot alle observaties van beide satellieten verzameld.

* De thermisch infrarode band van Landsat 8 is tijdens deze pilot niet gebruikt vanwege de lage observatie frequentie (maximaal 16 dagen) en lage resolutie (100 m).

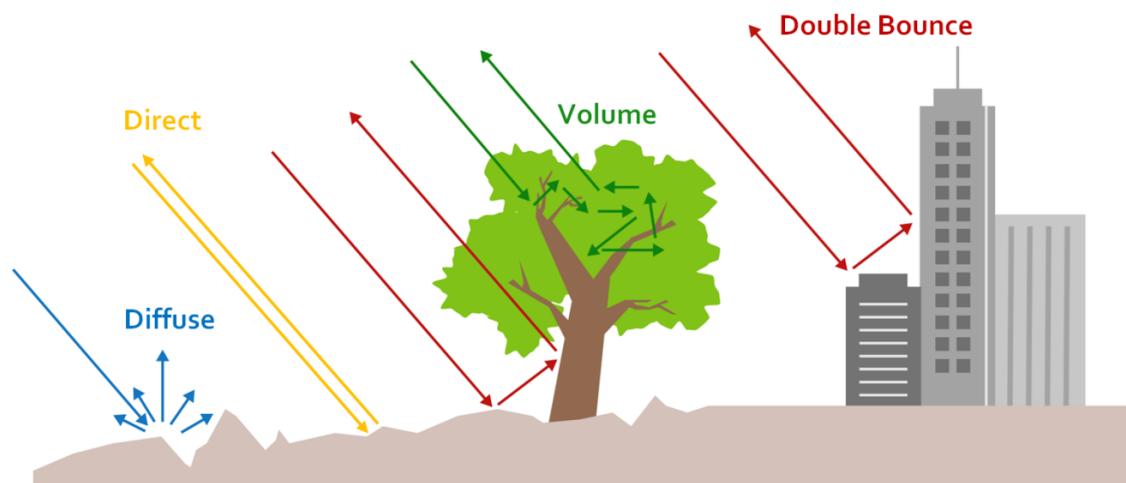


Figuur 2: Het elektromagnetische spectrum en de absorptie van straling in de atmosfeer per golflengte. Sentinel-2 en Landsat 8 observeren zichtbare tot (nabij/thermisch) infrarode straling (rood) en Sentinel-1 observeert C-band microgolf straling (blauw).

Sentinel-1 is een radar satelliet en observeert enkel de C-band, wat gelijk staat aan microgolf straling met een golflengte van ongeveer 5 cm. Net als voor optische sensoren is de resolutie van een radar afhankelijk van de grootte van de sensor, of in het geval van een radar de antenne. Echter, vanwege de grootte van de golflengte zijn radar antennes over het algemeen zeer groot, wat voor de ruimtevaart onpraktisch en duur is. Daarom beschikt Sentinel-1 over een Synthetische Apertuur Radar (SAR), wat erop neerkomt dat meerdere observaties van een kleinere antenne worden samengevoegd om zo een hogere resolutie te genereren. Omdat de aarde relatief weinig natuurlijke microgolf straling uitzendt/reflecteert, maakt Sentinel-1 gebruik van een actieve radar en wordt de reflectie van het uitgezonden signaal gedetecteerd.

Hoewel radar satellieten vaak maar over één band beschikken, kan het signaal wel op verschillende manieren gepolariseerd zijn. Sentinel-1 zendt over het algemeen verticaal gepolariseerde straling uit en kan zowel verticaal (VV) als horizontaal (VH) gepolariseerde straling ontvangen. Wanneer straling van polarisatie veranderd spreekt men van depolarisatie. Dit komt voornamelijk voor wanneer straling vanwege complexe structuren onder verschillende hoeken wordt weerkaatst. Omdat depolarisatie minder voorkomt dan reguliere weerkaatsing van het signaal is het horizontaal gepolariseerde signaal over het algemeen zwakker dan het verticaal gepolariseerde signaal. Echter, wanneer er complexe structuren, zoals vegetatie, worden geobserveerd, zal in verhouding meer horizontaal gepolariseerde straling de satelliet bereiken dan voor een vlak oppervlak. Hierdoor kunnen verschillende structuren beter van elkaar worden onderscheiden. Figuur 3 geeft een schematische weergave van de vier meest voorkomende manieren van verstrooiing van (microgolf) straling.

De observaties van Landsat 8 en Sentinel-2 worden beïnvloed door bewolking, wat voor Nederland een drastische limitatie is. Dit resulteert voor de onderzoeksperiodes van 04/2018-11/2018 en 04/2018-11/2019 in een totaal van 47 (gedeeltelijk) onbewolkte optische (Landsat 8 + Sentinel-2) satelliet observaties, waar in potentie 129 beelden beschikbaar zijn. Sentinel-1 observaties worden niet beïnvloed door bewolking vanwege het feit dat deze satelliet microgolven observeert. Hierdoor zijn alle beelden die de satelliet maakt ook daadwerkelijk te gebruiken voor de beregeningsmonitor. Voor Nederland betekent dit dat ongeveer om de twee dagen één Sentinel-1 observatie beschikbaar is, wat neer komt op 286 observaties in totaal tijdens de betreffende onderzoeksperiodes.



Figuur 3: Schematische weergave van vier meest voorkomende manieren van verstrooiing van (microgolf) straling (Durieux, et al., 2019). Diffuse verstrooiing vindt plaats op grove/ruwe oppervlaktes. De mate van diffuse straling hangt zowel af van de ruwheid van het oppervlak als van de golflengte van de straling. Directe verstrooiing vindt plaats wanneer het oppervlak zich loodrecht onder de kijkhoek van de satelliet bevindt. Double bounce verstrooiing vindt plaats wanneer het signaal door middel van rechte hoeken terug wordt gekaatst naar de satelliet. Volume verstrooiing vindt plaats wanneer het signaal een medium, zoals een gewaskruin, kan penetreren maar waar het medium wel het signaal kan beïnvloeden. Voor langere golflengtes zal voornamelijk de stam en de takken verstrooiing veroorzaken, terwijl voor kortere golflengtes (zoals de C-band) voornamelijk het blad verstrooiing van het signaal veroorzaakt.

2.3 LANDGEBRUIKSDATA

Als landgebruiksdata is voornamelijk interne data van het waterschap Scheldestromen en het Basisregistratie Gewaspercelen (BRP) gebruikt. Aan de hand van het BRP zijn voor alle velden het gewas type bepaald, om zo per gewas onderscheid te kunnen maken in de effectiviteit van de verschillende beregeningsmonitoren. Verdere landgebruiksdata, zoals bodem, grondwater en verdampingskaarten zijn voor dit onderzoek niet gebruikt, maar kunnen in vervolgonderzoek wel worden meegenomen. Tabel 2 geeft een overzicht van alle gewassen waarvan Scheldestromen tenminste één beregeningsregistratie van heeft ontvangen. Voor dit rapport ligt de focus op aardappelen, wintertarwe en zaaiuien.

Tabel 2: Gewassen die volgens de beregeningsregistratie van het waterschap Scheldestromen in het jaar 2018 en 2019 zijn berekend.

Gewas	Aantal velden (2018)		Aantal velden (2019)	
	Beregend	Natuurlijk	Beregend	Natuurlijk
<u>Aardappelen, consumptie</u>	18	447	5	461
Bieten, suiker-	2	199	2	189
Bonen, tuin- (groen te oogsten)	1	18	0	15
Cichorei	1	58	1	82
Erwten, groene/gele (groen te oogsten)	1	1	0	0
Grasland, blijvend	1	283	0	277
Grasland, tijdelijk	1	95	0	102
Graszaad	4	118	0	133
Luzerne	1	73	0	72
<u>Tarwe, winter-</u>	2	312	0	318
Uien, poot- en plant- (incl. sjalotten)	3	32	0	0
<u>Uien, zaai-</u>	7	82	0	63
TOTAAL	42	1718	8	1712

3. METHODES

Tijdens de beregeningsmonitor pilot is gefocust op twee verschillende invalshoeken voor het detecteren van beregening aan de hand van satelliet data, namelijk direct en indirect monitoren. Per invalshoek bieden verschillende satellieten en verschillende gewaskarakteristieke eigenschappen een mogelijkheid tot het monitoren van beregening. Hieronder wordt elk van deze methodes in detail beschreven.

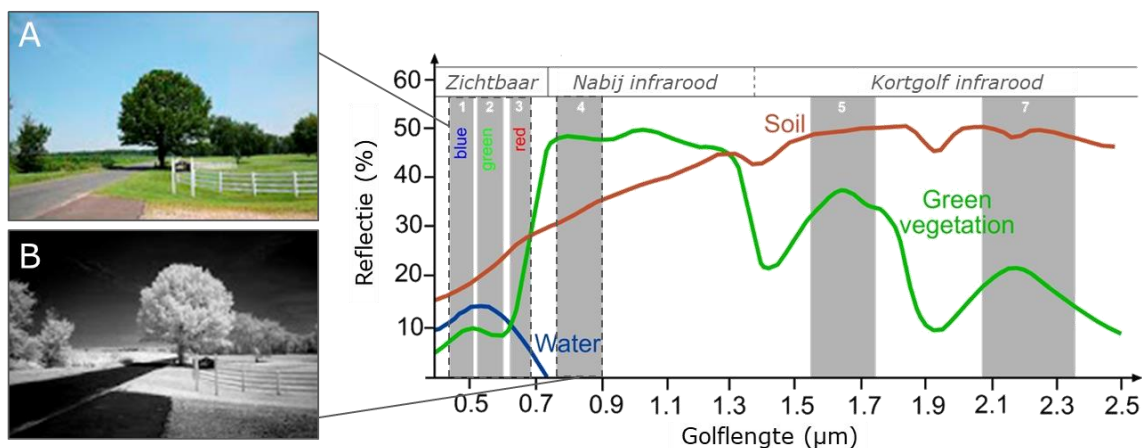
3.1 DIRECT MONITOREN

In het kort omvat direct monitoren methodes waar vanuit directe satelliet observaties beregening aan te tonen is. De satelliet moet in staat zijn om opgebracht water te onderscheiden van andere landgebruiksvormen. Om deze methodes tot een succes te maken is de frequentie waarmee de satelliet observeert van groot belang. Afhankelijk van de gebruikte methode zal het "signaal" van beregende velden maar tijdelijk zichtbaar blijven, dus hoe hoger de observatie frequentie, hoe groter de kans dat beregening wordt gedetecteerd. Voor direct monitoren zijn twee specifieke methodes getest, waarvan de eerste gebaseerd is op optische indexen en de tweede op radar signalen.

3.1.1 OPTISCHE OBSERVATIES

Het voordeel van het gebruik van optische satelliet observaties voor direct monitoren is dat deze satellieten beschikken over meerdere banden. Elke band observeert een specifiek deel van het elektromagnetisch spectrum. Dit maakt het mogelijk om verschillende fysische verandering in het veld tegelijkertijd te observeren. Naast zichtbaar licht beschikken Landsat 8 en Sentinel-2 ook over instrumenten die in staat zijn nabij en kortgolf infrarood licht te detecteren. Deze twee banden zijn cruciaal voor het creëren van verschillen indexen.

Om beregening direct te kunnen monitoren aan de hand van optische observaties is eerst gekeken naar de impact van water op verschillende banden en indexen. Hiervoor zijn twee verschillende soorten indexen gebruikt, namelijk vegetatie gerelateerde indexen (vegetatie index) en indexen die zowel vocht als vegetatie detecteren (water index). Als vegetatie index is de Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) gebruikt. De NDVI beschrijft de verhouding tussen reflectie van nabij infrarood en rood licht. Figuur 4 laat zien dat vegetatie voornamelijk rood licht absorbeert en nabij infrarood licht sterk reflecteert. Hoe sterker dit verschil, hoe hoger de NDVI en hoe groener (en gezonder) het gewas. Als water index is gekeken naar drie verschillende indexen, namelijk de Normalised Difference Water Index (NDWI), de Visible and Shortwave infrared Drought Index (VSDI) en de Global Vegetation Moisture Index (GVMI). Alle drie de indexen zijn gebaseerd op het verschil in reflectie van de kortgolf infrarode en nabij infrarode of zichtbare straling, wat als indicator voor het vochtgehalte in de vegetatie en de bodem kan dienen.



Figuur 4: De reflectie van verschillende landgebruikseenheden per golflengte (SEOS, 2018). In grijs zijn een aantal Landsat 8 banden weergegeven. Afbeelding A is een voorbeeld van reflectie van zichtbaar licht, waar vegetatie voornamelijk groen licht reflecteert. Afbeelding B toont dezelfde boom, maar nu is gebruik gemaakt van een (nabij) infrarood filter. Hier is goed te zien dat alle vegetatie nabij infrarood licht sterk reflecteert.

De vergelijkingen van alle verschillende indexen staan hieronder beschreven, waar SWIR en NIR staan voor kortgolfs infrarode en nabij infrarode straling.

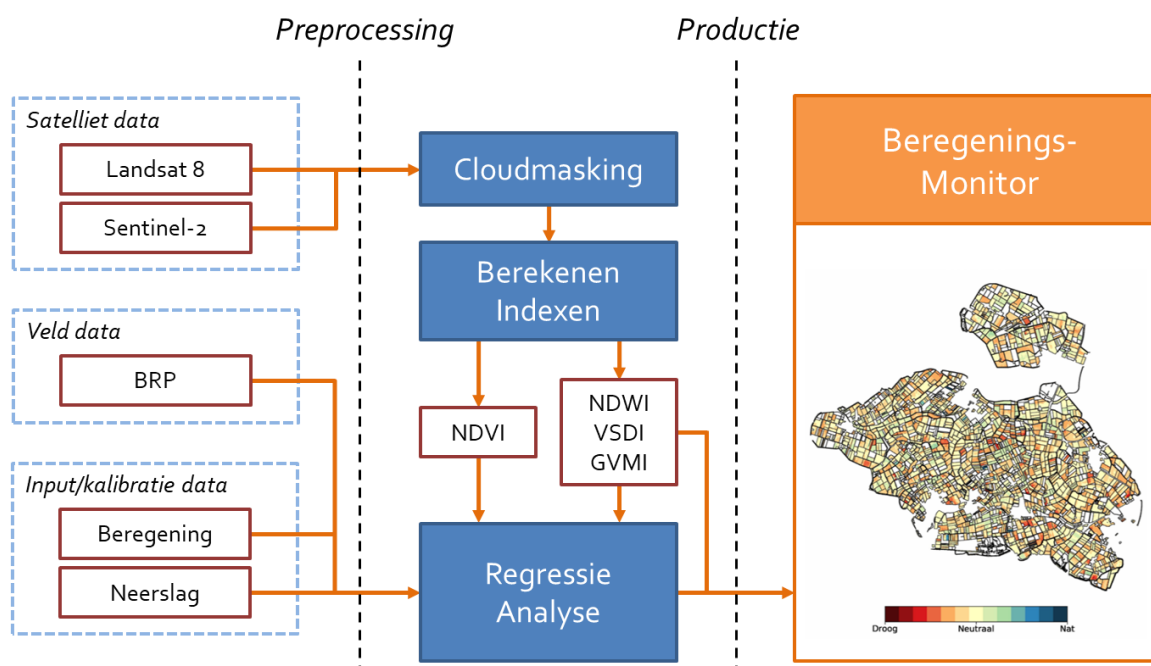
$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rood}}{\text{NIR} + \text{Rood}} \quad (1)$$

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (2)$$

$$\text{VSDI} = 1 - [(\text{SWIR} - \text{Blauw}) + (\text{Rood} - \text{Blauw})] \quad (3)$$

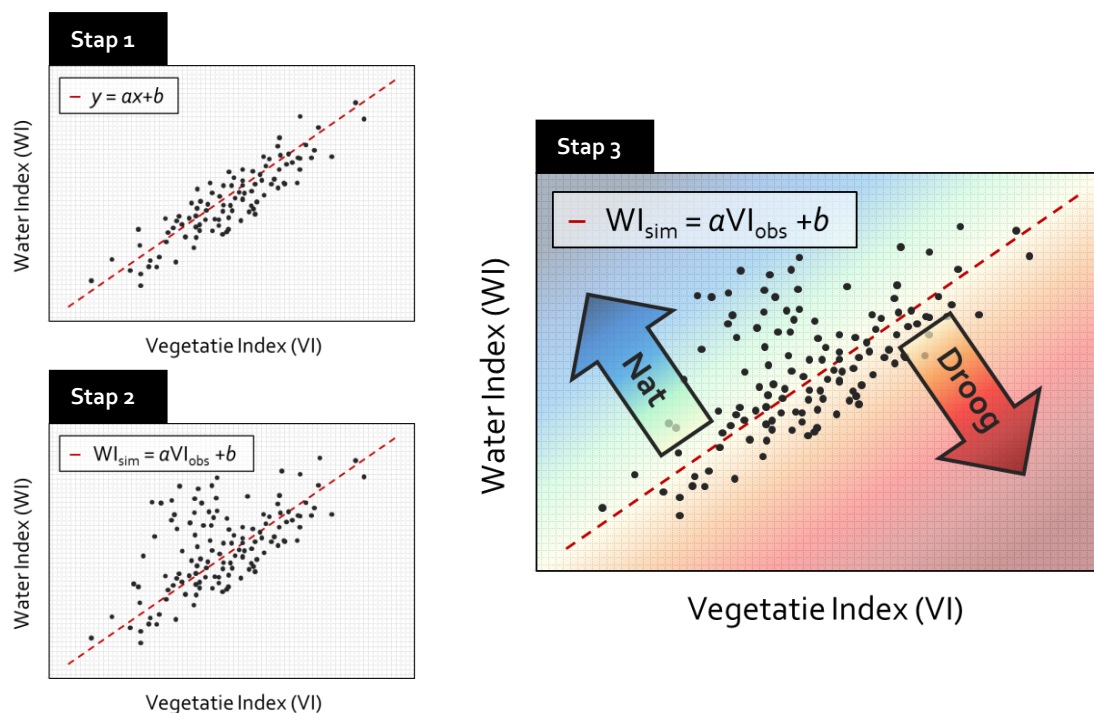
$$\text{GVMI} = \frac{(\text{NIR} + 0.1) - (\text{SWIR} + 0.02)}{(\text{NIR} + 0.1) + (\text{SWIR} + 0.02)} \quad (4)$$

Voor direct monitoren worden vegetatie en water indexen gebruikt om een onderlinge regressie af te leiden. Veel van deze indexen correleren sterk met elkaar omdat ze gebruik maken van ongeveer dezelfde banden. Wanneer er tijdens berekening een afwijking in de correlatie kan worden ontdekt kan aan de hand daarvan een methode worden ontwikkeld om berekening te detecteren. Figuur 5 laat een stroomschema zien voor direct monitoren aan de hand van optische data.



Figuur 5: Stroomschema voor direct monitoren aan de hand van optische satellietdata. Voor Landsat 8 en Sentinel-2 data worden bewolkte gebieden verwijderd en de verschillende vegetatie en water indexen berekend. Aan de hand van het BRP wordt onderscheid tussen gewassen gemaakt. Beregening en neerslag data worden gebruikt om het regressie model te kalibreren.

De belangrijkste stap uit het hierboven beschreven stroomschema is de regressie analyse. Figuur 6 geeft in stappen weer hoe de regressie analyse is uitgevoerd. Eerst worden alle beregening en neerslag momenten uit de satellietobservaties gefilterd. Daarna wordt de correlatie tussen de water index en vegetatie index bepaald. De volgende stap is om de water index te simuleren aan de hand van de eerder opgestelde regressie lijn, echter nu inclusief (eventuele) beregening en neerslag observaties. Door de geobserveerde water index af te trekken van de gesimuleerde water index, kan worden benaderd of een pixel droger of natter is dan verwacht. Een positieve afwijking is een indicatie voor natte omstandigheden en een negatieve afwijking een indicatie voor droge omstandigheden.

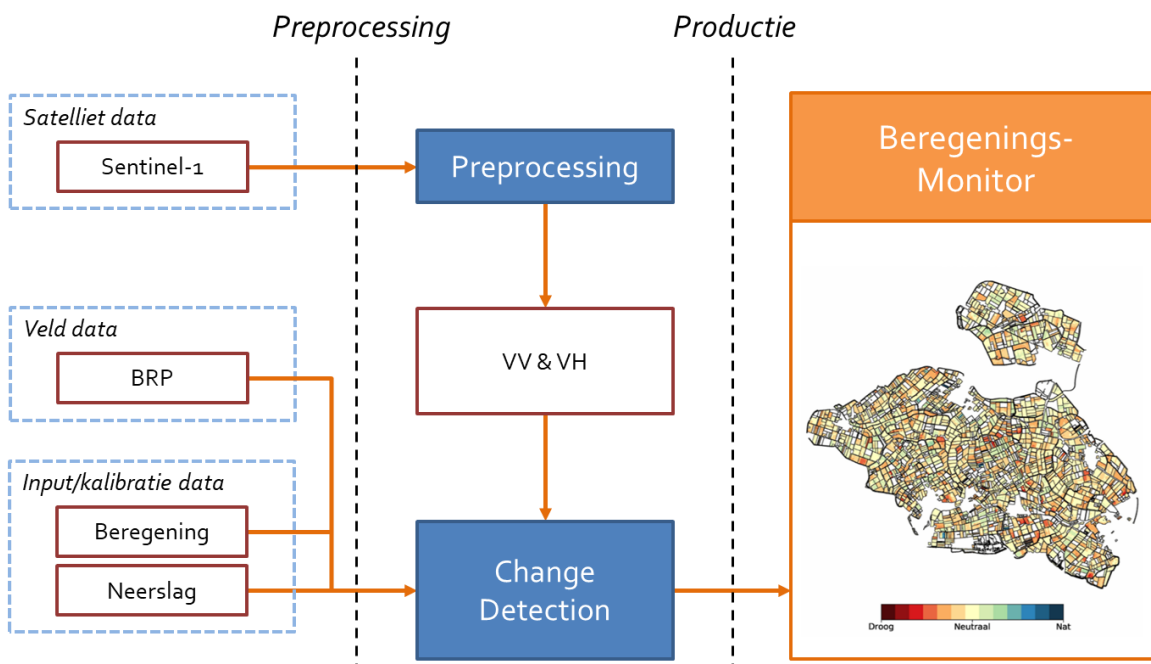


Figuur 6: Stappenplan voor de regressie analyse uit Figuur 5. Stap 1: Correleer de water index met de vegetatie index exclusief berekening en neerslag momenten. Stap 2: Correleer opnieuw de water index met de vegetatie index, maar nu inclusief berekening en neerslag momenten. Stap 3: Gebruik de regressielijn uit Stap 1 om de water index aan de hand van de vegetatie index te simuleren. Het verschil tussen de gesimuleerde en geobserveerde water index kan vertaald worden naar hoe nat of droog de observatie relatief gezien is.

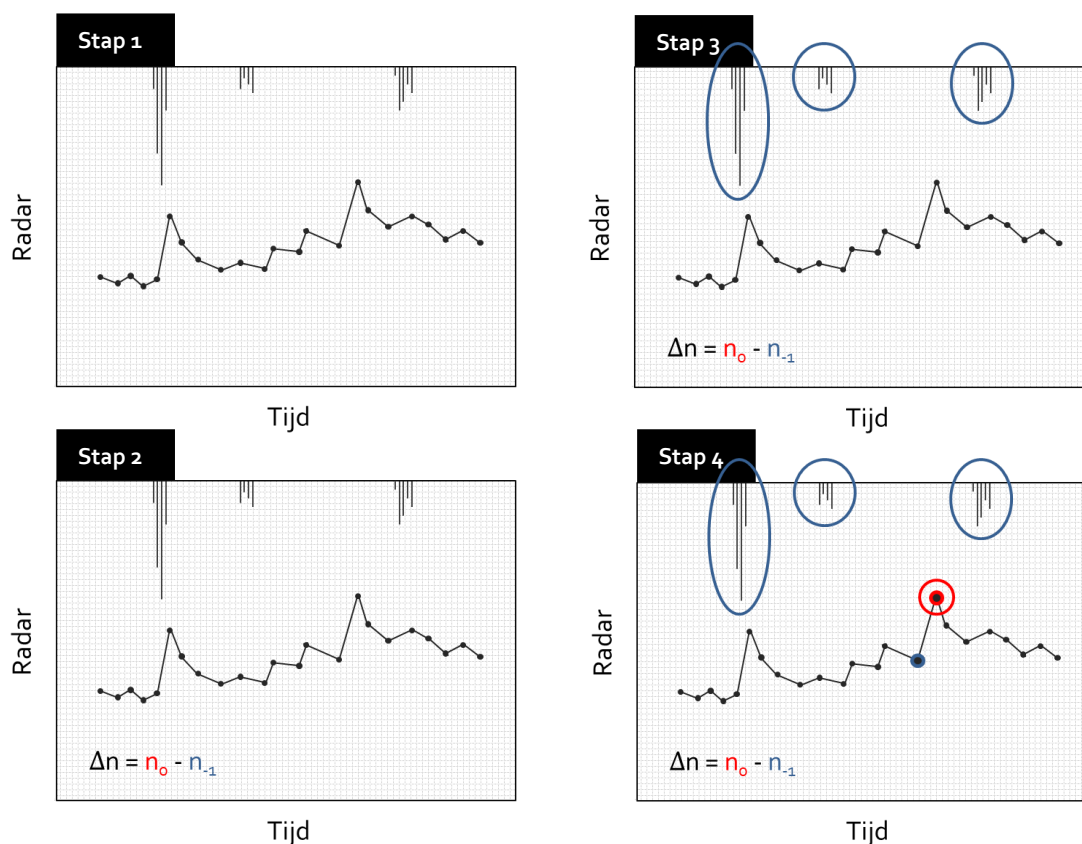
3.1.2 RADAR OBSERVATIES

Optische observaties zijn uitermate nuttig voor het beantwoorden van het beregeningsvraagstuk. Echter, het grootste nadeel van dit soort observaties is de invloed van bewolking op het signaal. Radar is in dat opzicht superieur omdat, afhankelijk van de gebruikte golflengte, het signaal wolken en zelfs het gewas of de bodem kan penetreren.

Figuur 7 geeft het stroomschema weer voor het direct monitoren aan de hand van radar observaties. Radar installaties maken gebruik van microgolven. Omdat de golflengtes van microgolven veel groter zijn dan die van zichtbaar licht (Figuur 2), reageren microgolven ook anders op hun omgeving. Afhankelijk van de golflengte kunnen microgolven worden gebruikt voor het detecteren van structuren, zoals vliegtuigen en schepen, maar ook voor het detecteren van neerslag en vegetatie. Naast structuur kan ook bodemvocht worden gedetecteerd, dankzij het verschil in primitiviteit tussen droge en natte bodems. Echter, ruwheid van de bodem en de vegetatie die daar op staat beïnvloeden het signaal sterk, wat het lastig maakt om enkel aan de hand van radar observaties bodemvocht te benaderen. Relatieve veranderingen in signaalsterkte kunnen wel een aanduiding van een verandering in bodemvocht condities zijn. Wanneer binnen een korte periode het radar signaal sterk veranderd, terwijl het gewas of de bodem zelf niet veranderd, kan worden aangenomen dat veranderingen in bodemvocht de oorzaak zijn, waardoor het, in combinatie met de gemeten neerslag, mogelijk is om berekening te detecteren. Dit is dan ook de methode waar direct monitoren in combinatie met radar observaties op berust. Deze methode wordt change detection genoemd. Figuur 8 geeft een overzicht van de change detection methode. Hier is het belangrijk dat neerslagmomenten uit de radar tijdseries worden gefilterd. Wanneer grote onderlinge verschillen tussen opeenvolgende beelden worden waargenomen, kan worden aangenomen dat berekening is toegepast.



Figuur 7: Stroomschema voor direct monitoren aan de hand van radar satellietdata. Voor Sentinel-1 worden een aantal preprocessing stappen uitgevoerd, waaronder terreincorrectie, radiometrische kalibratie en het toepassen van een speckle filter. Aan de hand van change detection kan een beregeningsmonitor worden opgezet.



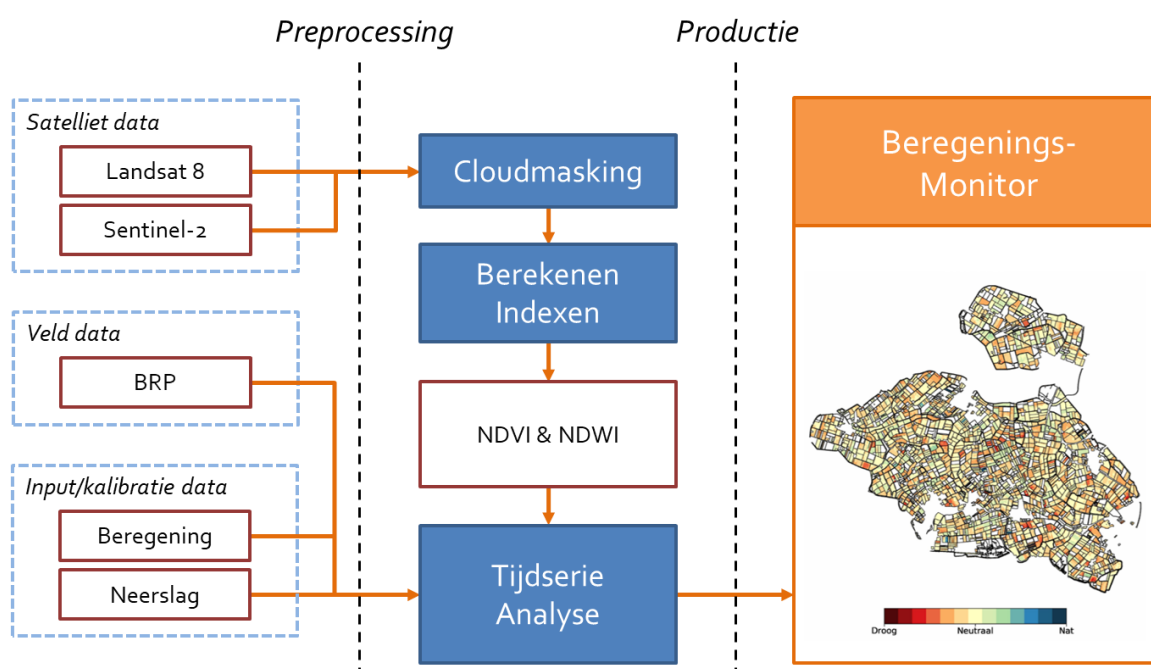
Figuur 8: Stappenplan voor de change detection methode uit Figuur 7. Stap 1: Vergelijk de radartijdserie met neerslag data. Stap 2: Bereken voor elke radar observatie Δn door de vorige observatie (Δn_{-1}) van de huidige observatie (Δn_o) af te trekken. Stap 3: Filter de momenten waar neerslag voorkwam. Stap 4: Zoek de opvolgende radar beelden met het grootste onderlinge verschil. Hoe groter het verschil, hoe groter de kans is dat er beregening heeft plaatsgevonden.

3.2 INDIRECT MONITOREN

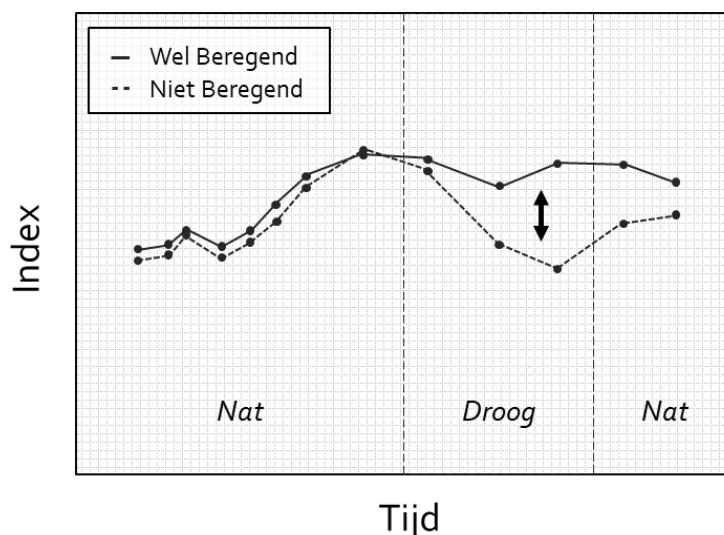
Naast het direct monitoren van beregening kunnen ook tijdreeksen van verschillende indexen worden gebruikt om het verschil in gewasgroei of waterhuishouding van meerdere percelen te vergelijken. Hiervoor kunnen dezelfde optische indexen als eerder beschreven worden gebruikt. Een groot voordeel van indirect monitoren is dat de satelliet observatie niet samen hoeft te vallen met de beregening, waardoor de observatie frequentie van de satelliet minder belangrijk is.

Deze methode is gebaseerd op het feit dat beregening voornamelijk wordt toegepast om tijdens droge periodes gewassterfte tegen te gaan of gewasopbrengst te verhogen. Ongeacht de reden voor beregening kan er over het algemeen van worden uitgegaan dat een identiek gewas op een beregend perceel betere opbrengsten levert dan op een niet beregend perceel, mits randvoorwaarden zoals bodemeigenschappen, grondwaterhuishouding, neerslaghoeveelheden, etc. vergelijkbaar zijn. De NDVI leent zich uitstekend voor het onderscheiden van beregende en niet beregende percelen omdat deze index in staat is de gezondheid van een gewas te monitoren. Echter, voordat er een duidelijk onderscheid tussen beregende en niet beregende velden kan worden gemaakt moet het per gewas duidelijk zijn wat de typische groeicurve is. Omdat dit patroon sterk afhankelijk kan zijn van verschillende omgevingseigenschappen moet deze curve per gewas en per gebied worden bepaald om zo de gewas- en regio specifieke eigenschappen in acht te nemen.

Radar observaties zijn minder geschikt voor indirect monitoren. De NDVI geeft inzicht in zowel de gezondheid als het bladoppervlak van het gewas, terwijl radar observaties voornamelijk inzicht geven in de structuur van een gewas. Zo kan bijvoorbeeld aan de hand van radar data het begin van het groeistadium goed worden geobserveerd omdat de structuur van het perceel snel sterk verandert. Echter, veel gewassen blijven zich ontwikkelen terwijl de gewasstructuur (van boven gezien) niet of nauwelijks verandert. Daarnaast kan verkleuring van het gewas door te kort aan water of voedingsstoffen wel met de NDVI maar niet met radar observaties worden gedetecteerd. Daarom wordt voor indirect monitoren alleen optische data gebruikt. Figuur 9 geeft het stroomschema van de indirect monitoren methode weer. De belangrijkste stap voor deze methode is de tijdserie analyse, die in Figuur 10 verder beschreven is.



Figuur 9: Stroomschema voor indirect monitoren aan de hand van optische satellietdata. Dezelfde preprocessing stappen gelden als voor Figuur 5. Het enige verschil is dat deze methode focust op een NDVI en NDWI tijdserie analyse.



Figuur 10: Uitvoering van de tijdserie analyse zoals beschreven in Figuur 9. Aan de hand van gewasindexen, zoals de NDVI en NDWI, kan het verschil tussen een gezond en een gewas wat lijdt aan droogteschade worden geobserveerd. Wanneer velden met dezelfde gewassen en dezelfde omgevingseigenschappen duidelijke verschillen vertonen in gewasdictheid/gezondheid tijdens een droge periode kan worden aangenomen dat het beter presterende gewas in stand is gehouden door beregening.

Omdat voor deze methode data voor een heel seizoen nodig is, kan alleen de inschatting worden gemaakt of er over een langere periode wel of niet beregend is. Daarnaast moeten, ondanks dat beregening waarschijnlijk een grote impact heeft op de gezondheid van een gewas, verschillen in bemesting en onderhoud per veld ook in acht genomen worden.

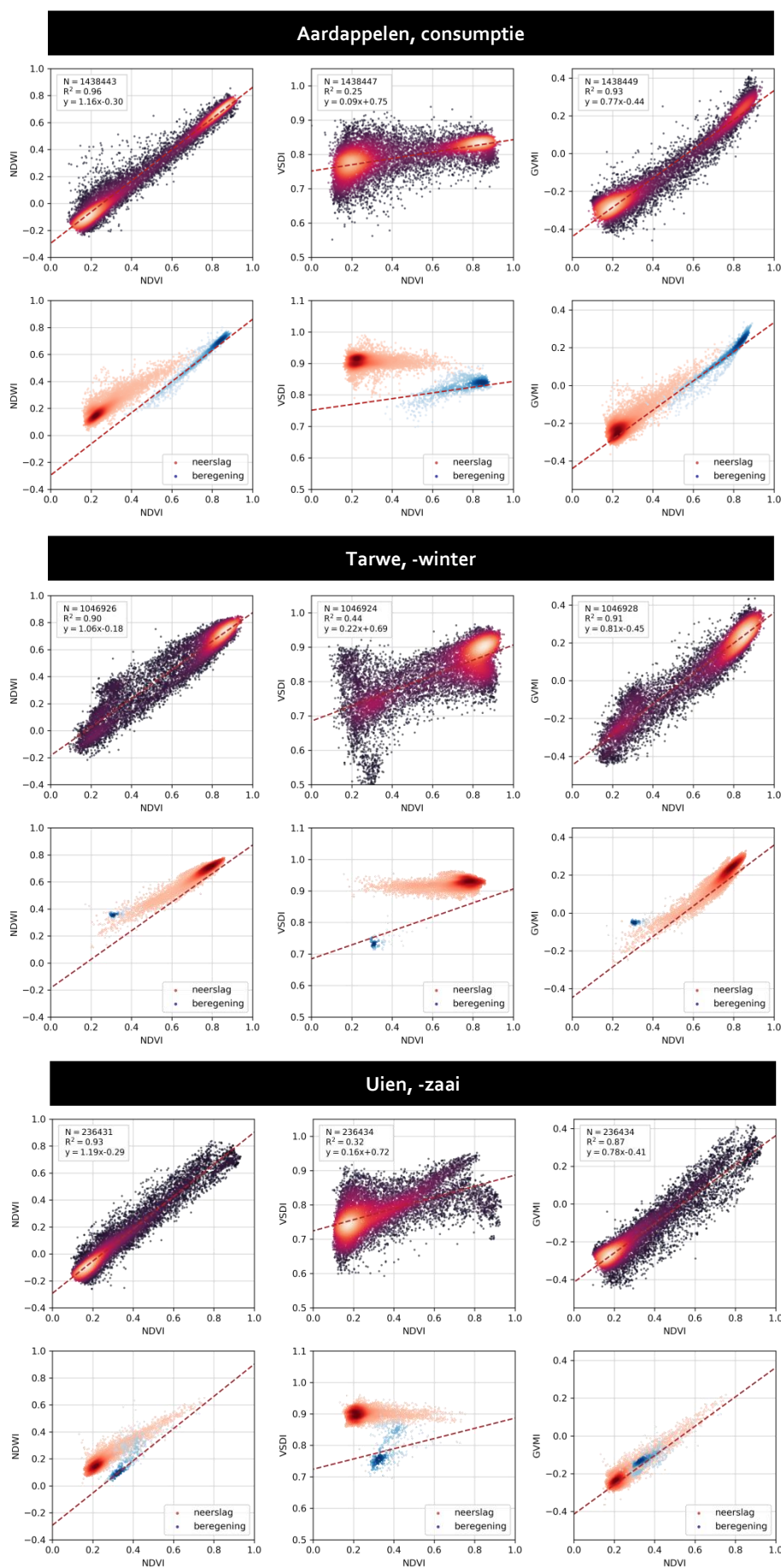
4. RESULTATEN

In de pilot zijn de drie beschreven methodes uitgevoerd voor 2018 en 2019. Gezien het feit dat waterschap Scheldestromen minder beregeningsdata voor 2019 beschikbaar heeft én 2018 bekend staat als één van de droogste jaren van de afgelopen decennia en daarom erg relevant is voor beregeningsmonitoring zijn in dit rapport alleen resultaten voor 2018 behandeld. In de volgende paragrafen staat per methode de resultaten beschreven.

4.1 DIRECT MONITOREN

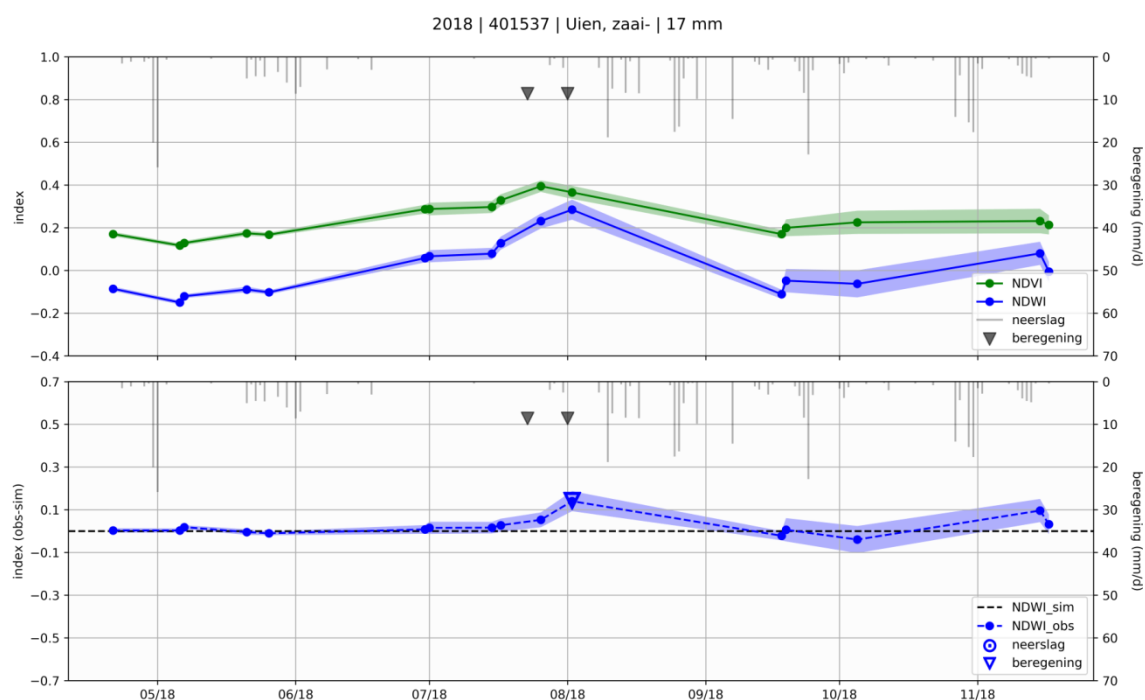
4.1.1 OPTISCHE OBSERVATIES

Voorafgaand aan de resultaten van de beregeningsmonitor, dient voor direct monitoren aan de hand van optische satelliet observaties eerst de regressie analyse te worden uitgevoerd. Figuur 11 toont voor aardappelen, wintertarwe en zaaiuien de regressies tussen de vegetatie index (NDVI) en water indexen (NDWI, VSDI en GVMI) voor zowel exclusief beregening en neerslag data (boven; stap 1) als data waar enkel neerslag of beregening is geregistreerd (beneden; stap 2). De regressielijn die is opgesteld is afhankelijk van de regressie tussen de vegetatie index en water index exclusief beregening en neerslag is gebruikt om de afwijking van neerslag en beregening aan te tonen. Hoe verder de data inclusief neerslag en beregening boven de regressie lijn ligt, des te groter de zekerheid dat beregening kan worden gedetecteerd. Voor alle drie de gewassen toont de NDWI de grootste en meest eenduidige afwijking van de regressielijn. Om deze reden is voor het vervolg van het rapport gekozen om alleen resultaten aan de hand van de NDWI te tonen. Echter, gezien de grote verschillen tussen gewassen dient voor een operationele beregeningsmonitor opnieuw per gewas de afweging te worden gemaakt welke water index het meest geschikt is voor deze methode. Een algemene trend voor ieder gewas en iedere index is dat bij een hogere gewasdictheid (hogere NDVI) de afwijking van de trendlijn kleiner is dan voor kale grond (lage NDVI).



Figuur 11: Regressie analyses voor direct monitoren aan de hand van optische satelliet data voor aardappel, wintertarwe en zaauien velden, met boven de observaties exclusief beregening en neerslag en onder alleen de observaties waar neerslag en beregening een rol speelde. De regressielijn is voor beide scenario's gelijk, waardoor de afwijking van beregende pixels ten opzichte van droge pixels kan worden afgeleid.

Aan de hand van de hierboven beschreven relaties kan voor ieder gewas een beregeningsmonitor worden opgesteld. Figuur 12 laat het resultaat van de regressie analyse tussen de NDVI en NDWI zien voor een veld met zaaiuien waar twee beregeningsmomenten zijn geregistreerd. De bovenste grafiek toont de werkelijke NDVI en NDWI observaties en de onderste grafiek laat het verschil zien tussen de gesimuleerde en geobserveerde NDWI. Het tweede beregeningsmoment is goed af te leiden, wat aantoont dat de methode in potentie werkt.

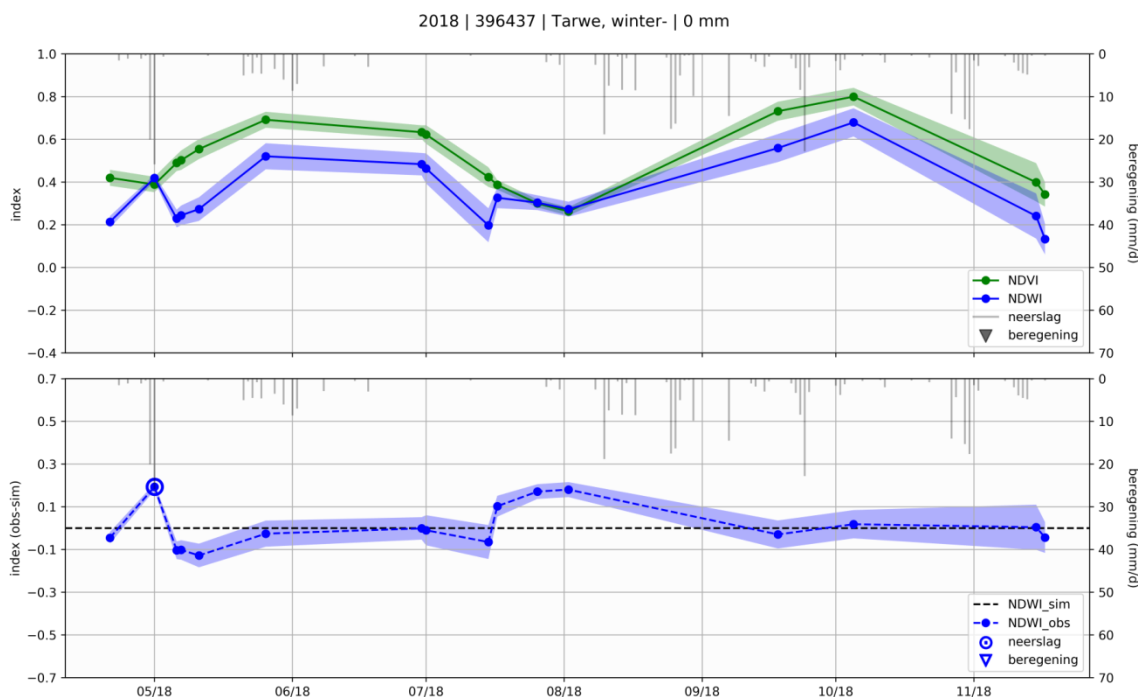


Figuur 12: Voorbeeld van een veld met zaaiuien waar beregening heeft plaatsgevonden. De bovenste grafiek laat de observaties van de NDVI en de NDWI zien. De tweede y-as toont de hoeveelheid beregening of neerslag in mm/d. De onderste grafiek toont het verschil tussen de gesimuleerde NDWI en de geobserveerde NDWI. Wanneer de geobserveerde NDWI wordt aangeduid met een cirkel of driehoek heeft er vlak voor de satelliet observatie respectievelijk neerslag of beregening plaatsgevonden. De banden rondom iedere tijdserie geven de standaard deviatie binnen het betreffende veld weer.

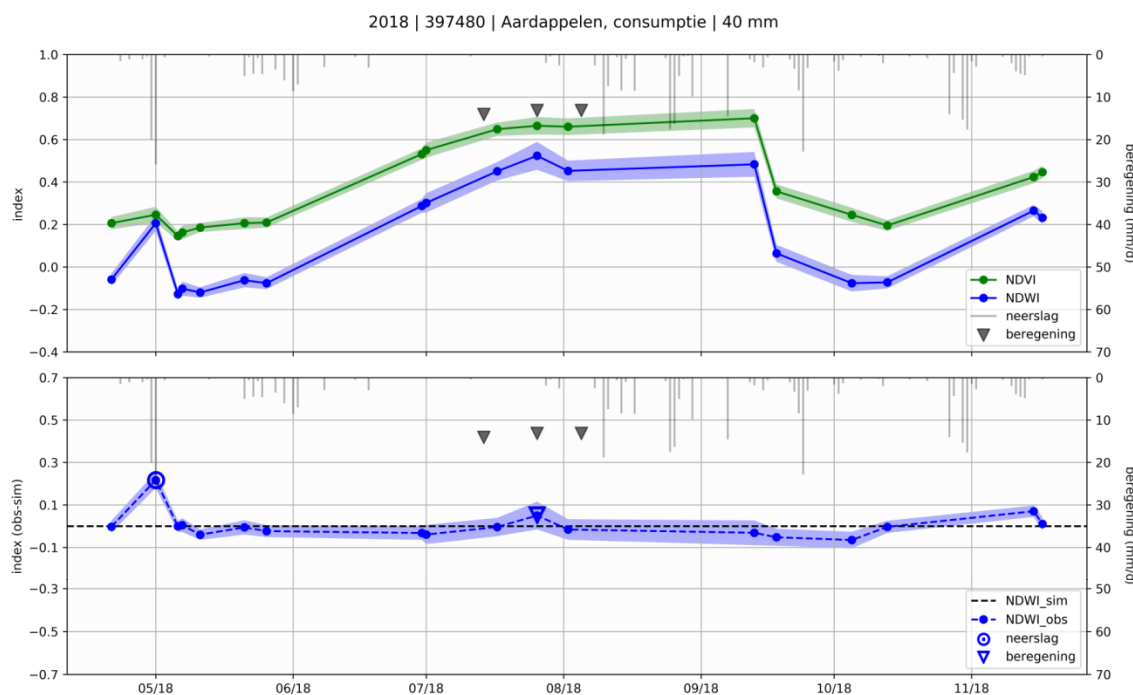
Figuur 13 toont het resultaat van de regressie analyse tussen de NDVI en NDWI voor een veld met wintertarwe waar geen beregeningsmomenten zijn gedetecteerd. Er zijn echter toch twee duidelijke pieken waar te nemen. De eerste piek correspondeert met neerslag wat twee dagen voor de satelliet observatie is gevallen. Omdat de bodem in deze periode nog relatief kaal was is door de hevige neerslag (45 mm in twee dagen) het oppervlak verzadigd, wat goed door de satelliet is opgepikt. Echter, de tweede piek correspondeert hoogst waarschijnlijk niet met neerslag of beregening, maar de karakteristieken van het laatste groeistadium van wintertarwe. Voordat de oogst plaatsvindt, wordt het gewas geel. Omdat de NDVI gebaseerd is op de aanwezigheid van bladgroen, zal de NDVI dalen, terwijl de gezondheid/gewasdichtheid van het gewas nauwelijks veranderd. Hierdoor ontstaat er een false positive omdat de gesimuleerde NDWI aan de hand van de geobserveerde NDVI lager zou moeten zijn dan de geobserveerde NDWI.

Figuur 14 toont het laatste voorbeeld van de regressie analyse tussen de NDVI en NDWI voor een veld met aardappelen waar drie beregeningsmomenten zijn geregistreerd. Ook voor dit veld is de neerslagpiek rond 1 mei goed zichtbaar, maar kunnen in ieder geval twee van de drie beregeningsmomenten niet worden gedetecteerd. Dit laatste komt voornamelijk doordat de beregening niet vlak voor de satellietobservatie heeft plaatsgevonden. Het tweede beregeningsmoment geeft wel een positieve afwijking, hoewel deze afwijking zeer klein is. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door de

vergevoerde groeifase waar het gewas zich in bevindt, waardoor bodemvocht maar een klein of geen deel uitmaakt van de satellietobservatie.

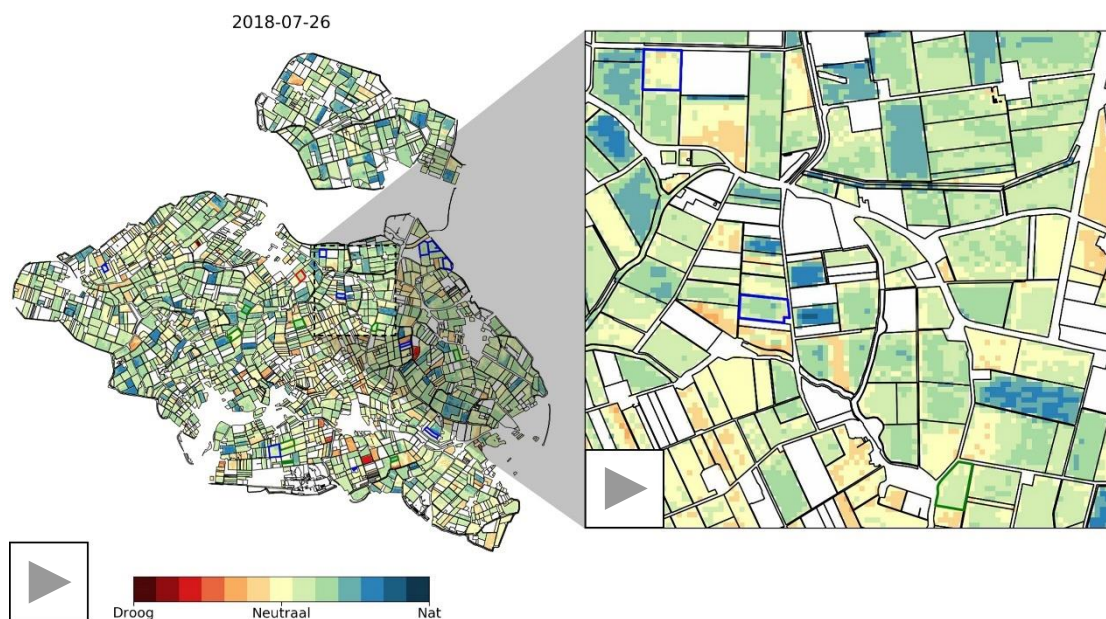


Figuur 13: Voorbeeld van een veld met wintertarwe waar geen beregening heeft plaatsgevonden.



Figuur 14: Voorbeeld van een veld met consumptie aardappelen waar beregening heeft plaatsgevonden.

Door voor elk gewas in het onderzoeksgebied een regressie analyse uit te voeren kan in potentie een beregeningsmonitor worden opgezet. Figuur 15 geeft een voorbeeld van een momentopname van de beregeningsmonitor aan de hand van de regressie analyse tussen de NDVI en NDWI.



Figuur 15: Beregeningsmonitor aan de hand van direct monitoren met optische satellietdata. Voor de regressieanalyse zijn de NDVI en NDWI gebruikt. Rode velden staan voor velden die op dezelfde dag als de satelliet observatie zijn berekend, groene velden verwijzen naar velden waar 1-3 dagen vóór de satelliet observatie berekening heeft plaatsgevonden en blauwe velden verwijzen naar velden waar 4-7 dagen vóór de satelliet observatie berekening heeft plaatsgevonden. Druk op de afspeelknoppen om de animaties van de beregeningsmonitor weer te geven.

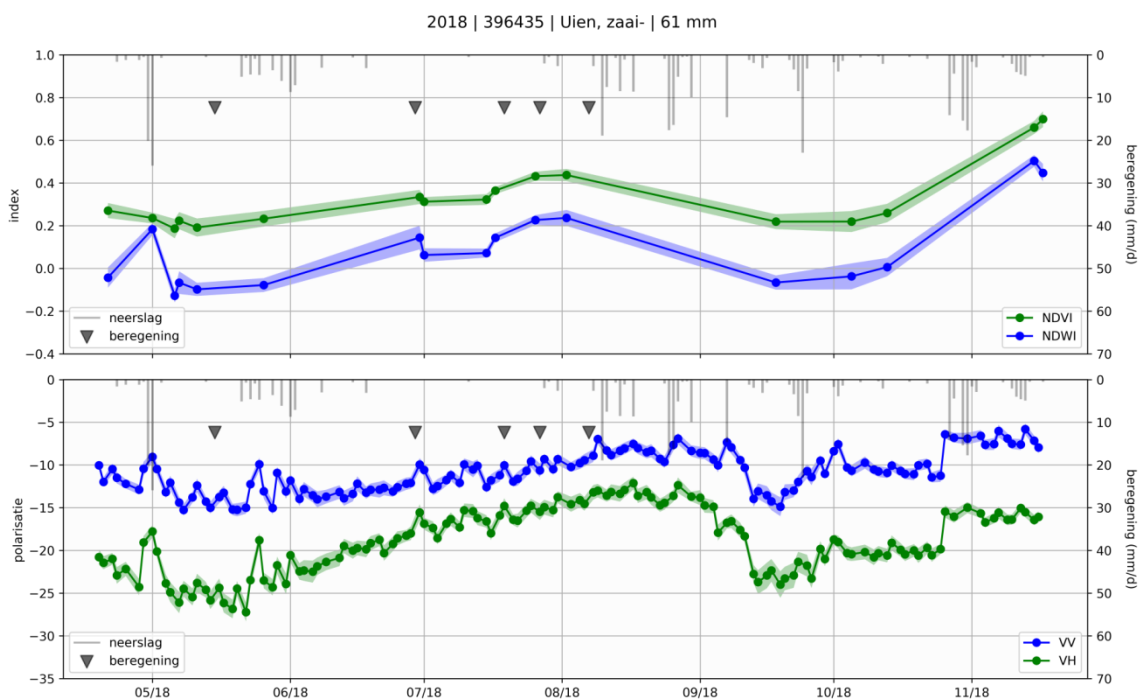
4.1.2 RADAR OBSERVATIES

Radar observaties bieden kansen voor de beregeningsmonitor gezien de hoge temporele resolutie en gevoeligheid voor vocht in de bodem en het gewas. Echter, omdat het signaal zelf ook wordt beïnvloed door de gewasstructuur, gewasdichtheid en bodemruwheid zijn alleenstaande satellietobservaties moeilijk te interpreteren. Daarom berust direct monitoren aan de hand van radar observaties voornamelijk op de change detection methode (Figuur 8).

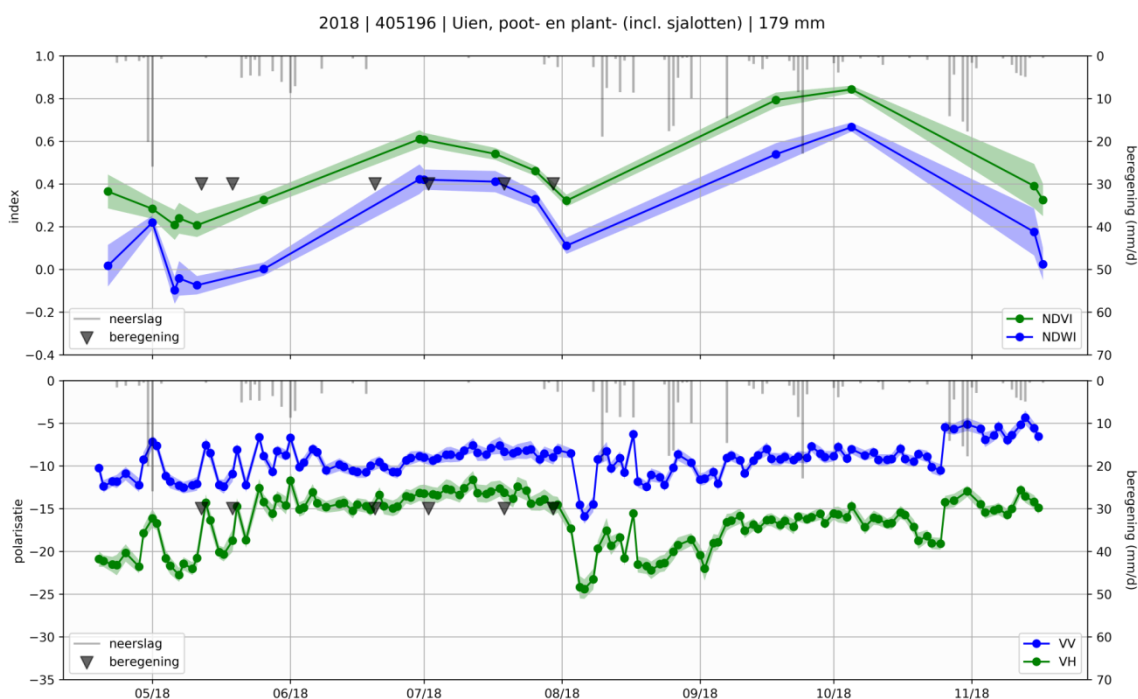
Figuur 16 en Figuur 17 geven twee voorbeelden van optische (NDVI en NDWI) en radar (VV en VH) tijdseries. Het voornaamste verschil tussen optische en radar observaties is het verschil in temporele resolutie. Qua signaal zijn er een aantal gelijkenissen. Zo wordt de neerslagpiek van 1 mei 2018 voor zowel de NDWI als de radar observaties geobserveerd en neemt het signaal toe naarmate het groeiseizoen vordert. Naast de neerslagpieken geven de radarsignalen ook berekening weer. Figuur 16 toont een aantal (kleinere) pieken wanneer er vlak voor de radar observatie berekening heeft plaatsgevonden. Figuur 17 laat vooral zien dat aan het begin van het groeiseizoen een sterk beregeningssignaal aanwezig is. Echter, de algemene trend laat zien dat hoe verder het gewas zich ontwikkeld, hoe zwakker het beregeningssignaal wordt. Zodra het gewas het volledige bodemoppervlak bedekt, wordt alleen de kruin van het gewas geobserveerd en worden veranderingen in bodemvocht niet meer gedetecteerd. Dit effect is voornamelijk zichtbaar in Figuur 17, waar gedurende het jaar een constante hoeveelheid van 30 mm/d wordt berekend, maar deze berekening bij een hoge NDVI niet meer waar te nemen is aan de hand van radar observaties.

Omdat het voor de beregeningsmonitor alleen interessant is om te weten waar- en wanneer er beregend is moeten de beelden voor neerslag worden gecorrigeerd. Omdat neerslag, in een klein gebied, relatief homogeen valt kunnen beelden worden genormaliseerd. Dit is bereikt door het gemiddelde verschil tussen twee opeenvolgende beelden te berekenen en dit van de daadwerkelijke observaties af te trekken, zoals de formule hieronder beschrijft. Figuur 18 toont een voorbeeld van het resultaat.

$$\Delta n_{norm} = \Delta n - \overline{\Delta n} \quad (5)$$



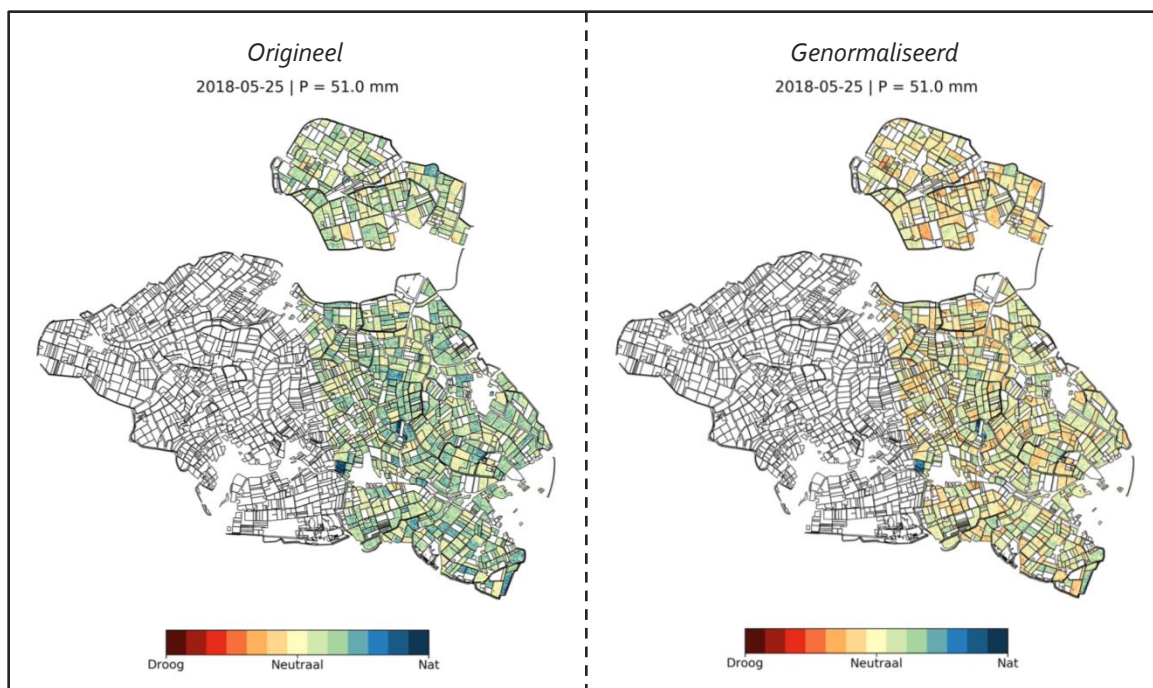
Figuur 16: Voorbeeld van een veld met zaaiuien waar beregening heeft plaatsgevonden. De bovenste grafiek laat de observaties van de NDVI en de NDWI zien. De onderste grafiek toont de twee radar polarisaties (VV en VH). De tweede y-as toont de hoeveelheid beregening of neerslag in mm/d. De banden rondom iedere tijdserie geven de standaard deviatie binnen het betreffende veld weer.



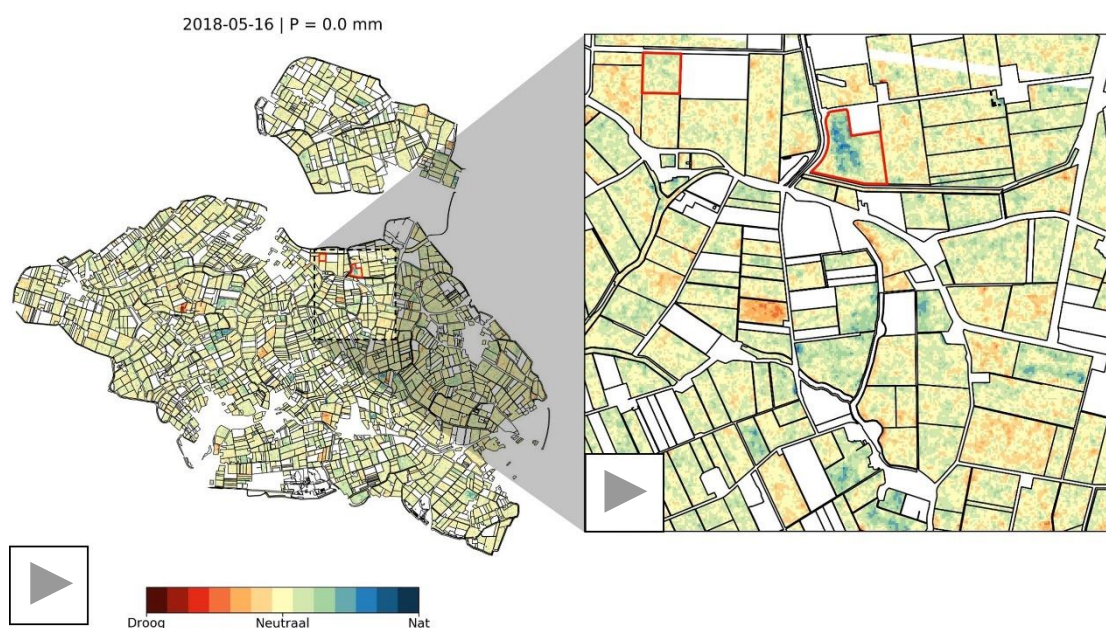
Figuur 17: Voorbeeld van een veld met poot- en plantuien waar beregening heeft plaatsgevonden.

Omdat voor radar observaties deze methode (nog) niet gewas afhankelijk is kan gemakkelijk een beregeningsmonitor voor het gehele onderzoeksgebied worden opgezet. Figuur 15 geeft een voorbeeld

van een momentopname van de beregeningsmonitor aan de hand van radar observaties in combinatie met de change detection methode. Het beeld geeft het gemiddelde van de VV en VH polarisaties weer.



Figuur 18: Voorbeeld van een genormaliseerde beregeningsmonitor aan de hand direct monitoren in combinatie met radar observaties.



Figuur 19: Beregeningsmonitor aan de hand van direct monitoren met radar satellietdata. Voor de change detection methode is een gemiddelde van de VV en VH polarisaties gebruikt. Rode velden staan voor velden die tussen de opeenvolgende satelliet observaties zijn berekend. Druk op de afspeelknoppen om de animaties van de beregeningsmonitor weer te geven.

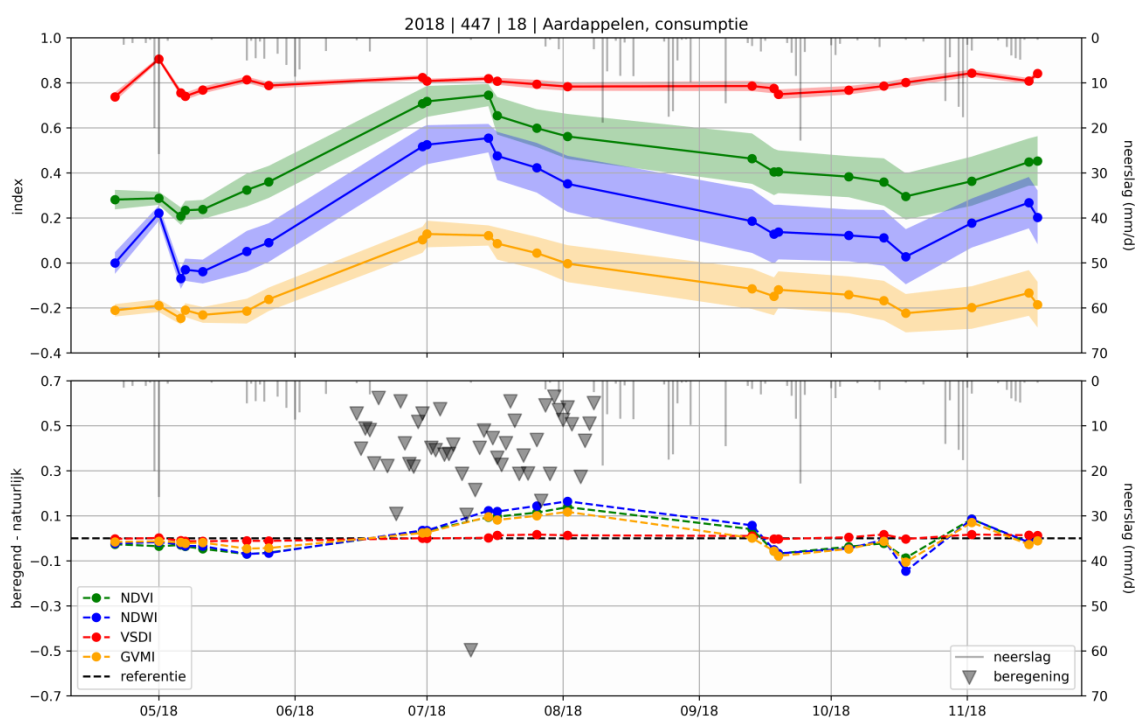
4.2 INDIRECT MONITOREN

Indirect monitoren is als methode niet in staat om bij te houden wanneer beregening heeft plaatsgevonden, maar kan wel een overzicht geven welke velden wel of niet berekend zijn door het

seizoen heen. Omdat de NDVI en NDWI over het algemeen de meest gebruikte indexen zijn om de gewasgezondheid/dichtheid mee te benaderen ligt de focus voornamelijk op deze twee indexen. Voor de volledigheid zijn echter ook de VSDI en GVMI meegenomen. De analyse is per gewas (Tabel 2) uitgevoerd, maar hieronder staan de resultaten van de drie focusgewassen, namelijk consumptie aardappelen (Figuur 20), wintertarwe (Figuur 21) en zaauien (Figuur 22), beschreven.

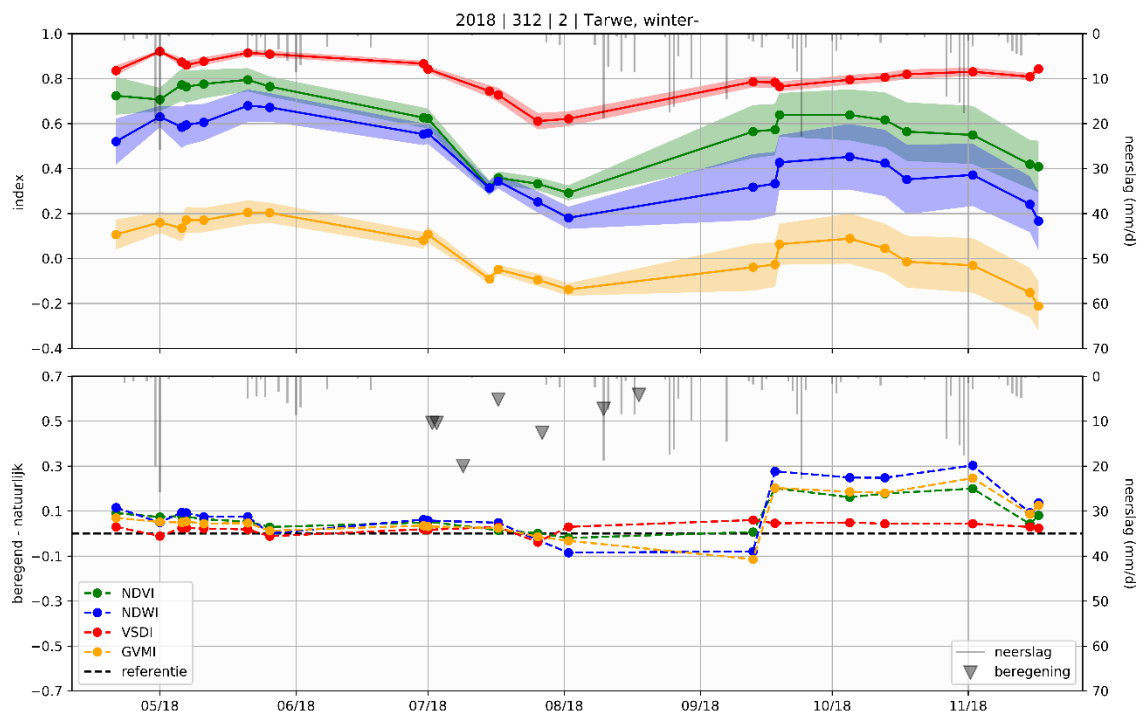
Om beregende velden correct te kunnen identificeren dienen de tijdseries van niet beregende velden zwakkere signalen te tonen dan velden waar wel berekening heeft plaatsgevonden vanwege het feit dat droogte schade een negatieve invloed op heeft zowel de NDVI als de NDWI. Door droogte zal de biomassa en het chlorofyl gehalte afnemen. Daarnaast zal de vegetatie minder vocht bevatten en zal er meer kale grond te zien zijn.

Figuur 20 toont aan dat er voor aardappelen inderdaad een positieve afwijking aan te tonen is. In het onderzoeksgebied zijn er 18 velden met aardappelen beregend, terwijl er van 447 velden geen data is of er berekening heeft plaatsgevonden. Gezien de kans dat niet beregende velden in werkelijkheid wel zijn beregend maar niet zijn geregistreerd, kan het positieve signaal in werkelijkheid sterker zijn dan Figuur 20 aantoont. Daarnaast komt de timing van het positieve signaal overeen met de droge periode waar veel berekening heeft plaatsgevonden en stabiliseert de afwijking naarmate er meer neerslag is gevallen.

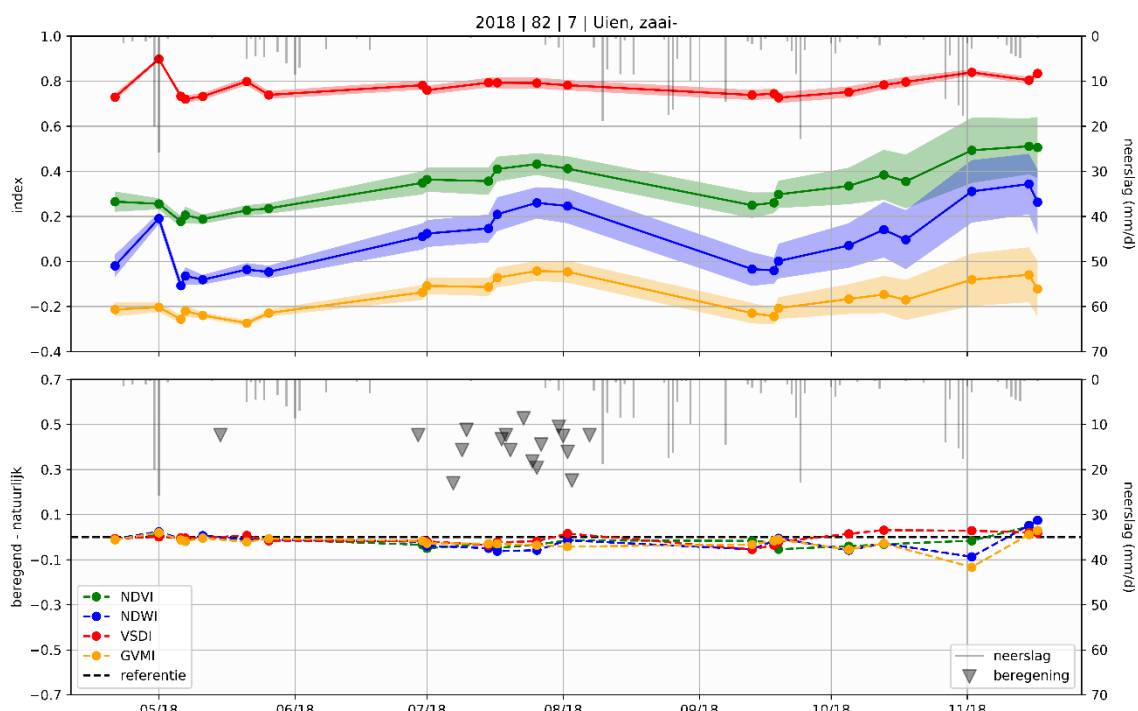


Figuur 20: Resultaten van indirecte monitoren voor consumptie aardappelen. De bovenste grafiek geeft per index de gemiddelde tijdseries weer, berekend over 447 niet beregende percelen. De banden geven de standaard deviatie aan berekend over het veldgemiddelde van alle 447 niet beregende percelen. De onderste grafiek laat de afwijking zien tussen de gemiddelde tijdseries berekend voor 447 niet beregende en 18 beregende percelen. Bij een positieve afwijking geeft aan dat de betreffende index een sterker signaal gaf voor beregende percelen dan niet beregende percelen.

Voor wintertarwe en zaauien zijn dergelijke positieve afwijking niet waar te nemen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het gebrek aan beregeningsdata, waardoor voor bijvoorbeeld wintertarwe 312 niet beregende percelen worden vergeleken met 2 beregende percelen. Voor zaauien is de verhouding tussen wel (7) en niet (82) beregende percelen minder scheef. Echter, ook hier kan niet worden afgeleid dat beregende percelen beter presenteren dan niet beregende percelen.



Figuur 21: Resultaten van indirect monitoren voor wintertarwe. De grafiek is hetzelfde opgebouwd als in Figuur 20, echter zijn in het geval van wintertarwe 312 percelen niet beregend en 2percelen wel beregend.



Figuur 22: Resultaten van indirect monitoren voor zaaiuien. De grafiek is hetzelfde opgebouwd als in Figuur 20, echter zijn in het geval van zaaiuien 82 percelen niet beregend en 7 percelen wel beregend.

5. DISCUSSIE

Tijdens deze pilot is aangetoond dat satellietdata van toegevoegde waarde kan zijn voor het detecteren van beregening in Nederland. Er zijn echter discussiepunten die in acht moeten worden bij de interpretatie van deze resultaten. Deze kunnen verschillen per methode en staan hieronder beschreven. Allereerst volgt een algemene discussie.

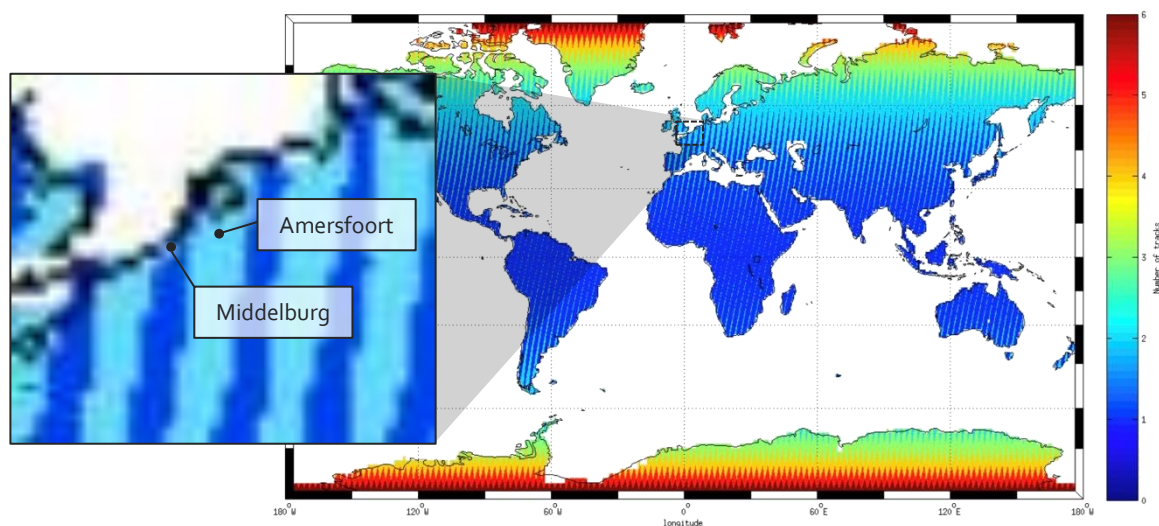
5.1 ALGEMEEN

5.1.1 REFERENTIEDATA

Tijdens de voorbereidingen van de pilot is duidelijk geworden dat er een grote vraag is naar een beregeningsmonitor. Echter, een van de grootste uitdagingen voor het opzetten van een dergelijke monitor is de schaarheid van betrouwbare kalibratie/validatie data. Beregening registreren is een uiterst tijdrovend proces en kan nu alleen in samenwerking met boeren op grote schaal worden uitgevoerd. Het waterschap Scheldestromen heeft een duidelijke dataset aan kunnen leveren, maar ondanks de kwaliteit van de dataset blijven er onduidelijkheden bestaan. Zo is het bijvoorbeeld goed bekend welke velden zijn beregend, maar de vraag blijft of er ook velden beregend zijn waar geen registratie van is ontvangen. Een duidelijk onderscheid tussen zeker wel en zeker niet beregende velden is tijdens het kalibratieproces van de beregeningsmonitor van cruciaal belang. Wanneer de beregeningsmonitor op grotere schaal zal worden opgezet dient eerst voor kleinere onderzoeksgebieden een zeer betrouwbare dataset te worden opgezet, zodat het model goed gekalibreerd kan worden.

5.1.2 SATELLIETDATA

Ondanks dat steeds meer satelliet data beschikbaar is, blijft bewolking een uitdaging voor optische observaties. Echter, binnen de landsgrenzen kunnen verschillen in temporele resolutie optreden. Dit verschil wordt veroorzaakt door de verhoogde kans op de overlap van satellietbanen bij hogere breedtegraden. Nederland is voor Sentinel-2 precies een grensgeval waar in Zeeland slechts één observatie per omloop beschikbaar is, terwijl in het midden van het land twee satelliet observaties overlappen (Figuur 23). Hierdoor verdubbelt de temporele resolutie, ten gunste van de potentie van een operationele beregeningsmonitor voor het midden van het land.



Figuur 23: Verschil in overlappende Sentinel-2 satellietbanen voor per cyclus (ESA, 2020). Hoe hoger de breedtegraad, des te groter de kans dat satellietbanen overlappen waardoor meerdere observaties per omloopcyclus beschikbaar zijn.

Naast de satellieten die voor deze pilot zijn gebruikt zijn er meer satellieten beschikbaar die het doel van de beregeningsmonitor kunnen dienen. Naast Sentinel-1, Sentinel-2 en Landsat 8 zijn er een aantal andere satellieten/sensoren van NASA en ESA, zoals MODIS en Sentinel-3, die gelijkwaardige optische

banden kunnen detecteren. Hoewel de temporele resolutie van deze satellieten hoger ligt dan die van Landsat 8 en Sentinel-2, varieert de ruimtelijke resolutie tussen de 250 en 1000 m, wat zeer ongunstig is voor het monitoren van beregening op kleine percelen. Hoewel dit soort satellieten gebruikt kunnen worden om op grotere schaal bijvoorbeeld thermische observaties te verrichten, zal actieve beregening moeilijk te observeren zijn.

Naast satellieten van NASA en ESA zijn er ook andere ruimtevaartorganisaties die satellietdata aanbieden. JAXA, de Japan Aerospace Exploration Agency, beschikt bijvoorbeeld over ALOS-2, een SAR satelliet vergelijkbaar met Sentinel-1. Deze satelliet is echter uitgerust met een sensor die L-band microgolf straling kan observeren. L-band straling heeft een grotere golflengte dan C-band straling, waardoor de ruwheid van vegetatie minder belemmerend is voor het observeren van bodemvocht. L-band satellieten kunnen daarom in potentie nauwkeuriger beregening detecteren dan Sentinel-1. Echter, de temporele resolutie van ALOS-2 is 12 dagen, waardoor de kans groot is dat actieve beregening niet zal worden gedetecteerd. Naast actieve satellieten zoals ALOS-2 en Sentinel-1 zijn er ook satellieten die passief microgolven detecteren. Deze satellieten observeren alleen de microgolf achtergrondstraling van de aarde. Voorbeelden van dit soort satellieten zijn SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) en SMAP (Soil Moisture Active Passive), die op wereldwijde schaal bodemvocht kunnen observeren. Echter vanwege de zwakke microgolf achtergrondstraling van de aarde is de ruimtelijke resolutie van deze satellieten erg laag, variërend tussen de 3 en 50 km. Gezien de beschikbaarheid van data en de hoge ruimtelijke en temporele resolutie is Sentinel-1 de microgolf/radar satelliet met de meeste potentie voor de beregeningsmonitor. De RADARSAT Constellation van de CSA (Canadian Space Agency) bestaat uit drie RADARSAT satellieten die ongeveer dezelfde eigenschappen als Sentinel-1 hebben. Hoewel de datasets van al deze satellieten niet gratis toegankelijk zijn, kunnen dit soort observaties in de toekomst met Sentinel-1 worden gecombineerd om de temporele resolutie potentieel te vergroten.

De keuze in optische satellieten is nog groter dan voor radar satellieten en hier speelt ook de commerciële markt een grotere rol. Omdat de kosten van het lanceren van satellieten drastisch is verlaagd dankzij bedrijven als SpaceX en Rocket Lab worden steeds meer aardobservatie satellieten van commerciële bedrijven gelanceerd. Voornamelijk de markt van Cubesats, satellieten van 10x10x10 cm die niet zwaarder wegen dan 1,3 kg, is sterk gegroeid. Omdat de sensoren steeds kleiner worden is het mogelijk om in één lancering meerdere satellieten tegelijkertijd in een baan rond de aarde te brengen. Bedrijven als Planet Labs spelen hierop in en beschikken over grote vloten (150+) van kleine satellieten. Hierdoor kan met zowel een hoge ruimtelijke (0,3 - 5 m) en temporele (dagelijks) resolutie de aarde worden geobserveerd. Echter, vanwege het formaat van de satellieten kan doorgaans alleen zichtbare tot nabij infrarode straling worden geobserveerd, waardoor alleen indexen als de NDVI kunnen worden berekend. Voor het observeren van kortgolf infrarode en thermisch infrarode straling zijn meer geavanceerde en grotere satellieten nodig. Bedrijven als Digital Globe kunnen wel dit soort satellietdata aanbieden. Worldview-3 is bijvoorbeeld een satelliet die met een resolutie variërend tussen de 0,31 (panchromatisch) tot 3,7 m (SWIR) gemiddeld meer dan 1 observatie per dag kan maken.

Hoewel commerciële satellieten dus in sommige gevallen meer te bieden hebben, blijven de hoge kosten een groot nadeel voor het gebruik van commerciële data. Dit is zeker het geval voor het opzetten van een landelijke beregeningsmonitor, waar potentieel elke dag 34.000 km² aan satellietdata aangeschaft dient te worden. Als de kosten voor een enkele satellietobservatie per km² al \$27,50 kunnen bedragen* wordt al snel duidelijk dat zorgvuldig onderzoek gedaan moet worden welke platformen ook daadwerkelijk noodzakelijk zijn voor het opzetten van een operationele beregeningsmonitor. Sommige commerciële data is echter wel beschikbaar via het satellietportaal, zoals Radarsat-2 en hoge resolutie optische data (<https://www.spaceoffice.nl/nl/satellietdataportaal/>).

* Voorbeeld gebaseerd op kosten van Worldview-3 observatie per ha (Sozzi, Marinello, Pezzuolo, & Sartori, 2018).

5.2 DIRECT MONITOREN

De resultaten tonen aan dat aan de hand van direct monitoren in potentie berekening kan worden gedetecteerd. Echter, voor zowel het gebruik van optische data als radar data zijn er een aantal factoren die van invloed zijn op de nauwkeurigheid van het uiteindelijke beregeningsproduct.

Sommige van deze factoren zijn van toepassing op beide databronnen. Zo is het belangrijk dat berekening vlak vóór de satellietobservatie plaatsvindt om te voorkomen dat water nog niet is verdampt of geïnfiltreerd. Daarnaast worden de voorgeschreven methodes minder accuraat wanneer het gewas zich verder ontwikkeld heeft. Zowel optische sensoren als (C-band) radar zijn niet in staat om door een dichte gewaskruin de bodem te observeren, waardoor bodemvocht en oppervlakkig water niet gedetecteerd zal worden.

5.2.1 OPTISCHE OBSERVATIES

Voor direct monitoren aan de hand van optische indexen is het ook van belang dat de groenheid van het gewas kan worden gebruikt om de biomassa of de gezondheid van het gewas te benaderen. Wintertarwe is een voorbeeld van een gewas dat aan het einde van zijn groeicyclus vergeelt, waardoor de NDVI afneemt ondanks dat de biomassa nauwelijks verandert. Ook is het voor de regressie analyse belangrijk om te kunnen differentiëren tussen zeker wel en zeker niet beregende velden. Tijdens de pilot hebben wij de data verdeeld in een dataset met en zonder berekening, maar het is zeer aannemelijk dat in de dataset zonder berekening toch beregende velden zijn opgenomen die niet zijn geregistreerd door het waterschap.

5.2.2 RADAR OBSERVATIES

Voor direct monitoren aan de hand van radar observaties is het voornamelijk van belang dat veldomstandigheden niet veranderen op korte tijdschaal door bijvoorbeeld oogsten of ploegen. Daarnaast moet rekening worden gehouden met het feit dat opeenvolgende radar observaties vaak met een andere kijkhoek naar het gewas kijken, waardoor de structuur van het gewas of de bodem tijdens twee identieke omstandigheden toch anders wordt geobserveerd.

5.3 INDIRECT MONITOREN

Vergelijkbaar met direct monitoren laten de resultaten van indirect monitoren ook potentie zien. Echter, ook hier zijn er een aantal discussiepunten waar rekening mee gehouden moet worden.

Het meest voorname criterium dat het succes van deze methode bepaald is dat het gewas zichtbaar lijdt vanwege aanhoudende droogte. Wanneer het niet beregende perceel nauwelijks fysieke veranderingen laat zien in vergelijking tot een beregend perceel, bijvoorbeeld fruitbomen tijdens beregening ter voorkoming van vorstschade of soortgelijke gewassen die groeien in gebieden met een hoog grondwaterpeil.

Daarnaast worden velden met hetzelfde soort gewas vergeleken om onderscheid tussen beregende en niet beregende percelen te kunnen maken. Echter, hier wordt dan wel aangenomen dat overige randvoorwaarden, zoals bemesting, voor al deze velden gelijk zijn, wat in de werkelijkheid waarschijnlijk niet het geval is.

6. CONCLUSIES

In het pilotonderzoek voor de beregeningsmonitor is een breed spectrum aan methodes onderzocht om zo een goed beeld te kunnen vormen welke methodes potentieel de onderzoeksvraag 'waar en wanneer is beregend?' kunnen beantwoorden. Uit het onderzoek blijkt dat een aantal methodes potentie hebben en voor andere methodes is de verwachting dat deze in hun huidige vorm ook in vervolgstudies weinig resultaat zullen leveren. In onderstaand overzicht zijn de conclusies per methode uiteengezet met tot slot de algemene conclusies.

6.1 DIRECT MONITOREN

6.1.1 OPTISCHE OBSERVATIES

Bij direct monitoren van gewassen doormiddel van optische satellietdata wordt gebruik gemaakt van verschillende indexen om in te schatten of gewassen relatief veel- of weinig vocht bevatten (hoofdstuk 3.1.1). Uit het pilotonderzoek blijkt dat deze methode potentie heeft mits berekening plaats heeft gevonden vlak vóór het moment van de satellietobservatie. Daarnaast dient het gewas niet volledig ontwikkeld te zijn en dient de groenheid van het gewas representatief te zijn voor de gezondheid van het gewas.

Mede door de relatief lage temporele resolutie van optische satellietdata, welke nog verder wordt beperkt door wolken, komt het in weinig gevallen voor dat berekening kort vóór een satellietobservatie heeft plaatsgevonden. Daarnaast is deze methode sterk afhankelijk van gewaseigenschappen (bv. graan wordt in een bepaald groeistadium geel ondanks dat het wellicht gezond is). Om deze redenen is geconcludeerd dat deze methode weinig potentie heeft om op korte termijn vast te kunnen stellen waar en wanneer beregend wordt in Nederland.

6.1.2 RADAR OBSERVATIES

Bij het direct monitoren van berekening doormiddel van radar data wordt de gezondheid van een gewas en het vochtgehalte in de bodem geschat door de manier van weerkaatsing van de actieve radarsignalen (hoofdstuk 3.1.2). Het grootste voordeel van deze methode ten opzichte van het gebruik van optische data is dat de radarbeelden niet beperkt worden door bewolking. Uit het pilotonderzoek blijkt dat in veel gevallen berekening detecteerbaar is door radarsignalen.

Radarsignalen worden echter door vele andere aspecten beïnvloedt zoals het oogsten of ploegen van het land waardoor het signaal relatief moeilijk te interpreteren is. Daarnaast wordt het schatten van bodemvocht doormiddel van radardata bemoeilijkt wanneer velden volledig begroeid zijn en de bodem niet meer zichtbaar is.

In de resultaten van het pilotonderzoek zijn voor deze methode echter voldoende aanknopingspunten geconstateerd die vertrouwen geven om deze methode verder te onderzoeken. Radarsignalen kunnen bijvoorbeeld worden gecorrigeerd met modellen, zoals het Water Cloud Model (WCM) (Baghdadi, El Hajj, Zribi, & Bousbih, 2017), om zo de impact van vegetatie te verminderen. Bij vervolgonderzoek van deze methode is het van belang om voorkennis over verschillende groeistadia van gewassen te benutten en op deze manier onzekerheden rondom andere invloeden dan berekening op het radarsignaal te minimaliseren.

6.2 INDIRECT MONITOREN

Bij indirect monitoren van berekening worden lange termijn effecten van berekening gedetecteerd door de gezondheid van gewassen op potentieel beregende velden te vergelijken met een referentiegewas wat niet beregend is (hoofdstuk 3.2). Uit het pilotonderzoek blijkt dat het indirect monitoren met optische satellietdata potentie heeft om berekening te detecteren mits het gewas zichtbaar lijkt in het geval het niet beregend is. Daarnaast moet voor een succesvolle toepassing van deze methode een aantal velden bekend zijn waar zeker niet beregend is.

In het onderzochte pilotgebied zijn echter minimale verschillen aangetroffen in de lange termijn effecten van beregening tussen wel beregende velden en niet beregende velden. Enerzijds kan de oorzaak hiervoor liggen bij het feit dat in lager gelegen gebieden met hoofdzakelijk kleiige ondergronden zoals het pilotgebied, de grondwaterstand relatief hoog blijft door het hele jaar, waardoor de capillaire nalevering ook tijdens droogte substantieel blijft en het bodemvocht gehalte relatief hoog blijft. Hierdoor zijn de lange termijn effecten van beregening minder merkbaar in deze gebieden. In hoger gelegen gebieden in Nederland met voornamelijk zandgronden (bv. oost- en zuid Nederland), zakt het grondwater wel ver uit gedurende droge periodes en is er dus weinig tot geen capillaire nalevering vanuit het grondwater. Een andere potentiële oorzaak voor deze minimale verschillen is dat de beregeningsdata geleverd door het waterschap gebaseerd is op beregeningsregistraties door agrariërs en mogelijk niet alle agrariërs ieder beregeningsmoment consequent registreren. Hierdoor is het mogelijk dat velden die in de data gekenmerkt zijn als niet beregende velden in werkelijkheid wel beregend zijn en hierdoor geen verschillen tussen wel of niet beregende velden te zien zijn.

Kortom, het indirect monitoren van beregening doormiddel van optische satellietdata heeft de potentie om beregening te detecteren op langere tijdschalen. Om eerdergenoemde onzekerheden echter nader te onderzoeken is een toepassing van deze methode op een gebied met een bij voorkeur hoger gelegen en poreuzere ondergrond van belang. Bij een vervolgonderzoek is het daarnaast van belang dat de beregeningsregistraties door agrariërs nauwkeurig en consequent wordt bijgehouden.

6.3 ALGEMEEN

Aan de hand van de pilot kunnen drie algemene conclusies worden getrokken. (i) Twee van de onderzochte methodes hebben potentie en bieden voldoende perspectief voor vervolgonderzoek. Echter, voor direct monitoren aan de hand van optische satelliet data is geconstateerd dat deze te weinig potentie biedt om op korte termijn bij te dragen aan een operationele beregeningsmonitor. (ii) Naast de onderzochte methodes zijn gedurende het pilotonderzoek een aantal databronnen naar voren gekomen, zoals onder andere thermische satellietdata, verdampingsmodellen/observaties en gemodelleerde bodemvochtdata, waarvan de potentiële waarde voor de beregeningsmonitor nog onderzocht dient te worden (hoofdstuk 7). (iii) Het pilotonderzoek is eenzijdig geweest wat betreft het onderzoeksgebied. Een potentieel vervolgonderzoek zou daarom bij voorkeur gericht moeten zijn op de toepassing van de onderzochte, en aanvullende methoden op hoger gelegen zandgronden in Nederland.

7. VERVOLGSTAPPEN

Uit de conclusies van dit pilotonderzoek volgt dat een operationele beregeningsmonitor (tenminste voor een deel van Nederland) haalbaar is, maar wel nader onderzoek vraagt. Het pilotonderzoek is door beperkte beregeningsdata eenzijdig geweest met betrekking tot het type onderzoeksgebied. In een vervolgonderzoek is het daarom van belang dat beregeningsdata verkregen wordt voor gebieden met een ander soort ondergrond zoals de hoger gelegen gebieden op zandgronden in oost- en zuid Nederland. Daarnaast is het van belang dat deze beregeningsdata van hoge kwaliteit is. Dat wil zeggen dat aan de hand van deze data met enige zekerheid vastgesteld kan worden waar wel en waar zeker niet beregend is. Ook is vervolgonderzoek nodig om te bepalen wat de beste methode is voor het vast stellen van beregening. Deze uiteindelijke methode kan een combinatie zijn van verschillende complementaire methoden die in dit verslag al getoetst zijn ondersteund met aanvullende methoden en databronnen.

Om bovenstaande doelen te bereiken zullen wij een plan van aanpak uitwerken waarbij de volgende aspecten naar voren zullen komen:

1. Verkrijgen van beregeningsdata voor gebieden op (hoge) zandgronden

- Focusmeetings met deelnemende organisaties die gelegen zijn op zandgronden (Hunze en Aa's, Vallei en Veluwe en Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden) om de mogelijkheden tot het verkrijgen van beregeningsdata te bespreken en hier een plan voor te maken.
- Verkenning naar gebieden buiten het werkgebied van deze drie waterschappen waar eventueel beregening wordt geregistreerd op vergelijkbare ondergrond. Marnix van de Brande heeft bijvoorbeeld een lead bij het bedrijf Van den Borne Aardappelen waar onder andere beregeningsmomenten in detail worden geregistreerd. In een vervolgonderzoek zal contact opgenomen worden met dergelijke bedrijven.

2. Methode verfijnen en ondersteunen met aanvullende data

- De twee methodes waarvan in dit pilotonderzoek is vastgesteld dat deze potentie hebben (indirect monitoren met optische satelliet data en direct monitoren met radardata) verfijnen en combineren om zo tot een zo generiek mogelijke methode te komen. Men kan hierbij denken aan het gebruik van optische data om de oriëntatie van gewassen vast te stellen waardoor de radardata waardevoller kan worden. Daarnaast is het in een vervolgonderzoek van belang om de statistische methoden voor het onderscheid tussen wel- en niet beregende velden waar mogelijk aan te scherpen.
- Focussen op waarde van aanvullende databronnen zoals thermische data en bodemvocht- en/of verdampingsdata uit modellen om de huidige methodes te ondersteunen. Andere databronnen hebben weliswaar nadelen zoals een lage ruimtelijke resolutie maar zouden potentieel de onzekerheden van eerder verkende methoden kunnen verkleinen.

3. Implementatieplan uitwerken

- Uit een vervolgonderzoek zou een compleet beeld gevormd moeten kunnen worden hoe de beregeningsmonitor in verschillende gebieden in Nederland geïmplementeerd kan worden. Hieruit volgt een implementatieplan waarbij ook de kosten en baten van een beregeningsmonitor worden meegenomen.

8. BRONVERMELDING

- Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., & Bousbih, S. (2017). Calibration of the Water Cloud Model at C-Band for Winter Crop Fields and Grasslands. *Remote Sensing*, 9, 969.
- Durieux, A. M., Calef, M. T., Arko, S., Chartrand, R., Kontgis, C., Keisler, R., & Warren, M. S. (2019). Monitoring forest disturbance using change detection on synthetic aperture radar imagery. *Proc. SPIE 11139, Applications of Machine Learning*, 1113916.
- ESA. (2020). *Sentinel-2 MSI Revisit Coverage*. Opgehaald van www.sentinel.esa.int: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage>
- SEOS. (2018). *Classification Algorithms and Methods*. Opgehaald van www.seos-project.eu: <https://seos-project.eu/classification/classification-co1-po5.html>
- Sozzi, M. M., Marinello, F., Pezzuolo, A., & Sartori, L. (2018). Benchmark of Satellites Image Services for Precision Agricultural use. *Conference: European Society of Agricultural Engineers 2018*. Wageningen, the Netherlands.
- Wolters, H., van den Born, G., Dammers, E., & Reinhard, S. (2018). *Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017*. Utrecht: Deltares.