

Lumbricus - Peilen en Vegetatie

Resultaten 2020



Lumbricus - Peilen en Vegetatie

Resultaten 2020

Auteur(s)

mevrouw W.E. Penning

de heer K.D. Berends

mevrouw S. Gaytan Aguilar MSc

Lumbricus - Peilen en Vegetatie

Resultaten 2020

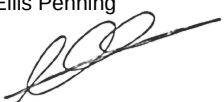
Opdrachtgever	Waterschap Aa en Maas
Contactpersoon	de heer ir. F.J.E. van der Bolt
Referenties	-
Trefwoorden	Vegetatiebeheer, Peilbeheer, Beekruwheidsmodel, Ecohydraulics, Remote Sensing, Aquatische Vegetatie

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	06-04-2021
Projectnummer	1220765-023
Document ID	1220765-023-BGS-0005
Pagina's	71
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	W.E. Penning	
	K.D. Berends	
	S. Gaytan Aguilar	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Ellis Penning 	Jasper Dijkstra 	Otto de Keizer 	

Samenvatting

Het project 'Peilen en vegetatie' binnen het onderzoeksprogramma Lumbricus richt zich op het geven van meer inzicht in de relatie tussen vegetatieontwikkeling en de afvoercapaciteit van stromende wateren. Door analyse van vlakdekkende beelden, gekoppeld aan hydraulische gegevens, is onderzocht of dit type informatie bijdraagt aan een vegetatiebeheer dat zowel voor waterveiligheid als voor ecologie optimaal wordt ingericht.

In dit rapport vindt u de resultaten van de werkzaamheden uit 2020 waarbij met name data uit 2018 en 2019 is gebruikt voor de analyses. De resultaten passen binnen het meerjarige programma rondom peilen en vegetatie, dat onderdeel is van het deelproject 'Boeiende Beekdalen' binnen het onderzoeksprogramma Lumbricus.

In 2020 is het beekruwheidsmodel ontwikkeld en gebruikt om inzicht te bieden in de effectiviteit van uitgevoerde maaibeurten. Voor verschillende stuwpanden in de Leijgraaf is geanalyseerd in hoeverre de bovenstroomse peilen zouden zijn toegenomen als er niet was gemaaid. Ook kunnen met het beekruwheidsmodel voorspellingen worden gedaan over de bandbreedte waarin vegetatie zich in de toekomst zal ontwikkelen.

Er is in enige mate een koppeling mogelijk tussen de waargenomen ruwheden en de met satellietbeelden waargenomen vegetatiebedekkingen, maar dit kan alleen worden bevestigd voor jaren waarin er voldoende afvoer en daarmee betrouwbare hydraulische data over deze relatie bestaat en dat deze hoge resolutiebeelden beschikbaar zijn. In de zomers van 2018 en 2019 was er onvoldoende afvoer om deze relatie te bevestigen.

De hotspot-analyse van hoge resolutiesatellietbeelden (TripleSat en Superview) geeft aan dat er binnen de Leijgraaf een aantal locaties zijn waar notoir veel vegetatie wordt waargenomen in het groeiseizoen, maar ook dat er veel locaties zijn die niet volgroeien. Deze informatie kan gekoppeld worden met het herdefiniëren van maaibestekken, en richting geven aan keuzes rondom efficiënt en ecologisch bewust maa- en baggerbeheer.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Projectomschrijving	7
1.2	Aanleiding en doel	7
1.3	Motivering van het project binnen Lumbricus	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Hydraulische analyse	9
2.1	Aanleiding	9
2.2	Doelstelling	9
2.3	Methode	9
2.3.1	Algemene aanpak	9
2.3.2	Data en studiegebied	10
2.3.3	Het berekenen van ruwheid	11
2.3.4	Het beekruwheidsmodel	12
2.3.4.1	Algemene beschrijving	12
2.3.4.2	Literatuuronderzoek: afvoerafhankelijkheid	13
2.3.4.3	Literatuuronderzoek: vegetatiegroeimodellen	14
2.3.4.4	De definitie van het beekruwheidsmodel	15
2.3.4.5	Het updaten van parameterwaarden	16
2.3.4.6	Het bepalen van momenten van menselijk ingrijpen	16
2.3.4.7	Het modelleren van menselijk ingrijpen	18
2.3.5	Toepassing van het ruwheidsmodel	18
2.3.5.1	Parameter analyse	18
2.3.5.2	Voorspelling	19
2.4	Resultaat	20
2.4.1	Berekende ruwheid	20
2.4.2	Het beekruwheidsmodel	21
2.4.2.1	Momenten van menselijk ingrijpen	21
2.4.2.2	Updaten van de parameterwaarden	22
2.4.3	Gevoeligheid van modelresultaten	24
2.5	Toepassing	25
2.5.1	De effectiviteit van maaien	25
2.5.2	Scenario modellering met hoge afvoer	27
2.5.3	Ondersteunen van real-time advies	28
2.5.4	Tijdsafhankelijke ruwheid in hydraulische modellen	29
3	Tijdserie-analyse satellietbeelden	30
3.1	Introductie	30
3.2	Gebruikte data	30
3.2.1	Beschikbare beelden	31
3.2.2	Analysestappen	32

3.3	Resultaten	34
3.4	Discussie en conclusie tijdserie-analyse satellietbeelden	38
4	Algemene discussie en conclusies Peilen en Vegetatie in Proeftuin Zuid	39
4.1	Vergelijken van satellietbeelden en ruwheid	39
4.2	Samenvattende conclusies Peilen en Vegetatie – Proeftuin Zuid	40
4.2.1	Samenvatting resultaten 2016-2020	40
4.2.2	Inzet van vlakdekkende beeldinformatie voor vegetatiebeheer	42
4.2.3	Richting toepassingen in het primair proces	43
5	Referenties	44
A	Surrogaat hydraulisch model	45
B	Seizoensmatige bedekkingen per stuwpand	46
C	Bedekking langs het traject	51

1 Introductie

1.1 Projectomschrijving

Het project 'Peilen en vegetatie' richt zich op het geven van meer inzicht in de relatie tussen vegetatieontwikkeling en de afvoercapaciteit van stromende wateren. Door analyse van vlakdekkende beelden, gekoppeld aan hydraulische gegevens, wordt onderzocht of dit type informatie bijdraagt aan een vegetatiebeheer dat zowel voor waterveiligheid als voor ecologie optimaal wordt ingericht. Ook wordt ingezet op de koppeling van deze kennis met informatie over vegetatieontwikkeling in de tijd.

1.2 Aanleiding en doel

In 2016 en 2017 zijn de eerste proeven en analyses gedaan om vlakdekkende informatie over vegetatiebedekkingen te koppelen aan peilfluctuaties (Van den Eertwegh & Penning 2017, Penning et al., 2018a, 2018b). Ook is een start gemaakt met analyses van ruwheidsveranderingen door de tijd (Penning et al. 2018c). In 2018 is vooral ingegaan op de opschaalbaarheid van deze informatie in ruimte door zowel het uitvoeren van vlakdekkende beeld-analyses die waren ingewonnen met een vliegtuig voor de Leijgraaf. In 2018 is tevens ingegaan op de opschaalbaarheid van deze informatie in tijd door een uitgebreidere hydraulische analyse van de Leijgraaf voor langlopende tijdseries. In 2019 is gewerkt aan verdere opschaling door middel van analyse van hoge resolutie satellietbeelden en is een eerste stap gezet in de discussie hoe deze technieken in te bedden zijn in de dagelijkse praktijk van het uitvoerend maaibeheer.

Het doel van het Peilen en Vegetatie-onderzoek in proeftuin Zuid in 2020 was driedelig:

- 1 Verdere uitwerking van een hydraulische analyse methode zodat afwegingen rondom (stroombaan-)maaien en de impact van baggeren in kaart kunnen worden gebracht op een generieke wijze.
- 2 Gekoppeld aan de hydraulische analyse is een studentonderwerp gedefinieerd om te komen tot een risico-inschatting van veranderende neerslag-afvoerpatronen als gevolg van klimaatveranderingen (in koppeling met ontwikkelpaden)
- 3 Het doen van tijdsanalyses van hoge resolutie satellietbeelden voor een geselecteerd gebied om te beschouwen of hier hotspots en groeicurves uit kunnen worden gedestilleerd die als aanvullende input kunnen dienen bij de definitie van maaibestekken.
- 4 De resultaten uit de voorgaande jaren samen te voegen tot een totale aanbeveling voor het gebruik van de onderzochte analyse technieken om te komen tot een meer risico-gestuurd maaibeheer dat zowel waterveiligheidsdoelen als ecologische doelen nastreeft.

1.3 Motivering van het project binnen Lumbricus

Binnen de pijler 'Peilen en Vegetatie' van het kennisprogramma Lumbricus, onderdeel Boeiende Beekdalen, worden zowel de seizoensmatige als meerjarige verandering van vegetatie gekoppeld aan het effect hiervan op de afvoercharacteristieken van het watersysteem.

Hierbij ligt de focus voor de kleinere beeksystemen op seizoensmatige veranderingen, zoals in proeftuin Zuid in de Lage Raam en de Leijgraaf, en in Tabel 1.1

Tabel 1.1 Algemene indeling van deelaspecten Peilen en Vegetatie, waarbij in zwart de onderwerpen met hoogste prioriteit, en in grijs de onderwerpen met lagere prioriteit.

	Kleinere beeksystemen (proeftuin Lage Raam)	Grotere beeksystemen (proeftuin Vecht)
Seizoensmatige veranderingen	Seizoensmatige relaties tussen vegetatie in de beek en peil- en maaibeheer. Kenmerken per dominante groeivorm gekoppeld aan afvoercapaciteit en risico gestuurd maaibeheer. Gekoppeld aan discussie met groenbeheerder.	Seizoensmatige relatie tussen vegetatie in nevengeulen en op uiterwaardsystemen (koppeling met rivercare).
Meerjarige veranderingen	Effect van ontwikkeling van sedimentatie- en erosiepatronen door wortelpakketten en effectieve maaitechnieken (incl. verwijderen wortelpakket) voor beheer op biodiversiteit in relatie tot morfologie.	Langjarige vegetatieontwikkeling op oevers en in het droge winterbed. Relatie met morfologische veranderingen in het beekstelsysteem (koppeling met ontwikkelpaden). Gekoppeld aan discussie met perceeleigenaren.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de hydraulische analyse en de daarvoor ontwikkelde methode van het beekruwheidsmodel beschreven. In hoofdstuk 3 wordt de satellietbeeld-analyse beschreven waarbij de hotspot-detectie centraal staat en in hoofdstuk 4 wordt een algemene samenvatting gegeven.

2 Hydraulische analyse

2.1 Aanleiding

Binnen het onderzoeksprogramma Lumbricus wordt in Proeftuin Zuid de relatie tussen vegetatie (waterplanten) en peilen in watergangen onderzocht. Over het algemeen hebben waterplanten hebben een peilverhogend effect. Dit effect wordt veroorzaakt doordat de stroming belemmerd wordt, wat leidt tot lagere stroomsnelheid. Bij gelijkblijvende afvoer en lagere stroomsnelheid in de watergang, stijgt de waterstand.

In stromingsleer wordt de relatie tussen waterstand en afvoer beschreven door ruwheid. Ruwheid is een abstracte maat, die gebruikt wordt om te beschrijven hoeveel weerstand stroming ondervindt. Het effect van waterplanten op stroming wordt doorgaans gemodelleerd als een verhoogde ruwheid.

In 2017 is data uit de Lage Raam (Penning et al., 2017) gebruikt om indirect vegetatiegroei waar te nemen door te kijken hoe ruwheid door de tijd verandert. Hieruit bleek dat een toename van de ruwheid in de tijd waarneembaar is, en dat die in het voorjaar snel stijgt. Maaien leek slechts kort de ruwheid te verlagen, wat kan duiden op een snelle teruggroeisnelheid. Vergelijking met eerder onderzoek in de Grote Beek (gelegen binnen Waterschap Rijn en IJssel) (Linneman, 2017) liet zien dat de genormaliseerde ruwheden vergelijkbaar gedrag vertonen, maar dat de daadwerkelijke waarden voor de ruwheid erg verschillen. Hierdoor bleek de opgedane kennis niet toe te passen op andere systemen.

In 2018 is een langjarige tijdsanalyse gedaan op de afvoer- en peildata van de Leijgraaf (Penning et al., 2018c). Hieruit bleek dat de berekende ruwheid sterk afhankelijk is van de afvoer en van de tijd in het jaar. Ook hier kwamen grote verschillen tussen de verschillende stuwpanden naar voren. Aanvullend onderzoek van Waterschap Rijn en IJssel (Verdonschot et al., 2021) naar het effect van maaien op peilen gaf meer bewijs voor een sterke omgekeerd evenredige relatie tussen afvoer en ruwheden. Verder kwam eruit naar voren dat (1) de hoeveelheid slib een belangrijke verklarende factor kan zijn voor grote verschillen tussen panden en (2) het effect van maaien kleiner kan zijn dan verwacht bij maatgevende afvoeren doordat de ruwheden bij hogere afvoeren kleiner worden.

Uit deze onderzoeken bleek dat de huidige vegetatiemodellen die gebruikt worden om de ruwheid van waterplanten te voorspellen niet nauwkeurig genoeg zijn om gebruikt te worden voor het ondersteunen van maaibeleid.

2.2 Doelstelling

In voorgaand onderzoek is geconstateerd dat traditionele ruwheidsvoorspellers (nog) niet goed in staat zijn om het effect van waterplanten op stroming te beschrijven en voorspellen. Wel werd een sterke relatie tussen afvoer, ruwheid en tijd gezien. Op basis hiervan verwachten we dat een model kan worden ontwikkeld dat wel in staat is om de ruwheid in een watergang te voorspellen.

2.3 Methode

2.3.1 Algemene aanpak

De algemene aanpak is schematisch weergegeven in Figuur 2.1. De aanpak bestaat uit drie onderdelen:

Stap 1: Het berekenen van de opgetreden ruwheid

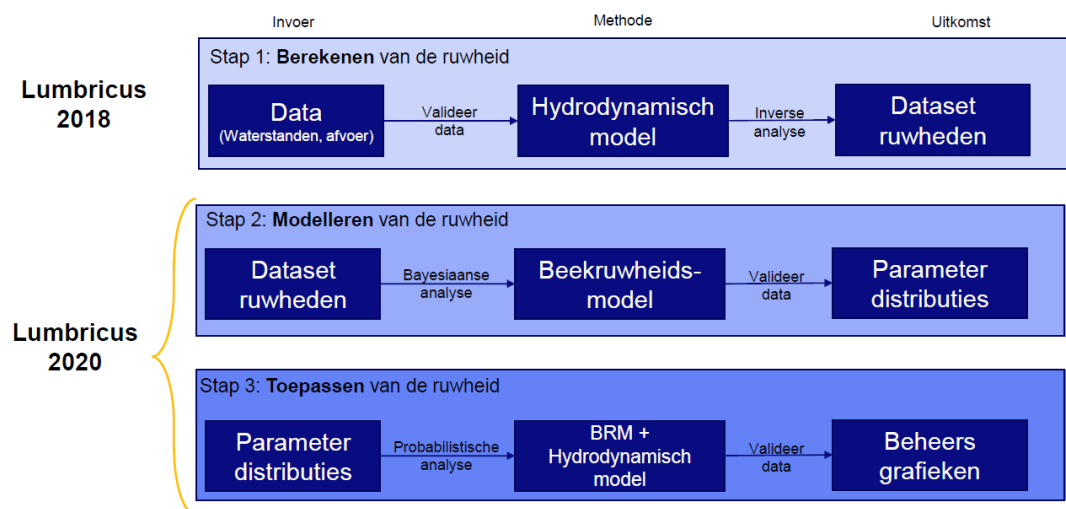
De opgetreden ruwheid kan teruggerekend worden met een stromingsmodel. Deze ruwheid wordt uitgedrukt in de Manning coëfficiënt ($\text{sm}^{-1/3}$). Deze stap wordt in detail beschreven in paragraaf 2.3.3. Hiervan wordt deels data gebruikt uit Lumbricus 2018, aangevuld met nieuwe data.

Stap 2: Het modelleren van de opgetreden ruwheid

De volgende stap is het ontwikkelen van het 'beekruwheidsmodel', op basis van de in stap 1 gegenereerde dataset. Dit doen wij met een Bayesiaanse (probabilistische) aanpak. Dit wordt nader beschreven in paragraaf 2.3.4.5

Stap 3: Het toepassen van het ruwheidsmodel

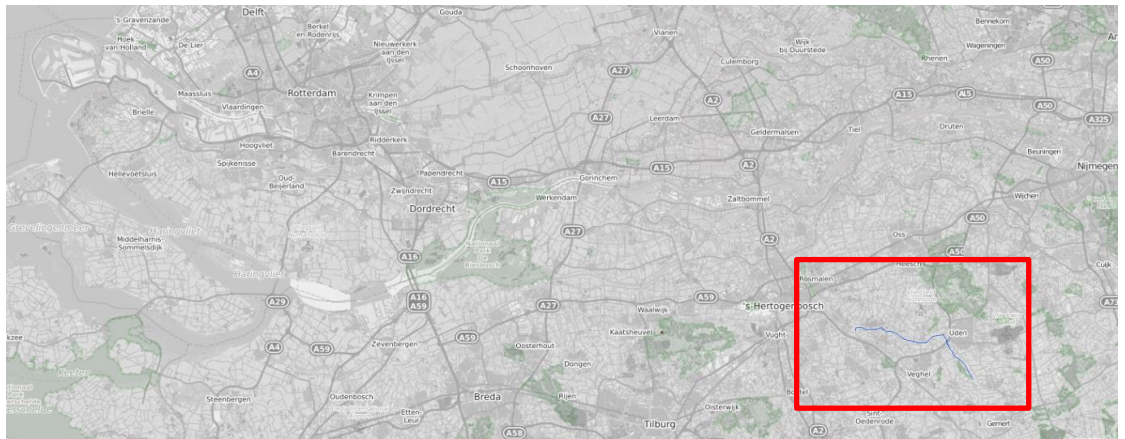
We beschrijven twee toepassingen van het model: (1) voor gebruik in operationele voorspelling en (2) voor gebruik in evaluatie van de effectiviteit van het maaibeleid. Hierbij gaan we ook in op het gebruik van een D-HYDRO surrogaatmodel in plaats van een volledig stromingsmodel (paragraaf 2.3.5).



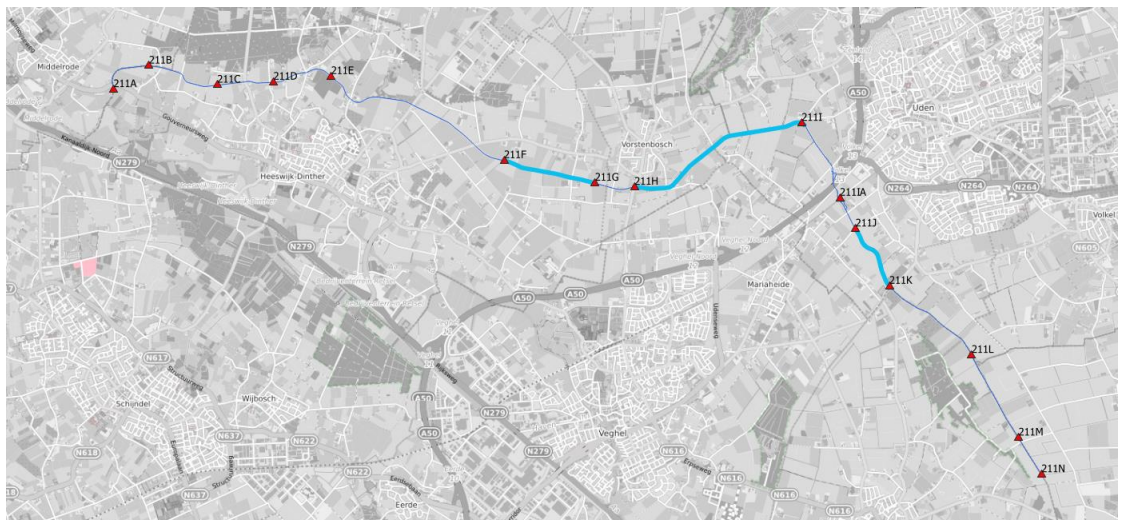
Figuur 2.1 De algemene aanpak, waarin is aangegeven hoe wordt verder gebouwd op de resultaten

2.3.2 Data en studiegebied

Het studiegebied omvat drie stuwpannen in de Leijgraaf (Figuur 2.2;Figuur 2.3). Voor deze pannen zijn afvoeren en peilen aangeleverd vanaf 2005, en is een SOBEK stromingsmodel beschikbaar. De Leijgraaf is een gegraven watergang in Noord-Brabant met een gemiddelde afvoer van ongeveer $0.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en een typische piekafvoer van $2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De watergang is niet vrij afstromend; de waterstand wordt op peil gehouden door een serie stuwen. De stuwpannen hebben een lengte variërend van 600 m (211H-211G) tot 3300 m (211F-211E).



Figuur 2.2 De Leijgraaf ligt ten zuid-oosten van 's Hertogenbosch



Figuur 2.3 De Leijgraaf is opgedeeld in 14 verschillende stuwpanden. De drie stuwpanden die nader worden bestudeerd zijn in dikke lijnen aangegeven.

2.3.3 Het berekenen van ruwheid

Ruwheid is een maat voor de weerstand die water ondervindt tijdens stroming. Een veelgebruikte maat voor ruwheid is de Manning coëfficiënt n . De zgn. “wet van Manning” beschrijft de relatie tussen afvoer en waterdiepte bij uniforme, stationaire stroming:

$$Q = \frac{A(d)d^{\frac{1}{6}}}{n} \sqrt{R(d)S_b}$$

Met afvoer Q (m^3s^{-1}), doorstroomoppervlakte A (m^2), waterdiepte d (m), hydraulische straal R (m), bodemverhang S_b (m/m) en waterdiepte d (m). Deze wet is niet toepasbaar in gestuwde panden, waar de waterstand niet alleen afhankelijk is van de ruwheid, afvoer en het dwarsprofiel, maar ook van de benedenstroomse klepstand.

Daarom gebruiken wij het softwarepakket D-Hydro om met het ééndimensionale SOBEK 3 stromingsmodel terug te rekenen wat de ruwheid is bij een gegeven afvoer en een gegeven benedenstroomse waterstand. Dit wordt gedaan per stuwpand. Om duidelijk te krijgen welke onafhankelijke variabelen de ruwheid kunnen beïnvloeden wordt deze berekende ruwheid naast meteorologische variabelen (bv. globale straling, zonnenschijnduur) gelegd.

2.3.4 Het beekruwheidsmodel

2.3.4.1 Algemene beschrijving

We definiëren een algemeen model dat de ruwheid beschrijft in termen van invoervariabelen θ en een foutmodel ϵ :

$$n = f(\theta) + \epsilon$$

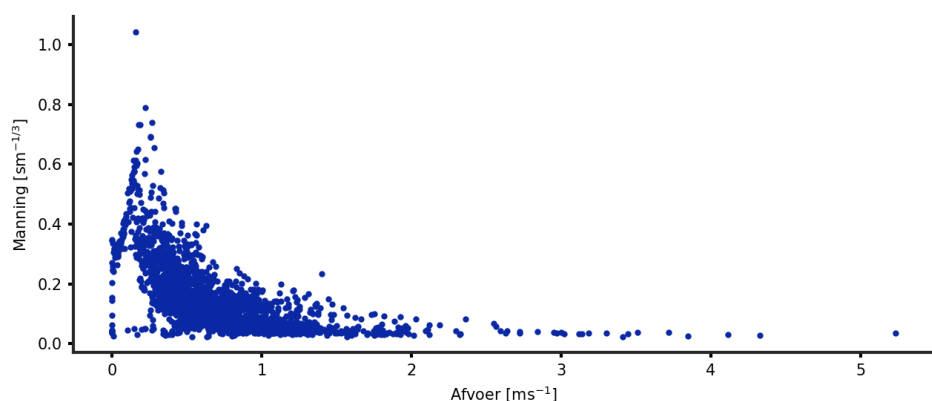
Dit model beschrijft dat de ruwheid n (uitgedrukt in Manning) wordt beschreven door het (nog niet bekende) model f en een (onbekende) fout ϵ . Om hier een bruikbaar model van te maken moeten we een aanname doen voor beide modellen. Voor het foutmodel nemen we aan dat het restant tussen f en de geobserveerde ruwheid normaal verdeeld is, maar dat de fout schaalt met de ruwheid. Hiermee wordt bovenstaande uitdrukken omgeschreven naar:

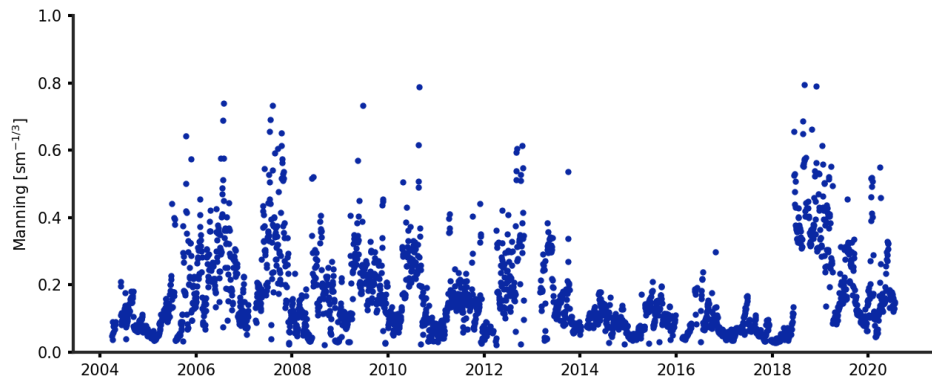
$$n \sim N(f(\theta), f(\theta)\zeta)$$

Deze vergelijking zegt dat de ruwheid n getrokken wordt ($\sim$) uit een normaalverdeling (N) met een gemiddelde van $f(\theta)$ en een standaardafwijking van $f(\theta)\zeta$.

De volgende stap is om te bepalen hoe $f(\theta)$ eruit ziet. In een compleet data-gebaseerde aanpak kan ook de vorm van het model worden bepaald door de data – bijvoorbeeld door een regressie-model, een neurale netwerk of andere algoritmes. In onze aanpak baseren we de vorm van het model op literatuur. Het voordeel hiervan is dat we het model hiermee bepaalde beperkingen opleggen waardoor het minder data nodig heeft om getraind te worden en bij extrapolatie een hogere voorspellingswaarde heeft.

In de analyse van de data zagen we een sterke afhankelijkheid tussen de ruwheid, tijd in het jaar en de afvoer (figuur 4). We hebben hierop een literatuuronderzoek uitgevoerd naar bekende relaties in de volgende paragraaf.





Figuur 2.4 De ruwheid (uitgedrukt in waarde Manning) varieert seizoensmatig door de tijd (beneden) en is sterk afhankelijk van opgetreden afvoer (boven).

2.3.4.2 Literatuuronderzoek: afvoerafhankelijkheid

Een veelgebruikte formule om de relatie tussen afvoer en vegetatie te beschrijven is de wet van Baptist et al. (2007). Deze formule heeft een sterke voorspellende kracht in lab-opstellingen met stijve vegetatie (bv. houtachtige soorten) maar werkt minder goed met planten die meebuigen met de stroming. Verschoren et al. (2016) hebben een aanpassing van deze methode voorgesteld om meebuigen te modelleren. Een algemenere manier om het stroomlijnen van vegetatie te modelleren is gegeven door Västilä & Järvelä (2017). Deze formules zijn gebaseerd op lab-proeven met specifieke parameters per plantensoort. Deze formules zijn vooral getest op oevervegetatie.

Een eenvoudige formule voor waterplanten in watergangen is voorgesteld door Rhee et al. (2008). Empirische ondersteuning voor deze formule op basis van veldproeven in Italiaanse watergangen die qua grootte vergelijkbaar zijn met de Leijgraaf wordt beschreven door Errico et al. (2018). Rhee et al. (2008) stelden de volgende formule voor:

$$n = \frac{a}{\bar{u}R} + b$$

Waarin a , b plant-specifieke parameters zijn, $\bar{u}$ de dwarsprofielgemiddelde stroomsnelheid en R de hydraulische straal (m). De formule van Rhee kan worden omgeschreven naar:

$$n = \frac{a}{\bar{u}AP^{-1}} + b$$

Met natte omtrek P (m) en dwarsprofieloppervlakte A (m²), dat verder kan worden vereenvoudigd tot:

$$n = \frac{a^*(d)}{Q} + b$$

Met afvoer Q (m³s⁻¹) en waterdiepte d afhankelijke parameter a^* . Voor een trapezevormig dwarsprofiel is de relatie tussen a en a^* beschreven door:

$$a^* = a(B + 2 \sin^{-1} \xi)$$

Met bodembreedte B (m) en taludhoek ξ . Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de definitie van natte-omtrek in een sterk begroeide beek niet eenvoudig bepaald kan worden. Daarom is het voor praktische toepassingen beter om de parameters a^* en b te zien als onbekende parameters.

2.3.4.3 Literatuuronderzoek: vegetatiegroeimodellen

Een van de meest gebruikte groeimodellen is het logistisch model:

$$\frac{dP}{dt} = rP(1 - PK^{-1})$$

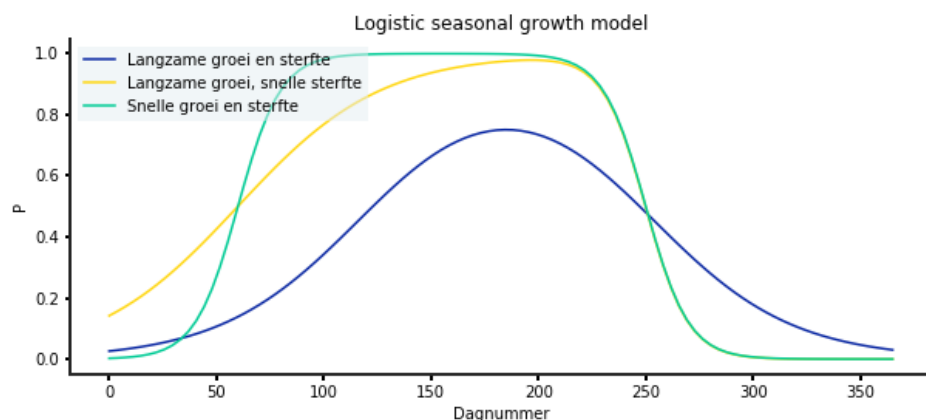
Waarin de populatie-parameter P groeit door de tijd t met groeisnelheid r tot een maximum van K . In bovenstaande vorm wordt de verandering in P beschreven. Als deze formule direct in P wordt uitgedrukt schrijft men:

$$P = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_m)}}$$

Waarin de extra parameter t_m de dag waarop de maximale groei plaatsvindt beschrijft. Bovenstaande formule beschrijft enkel groei. In werkelijkheid kan ook sterfte (mortaliteit) een rol spelen. Camac et al. (2018) beschrijven mortaliteit met een inverse groeimodel. Met andere woorden: sterfte volgt dezelfde vorm als groei, maar met een eigen snelheid. Een gecombineerd groei-sterfte model kan worden gebouwd door beide formules te combineren. Men krijgt dan:

$$P = K \left((1 + e^{-r_g(t-t_m)})^{-1} + (1 + e^{-r_m(t-t_m)})^{-1} - 1 \right)$$

Waarin de onderschriften verwijzen naar groei (g) of mortaliteit (m). Figuur 2.5 geeft een voorbeeld van een gecombineerd groei-sterftemodel met verschillende groei- en sterftecijfers.

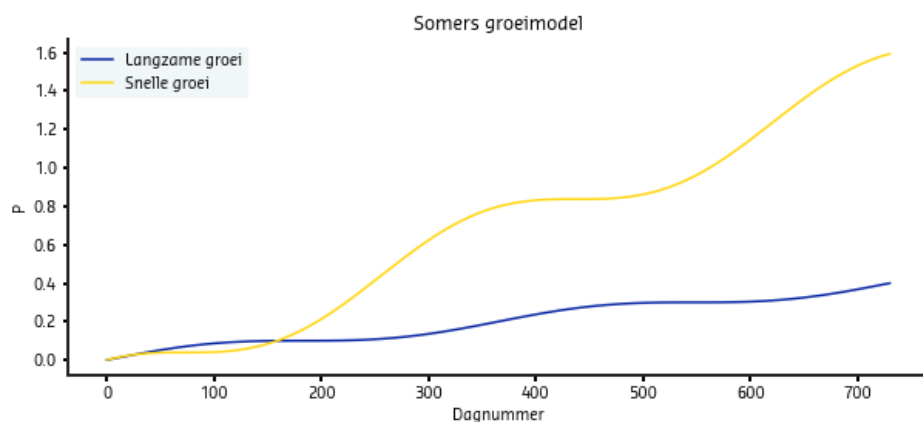


Figuur 2.5 Voorbeeld van een gecombineerd groei-sterftemodel, met verschillende groei- en sterftecijfers.

Een alternatief groeimodel is het zgn. Somers model (Garcia-Berthou et al., 2012), die een met trigonometrische functies een seizoenssignaal modelleerden. Hun model is:

$$P = P_{\infty} (1 - e^{-K(t-t_0)-S(t)+S(t_0)})$$

Waarin de S functies $S(x) = \left(\frac{CK}{2\pi}\right) \sin(2\pi(x - t_s))$ seizoensgebonden periodes van groei en stagnatie modelleren. Deze formule voegt aan aantal extra parameters toe die te maken hebben met het asymptotisch gedrag (P_∞) en de amplitude van de groei (C). Dit groeimodel is ontwikkeld voor vaste vegetatie (*perennials*), die de winter overleven. Het model blijkt minder goed toepasbaar te zijn voor eenjarigen (*annuals*), omdat een jaarlijkse reset, waarbij (vrijwel) alle vegetatie wordt verwijderd, zich niet goed laat modelleren (Figuur 2.6).



Figuur 2.6 Voorbeeld van een gecombineerd groei-sterftemodel, met verschillende groei- en sterftecijfers.

2.3.4.4 De definitie van het beekruwheidsmodel

Reflecterend op groeimodellen in literatuur, is een bijkomende uitdaging in beheerde beken dat er geen ononderbroken groei plaats vindt. Met enige regelmaat wordt gemaaid, waardoor de populatieparameter (P) plotseling wordt teruggebracht. Daarna vindt er weer groei plaats, tenzij de maaibeurt zo laat in het jaar plaatsvindt dat hergroei niet meer optreedt. Het kan niet worden aangenomen dat de groeisnelheid constant is door het jaar door verschillen in abiotische factoren (zonneshijn, regenval), biotische factoren (aanwezigheid van nutriënten) en de mogelijkheid dat na een maaibeurt andere soorten domineren.

Om tot een gecombineerd model te komen nemen wij aan dat (a) alle afvoerafhankelijkheid van de Manning ruwheid veroorzaakt wordt door (water)planten en dat (b) dat alle 'mortaliteit' door menselijk ingrijpen (maaieren) wordt veroorzaakt. Hiermee komen we tot het volgende ruwheidsmodel

$$f(\theta) = \frac{\alpha^*}{Q} + n_b$$

Met $f(\theta)$ de berekende Manning coëfficiënt is [$\text{sm}^{-1/3}$], basisruwheid n_b de debiet- en vegetatieonafhankelijke ruwheid [$\text{sm}^{-1/3}$], afvoer Q [m^3s^{-1}] en vegetatieparameter α^* [$\text{m}^{-1/9}$]:

$$\alpha^* = \frac{\alpha_{max}}{1 + e^{-r(t-t_m)}}$$

Met maximale waarde van de vegetatieparameter α_{max} [$\text{m}^{-1/9}$], groeisnelheid r [dag^{-1}], tijdsparameter t [dag] en dag waarop de maximale groei plaatsvindt t_m [dag]. In dit model is $f(\theta)$ een aangepaste versie van de Wet van Rhee (zie 2.3.4.24.2), waarin de parameter a^* vervangen is door een logistisch groeimodel.

Dit model heeft de volgende kenmerken:

- Als er geen vegetatie is ($\alpha^* = 0$), is de ruwheid gelijk aan n_b
- Bij lage afvoer neemt de ruwheid toe, bij hoge afvoer neemt de ruwheid af. De ruwheid wordt nooit lager dan n_b .
- Als er geen afvoer is $Q \rightarrow 0$ gaat de ruwheid naar oneindig hoog

2.3.4.5 Het updaten van parameterwaarden

Het beekruwheidsmodel bestaat uit verschillende parameters waarvoor een waarde moet worden bepaald, namelijk de basisruwheid n_b , de groeisnelheid r , het tijdstip van maximale groei t_m en de grootte van de afwijking ς . Omdat we werken met een probabilistisch model (zie 2.3.4.1), kiezen we voor deze waarden geen enkele waarde (ook wel: deterministische variabele), maar een verdeling (ook wel: stochastische variabele).

We onderscheiden twee types verdelingen: de verdeling voordat we naar de metingen kijken (de *priore verdeling*) en de verdeling nadat we naar de metingen hebben gekeken (de *posteriore verdeling*).

Om van de priore naar de posteriore verdeling te komen, gebruiken we een Markov Chain Monte Carlo (MCMC) algoritme. De MCMC methode loopt op een slimme manier¹ door de mogelijke combinaties van parameterwaarden en bepaalt voor elke combinatie hoe goed de overeenkomst is met de metingen. Doordat combinaties die goed werken vaker worden aangestipt, kan uit het pad dat het algoritme heeft afgelegd bepaald worden welke waarden per parameter leidden tot een goed resultaat. Dat is de posteriore verdeling. Deze manier van bepalen komt uit de Bayesiaanse statistiek, en wordt ook wel het 'updaten' genoemd.

Een belangrijk kenmerk van de MCMC methode is dat de posteriore verdeling bij weinig metingen nog erg lijkt op de priore verdeling, die men meestal zo kiest dat het alle plausible mogelijkheden beslaat. De verdeling is dan erg breed. Men zegt dan ook wel dat de modelonzekerheid groot is: we kunnen nog weinig zeggen over de waarden van de parameters. Hoe meer (informatieve) metingen er zijn, hoe kleiner de modelonzekerheid wordt. In het uiterste geval, wanneer het aantal metingen zeer groot is, kunnen de posteriore verdelingen zo smal zijn dat ze te benaderen zijn met een enkele waarde. De modelonzekerheid is dan vrijwel nul.

Wat dan overblijft, is de voorspelonzekerheid. Dit is de fout tussen model en meting, wanneer er geen modelonzekerheid is. Dit noemen we ook wel het residu, of de onverklaarde fout. De voorspelonzekerheid kan enkel verkleind worden door een beter model te maken.

2.3.4.6 Het bepalen van momenten van menselijk ingrijpen

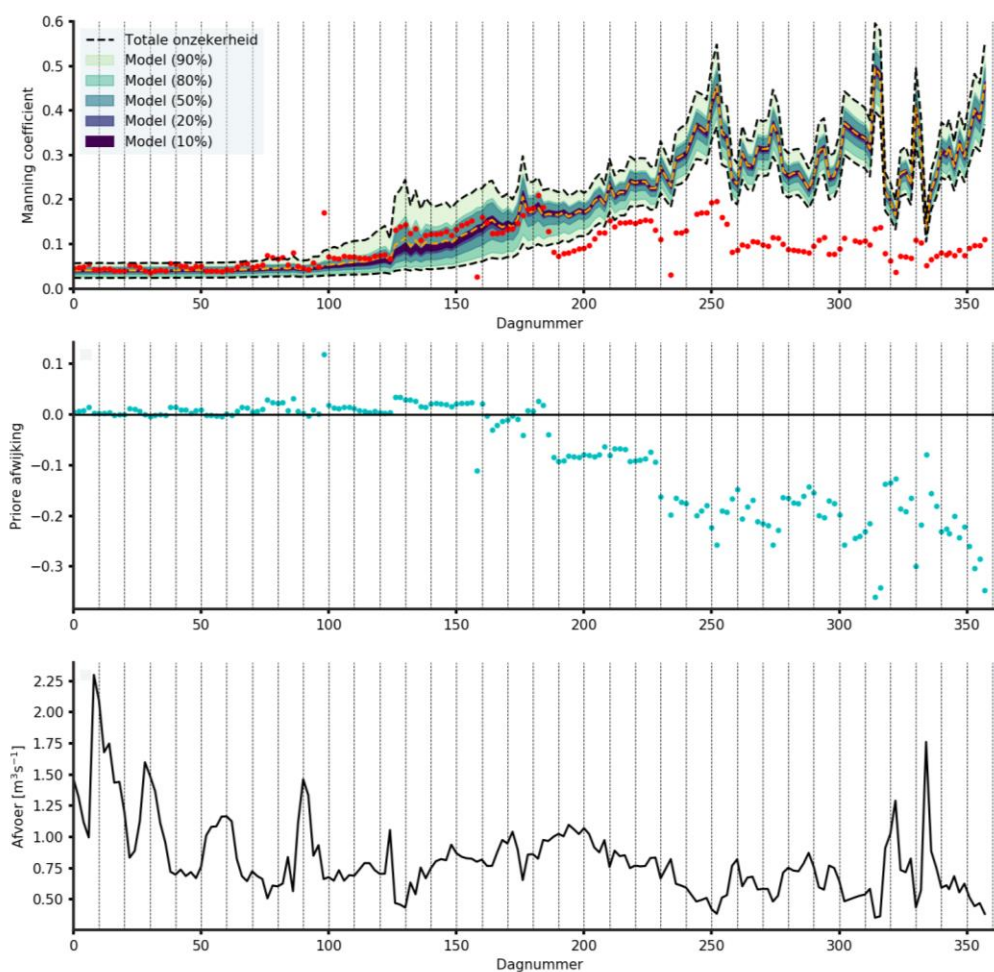
Het effect van menselijk ingrijpen – d.w.z. het maaien van waterplanten – is een afname in de ruwheid. Bij gelijke afvoer leidt dat ook tot een afname in de waterstanden. Omdat menselijk ingrijpen niet gemodelleerd wordt in het beekruwheidsmodel, verwachten wij dat een plotseling afname van de ruwheid die *niet* wordt voorspeld door het beekruwheidsmodel, veroorzaakt wordt door menselijk ingrijpen.

¹ De slimme methode die wij gebruiken heet NUTS (no-u-turn-sampler), een variant op een Hamiltonian step.

Om die momenten van menselijk ingrijpen vast te stellen, leggen wij de voorspellingen van het beekruwheidsmodel met de priore parameterverdelingen (dus: ongekalibreerd) naast de gemeten ruwheid van het systeem. Wanneer een plotselinge daling optreedt die lang aanhoudt, merken wij dat aan als menselijk ingrijpen. Plotselinge afwijkingen die niet aanhouden worden als uitschieters behandeld.

Een voorbeeld is geschetst in Figuur 2.7. Op basis dit figuur stellen we vast dat de ruwheidsdaling op dagnummer 162 (12 juni) veroorzaakt wordt door menselijk ingrijpen.

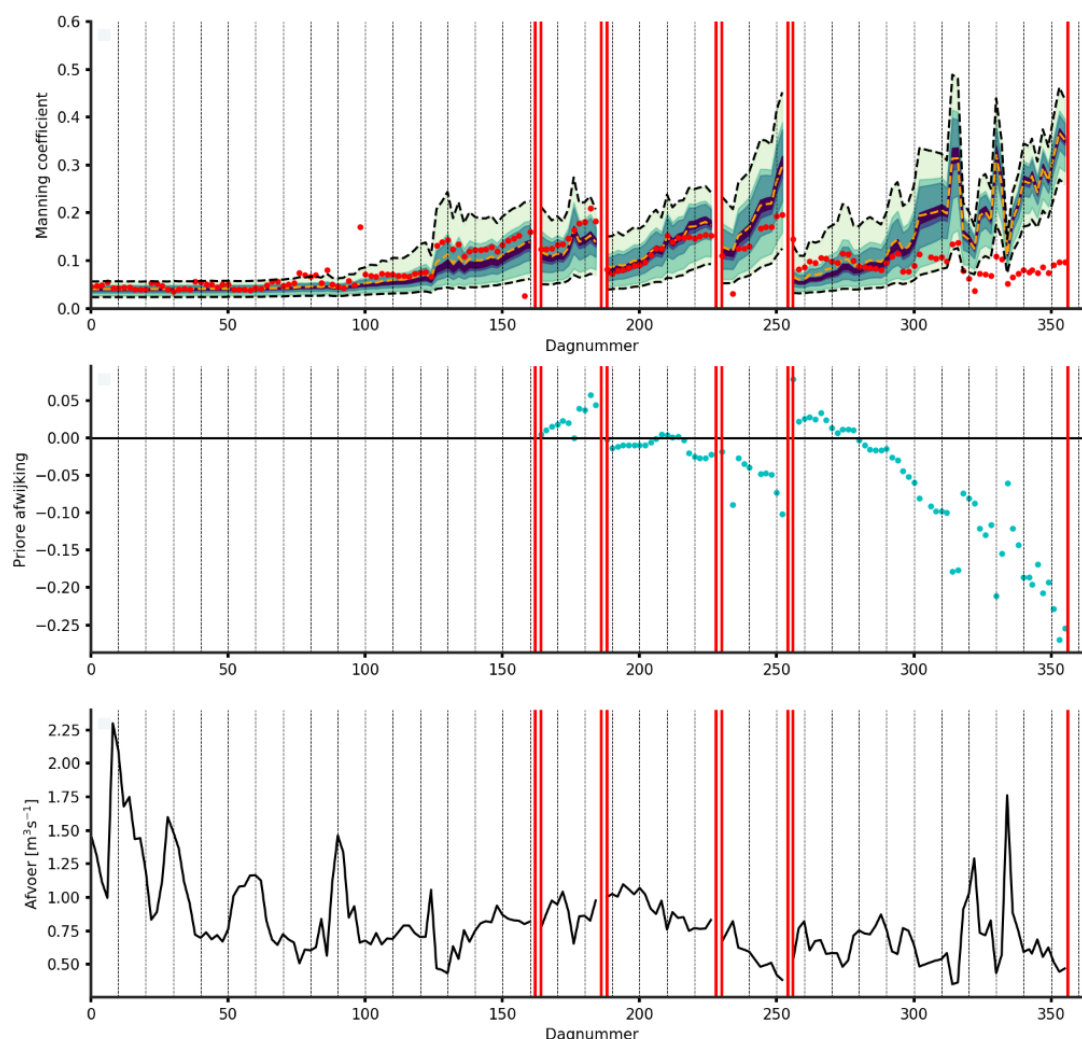
Een kanttekening bij deze aanpak is dat we zeer waarschijnlijk niet *alle* maaimomenten waarnemen. Het is goed mogelijk dat er in de aanloop naar 12 juni onderhoud heeft plaatsgevonden. Dit heeft echter niet overtuigend geleid tot een (blijvende) afname in de ruwheid. Daarom spreken we hier liever over de maaimomenten die wij zien als de *effectieve maaimomenten*, d.w.z. de maaimomenten die aantoonbaar invloed hebben gehad op de peilen.



Figuur 2.7 Voorbeeld van het aanmerken van menselijk ingrijpen. De data in dit voorbeeld is van het stuwpannd 211I voor het jaar 2015. Rond dagnummer 162 is een plotseling afname van de ruwheid te zien die niet voorspeld wordt door het model. Wij zien dit als een maaimoment (menselijk ingrijpen). De modelvoorspellingen van de ruwheid zijn op basis van priore (ongekalibreerde) parameterverdeling. Hierdoor is de onzekerheid vrij groot. Top: de gemeten en gemodelleerde ruwheden. Midden: de afwijking tussen de gemeten ruwheden en het gemiddelde van de gemodelleerde ruwheden. Beneden: de gemeten afvoer.

2.3.4.7 Het modelleren van menselijk ingrijpen

Op basis van de methodiek beschreven in 2.3.4.6 wordt ieder jaar in periodes onderverdeeld. Elke periode wordt begrensd door een jaargrens, of door een moment van menselijk ingrijpen. Voor iedere periode afzonderlijk worden parameterwaarden berekend. In het voorbeeld dat wordt gegeven in Figuur 2.8 zijn vier momenten van menselijk ingrepen vastgesteld, wat leidt tot vijf afzonderlijke sets van parameters.



Figuur 2.8 De periodes tussen menselijk ingrepen zijn aangemerkt met rode strepen. In dit voorbeeld (2111, 2015) hebben we vijf periodes, door vier momenten van menselijk ingrijpen. Top: de gemeten en gemodelleerde ruwheiden. Midden: de afwijking tussen de gemeten ruwheiden en het gemiddelde van de gemodelleerde ruwheiden. Beneden: de gemeten afvoer

2.3.5 Toepassing van het ruwheidsmodel

Het beekruwheidsmodel is een probabilistisch model, en hierdoor niet direct toepasbaar in gangbare hydraulische software. Hieronder schetsen we drie manieren waarop wij het model gebruiken om kennis op te doen uit de aangeleverde data.

2.3.5.1 Parameter analyse

De parameters van het beekruwheidsmodel zijn vegetatieparameter α_{max} [$\text{m}^{-1/9}$], groeisnelheid r [dag^{-1}], en de dag waarop de maximale groei plaatsvindt t_m [dag]. Deze parameters zijn fysisch interessant:

- α_{max} geeft aan wat de maximale invloed van de vegetatie is op de weerstand, als de vegetatie helemaal door kan groeien
- r is de groeisnelheid van de ruwheid. Aan de hand hiervan kan worden ingeschat hoe lang het duurt voordat de maximale ruwheid is bereikt. Ook is het interessant om te zien hoe de groeisnelheid over het jaar verloopt.
- t_m is de dag waarop de maximale groei van de vegetatieruwheid plaatsvindt. Deze is met name interessant in de 1^e groeiperiode. Door de waarden van r te vergelijken over de jaren, kan men jaren onderscheiden tussen vroege en latere jaren.

2.3.5.2 Voorspelling

Het model kan worden gebruikt om een voorspelling te doen over toekomstige ontwikkeling van de ruwheid. Hierbij moet wel een keus worden gemaakt over de te kiezen parameterwaarden. Een voorbeeld van dit gebruik is om vanaf een periode, waarvoor de parameters zijn berekend (zie 2.3.4.5), verder te rekenen – bijvoorbeeld om te zien wat de verwachte ruwheid is 10 dagen in de toekomst.

Omdat de parameterwaarden trekkingen zijn uit kansverdelingen, is deze voorspelling van de ruwheid zelf ook een kansverdeling. Deze verdeling noemt men ook wel de posterioore voorspelde verdeling (*posterior predictive distribution*). Deze distributie moet numeriek berekend worden, door het model te draaien met allerlei combinatie van mogelijke parameterwaarden en invoerwaarden.

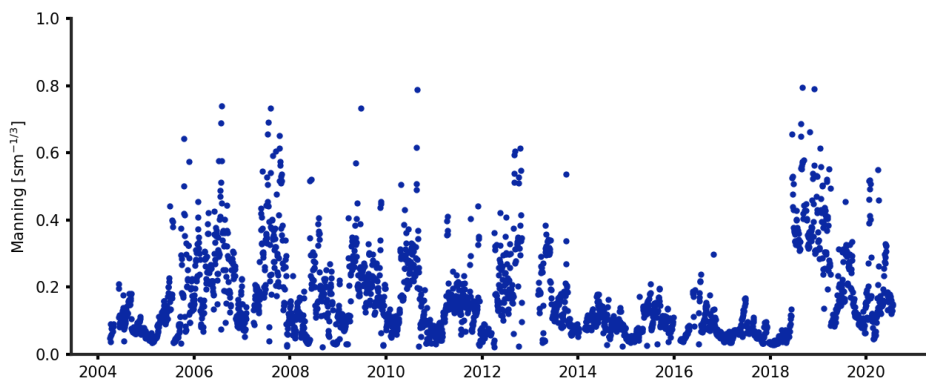
Hierdoor krijgt men een verdeling van mogelijke ruwheden, die vervolgens aan het hydraulische model kunnen worden gegeven om het effect op waterstanden te voorspellen. Dit kan op twee manieren:

- Rekenen met de verwachtingswaarde van de ruwheid (d.w.z. het gemiddelde van de voorspelde ruwheden). Hiermee rekent men de verwachte waterstand uit met de verwachte ruwheid.
- Rekenen met de volledige verdeling. Hierbij wordt de modelonzekerheid in de voorspelde ruwheid meegenomen. Het nadeel van deze aanpak is dat dit heel veel hydraulische modelberekeningen vraagt. In Appendix A beschrijven we een manier om deze rekentijd drastisch te verlagen.

2.4 Resultaat

2.4.1 Berekende ruwheid

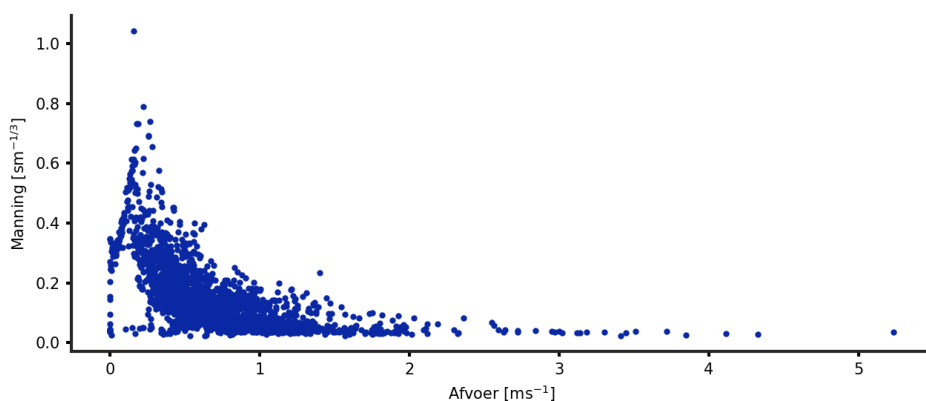
De resultaten voor stuwpannd 211I zijn weergegeven in Figuur 2.9. Stuwpannd 211I laat van de drie onderzochte stuwpannden de duidelijkste seizoensdynamiek zien, wat duidt op een sterke invloed van vegetatie op het peil. De figuren van de andere panden zijn als bijlage bij dit rapport gevoegd.



Figuur 2.9. De berekende ruwheid in het stuwpannd 211I

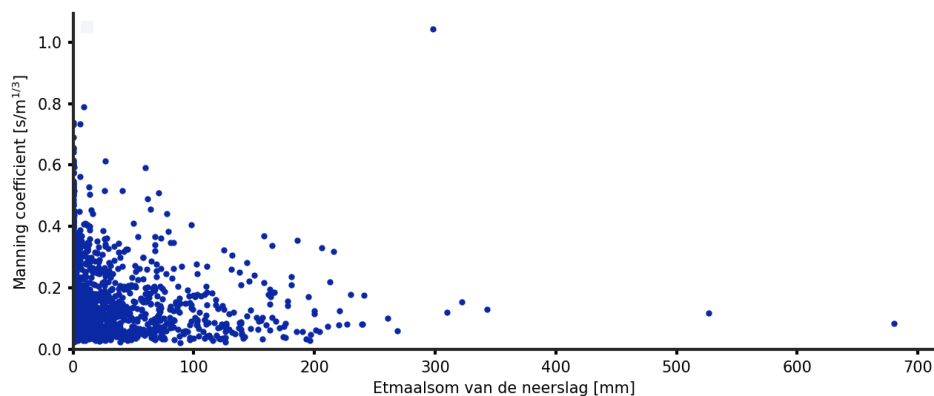
In deze figuur is een duidelijk seizoen signaal te zien, met hogere ruwheden in de zomer. Dit hoeft niet per se te komen door vegetatiegroei, omdat ook andere factoren de ruwheid kunnen beïnvloeden die ook seizoensmatig gedrag vertonen. In Figuur 2.9 is bijvoorbeeld te zien dat de afvoer en de Manning n een omgekeerde evenredig verband vertonen. Bij hoge afvoer is de ruwheid aanzienlijk lager dan bij lage afvoer.

De hoge ruwheden die plotseling in de zomer van 2018 optreden, worden veroorzaakt door de extreme droogte. Hierdoor viel de afvoer terug naar vrijwel nul. Wij zien daarom de ruwheden die in die periode berekend zijn als niet betrouwbaar – zonder afvoer is ruwheid geen betekenisvol begrip.



Figuur 2.10 De berekende ruwheid in het stuwpannd 211I

De berekende ruwheiden zijn ook vergeleken met meteorologische waarden van KNMI station Volkel. Er is gekeken naar zonnescijnduur (SQ/SP), globale straling (Q), etmaalsom van de neerslag (RH) en de referentiegewasverdamping (EV24). Van deze variabelen heeft enkel de etmaalsom van de neerslag een directe correlatie met de ruwheid – maar dit is te interpreteren als een afgeleide afhankelijkheid: hogere neerslag leidt tot hogere afvoer (Figuur 2.11).



Figuur 2.11 Relatie tussen de Manning n en de etmaalsom van de neerslag (KNMI station Volkel)

2.4.2 Het beekruwheidsmodel

2.4.2.1 Momenten van menselijk ingrijpen

In Tabel 2.1 Overzicht van waargenomen momenten die de ruwheid effectief hebben verlaagd, is een overzicht gegeven van de datums in de drie panden, waarop een verlaging van de ruwheid heeft plaatsgevonden die niet door het beekruwheidsmodel kon worden verklaard, en die dus wordt toegeschreven aan menselijk ingrijpen. We zien dat veel van de momenten overeenkomen tussen de panden. In de eerste helft van juli 2008 wordt er menselijk ingrijpen waargenomen in alle drie de stuwpannen. Omdat dit overzicht is gebaseerd op handmatige selectie, en bovendien enkel die afwijkingen meeneemt die een effect hadden op de ruwheid, is deze lijst geen volledig overzicht van alle maaimomenten. We hebben hier maaimomenten opgenomen tot en met 2017. Door de droogte en beperkte afvoer bleken 2018 en 2019 te zeer afwijkende jaren.

Tabel 2.1 Overzicht van waargenomen momenten die de ruwheid effectief hebben verlaagd.

	211I	211G	211K
2005	22-Jul-2005	28-Jul-2005	10-Jun-2005
2006		24-Jun-2006	10-Jun-2006
	25-Aug-2006		
2007		30-Jul-2007	30-Jul-2007
2008			09-Jun-2008
	07-Jul-2008	11-Jul-2008	11-Jul-2008
		12-Aug-2008	24-Aug-2008
2009			01-May-2009

	21-May-2009		15-May-2009
		30-Jul-2009	18-Jun-2009
2010			21-Apr-2010
	02-Jun-2010	30-Jun-2010	02-Jun-2010
	30-Jul-2010		
2011	22-Jun-2011	20-Jun-2011	09-May-2011
			02-Jun-2011
			14-Jul-2011
			28-Sep-2011
2012			20-Apr-2012
	29-Jun-2012	29-Jun-2012	25-Jun-2012
			12-Aug-2012
2013		20-Jul-2013	20-Jul-2013
2014	15-Jun-2014	20-Jun-2014	15-May-2014
	19-Aug-2014	19-Aug-2014	
	23-Sep-2014		
2015	12-Jun-2015	12-Jun-2015	27-May-2015
	06-Jul-2015		
	17-Aug-2015	19-Aug-2015	13-Aug-2015
	12-Sep-2015		
2016			30-May-2016
	19-Jul-2016	19-Jul-2016	11-Jul-2016
	07-Sep-2016		
2017	28-Jun-2017		26-Jun-2017
	29-Aug-2017		

2.4.2.2 Updaten van de parameterwaarden

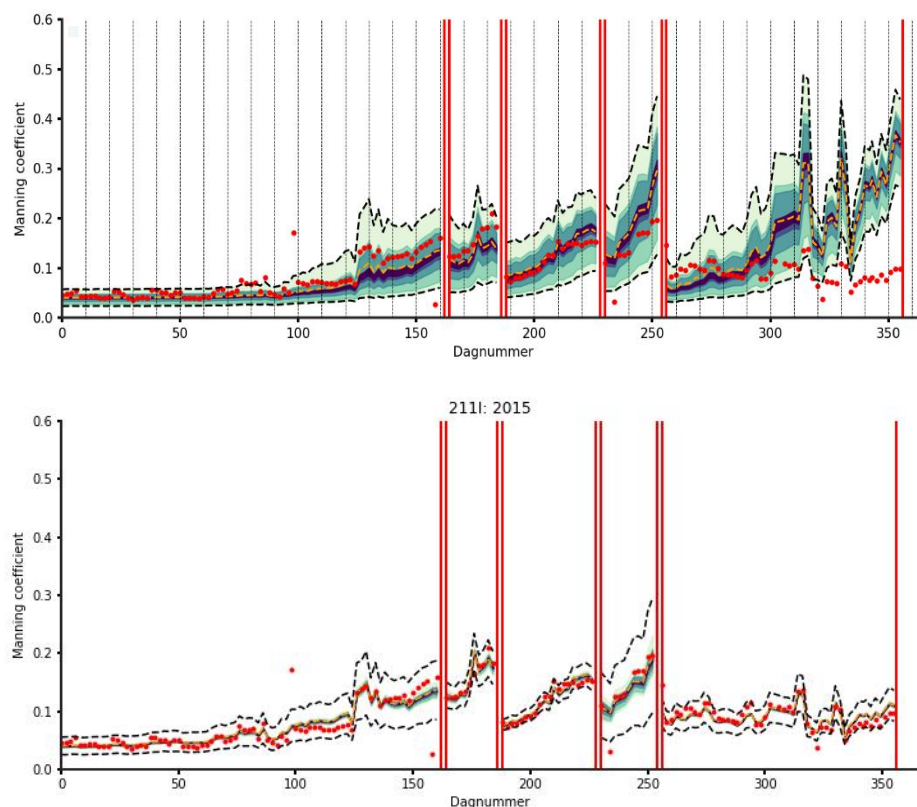
De parameterwaarden zijn geupdate door vooraannames (priors verdelingen) te confronteren met metingen. De keuze voor de priors verdelingen zijn hierbij erg belangrijk: bij weinig metingen (bijvoorbeeld, door weinig tijd tussen twee maaimomenten) zal de priors verdeling weinig geüpdatet worden. Na een set verkennende berekeningen hebben wij gekozen voor uniforme priors verdelingen met de begrenzingen volgens Tabel 2.2. De verkennende berekeningen dienden om vast te stellen in welk bereik de vermoedelijke oplossing gevonden gaat worden. Hiermee kan een grens worden gesteld aan de mogelijke waarden – zonder grens kan het algoritme mogelijk geen oplossing vinden.

Voor de basisruwheid n_b hebben wij aan aanvullende aanname gedaan dat de basisruwheid van alle periodes na de eerste van het jaar, gelijk zijn aan de eerste. De reden hiervoor, is dat bij kleine periodes vaak niet genoeg informatie aanwezig is om de basisruwheid op te bepalen. De eerste periode heeft daarentegen altijd een periode waarin er geen vegetatie aanwezig is (de eerste paar maanden van het jaar).

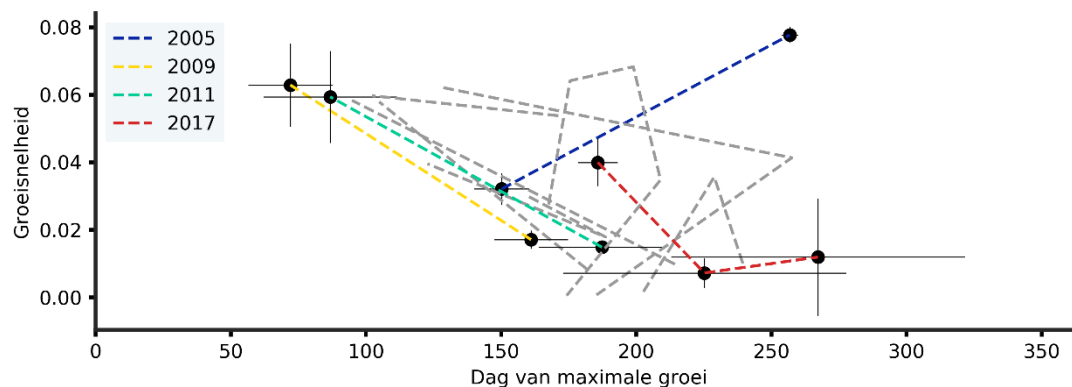
Tabel 2.2 Onder- en bovengrens van de uniforme priore verdelingen

Parameter	Ondergrens	Bovengrens
α_{max}	$0.05 \text{ m}^{-1/9}$	$0.25 \text{ m}^{-1/9}$
r	0.00 dag^{-1}	0.08 dag^{-1}
t_{max}	50	300
n_b (1 ^e periode)	$0.01 \text{ sm}^{-1/3}$	$0.08 \text{ sm}^{-1/3}$

In Figuur 2.12 laten we zien wat het verschil is tussen het beekruwheidsmodel met priore verdeling, en na het updaten van de parameterwaarden. We zien dat het posteriore model (onderste figuur) de ruwheden goed volgt. Hoewel dit niets zegt over de voorspellende waarde van het model (dit zijn immers ‘gekalibreerde’ resultaten) en we leren hieruit wel dat het relatief eenvoudige beekruwheidsmodel voldoende verklarende waarde heeft.



Figuur 2.12 De priore (boven) en posteriore (beneden) verdelingen van het beekruwheidsmodel voor pand 2111, het jaar 2015. De rode punten zijn gemeten ruwheden. De zwarte stippellijnen geven de totale onzekerheid van het model, terwijl de gekleurde banden de modelonzekerheid weergeven.



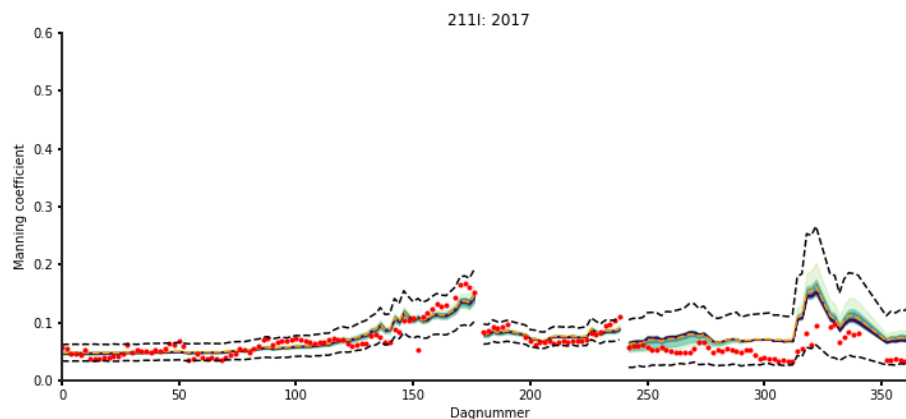
Figuur 2.13 Posteriore parameterwaarden voor het pand 211I, met vier uitgelichte jaren. De grijze lijnen zijn de overige jaren. Over het algemeen zien we dat de groeisnelheid (verticale as) afneemt met het tijdstip waarop maximale groei plaatsvindt (horizontale as). 2005 volgt hierin niet dezelfde trend.

Omdat de parameterwaarden zelf fysisch geïnterpreteerd kunnen worden, hebben we ze tegen elkaar uitgezet. In Figuur 2.13 hebben we de groeisnelheid vergeleken met de dag van de maximale groei. Elk zwart datapunt representeert een groeiperiode in een gegeven jaar. Deze figuur laat een aantal interessante zaken zien: ten eerste zien we dat voor de meeste jaren de groeisnelheid afneemt: hoe later de periode, hoe lager maximale groei is. Dit laat zien dat de vegetatieruwheid over het algemeen langzamer stijgt later in het jaar. Ten tweede zien we dat sommige jaren de maximale groei vroeg in het jaar valt, en sommige laat. Zo is 2011 opvallend vroeg (tussen 3 maart en 22 april), terwijl de ruwheid in 2017 opvallend laat piekt (tussen 28 juni en 3 juli).

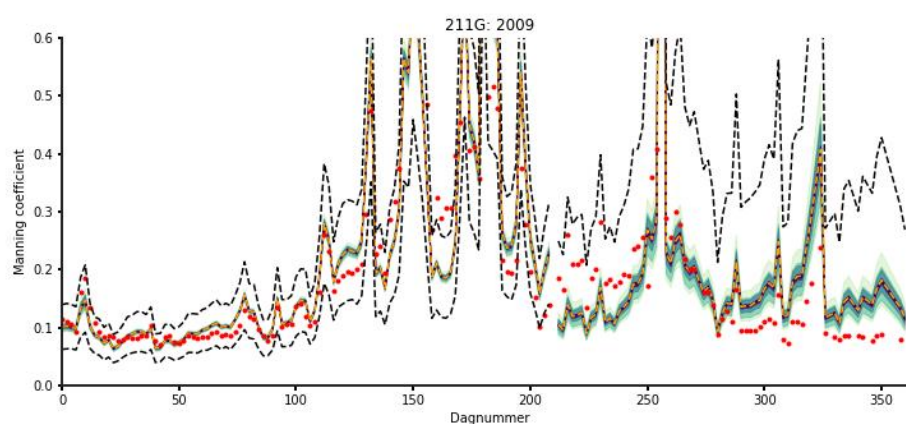
Voorzichtigheid is wel geboden bij de interpretatie van deze parameterwaarden: als er een hoge ruwheid wordt waargenomen, maar geen duidelijke groei, kan een hoge groeisnelheid vroeg in het jaar hiervoor compenseren. Dit is dus dan duidelijk niet fysisch. Bovendien zijn de resultaten voor de andere twee stuwpanden minder eenduidig.

2.4.3 Gevoeligheid van modelresultaten

Hoewel het ruwheidsmodel over het algemeen de waargenomen ruwheid goed beschrijft, zijn deze resultaten gevoelig voor aannames, de keuzes van de modelleur en de kwaliteit van de data. Een voorbeeld hiervan zijn de resultaten voor 211I in 2017 (Figuur 2.14). Hier zien we in het najaar de ruwheid afnemen, terwijl dat niet door het model wordt voorspeld. Dit zou kunnen komen door niet-gemodelleerde processen zoals natuurlijke mortaliteit. Helemaal aan het eind zien we bovendien de ruwheid plots afnemen. Dit kan komen door een winters maaimoment, die niet is opgenomen in de maaimomenten tabel. Een ander voorbeeld wordt gegeven in Figuur 2.15. Bij lage afvoeren gaat niet alleen de berekende ruwheid omhoog, maar neemt ook de gevoeligheid van de waterstand voor ruwheid sterk af. Hierdoor neemt de onzekerheid in de berekende ruwheid toe, waardoor het detecteren van de vegetatieafhankelijkheid ook moeilijker wordt. Een andere beperking in deze aanpak is dat er, doordat er gemaaid wordt, geen data is van een 'volgroeid systeem'. Er kan dus niet met zekerheid gezegd worden tot waar de ruwheid zal groeien – dit vloeit voort uit extrapolatie met het beekruwheidsmodel, waarin een centrale aanname is dat de ruwheidsgroei logistisch van aard is en dus een plafond heeft.



Figuur 2.14 De posteriore verdeling van 211I voor 2017. Het najaar wordt niet goed gemodelleerd door het model.



Figuur 2.15 De posteriore verdeling van 211G voor 2009. In dit jaar veroorzaakt lage afvoer in de periode na dag 140 voor grote schommelingen in de berekende ruwheid.

2.5 Toepassing

In deze paragraaf beschrijven we enkele toepassingen van het nieuwe beekruwheidsmodel die inzicht kunnen geven in het vegetatiebeheer van het Waterschap Aa en Maas.

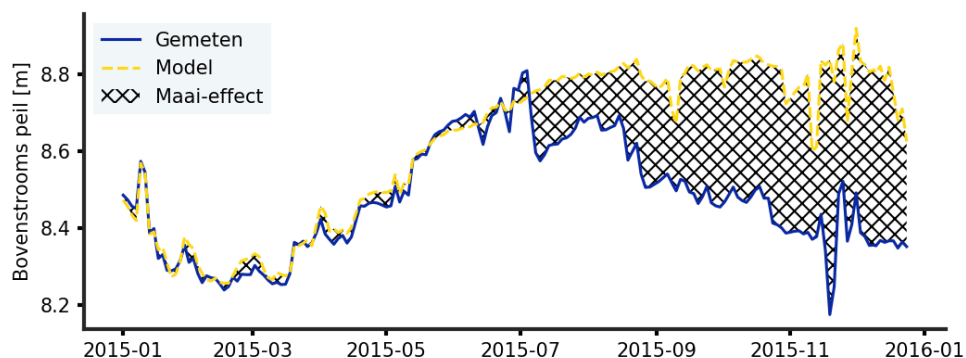
2.5.1 De effectiviteit van maaien

Tijdens deze studie werd duidelijk dat de ruwheid in watergangen niet beschreven kan worden met een groei-mortaliteitsmodel (zoals bijvoorbeeld Figuur 2.6), maar dat een 'onderbroken groei-model' nodig is. Door het model *niet* te onderbreken, maar door te rekenen met het scenario dat vegetatie door zou groeien, krijgen we een idee van het verwachte peil dat zou hebben opgetreden, als er niet was gemaaid. Voor deze berekeningen doen we de volgende versimpelingen:

- De opgetreden afvoer en benedenstroomse waterstand blijven onveranderd. In werkelijkheid kan zowel de afvoer (via beheer van de aanvoer) en benedenstroomse waterstand (door andere instellingen van de stuwkleppen en verhanglijneffecten) beïnvloed worden door een ruwer pand.
- We gebruiken een surrogaat hydraulisch model (zie appendix A) met een maximale ruwheid van $0.35 \text{ sm}^{-1/3}$ (dit is een orde groter dan normaal)

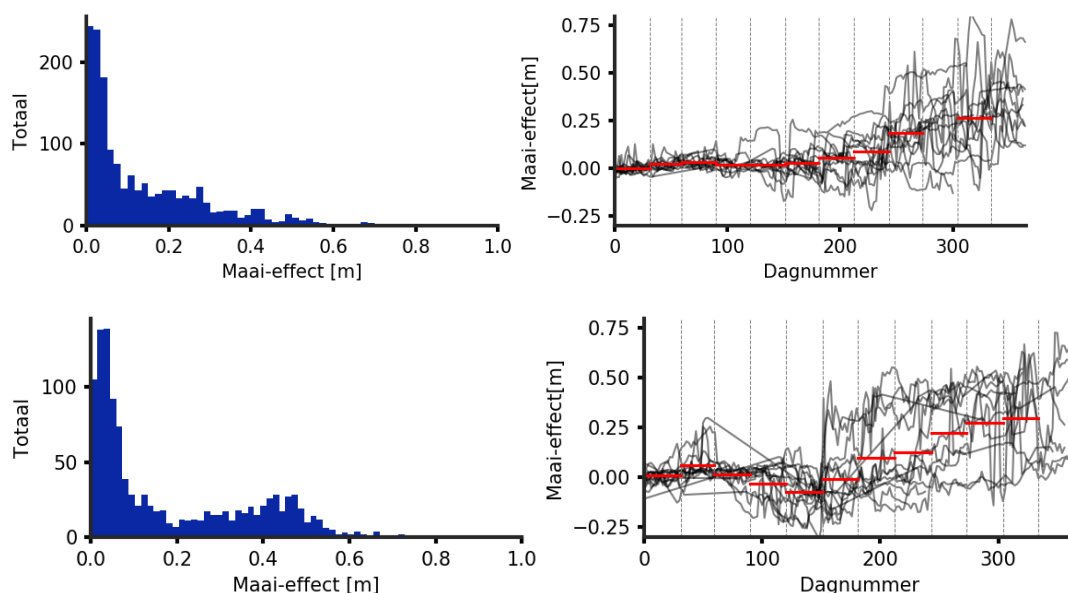
- We maken gebruik van de verwachte ruwheid (dus het gemiddelde van de kansverdeling)
- We houden geen rekening met eventuele verdrinking van stuwen of overstromingen die de waterstand zouden kunnen verlagen
- We houden geen rekening met mogelijke natuurlijke mortaliteit

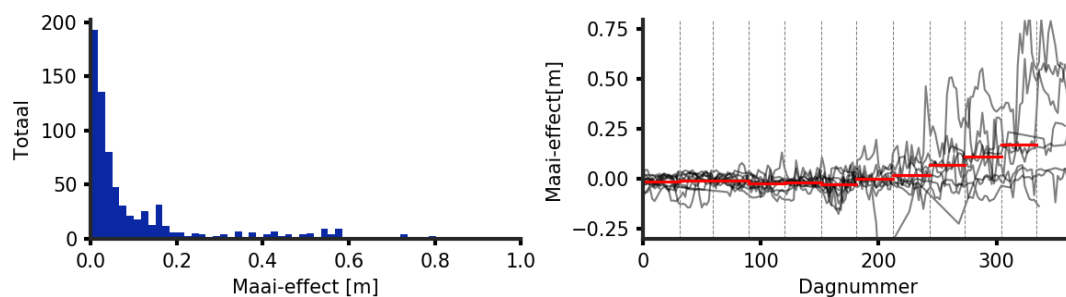
De resultaten voor 2015, stuwband 211 I zijn weergegeven in Figuur 2.16. We zien dat het effect van maaien vooral groot wordt vanaf het tweede maaimoment van 6 juli (Tabel 2.1). Zonder dit maaimoment verwacht het vegetatiegroeimodel dat de ruwheid was blijven doorstijgen. Hierdoor is het berekende peil zonder maaien gemiddeld zo'n 20 cm hoger dan met het maaien.



Figuur 2.16 De gemeten en gemodelleerde waterstanden bij de bovenstroomse stuw van pand 211I, waarbij het vegetatiegroeimodel niet onderbroken is door maaien.

We hebben deze analyse herhaald voor alle jaren. In Figuur 2.17 zien we dat het berekende maai-effect meestal tussen minder dan 40 cm peilverlaging is: 90% is kleiner dan 36 cm, met de mediaan op 8 cm. In Figuur 2.17 (rechts), zien we dat de maai-effecten duidelijk worden vanaf mei. Gemiddeld over alle jaren zien we dat het eerste grote effect duidelijk wordt in juli en augustus. Het grootste effect wordt laat in het jaar gemodelleerd – maar dit kan een overschatting omdat geen rekening gehouden wordt met natuurlijke sterfte.





Figuur 2.17 Verdeling van het berekende maaieffect tussen 2005 en 2017 (links) en overzicht van het maaieffect per dag in het jaar (rechts). In de rechterfiguur is elke zwarte lijn een ander jaar. De blauwe verticalen zijn maandgrenzen. Boven: 211I, midden: 211K, beneden 211G

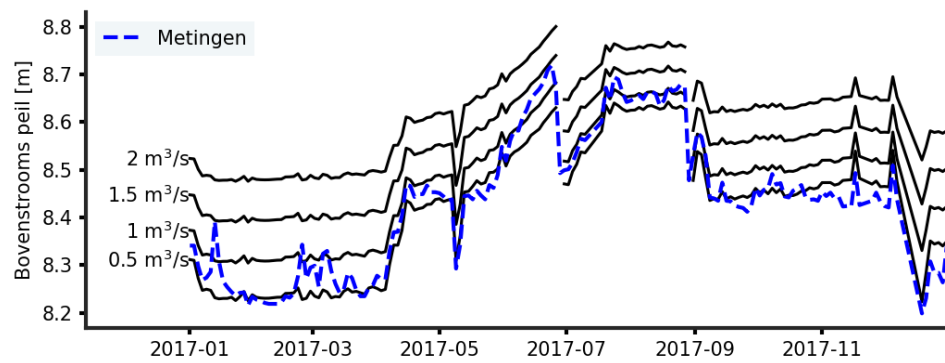
In Tabel 2.3 hebben we de gemiddelde berekende peilverlaging door maaien voor de twee zomermaanden opgenomen. We zien vooral in meer recente jaren een duidelijke peilverlaging, wat we met name wijten aan de afvoeromstandigheden. De afvoer in de Leijgraaf is na 2014 duidelijk toegenomen. Met weinig afvoer heeft vegetatie ook weinig invloed op peilen. Een goed voorbeeld hiervan is 2005, waar de afvoer in de tweede helft van het jaar veel lager was dan in de eerste helft van het jaar.

Tabel 2.3 Gemiddelde verwachte peilverlaging door maaien in centimeters, pand 211I.

Jaar	juli	augustus
2005	-1	-7
2006	-3	-1
2007	-8	-1
2008	0	4
2009	10	12
2010	9	7
2011	7	11
2012	3	2
2013		
2014	4	10
2015	12	18
2016	10	16
2017	22	31

2.5.2 Scenario modellering met hoge afvoer

Hoe meer vegetatie, hoe groter de afvoerafhankelijkheid van de ruwheid. Daardoor neemt de afvoercapaciteit van de watergang af. We hebben uitgerekend (met dezelfde vereenvoudingen die in de vorige paragraaf worden genoemd) wat de verwachte toename in waterstand zou zijn, als er een andere afvoer zou zijn geweest. In Figuur 2.18 zien we voor het jaar 2017, wat de verwachte waterstand was bij 0.5, 1, 1.5 en 2 m³s⁻¹. In 2017 zien we dus, dat bij een maximale afvoer van 2 m³s⁻¹, de verwachte maximale waterstand 8.80 m + NAP zou zijn. De maximale waterstanden voor de andere jaren voor het stuwpand 211I zijn weergegeven in Tabel 2.4.



Figuur 2.18 De waterstanden in het pand 211I. In het zwart zijn theoretische lijnen weergegeven, die bij gelijke invloed van vegetatie op de ruwheid maar een andere afvoer, worden verwacht (resp. 0.5, 1, 1.5 en 2 m^3s^{-1}).

Tabel 2.4 Maximaal verwachte waterstand bij de bovenstroomse stuw van pand 211I, bij een afvoer van 2 m^3s^{-1} , met de historisch opgetreden verwachte vegetatieruwheden

Jaar	Maximale waterstand bij 2 m^3s^{-1} (m + NAP)	Gemeten maximale waterstand
2005	9.01	9.04
2006	8.90	8.87
2007	8.95	8.91
2008	8.85	8.87
2009	8.88	8.87
2010	9.04	8.95
2011	8.83	8.79
2012	8.72	8.82
2013	Geen data	Geen data
2014	8.79	8.77
2015	8.89	8.81
2016	8.77	8.84
2017	8.80	8.72

2.5.3 Ondersteunen van real-time advies

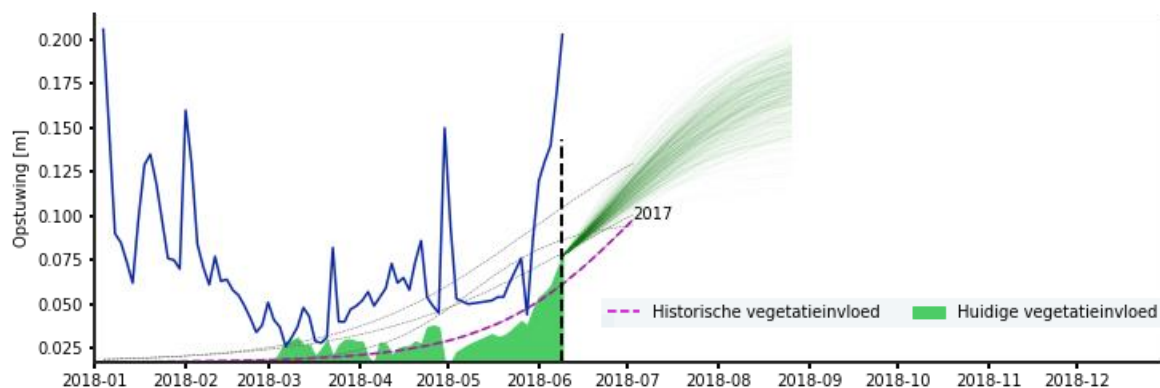
Het RAM (real-time advies maaien) project bij Waterschap Aa en Maas beoogt om maai-advies te geven aan beheerders, door een schatting te maken van de verwachte vegetatie-ontwikkeling. De kennis opgedaan in dit project zou hier aan bij kunnen dragen (Figuur 2.19). Om dit doel te bereiken zijn, in grote lijnen, de volgende stappen nodig:

- Het opzetten van een (surrogaat) hydraulisch model die de ruwheid berekent.
- De vegetatie-invloed bepalen door inversie van het beekruwheidsmodel:

$$\alpha = Q(n - n_b)$$

Waarbij α de vegetatie-invloed is, n de berekende ruwheid, Q de afvoer en n_b de basisruwheid (0.04 is hiervoor een redelijke aanname).

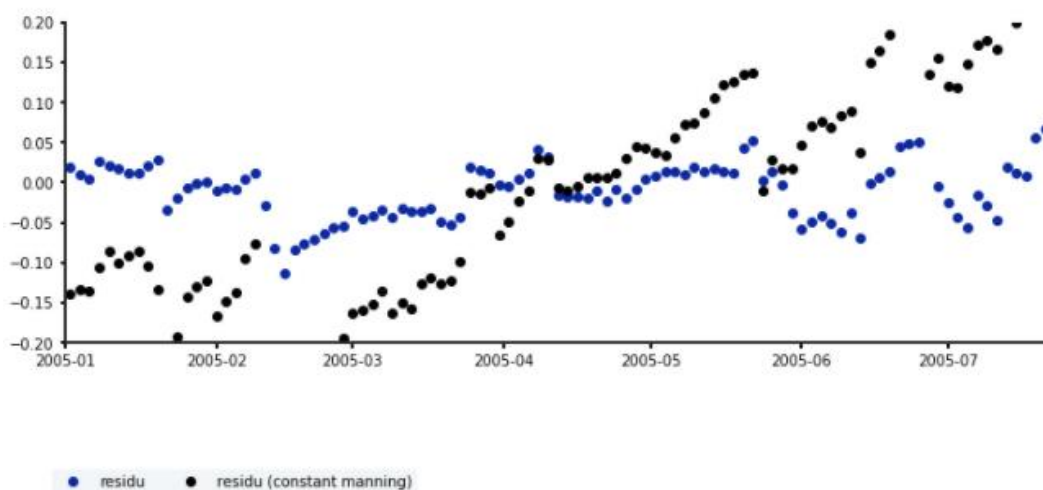
- Een database met historische gegevens ontsluiten
- Indien ook verwachtingen van de afvoer beschikbaar zijn, kan de verwachte ruwheidsontwikkeling gekoppeld worden aan het (surrogaat) hydraulisch model om een voorspelling te geven van waterstanden



Figuur 2.19 Een voorbeeld van een grafiek waarbij de real-time vegetatie-invloed wordt berekend (groen vlak) uit de gemeten opstuwing (blauwe lijn) en vergeleken met een database van historische trends. In dit voorbeeld volgt de ontwikkeling van 2018 de trend van 2017. Op basis van de historische parameterwaarden van 2017 is de doorontwikkeling van 2018 vervolgens ingeschat (groene lijnen), met inachtneming van modelonzekerheid.

2.5.4 Tijdsafhankelijke ruwheid in hydraulische modellen

In de praktijk wordt in stromingsmodellen vaak een constante Manningwaarde gebruikt, of met twee waarden (een zomerruwheid, en een winterruwheid). In werkelijkheid is de ruwheid sterk afhankelijk van vegetatiegroei en menselijk ingrijpen. In theorie zou het gebruik van een dynamisch ruwheidsmodel zoals het beekruwheidsmodel een verbetering kunnen geven in modelvoorspellingen: in Figuur 2.20 zien we dat het residu (verschil tussen gemeten en gemodelleerde waterstand) over het jaar heen kleiner is met een gekalibreerd beekruwheidsmodel (blauw) als met een gekalibreerde constante manningwaarde (zwart). In deze studie hebben we geen kalibratiestudie uitgevoerd om het beekruwheidsmodel te testen als een vervanging voor een constante Manning. Verder onderzoek is nodig om zo'n model in de praktijk nuttig te maken.



Figuur 2.20 De fout (residu) tussen gemodelleerde en gemeten waterstand met een constante Manningwaarde (zwart) en met het beekruwheidsmodel (blauw). Op de Y-as het verschil in waterpeil in cm. We zien dat de fout significant afneemt als de ruwheid wordt bepaald door het beekruwheidsmodel.

3 Tijdserie-analyse satellietbeelden

3.1 Introductie

Het Lumbricus-project heeft de afgelopen jaren het streven behouden om meer inzicht te geven in de relatie tussen de hoeveelheid vegetatie en de afvoercapaciteit van stromend water. In lijn met dit doel presenteert dit rapport het werk dat is uitgevoerd om de vegetatie-ontwikkelingen te volgen door de tijd met behulp van gratis beschikbare hoge resolutie satellietbeelden. In eerdere fasen van het project hebben we het gebruik van drones, vliegtuigen en satellietbeelden reeds geïntroduceerd, waaruit bleek dat de hoge resolutie satellietbeeld mogelijk ingezet kunnen worden voor het analyseren van locaties waar veel vegetatie door de tijd heen wordt waargenomen.

Op basis van eerdere ervaringen binnen het Lumbricus-project hebben we al de belangrijkste voor- en nadelen van de bovengenoemde beeldbronnen naar voren gebracht. Zo kunnen drones ongeacht het weer worden ingezet en kunnen ze hoge resolutie data (centimeters) behalen. De tijdverwerking van de gegevens is echter evenredig met de grootte van het ingemeten gebied, wat maakt dat drones niet eenvoudig kunnen worden ingezet voor standaard-monitoring voor een heel stroomgebied. Eerder zijn ze goed inzetbaar om een snel beeld van een klein stuk watergang te verschaffen. Een andere bron van beelden is het vliegtuig; afbeeldingen kunnen een resolutie van 0,1 m bereiken en de reikwijdte van een vliegtuig is vele malen groter dan een drone. Ook kunnen de beelden worden verkregen vanaf een relatief lage vlieghoogte die anders dan satellietbeelden minder atmosferische en wolkenverstoringen hebben. Het potentieel van vliegtuigbeelden voor monitoring van waterplanten is de afgelopen jaren onderzocht. Vliegtuigbeelden kunnen goed gebruikt worden om (deel-)stroomgebieden in 1x in te vliegen voor een jaarlijkse monitoring. Tijdreeksanalyse vanuit vliegtuigbeeld is nog niet mogelijk, zolang er geen data-serie wordt opgebouwd. Hoge resolutie satellietbeelden hebben een langlopend data-archief, en zijn voldoende nauwkeurig beoordeeld om in middelgrote watergangen (breder dan 5 meter) propen van hoge bedekking te kunnen onderscheiden.

In 2020 hebben we dan ook het gebruik van satellietbeelden onderzocht om waterplanten te detecteren, niet alleen als eenmalige gebeurtenis maar juist in tijdserie-analyses, om zo inzicht te krijgen in de ontwikkeling van waterplanten. Voor deze oefening hebben we ons gericht op het Leijgraafkanaal, waarvoor ook validatiemateriaal uit voorgaande jaren beschikbaar is.

3.2 Gebruikte data

Naarmate Remote Sensing-technologieën evolueren, komen er meer satellietbeelden met een voldoende hoge resolutie en frequentie beschikbaar. Zo ontsluit het Satelliet Data Portal (<https://www.satellietdataportaal.nl/>) satellietdata uit Nederland. Dit satellietdataportaal biedt toegang tot zowel onbewerkte als verwerkte satellietdata, verschillende instrumenten. Voor het Leijgraafkanaal hebben we gebruik gemaakt van de TripleSat en de SuperView satellieten.

De TripleSat levert 0,8 m panchromatische en 3,2 m multispectrale hoge resolutie satellietbeelden. De belangrijkste kenmerken van het beeldvormingssysteem worden hieronder beschreven:

- Spectrale banden:
 - Panchromatisch
 - 4-bands multispectraal (blauw, groen, rood en nabij-infrarood rood [NIR])
- Sensorresolutie:
 - Bij nadir - 0,8 m panchromatisch en 3,2 m multispectraal
 - 25 ° off-nadir - 1 m panchromatisch en 4 m multispectraal

Spectrale band golflengtebereik: (in nm)

- Panchromatisch –450 tot 650
- Blauw –440 tot 510
- Groen –510 tot 590
- Rood –600 tot 670
- NIR -760 tot 910

De SuperView levert panchromatische beelden van 0,5 m en multispectrale satellietbeelden van 2 m met hoge resolutie. De belangrijkste kenmerken van de SuperView-afbeeldingen worden hieronder beschreven:

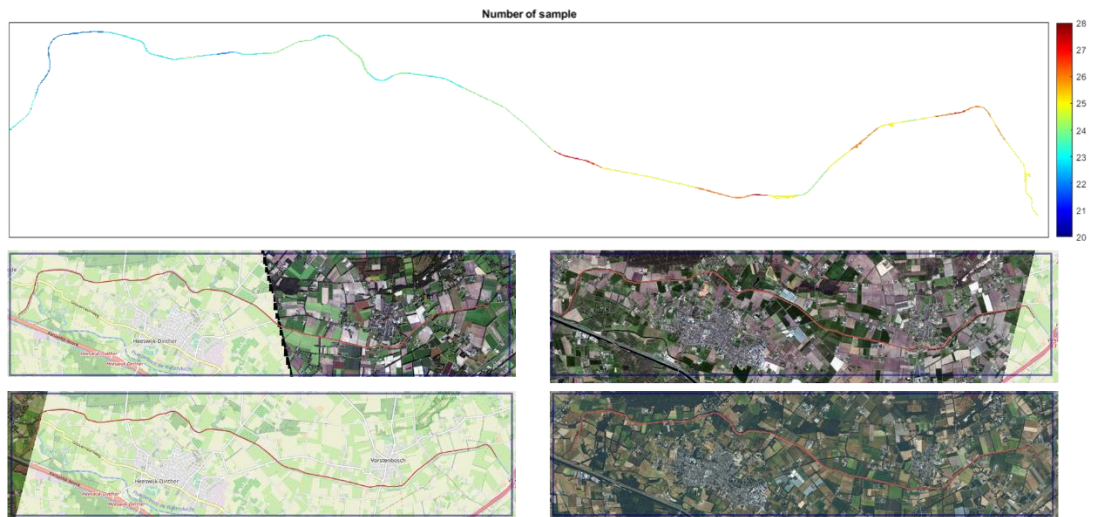
- Spectrale banden:
 - Panchromatisch
 - 4-bands multispectraal (blauw, groen, rood en nabij-infrarood [NIR])
- Sensorresolutie:
 - Bij nadir - 0,5 m panchromatisch en 2 m multispectraal

Spectrale band golflengtebereik: (in nm)

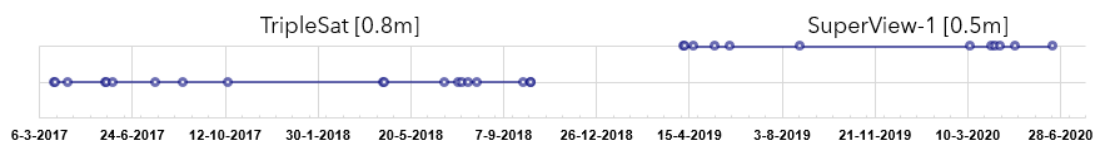
- PAN: 0,45-0,89 μm
- B1 / blauw: 0,45-0,52 μm
- B2 / groen: 0,52-0,59 μm
- B3 / rood: 0,63-0,69 μm
- B4 / NIR: 0,77-0,89 μm

3.2.1 Beschikbare beelden

Zoals eerder vermeld, is dit onderzoek gedaan voor de Leijgraaf. Het bovenste deel van Figuur 3.1 toont het precieze gebied dat voor deze analyse is geselecteerd, samen met het aantal beschikbare beelden per precieze locatie. Doordat de satellietbeelden soms maar een deel van het gebied bedekken wisselt het aantal beschikbare beelden over de lengte van kanaal. Afbeeldingen zijn beschikbaar van maart 2017 tot en met juni 2020, met in totaal 35 afbeeldingen van het Leijgraafkanaal. In totaal zijn er 28 beelden beschikbaar, waarbij in het oostelijke deel van de Leijgraaf de hoogste aantal beelden beschikbaar is. Het figuur toont ook voorbeelden van 4 verschillende afbeeldingen die verschillende delen van het kanaal beslaan. De eerste 19 afbeeldingen zijn van TripleSat en 16 van het SuperView-instrument (Figuur 3.2).

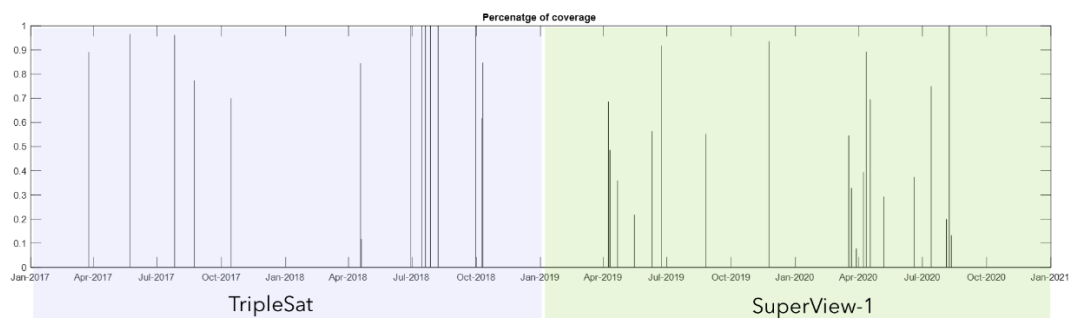


Figuur 3.1 Aantal afbeeldingen beschikbaar langs het Leijgraaf-kanaal.



Figuur 3.2. Afbeeldingen beschikbaar van TripleSat- en Superview-satellieten.

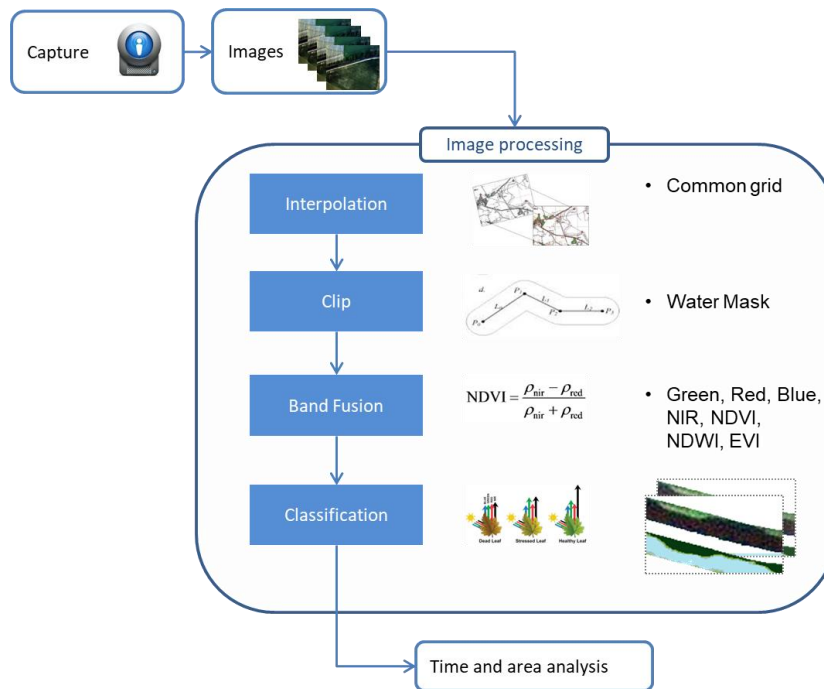
Figuur 3.2 completeert het dekkingsoverzicht (geografisch en temporeel), elke balk in de figuur vertegenwoordigt een enkel beeld, de hoogte van de balk (van 0 tot 1) geeft het percentage van de Leijgraaf kanaalbedekking voor elk beeld weer. Als de waarde van de staaf 1 bereiken, betekent dat de afbeelding het hele Leijgraaf-gebied beslaat, tegenover staven dichtbij 0 die aangeven dat de afbeelding slechts een klein deel van het kanaal beslaat.



Figuur 3.3 Percentage van het dekkingsgebied per beeld

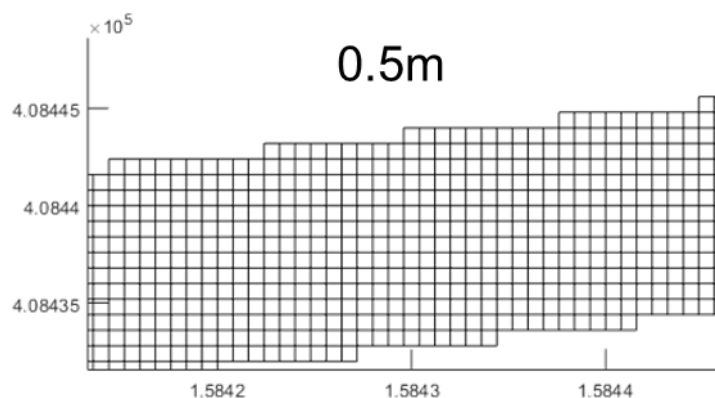
3.2.2 Analysestappen

De gedownloade gegevens waren al geografisch gecorrigeerd en verwerkt voor pansharping. Pansharping is een methode om een kleurenafbeelding met een lage resolutie om te zetten in een kleurenafbeelding met een hogere resolutie. Het lage resolutie kleurenbeeld (multispectraal) wordt gecombineerd met een (panchromatisch) hoge resolutie zwart-wit beeld. Voor de SuperView wordt de combinatie gedaan tussen 2 m multispectrale en 0,5 m panchromatische band en voor de SuperView een combinatie van 3,2 m multispectrale en 0,8 m panchromatische band.



Figuur 3.4 schematisering van het beeldverwerkingsproces

Een schematisering van de beeldverwerking is weergegeven in Figuur 3.4. Het selecteren en downloaden van de beelden is nog steeds een handmatig proces. Na het downloaden vindt de standaardisatie van het dataformaat plaats; afbeeldingen worden op een gemeenschappelijk raster geprojecteerd. Het raster (weergegeven in Figuur 3.5) is een raster op equidistante afstand langs het kanaal met een rastergrootte van 0,5 m * 0,5 m. Door het gebruik van het Leijgraaf watermasker voor beschikbaar in Open Street Maps wordt het aantal pixels per afbeelding verminderd.

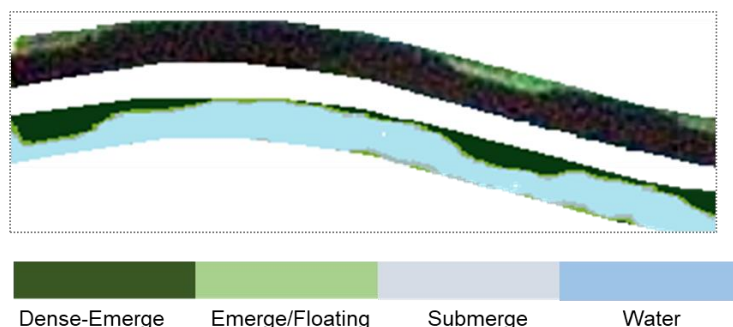


Figuur 3.5 Algemeen raster gebruikt voor het interpoleren van satellietbeelden

Er is gebruik gemaakt van een Artificial Neural Network (ANN) als classificatiemethode. Blauwe, groene, rode en nabij-infrarode banden, waarden van de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) en Normalized Difference Water Index (NDWI) worden gebruikt als classificatievariabelen voor water, ondergedoken, drijvende en emergente vegetatie. Eerdere Lumbricus-rapporten (2018 en 2019) bevatten de volledige beschrijving van de methode en de formules om verschillende indexen te berekenen.

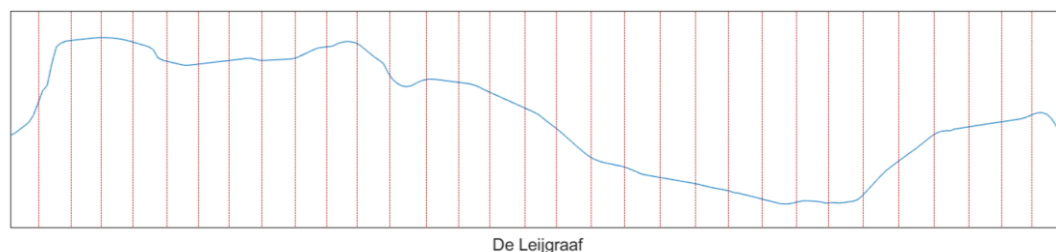
3.3 Resultaten

Informatie over waterplanten werd met behulp van het ANN uit TripleSat- en SuperView-beelden gehaald. Elke beschikbare afbeelding is geïdentificeerd; een voorbeeld van de ruimtelijke spreiding van alle vegetatietypen is weergegeven in Figuur 3.6. Figuur 3.6 presenteert vier klassen: water, ondergedoken vegetatie, drijvende en (gedeeltelijk) emergente vegetatie en (volledig) emergente vegetatie.



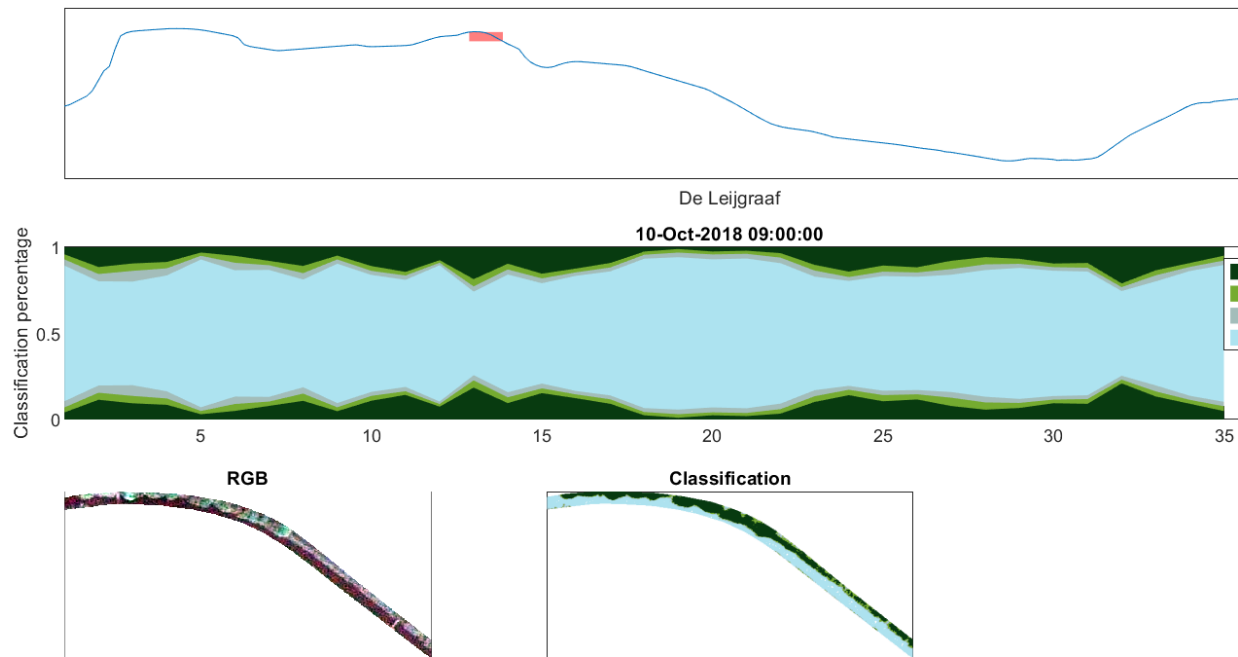
Figuur 3.6 Voorbeeld van de classificatie van waterplanten. Boven het RGB-kleurenbeeld van de satelliet, beneden de classificatie.

Nadat de classificatie is uitgevoerd, kunnen bij elke pixel tijdreeksplots worden gemaakt. Er zijn echter duizenden pixels langs het kanaal. Voor de analyse is de Leijgraaf daarom opgedeeld in 40 secties (Figuur 3.7). Elke sectie van het kanaal is ongeveer 350 meter lang.



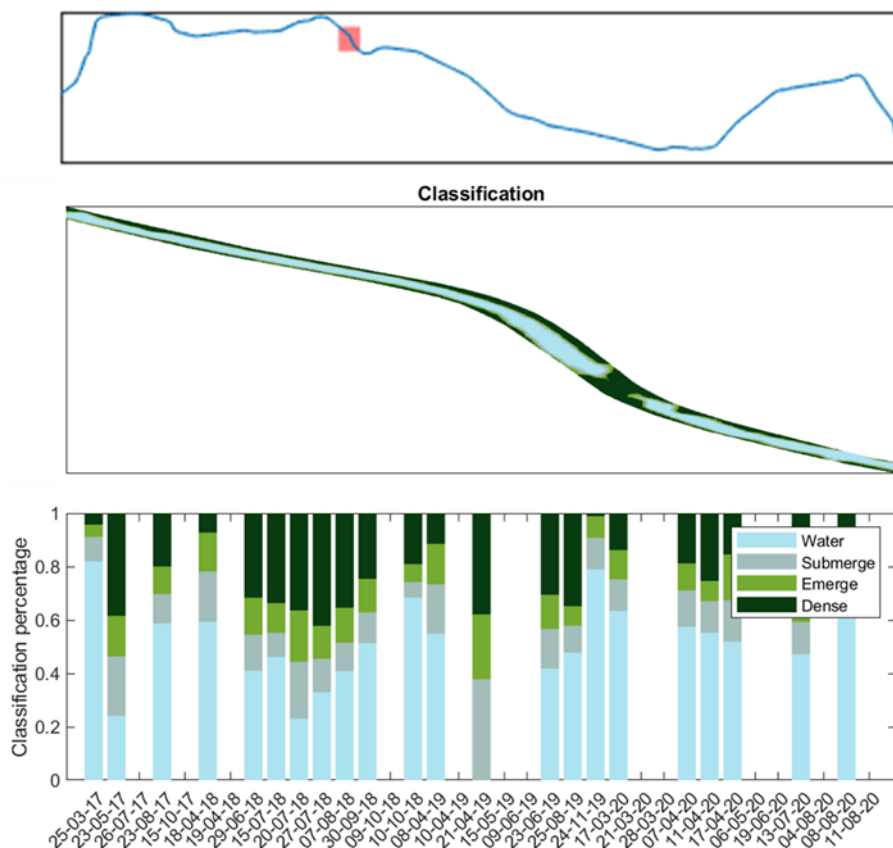
Figuur 3.7 Visualisatie van de Leijgraafvakken voor de tijdreeksanalyse

Figuur 3.8 geeft de lezer een visueel overzicht van de hoeveelheid vegetatie langs het kanaal. De figuur toont het resultaat van een TripleSat-geclassificeerde afbeelding voor 10 oktober 2018.



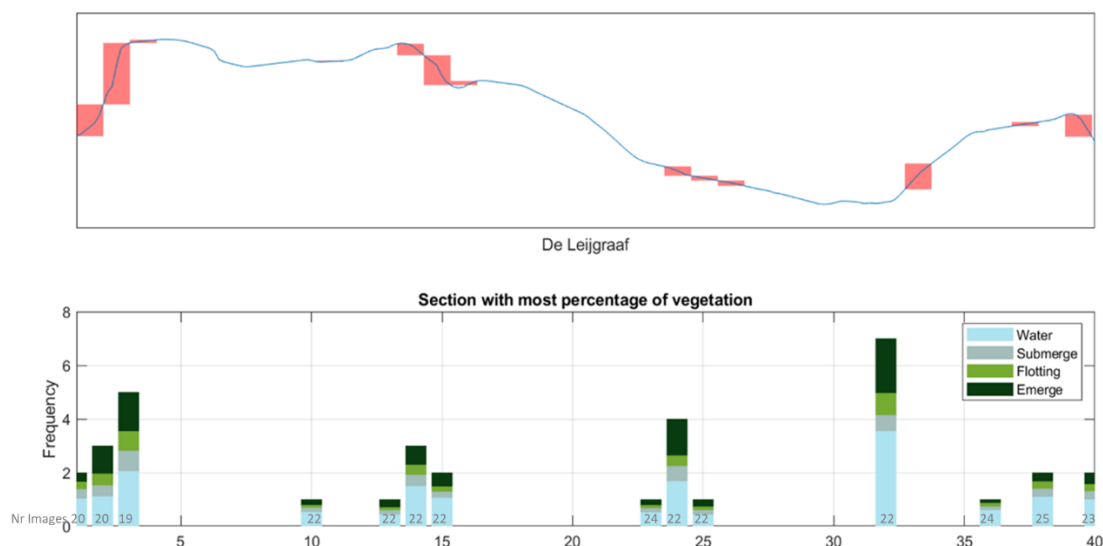
Figuur 3.8 Voorbeeld van classificatie van één afbeelding. Het bovenste paneel markeert het gedeelte met het hoogste percentage vegetatie. Het middelste paneel toont het percentage vegetatie per sectie en het onderste paneel toont een inzoomweergave op sectie 13, in dit paneel worden afbeelding met ware kleuren (RGB) en geclassificeerde afbeelding getoond. N.B. voor dit beeld is geen informatie beschikbaar in sectie 35 tot 40, die daarom wit zijn.

Figuur 3.9 toont een ingezoomde weergave van één sectie. De bovenste kaart geeft het gedeelte (rood vierkant) van het kanaal aan dat in het voorbeeld wordt weergegeven. Het geografische overzicht in het middelste paneel helpt om delen van het kanaal te herkennen met een constante hoge aanwezigheid van waterplanten over tijd. Het onderste paneel in de figuur toont de samenstelling van de verschillende klassen per beschikbaar satellietbeeld. Voor dit specifieke voorbeeld zijn 18 augustus 2018 en 21 april 2019 de datums waarop veel vegetatie is waargenomen in dit deel van het kanaal.



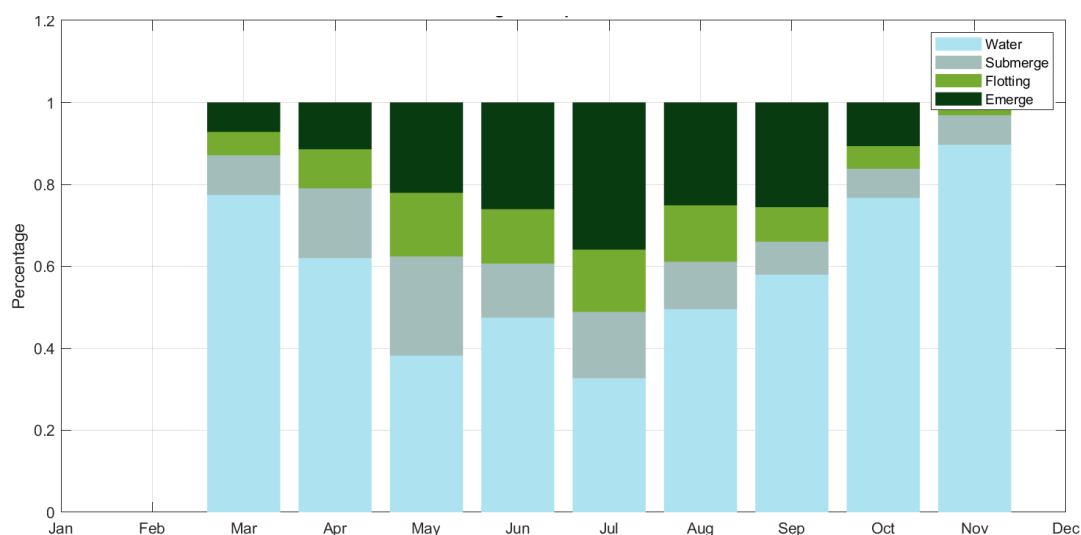
Figuur 3.9 Tijdreeksen met het percentage vegetatie per geclassificeerde afbeelding voor de sectie in het rood gekleurd in bovenste paneel. In het middelste paneel de locatie binnen de sectie waar gemiddeld genomen de meeste vegetatie voorkomt. De onderste sectie geeft de percentages van bedekking per groeiklasse per satellietbeeld, waarbij elke kolom 1 satellietbeeld is, en de lege kolommen satellietbeelden zijn waar deze sectie niet op beschikbaar is voor analyse. (nb: op de x-as staat dus geen absolute tijdschaal, omdat in de winterperiode veel minder beelden beschikbaar zijn)

De groei van aquatische vegetatie is een leidende factor bij het bepalen van de stromingsomstandigheden in het kanaal, aangezien de watervegetatie in kanaalsecties een toename van de stromingsweerstand veroorzaakt. Om de identificatie te vergemakkelijken van de delen van het kanaal waar voortdurend veel waterplanten aanwezig zijn, zijn in Figuur 30 de geaggregeerde resultaten van alle verwerkte afbeeldingen. De figuur belicht 12 verschillende secties met hoge vegetatiepercentages (>50% bedekt) voor de periode maart 2018 - augustus 2020. Dit figuur kan helpen bij het evalueren en stellen van prioriteiten voor maai-activiteiten.



Figuur 3.10 Overzicht van de frequentie waarop secties een hoogste score van bedekking scoorden ten opzichte van het totaal aantal beschikbare beelden. De kleine nummers per staafkolom geven aan hoeveel beelden er voor die specifieke sectie beschikbaar waren.

Op dezelfde manier toont Figuur 3.11 de seizoensgebonden aanwezigheid van waterplanten langs het Leijgraafkanaal. Uit de analyse blijkt dat juli de maand is met de meeste vegetatie in het kanaal. In mei is het percentage van ondergedompelde vegetatie groter dan in juli. In juni is er iets minder vegetatie waargenomen dan in mei en juli, wat mogelijk duidt op maai-activiteiten. Zo'n 30% van de Leijgraaf blijft ook in juli geclassificeerd als water, maar zoals in figuur 29 te zien was, kan het zijn dat op lokale punten de watergang vrijwel volledig is dichtgegroeid. Dit zouden belangrijke punten kunnen zijn die voor opstoppen in de watergang zorgen, en waar extra aandacht in het beheer naar uit zou kunnen gaan.



Figuur 3.11 Seizoenspercentage waterplanten voor het gehele Leijgraafkanaal (data van alle beschikbare beelden)

3.4 Discussie en conclusie tijdserie-analyse satellietbeelden

De aggregatie van de geclassificeerde beelden in tijd en ruimte maakt het mogelijk een goed overzicht te hebben van gebieden die vaak worden aangemerkt als gebieden met een hoog percentage vegetatie. Bovendien helpt een ingezoomde weergave van een sectie snel en eenvoudig het lokale notoire voorkomen van de vegetatie te spotten, bijvoorbeeld op de kanaaloever of in het midden van het kanaal.

In deze studie werd een ANN gebruikt voor het classificeren van satellietbeelden om waterplantenbedekking van verschillende groeivormen in het Leijgraafkanaal te kwantificeren. Helaas zijn er geen veldgegevens om de classificatie te valideren anders dan de visuele vergelijking met het RGB-beeld van de satellietbeelden. Veldgegevens en goede registraties van maaimomenten zijn nodig, die ook samenvallen met de satelliet-overpass-tijd, om met goede overeenstemming een robuust satelliet-gebaseerd model te ontwikkelen dat geschikt is om ook op andere satellietbeelden te worden toegepast.

Uit de visuele inspectie concluderen we dat de emergente vegetatie en waterklasse goed zijn ingedeeld in de afbeeldingen. Er zijn echter nog wel beperkingen aan de toepassing van deze methode. De methode kan in het algemeen een onderscheid maken tussen water en emergente vegetatie, maar het heeft moeite om ondergedoken vegetatie betrouwbaar te classificeren vanwege de mogelijke interferentie van het water, zeker als dit op een gegeven moment te troebel is om de ondergedoken vegetatie goed waar te nemen in het satellietbeeld.

Er is geen goede relatie te maken tussen de hoeveelheid emergente en ondergedoken vegetatie, omdat ook het maairegime invloed heeft op deze relatie: wanneer er met een maaiboot wordt gemaaid worden vooral de ondergedoken planten verwijderd in het midden van de watergang, terwijl de emergente vegetatie langs de oevers blijft staan. Een goede registratie van de maaimomenten helpt bij de interpretatie van de satellietbeelden voor de hotspot analyse, omdat beelden direct na het maaien een vertekend beeld van de situatie zouden kunnen geven: immers in dat geval is de hotspot mogelijk net verwijderd en wordt hij in de aggregatie van beelden dus over het hoofd gezien.

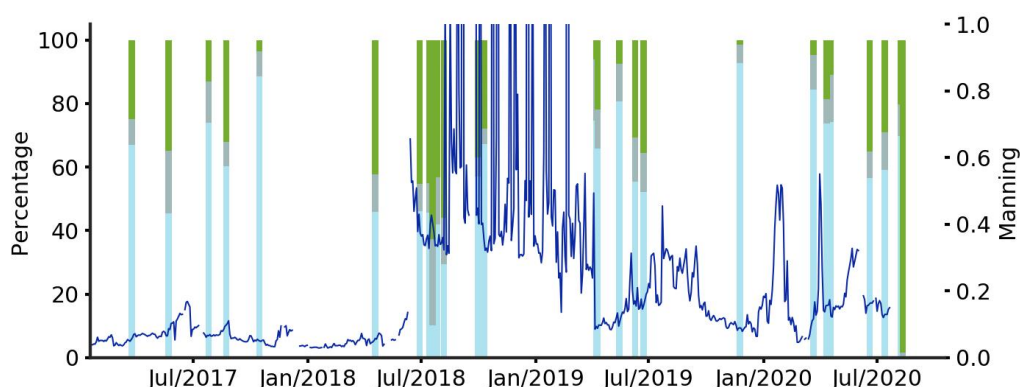
De hotspot-analyse is nog niet besproken met terreinbeheerders. Het is aan te raden om in een vervolgstap deze bespreking voorop te stellen om te zien of de beheerders de aangemerkte hotspot-locaties ook als zodanig herkennen, en betere duiding kunnen geven van de resultaten in relatie door de praktische aspecten van het veld. Hiermee wordt de hotspot-analyse dan mogelijk ook een bruikbaar middel om maaibeheer aan te scherpen richting de toekomst en te focussen op juist die gebieden die in de hotspot-analyse naar voren komen, om zo andere locaties met minder hoge frequentie te maaien om zo ecologische waarden te sparen.

4 Algemene discussie en conclusies Peilen en Vegetatie in Proeftuin Zuid

4.1 Vergelijken van satellietbeelden en ruwheid

In zowel de hydraulische analyse (hoofdstuk 2) en de remote sensing analyse (hoofdstuk 3) is een seizoensgebonden dynamiek goed waargenomen in overeenstemming met de algemene verwachtingen gebaseerd op systeemkennis. De vanzelfsprekende koppeling tussen toename in ruwheid in de zomerperiode en de toenemende hoeveelheid vegetatie in diezelfde periode is logischerwijs goed te kwantificeren. De grote uitdaging is om beide gebruikte technieken voldoende betrouwbaar en in samenhang te kunnen inzetten voor meer risico-gestuurd maaibeheer. In Figuur 4.1 hebben we de observaties uit satellietbeelden naast de berekende ruwheden geplot, voor pand 211I in de jaren 2017-2020. We zien hier heel duidelijk het effect van de droogte van 2018, die nog lang doorwerkt in de ruwheden doordat de lage afvoer leidt tot zeer hoge ruwheden. Let wel: zonder stroming is de hoeveelheid vegetatie niet bepalend voor het waterpeil en zijn er geen betrouwbare ruwheden meer af te leiden uit peil-afvoer gegevens.

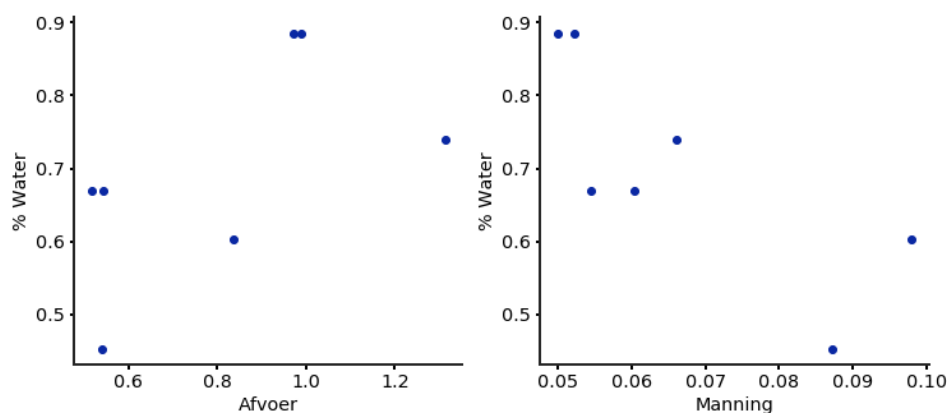
In 2017 lijkt wel enige relatie te zien tussen de hoeveelheid vegetatie en ruwheid. Zo zien we naar aanloop van de ruwheidspiek dat het percentage water afneemt. Na het maaimoment van 28 juni is het percentage water duidelijk hoger en neemt de ruwheid weer licht af. De ruwheidsafname van eind 2017 is in de hydraulische analyse niet geoormerkt als een potentieel maaimoment (2.4.3), maar we zien dat het percentage water erna wel is gestegen, wat duidt op een mogelijk extra maaimoment of natuurlijke sterfte in het najaar.



Figuur 4.1 Percentage vegetatie en ruwheid voor pand 211I

In Figuur 4.2 hebben we de metingen die overeenkomen met de satellietbeelden in 2017, tegen de gemeten afvoer en ruwheid uitgezet voor stuwpand 211I. Hieruit zien we een duidelijke relatie tussen het percentage afvoer en percentage water. Bij een percentage water dat 100% nadert, gaat de ruwheid richting $0.05 \text{ sm}^{-1/3}$. Hoe lager het percentage water (en dus hoe hoger het percentage vegetatie), hoe meer de ruwheid toeneemt. We zien ook een omgekeerde relatie met afvoer. Dit is te verwachten, omdat ruwheid en afvoer zelf sterk gecorreleerd zijn, en omdat vegetatie bij hogere afvoer kan onderduiken. Desalniettemin duidt de sterkere relatie met ruwheid dat dit soort satellietbeelden een goede indicator kan zijn voor de ruwheid in het systeem. De spreiding is echter nog dusdanig groot dat er geen algemene wetmatigheden uit zijn af te leiden. Daarvoor zou deze analyse voor meer jaren (met voldoende afvoer in de zomer) en voor meer panden moeten worden herhaald.

De koppeling tussen satellietbeeldgegevens en hydraulische parameters is daarmee wel een stap verder gebracht, maar ook is gebleken dat het achterhalen van algemene wetmatigheden op basis van dit type analyses niet mogelijk is. Wel kan per stuwpand een beter inzicht in het functioneren van de relatie van peilen met vegetatiebedekkingen worden geduid.



Figuur 4.2 Correlatie tussen het percentage water, afvoer, en de Manning coëfficiënt. Stuwpan 211I, 2017

4.2 Samenvattende conclusies Peilen en Vegetatie – Proeftuin Zuid

4.2.1 Samenvatting resultaten 2016-2020

Binnen Lumbricus ‘peilen en vegetatie’ is in Proeftuin Zuid de relatie tussen vegetatie (waterplanten) en peilen in watergangen onderzocht. Over het algemeen verhoogt de aanwezigheid van waterplanten het peil bovenstrooms van deze waterplanten. Dit effect wordt veroorzaakt doordat de stroming belemmerd wordt, wat leidt tot lagere stroomsnelheid. Bij gelijkblijvende afvoer en lagere stroomsnelheid in de watergang, stijgt de waterstand. Voor individuele stuwpanden is daarom een methode ontwikkeld die grip geeft op deze relatie en die voorspellend kan aangeven wat de verwachtingen zijn van de groei van vegetatie gedurende het groeiseizoen en hoe het effect van maaien daarop gekwantificeerd kan worden. Daarnaast is gekeken of er met behulp van vlakdekkende multispectrale beeldinformatie een beter grip kon worden gekregen op het voorkomen van waterplanten in watergangen, en of deze informatie kan worden gekoppeld aan de hydraulische analyses. De ontwikkelingen op het vlak van de koppelingen van vlakdekkende informatie met hydraulica is door de jaren met stapjes steeds een stukje verder gebracht, resulterende in een aanpak waarbij de inzet van hoge resolutie satellietdata als meest praktische vorm naar voren is gekomen. In onderstaande paragrafen wordt de ontwikkeling van kennis door de jaren heen stap voor stap samengevat.

Reeds in 2016 is voor het eerst ge-experimenteerd met het gebruik van hyperspectrale en multispectrale camera's voor het inmeten van aquatische submerse en emergente vegetatie als aanloop naar de daadwerkelijke veldmetingen en analyses binnen Lumbricus. Deze beeldanalyses zijn voornamelijk binnen het TKI-Dotterproject uitgevoerd en resulteerden in de conclusie dat de beide typen camera's aanvullende en waardevolle typen informatie leveren, maar dat de multispectrale beelden veel praktischer in gebruik zijn (Eertwegh & Penning, 2016). Ook lieten de eerste veldproeven zien dat de invloed van waterdiepte en turbiditeit belangrijke parameters zijn die het signaal van ondergedoken vegetatie beïnvloeden: hoe dieper en hoe troebeler hoe minder goed de submerse vegetatie te zien is.

De techniek van vlakdekkend inmeten vanuit de lucht is dus vooral toepasbaar voor ondiepere en relatief heldere watersystemen en werkt beter voor het waarnemen van emerse en drijvende vegetatie dan voor ondergedoken vegetatie die niet tot aan het wateroppervlakte reikt.

In 2017 is hydraulische data uit de Lage Raam (Penning et al., 2017) gebruikt om indirect vegetatiegroei waar te nemen door te kijken hoe ruwheid door de tijd veranderd. Hieruit bleek dat een toename van de ruwheid in de tijd waarneembaar is, en dat die in het voorjaar snel stijgt. Maaien leek slechts kort de ruwheid te verlagen, wat kan duiden op een snelle teruggroei. Vergelijking met eerder onderzoek in de Grote Beek (gelegen binnen Waterschap Rijn en IJssel) (Linneman, 2017) liet zien dat de genormaliseerde ruwheiden vergelijkbaar gedrag vertonen, maar dat de daadwerkelijke waarden voor de ruwheid erg verschillen per beekstelsel. Hierdoor bleek de opgedane kennis niet toe te passen op andere systemen of te vertalen naar generieke kennisregels omtrent groeicurves. In 2017 is tevens met een multispectrale camera op een drone een stukje van de Lage Raam ingevlogen voor en na een maaibeurt. Hieruit bleek dat bij voldoende helder water onderwatervegetatie voldoende goed zichtbaar is op deze beelden, en dat de maaibeurt lang niet op het hele beschouwde traject nodig was geweest. Slechts 50% van het traject was zo sterk begroeid dat er een duidelijk verschil waarneembaar was in aanwezige vegetatie voor en na het maaien. De vlakdekkende beelden geven daarmee een aanvullende bron van informatie voor de evaluatie van maaitrajecten: is het nodig om het hele aangemerkte traject te maaien, of kunnen stukken met weinig begroeiing met rust worden gelaten tijdens de beoogde maaibeurt. Drones blijken in de praktijk wel nuttig voor het invliegen van kleine stukken watergang voor een 'snelle blik', maar kunnen niet voor een heel beheergebied worden ingezet. Ook moet er worden nagedacht over hoe de ingewonnen data op een snelle en automatische manier wordt omgezet tot bruikbare informatie. Binnen het Lumbricusproject is niet inzet op de verdere automatisering van de beeldverwerking vanaf drones, omdat het niet logisch is dit te doen als grote gebieden moeten worden ge-evalueerd op hun maaistrategie. Wel zal zo'n verdergaande automatisering van de beeldverwerking de toepasbaarheid van het vlakdekkend inwinnen vanuit drones wel verder brengen als de verwerkte beelden in zeer korte tijd voor beheerders beschikbaar kunnen komen om op basis daarvan detail-vragen rondom het maaien ter plekke kunnen worden opgelost.

Omdat bleek dat de Lage Raam een te geringe afvoer kende in de zomerperiode is in 2018 overgestapt op analyses in de Leijgraaf, die een constanter debiet heeft. In 2018 is een langjarige tijdsanalyse gedaan op de waterdata van de Leijgraaf (Penning et al., 2018c). Hieruit bleek dat de berekende ruwheid sterk afhankelijk is van de afvoer en van de tijd in het jaar. Ook hier kwamen grote verschillen tussen de verschillende individuele stuwpanden uit naar voren: in verschillende stuwpanden waren de debietmetingen niet betrouwbaar genoeg om verdere analyses mee uit te voeren. Het belang van goede basis-data-inwinning werd hiermee wederom onderstreept. Aanvullend onderzoek i.s.m. Waterschap Rijn en IJssel (Verdonschot et al., 2021) naar het effect van maaien op peilen gaf in 2019 meer bewijs voor de sterke omgekeerd evenredige relatie tussen afvoer en ruwheden. Verder kwam uit de stroombaanmaaienproef die hiervoor is uitgevoerd naar voren dat (1) de hoeveelheid slib een belangrijke verklarende factor kan zijn voor grote verschillen tussen panden en (2) het effect van maaien kleiner kan zijn dan verwacht bij maatgevende afvoeren doordat de ruwheden bij hogere afvoeren kleiner worden.

Omdat de drone geen geschikt platform was om een groot watersysteem in te vliegen is in 2018 de bedekking met waterplanten in de Leijgraaf met multispectrale camera ingevlogen gebruikmakend van een vliegtuig. Hieruit bleek dat het goed mogelijk is om vanaf deze hoogte met voldoende resolutie de vegetatiebedekking in de Leijgraaf te classificeren in 5 hoofdklassen van bedekking, maar dat deze eenmalige inwinning niet eenduidig te koppelen is aan de hydraulische analyse, die veel meer gestoeld is op begrip door de tijd heen.

De doorlooptijd van zowel drone- als vliegtuig-beeldverwerking is momenteel nog aan de lange kant, waardoor de informatie nog niet kan worden ingezet voor kortstondige beslissingen in het maaibeheer. Daarom is in 2019 een eerste aanzet gemaakt tot analyses met behulp van hoge resolutie satellietbeelden (TripleSat en Superview) die gratis beschikbaar worden gesteld door de Netherlands Space Office. Deze beelden zijn in 2020 gebruikt voor de hotspot-analyse die in hoofdstuk 3 van dit rapport is beschreven. De hotspot-analyse geeft ook nog geen hele korte doorlooptijd tussen het inwinnen van gegevens en het daadwerkelijk inzetten van deze kennis voor ad-hoc beslissingen in het maaibeheer, maar geeft door zijn multi-temporele facet wel een goed inzicht in de dynamiek van het systeem in ruimte en tijd.

4.2.2 Inzet van vlakdekkende beeldinformatie voor vegetatiebeheer

Vlakdekkende beeldinformatie kan voor verschillende doeleinden nuttig zijn in het vegetatiebeheer. Voor een snelle scan van een klein deel van een watergang kan een drone worden ingezet voor visuele inspectie van locaties die anders moeilijk benaderbaar zijn. Met een vliegtuig kan voor specifieke monitoringsopgaven nauwkeurige data worden ingewonnen voor een groter gebied. Zo zijn bijv. in 2020 voor Hoogheemraadschap Rijnland vlakdekkende multispectrale vliegtuigbeelden ingewonnen voor een nauwkeurige classificering van de KRW-groevormen voor een grootschalig poldergebied met veel kleine sloten (Van den Eertwegh et al, 2021).

De hoge-resolutie satellietdata is waardevol voor het verkrijgen van een grofstoffelijk beeld van de vegetatie in grote ruimte en tijdschalen. Volledig begroeide watergangen kunnen makkelijk worden opgespoord binnen een groter beheergebied. Dit principe wordt nu ook al ingezet voor de schouw bij waterschap Drents Overijsselse Delta. De hotspotanalyses die voor de Leijgraaf zijn uitgevoerd tonen dat de hotspots beperkt zijn tot enkele locaties binnen het systeem waar notoir veel vegetatie voorkomt. Watergangen smaller dan ~2 meter zijn minder goed te beschouwen met satellietdata wanneer de classificatie nauwkeuriger moet dan een basaal onderscheid tussen 'water' en 'geen water', doordat de resolutie dan een beperkende factor wordt in de nauwkeurigheid. De hotspot-analyse gebruikte een classificatie-algoritme dat 5 verschillende vegetatieklassen onderscheidt en daarmee nauwkeuriger in karakterisering is dan een simpele 'water/geen water' analyse, maar daarmee wel een aanvullende vraag oplevert hoe nauwkeurig ondergedoken vegetatie daadwerkelijk wordt waargenomen. Een goede koppeling met het veld blijft dan ook altijd nodig.

De koppeling van de satellietdata aan hydraulische data werkt alleen als er ook een goede registratie is van maaimomenten en er voldoende afvoer is om een betrouwbare ruwheid uit af te leiden. Hieruit is voor data uit het jaar 2017 een grove relatie gekomen voor deze bedekking en de ruwheid in een deel van de Leijgraaf. De data uit 2018 en 2019 was niet goed bruikbaar, door het gebrek aan afvoer in de Leijgraaf als gevolg van de zeer droge zomers. Wanneer de dataset verder kan groeien in de komende jaren, wordt deze relatie steeds nauwkeuriger en beter inzetbaar.

De hoge resolutie-satellietbeelden komen met enige regelmaat op de NSO website beschikbaar, maar inzet voor ad-hoc aansturen van maaibeheer op basis van deze data is nog niet mogelijk omdat er nog onvoorspelbare tussenpozen tussen het beschikbaar komen van deze beelden kan zitten en bewolking een belangrijke limiterende factor is. Ook is de verwerking van de data op dit moment nog tijdsintensief en is de doorlooptijd daarvan te lang om snelle beschikbaarheid van informatie te garanderen. Dit aspect kan door verdergaande automatisering en mogelijk ook door contractering ('tasking') van commerciële satellieten wel deels worden verholpen maar dit vergt verdergaande investeringen.

4.2.3 Richting toepassingen in het primair proces

De kennis ontwikkeld binnen Peilen en Vegetatie richt zich enerzijds op het begrip van de relatie tussen peilen en ruwheidsontwikkeling door het jaar en anderzijds op de mogelijkheid om met vlakdekkende informatie een beter beeld te krijgen waar in het watersysteem de vegetatie daadwerkelijk voorkomt.

Het ontwikkelde beekruwheidsmodel geeft de mogelijkheden om te voorspellen wat de potentiële risico's zijn van 'niet-maaien'. Het kan bijdragen aan de verdere ontwikkelingen van het RAM (Realtime Advies Maaien) zoals voorgesteld in paragraaf 2.5.

In de huidige analyses met het beekruwheidsmodel is nog alleen een korte analyse gemaakt van de invloed van de weerstatistieken per jaar op de resultaten. Deze koppeling leverde niet veel aanvullende informatie op om met meer zekerheid te verklaren waarom er opvallende verschillen zitten in de ruwheidsontwikkeling tussen de jaren. Verdere detaillering van deze analyse is gewenst.

We raden het Waterschap Aa en Maas aan een zo nauwkeurig mogelijke maairegistratie bij te houden, en de peilmetingen bij de benedenstroomse stuwen in de Leijgraaf te controleren op nauwkeurigheid aangezien dit nu tot belangrijke omissies in begrip voor de totale Leijgraaf heeft geleid.

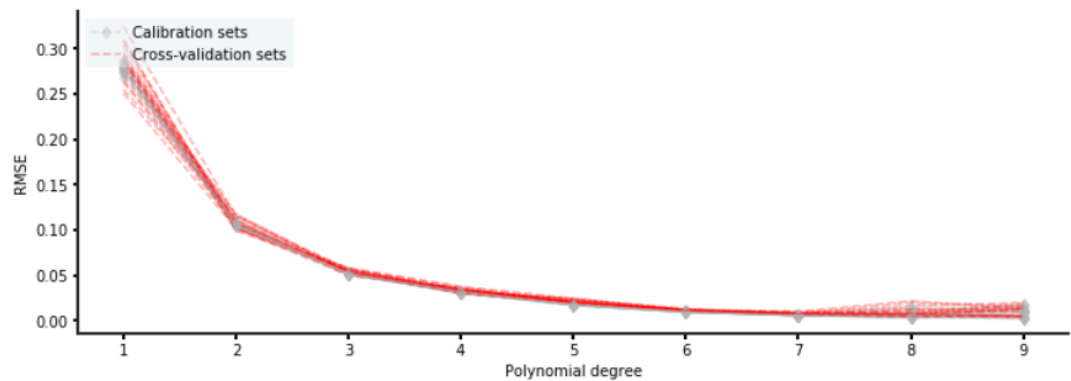
Daar waar geen waterpeilen online worden gemeten kan de analyse van satellietdata bijdragen aan het opsporen van hotspots waar vegetatiegroei belemmerend kan zijn voor de afvoer. De satellietbeeld-analyses kunnen ook worden ingezet om de doorgroei van vegetatie tijdens het seizoen beter in de gaten te houden, mits de beelden voldoende vaak binnenkomen met voldoende weinig bewolking. Deze beelden leveren dan aanvullende informatie over de bedekkingspercentages, zodat het beheer niet voor 'onverwachte verrassingen' komt te staan als het systeem weer begint te stromen. Dit zou een volgende stap kunnen zijn in de verdere doorontwikkeling van deze techniek waarbij vragen over het tijdig beschikbaar komen van beelden en daaruit voortvloeiende informatie centraal moeten staan. Tevens kan deze satellietdata worden gebruikt voor ondersteuning bij de schouw en kunnen vliegtuig-gevlogen multispectrale beelden worden ingezet voor bijv. de KRW monitoring van groeivormen.

5 Referenties

- Aa en Maas (2019) Gebruik van nieuwe vlakdekkende beeldinformatie ten behoeve van het maaibeheer in de dagelijkse praktijk. Waterschap Aa en Maas rapport kenmerk 877714.
- Baptist, M.J., Babovic, V., Rodriguez Uthurburu, J., Keijzer, M., Uittenbogaard, R.E., Mynett, A., en Verwey, A. (2007), On inducing equations for vegetation resistance, *Journal of Hydraulic Research*, 45:4, 435-450, DOI: 10.1080/00221686.2007.9521778
- Berends, K.D., Fraaije, R., Gaytan Aguilar, S., Verdonschot, R., Penning, E. (2019) Efficient vegetation management through remote sensing in small streams, in: Stouthamer, E., Middelkoop, H., Van der Perk, M., Straatsma, M. (2019), *Land of Rivers: NCR DAYS 2019 Proceedings*, NCR publication 43-2019
- Berends, K. Penning E, Schoelynck J, Reitsema R. 2020-in prep. Rapportage stroombaanmaaien-veldproef Eefse Beek 2019. OBN-rapport aangepast beheer en kleinschalige maatregelen onderdeel stroombaanmaaien.
- Camac, J.S., Condit, R., FitzJohn, R.G., McCalman, L., Steinberg, D., Westoby, M., Joseph Wright, S., Falster, D.S., (2018), Partitioning mortality into growth-dependent and growth-independent hazards across 203 tropical tree species, *PNAS*, 115, 12459-12464, DOI: 10.1073/pnas.1721040115
- Errico, A., Pasquino, V., Maxwald, M., Chirico, G.B., Solari, L., Preti, F. (2018), The effect of flexible vegetation on flow in drainage channels: estimation of roughness coefficients at the real scale, *Ecological Engineering* 120, 411-421, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.06.018
- Garcia-Berthou, E., Cormona-Catot, G., Merciai, R., Ogle, D.H. (2012), A technical note on seasonal growth models, *Rev Fish Biol Fisheries*, 22, 635-640, DOI: 10.1007/s11160-012-9262-x
- Linneman R (2017) Risico-gestuurd Maaibeheer. Toetsing van maaistrategieën in beken met het Dottermodel. BSc Thesis Universiteit Twente
- Penning, E., Berends, K.D., en Gaytan Aguilar, S. (2017), Peilen en vegetatie – proeftuin Zuid, *Deltares rapport 1120765-012-BGS*
- Penning, E., Noorlandt, R., Berends, K.D., Fraaije, R. van den Eertwegh, G., 2018a, Nieuwe overwegingen voor maaibeheer met vlakdekkende informatie over vegetatie. H2O Online. URL: https://www.h2owaternetwerk.nl/images/H2O-Online_180507_Dotter2.pdf
- Penning, E. Berends, K. Noorlandt, R. Van den Eertwegh, G. 2018b. Richting een bepaling van vegetatiegroeisnelheden voor ruwheidsvoorspellingen. *Deltares-rapport 11200712-000*.
- Penning, E., Berends, K., en Gaytan Aguilar, S., (2018c), Peilen en vegetatie – proeftuin zuid, *Deltares rapport 1120765-012-BGS-0013*
- Penning, E. Berends, K. en Gaytan Aguilar (2020) Rapportage Lumbricus Peilen en Vegetatie 2019. Proeftuin zuid. *Deltares rapport 1120765-000-BGS-0021*
- Rhee, D.S., Woo, H., Kwon, B.A., Ahn, H.K. (2008), Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows, *River. Res. Applic.*, 24, 673-687, DOI: 10.1002/rra.1143
- Västilä, K. en Järvelä, J. (2017), Characterizing natural riparian vegetation for modelling of flow and suspended sediment transport, *J Soils Sediments*, DOI: 10.1007/s11368-017-1776-3
- Verdonschot, R., Penning, E., Berneds, K., Schoelynck, J., Reitsema, R., Verdonschot, P. (2021), Aangepast beheer en onderhoud en kleinschalig maatregelen in beken, OBN rapport nr. (nog niet gepubliceerd)
- Verschoren, V., Meire, D., Schoelynck, J., Buis, K., Bal, K.D., Troch, P., Meire, P., Temmerman, S. (2016), Resistance and reconfiguration of natural flexible submerged vegetation in hydrodynamic river modelling, *Environ Fluid Mech*, 16, 245-265

A Surrogaat hydraulisch model

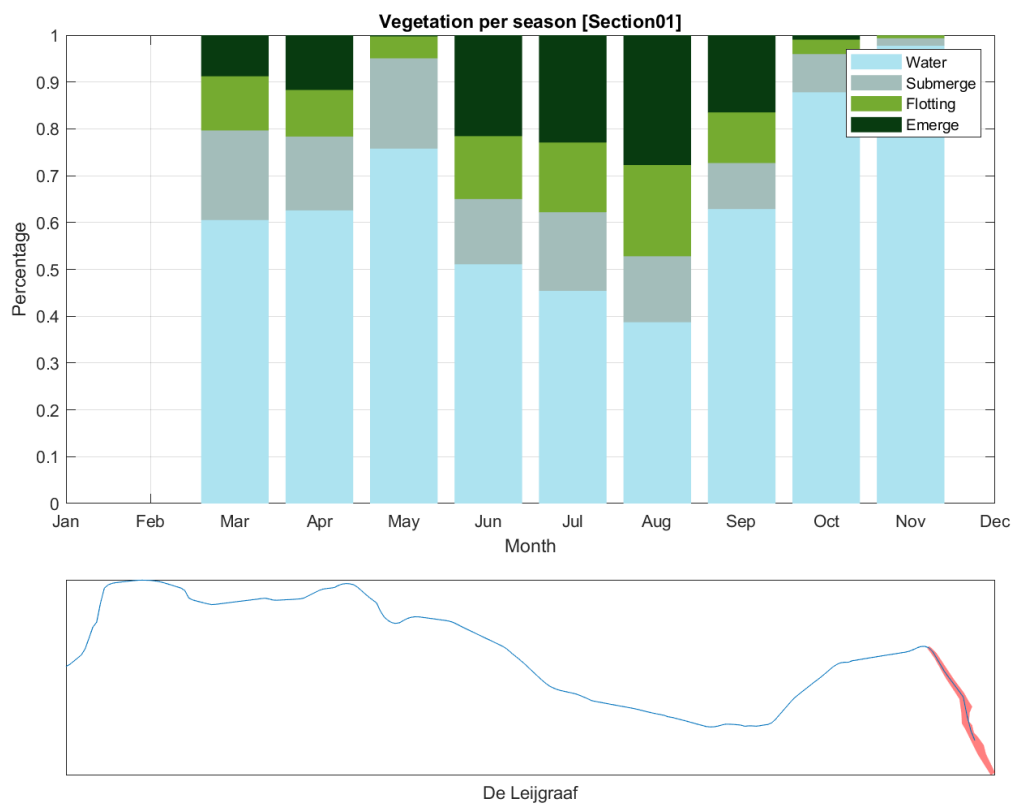
Bij de toepassing van het beekruwheidmodel (2.4.3) is gebruikt gemaakt van een surrogaatmodel om het effect van ruwheid op peilen te berekenen, in plaats van een volledig SOBEK stromingsmodel, om de rekensnelheid te reduceren. Het surrogaatmodel is een multivariaat regressiemodel (7^e graad) dat is gefit op een trainingstest van 800 berekeningen met het SOBEK model en gevalideerd op 200 andere berekeningen. Het surrogaatmodel heeft als invoer de benedenstroomse waterstand, afvoer en ruwheid, en geeft als uitvoer de bovenstroomse waterstand.

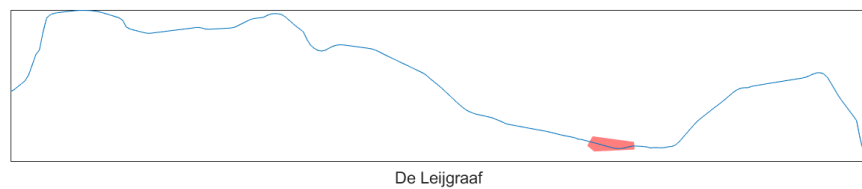
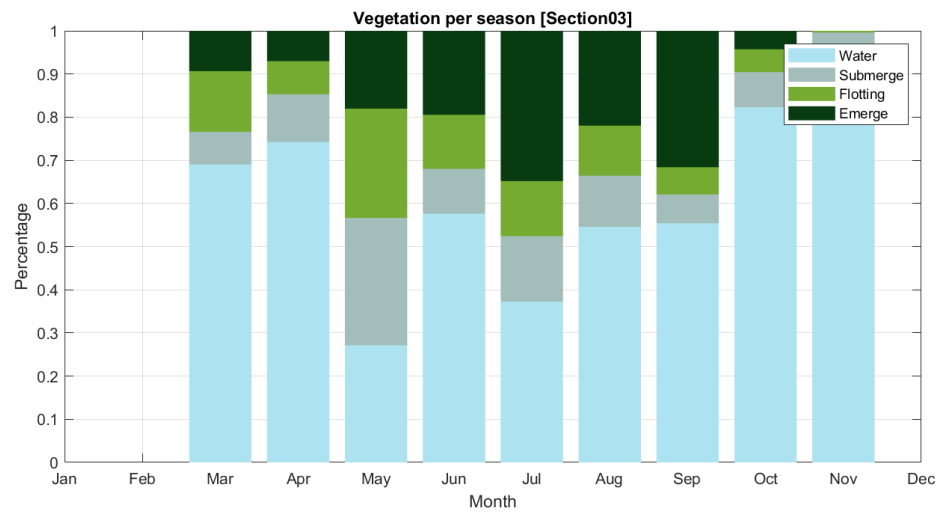
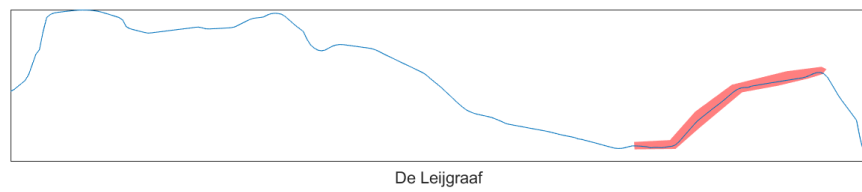
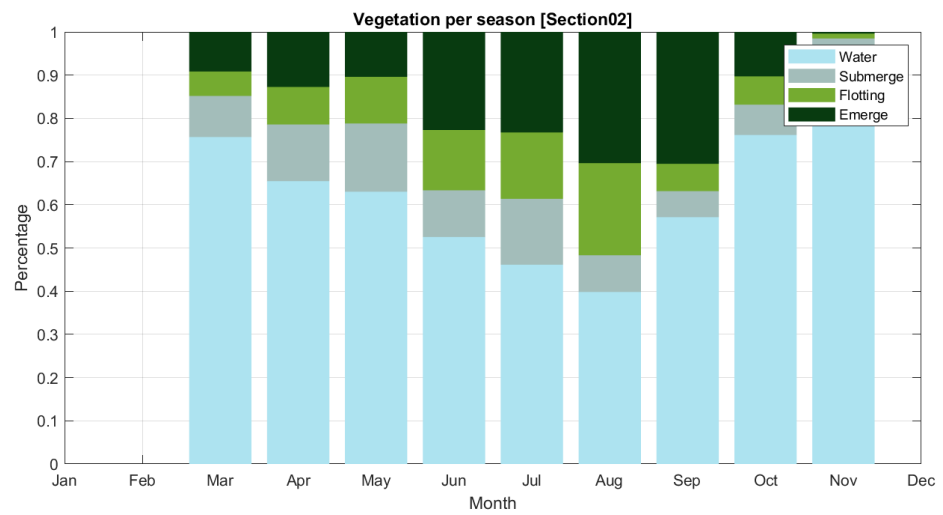


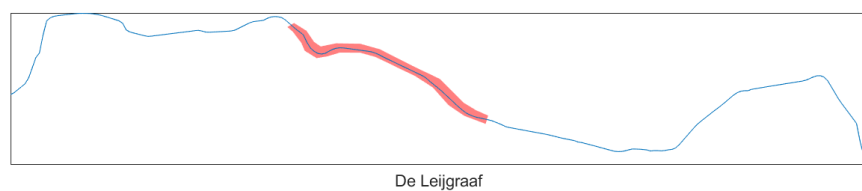
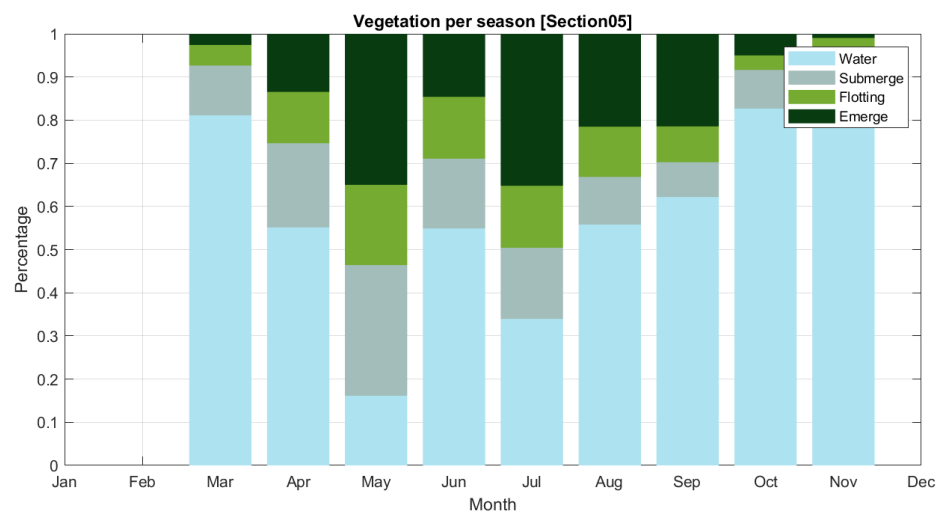
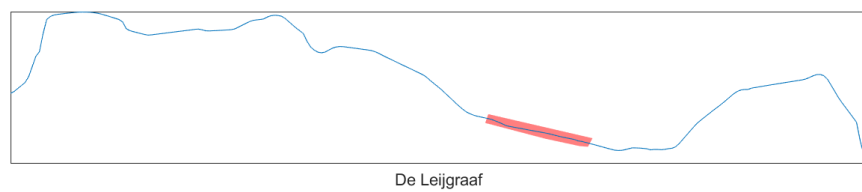
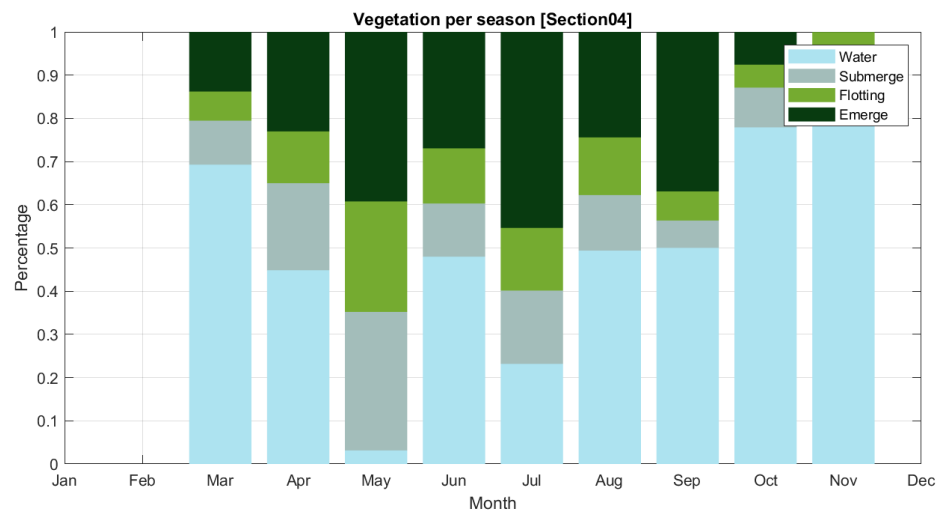
Figuur A.1 Root-mean square error van de kalibratie en kruisvalidatie sets. Het optimum ligt ongeveer rond de zevende graad. Hogere fouten bij kruisvalidatie bij hogere graden duidt op overfitting.

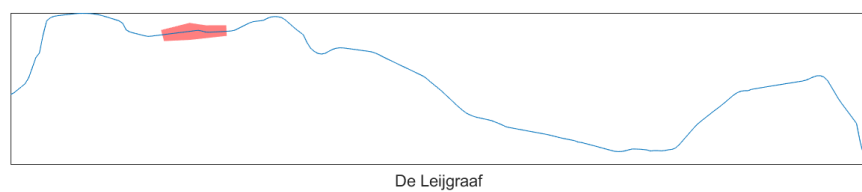
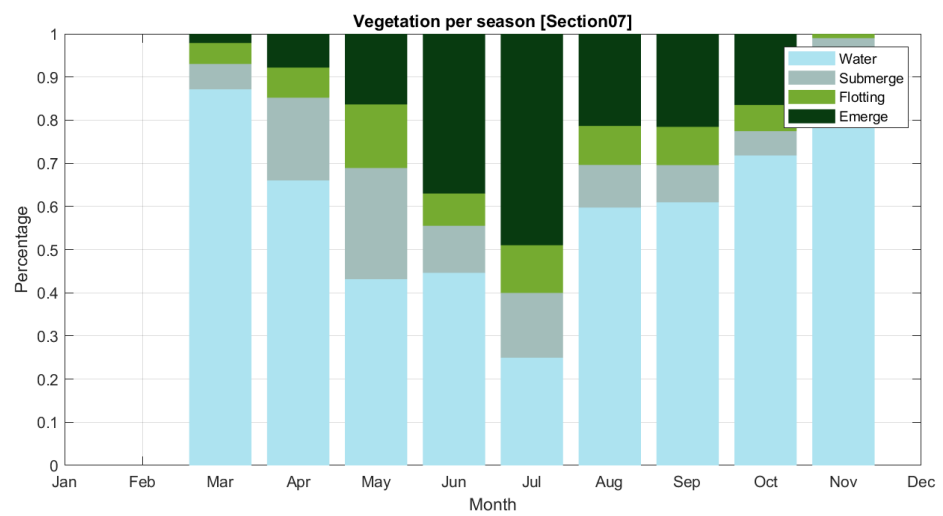
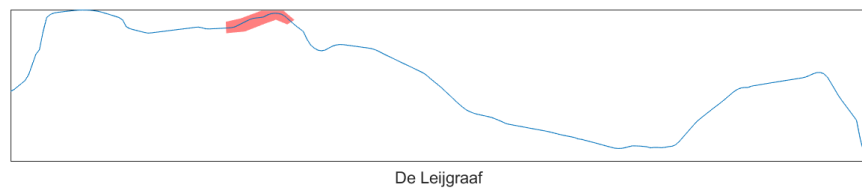
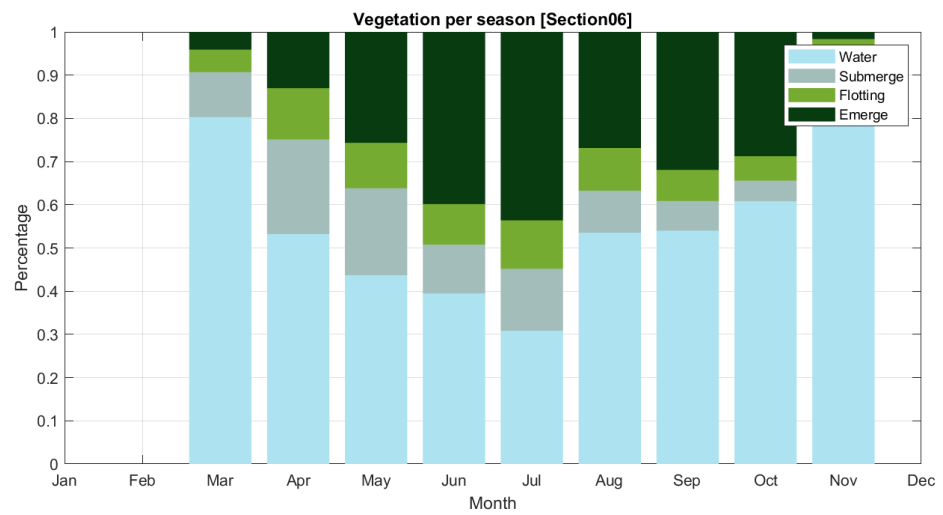
B Seizoensmatige bedekkingen per stuwpand

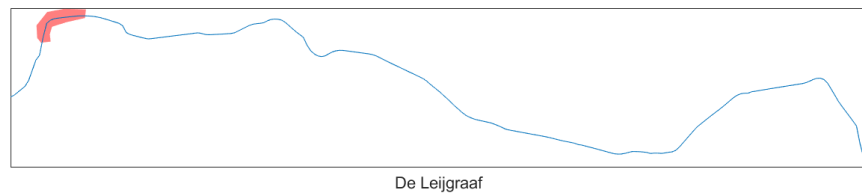
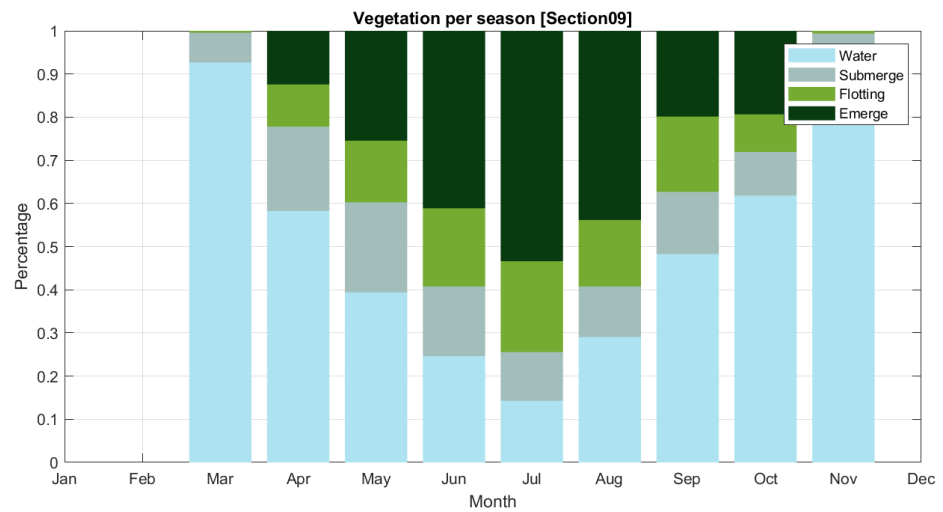
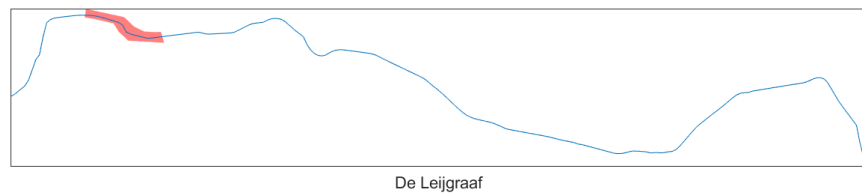
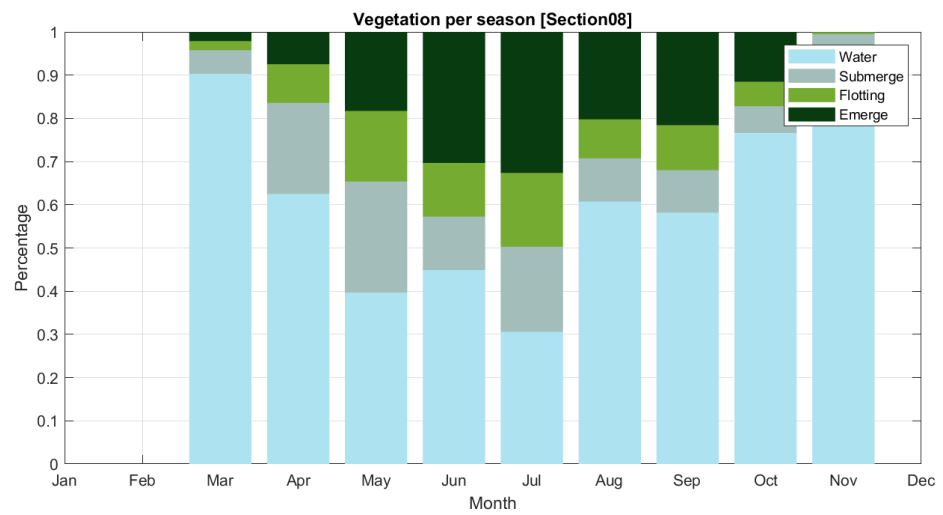
Deze appendix toont voor alle verschillende stuwpanden (aangegeven in rood) de seizoensmatige variatie in bedekkingsgraad.





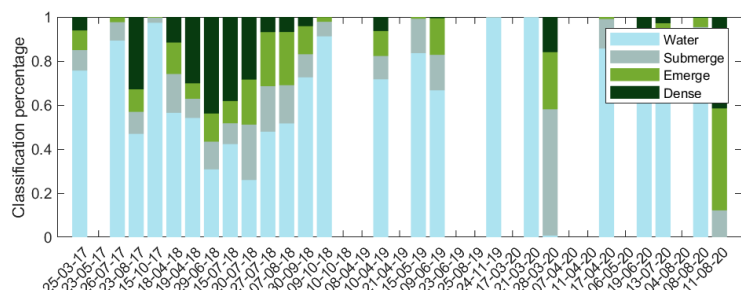
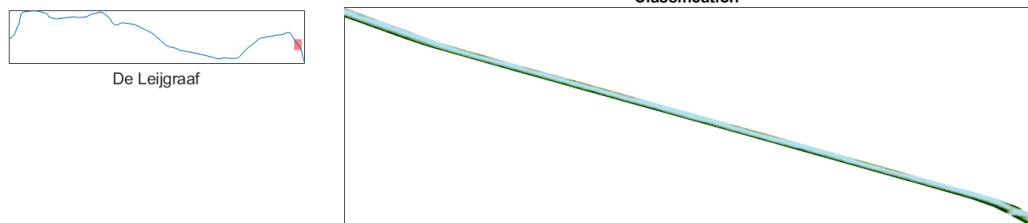
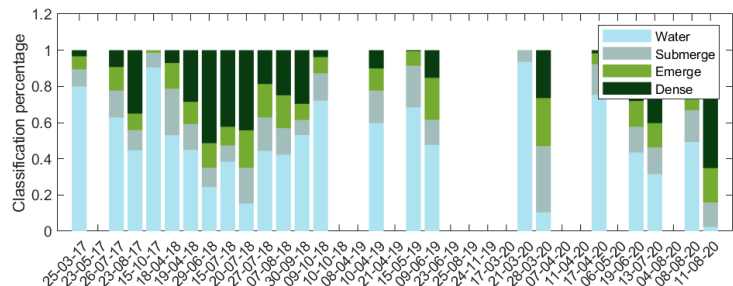
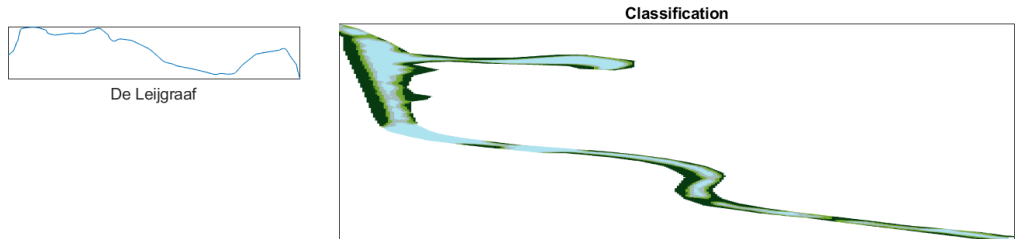


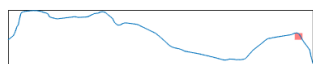




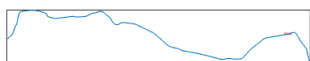
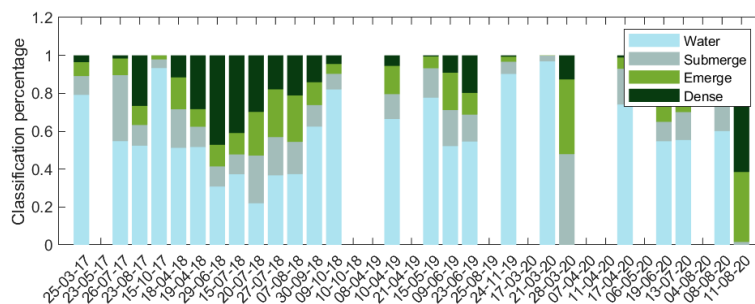
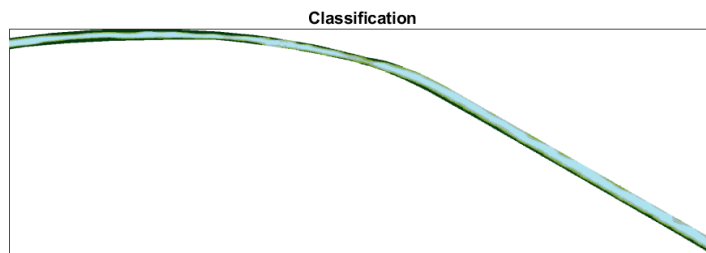
C Bedekking langs het traject

Deze appendix toont de gemiddelde bedekking voor alle hotspots langs de Leijgraaf in meer detail, waarbij in het bovenste plaatje een gemiddelde bedekking is geplot, en daaronder de bedekkingsgraad zoals afgeleid uit de beschikbare satellietbeelden per kolom. NB: de kolommen in dit plaatje staan wel in de juiste tijdsvolgorde, maar de afstand in tijd tussen de individuele kolommen is representeert niet een absolute tijd-as (in de winter zijn er veel minder beschikbare beelden dan in de zomer). Lege ruimtes tussen de kolommen betekenen dat er wel een beeld beschikbaar is, maar dat het betreffende traject niet op dat beeld staat.

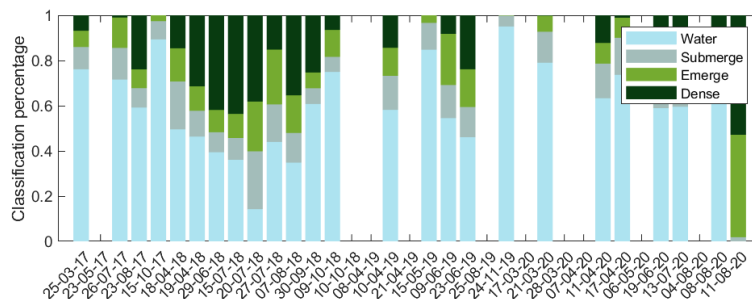
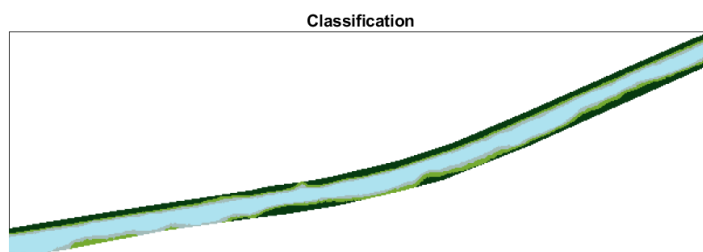


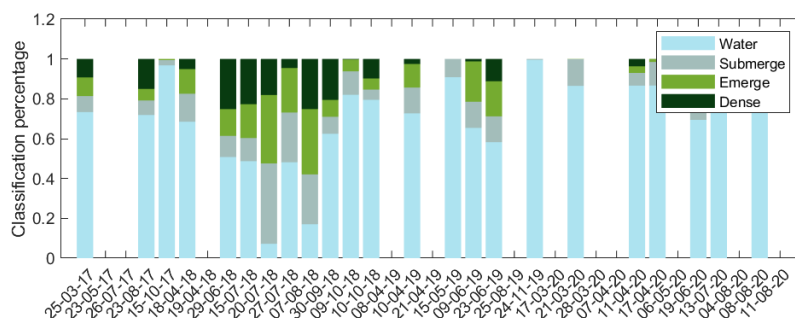
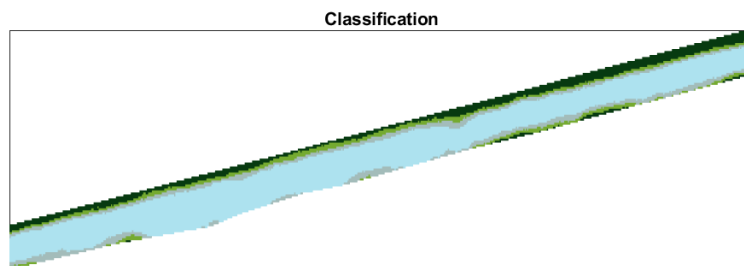
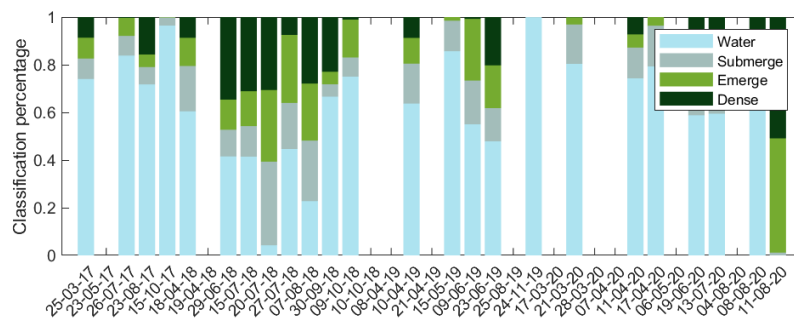
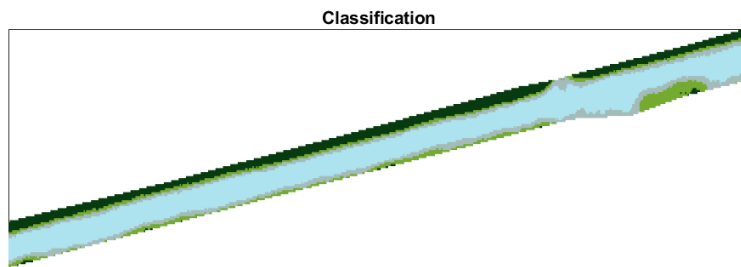
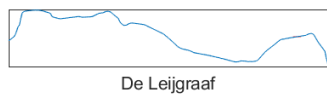


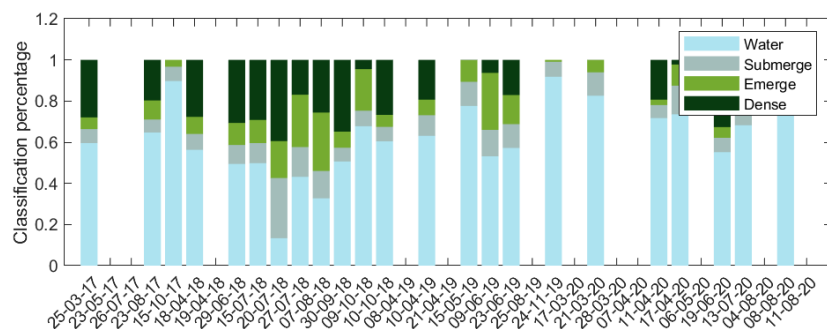
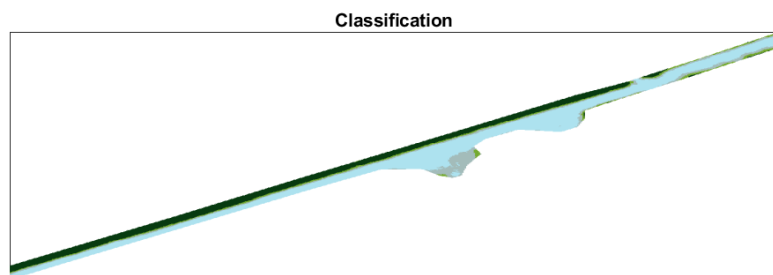
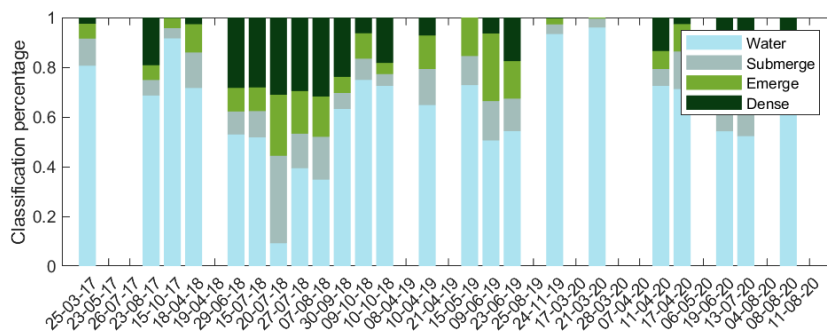
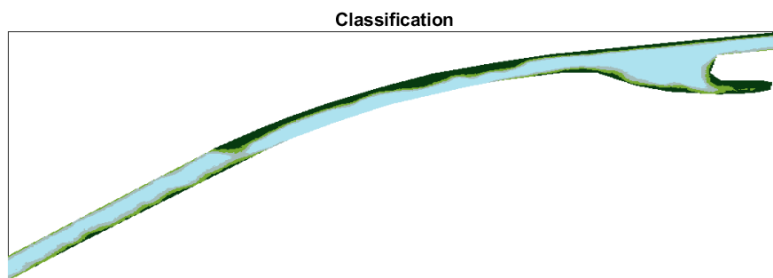
De Leijgraaf

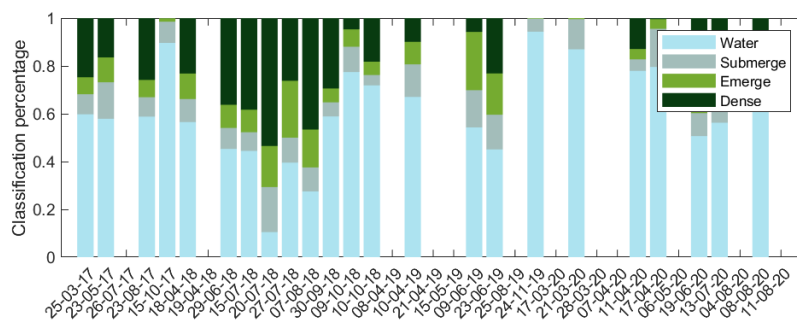
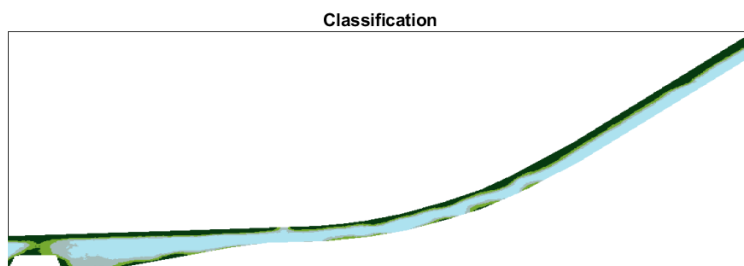
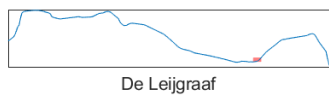
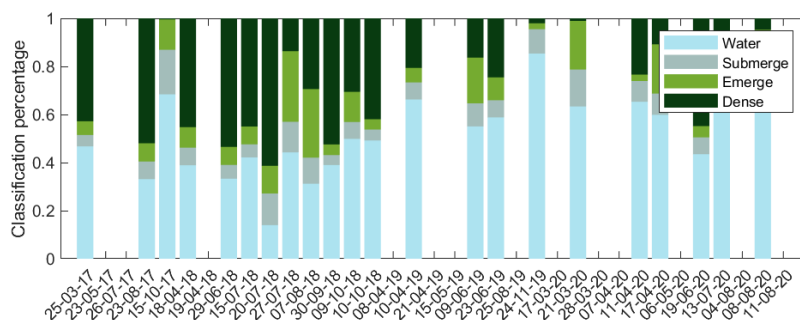
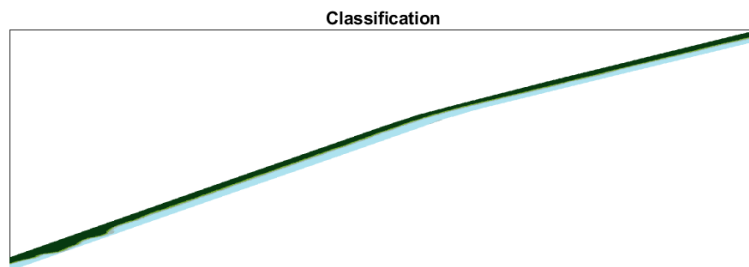
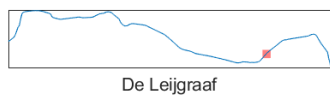


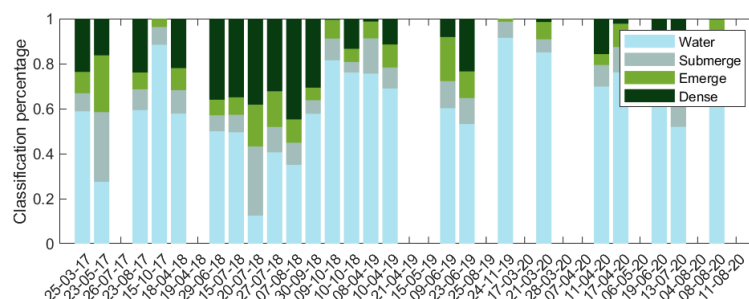
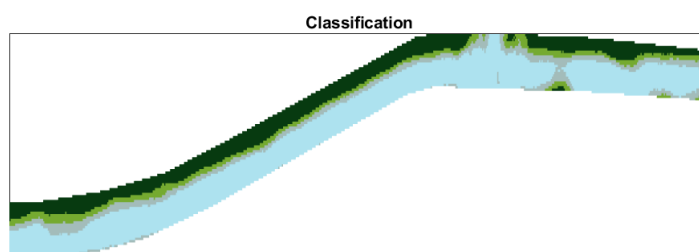
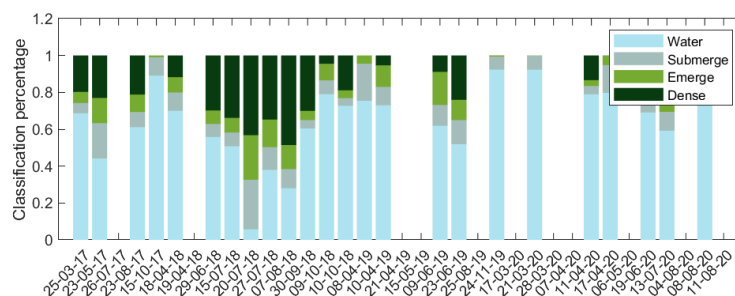
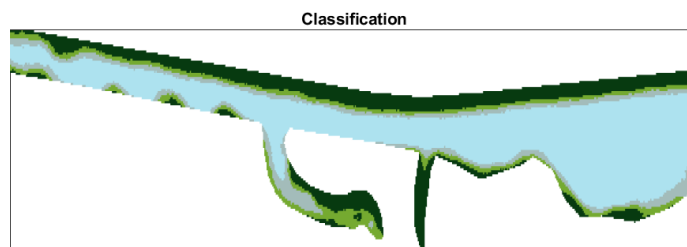
De Leijgraaf

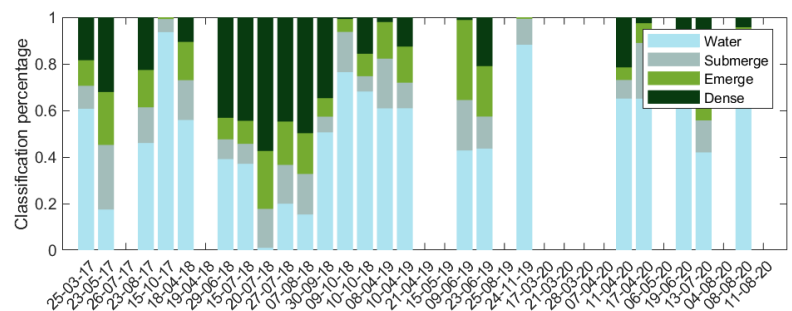
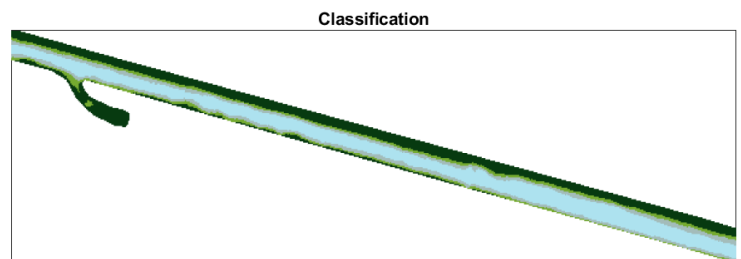
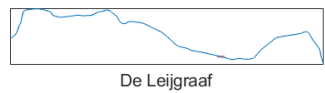
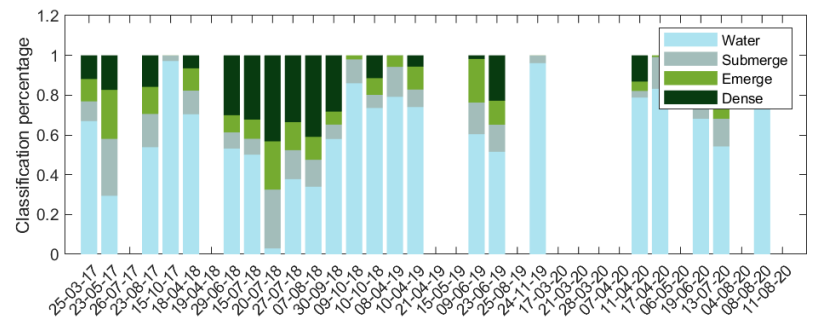
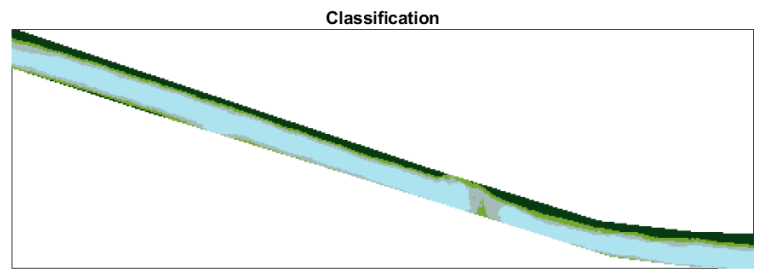


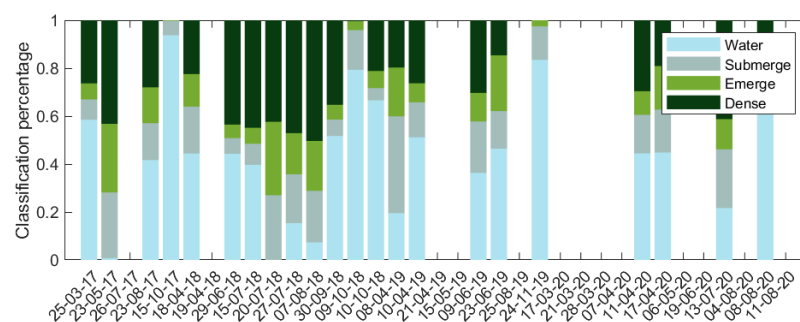
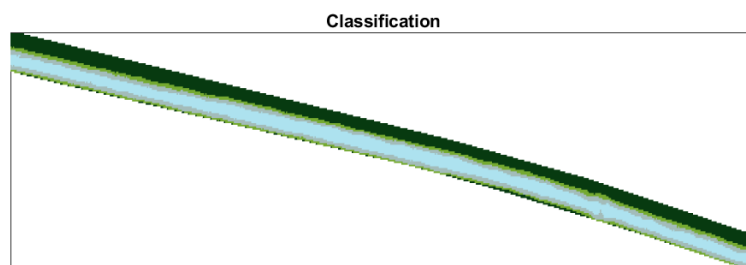
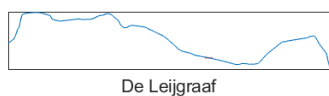
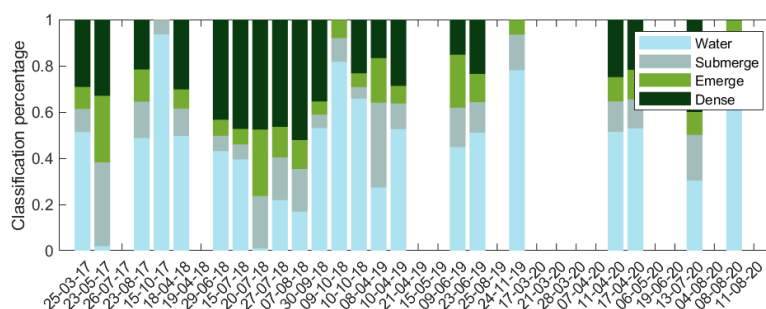
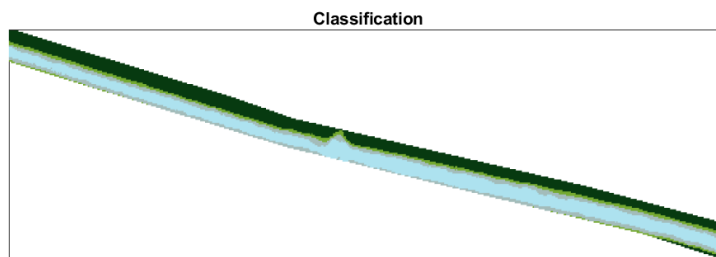


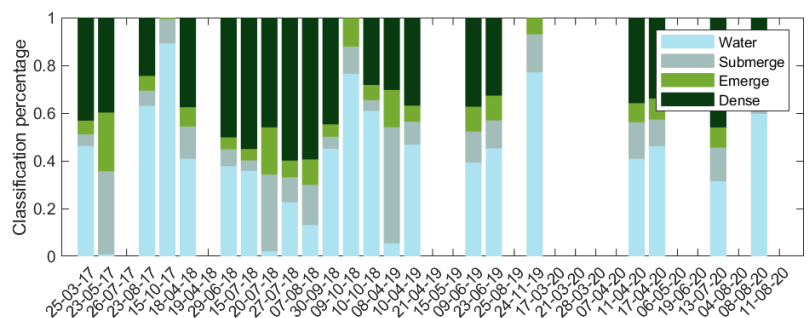
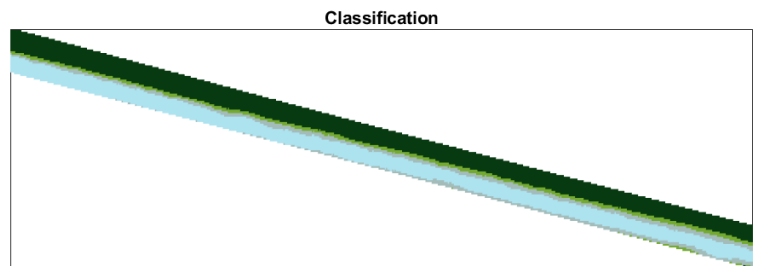
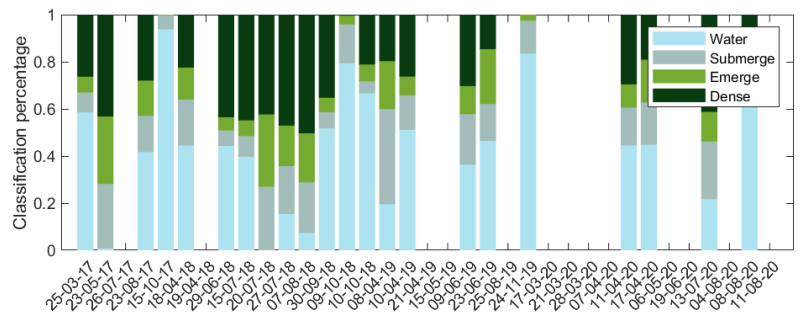
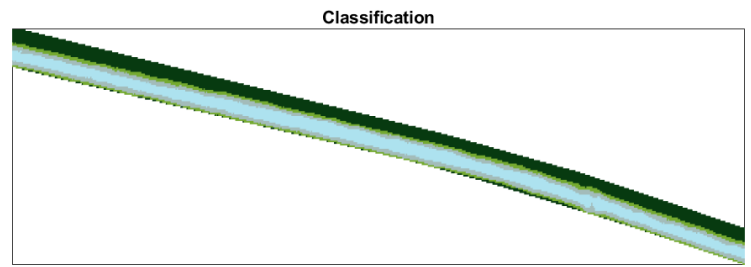
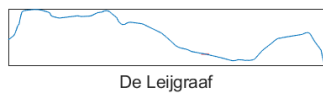


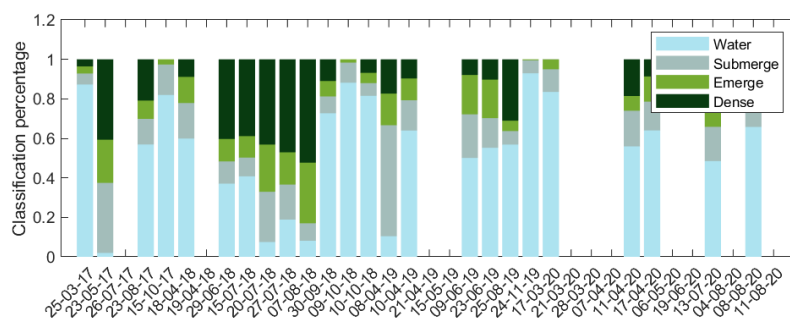
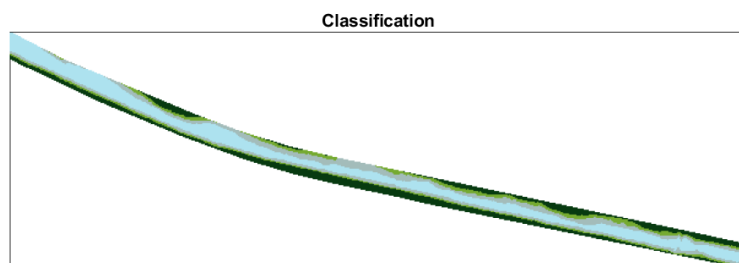
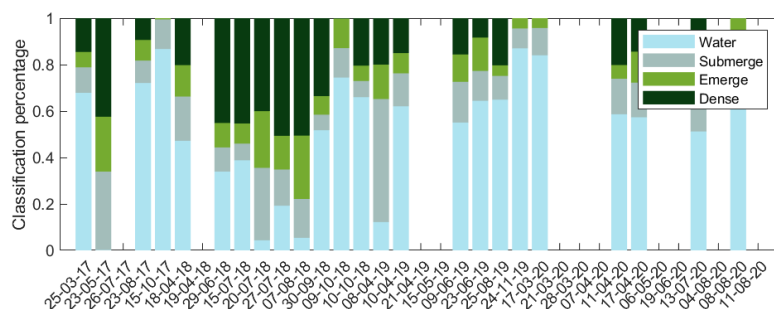
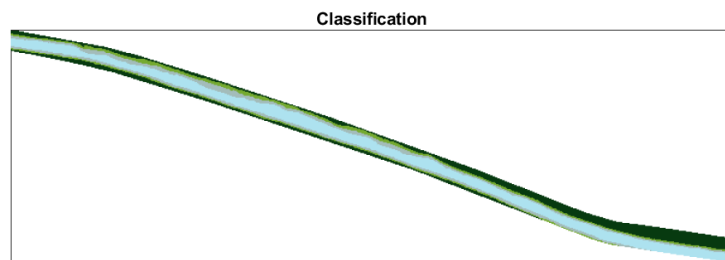
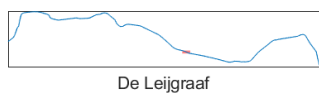


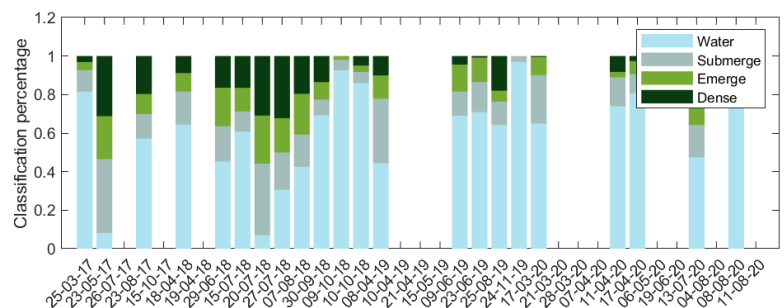
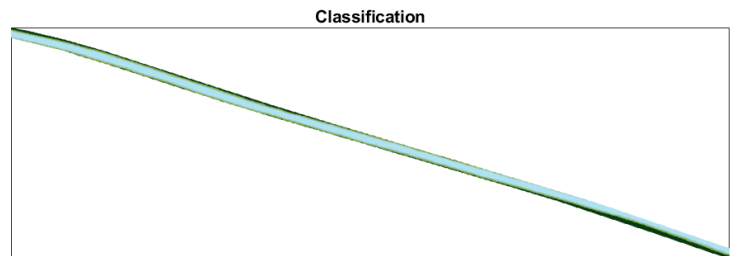
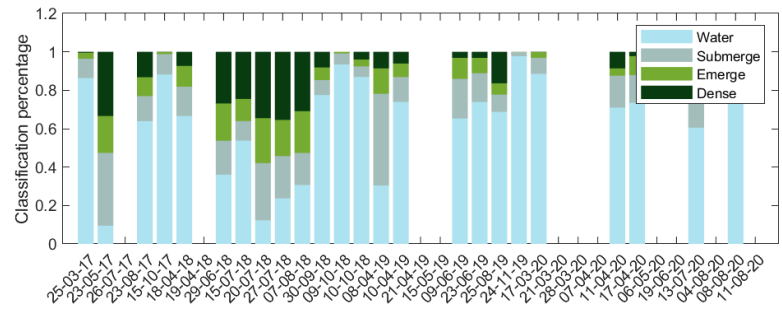
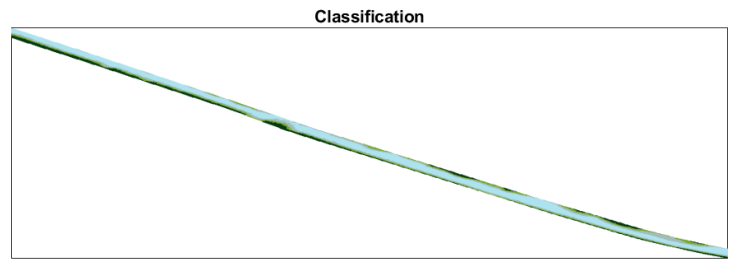






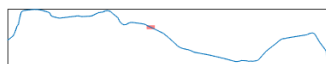
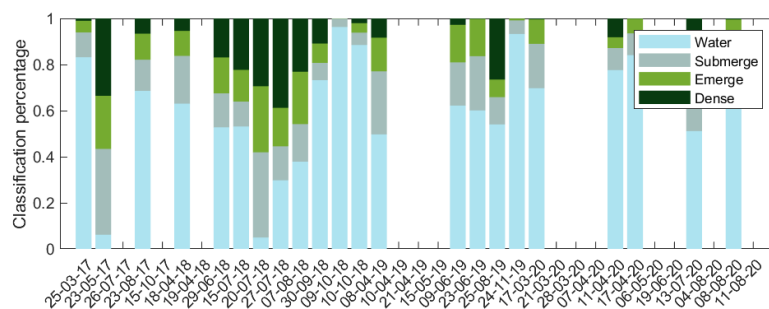
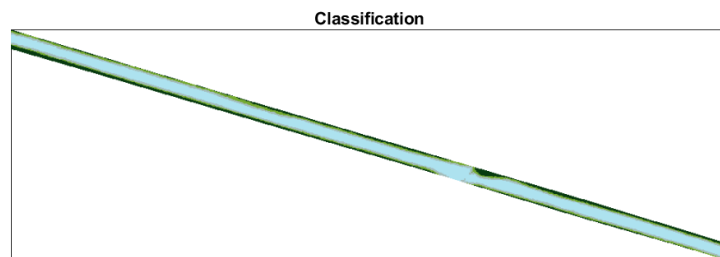




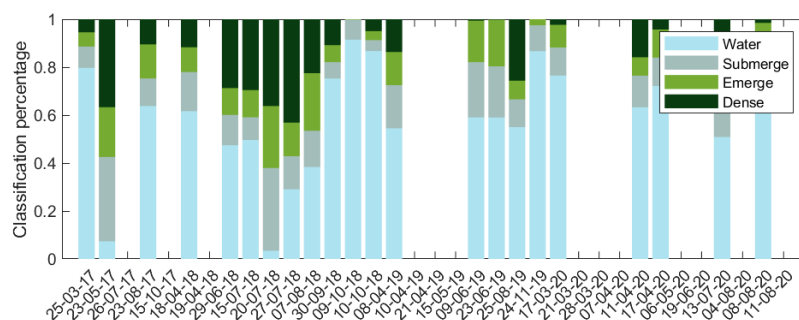
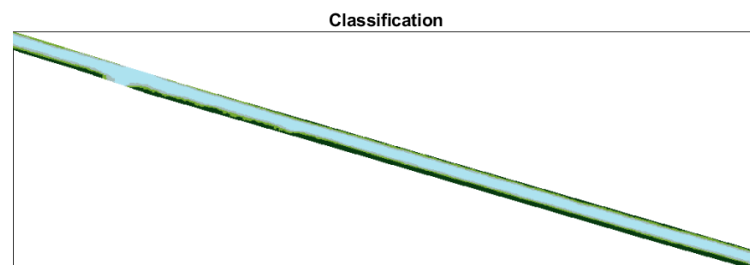


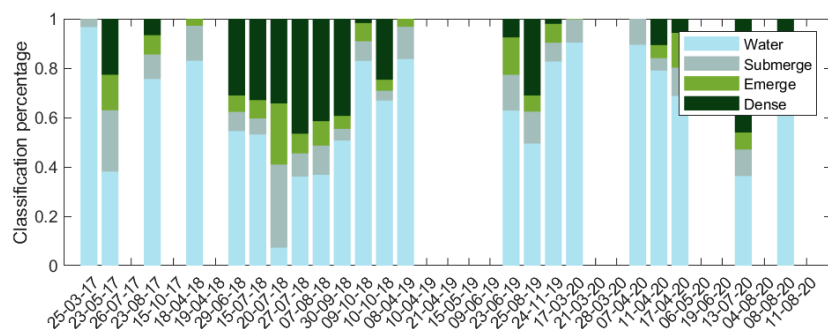
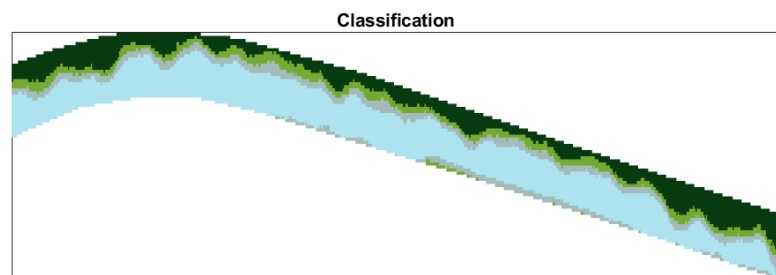
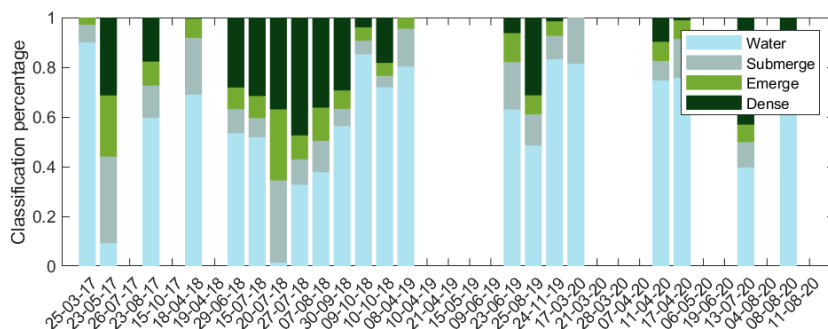
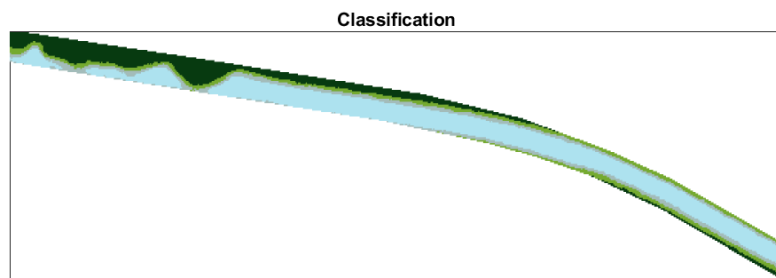
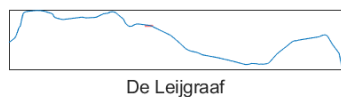


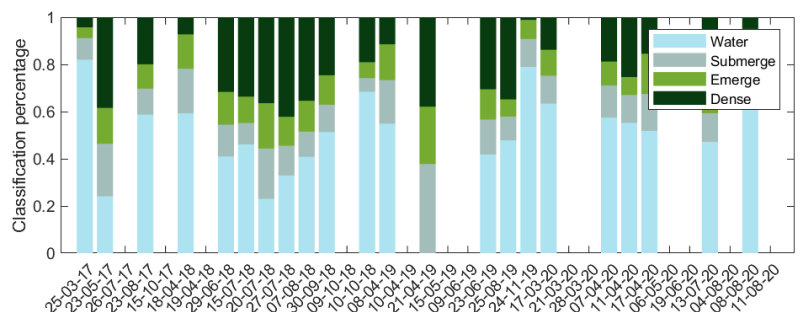
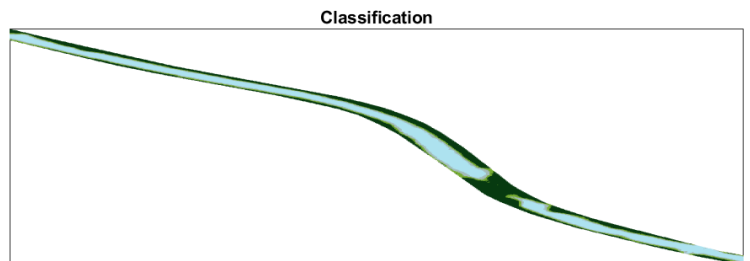
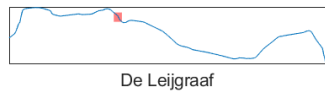
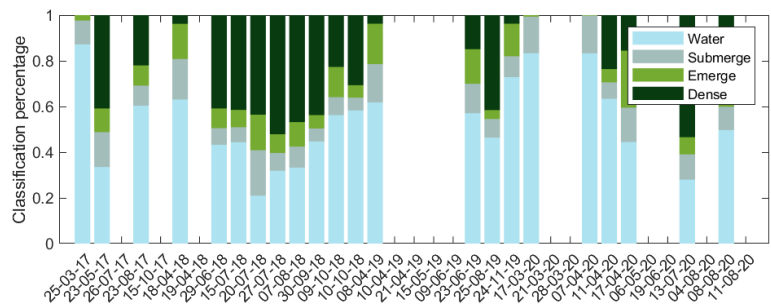
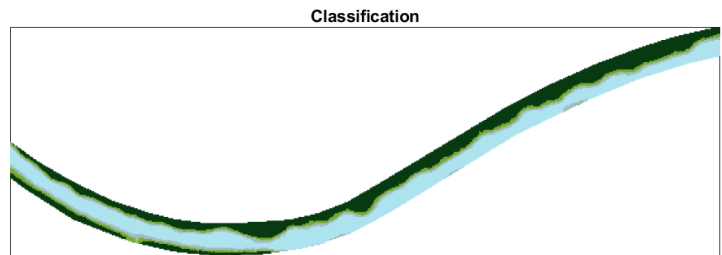
De Leijgraaf

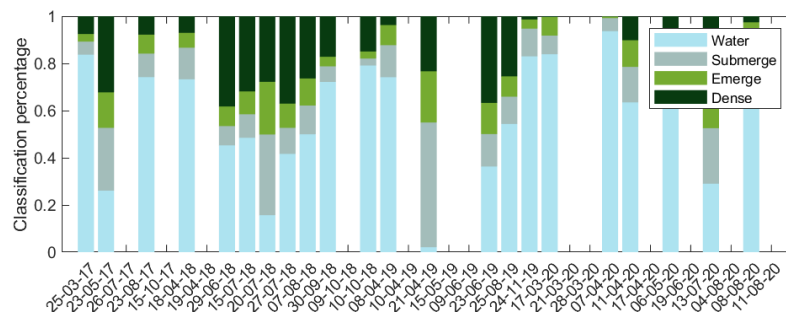
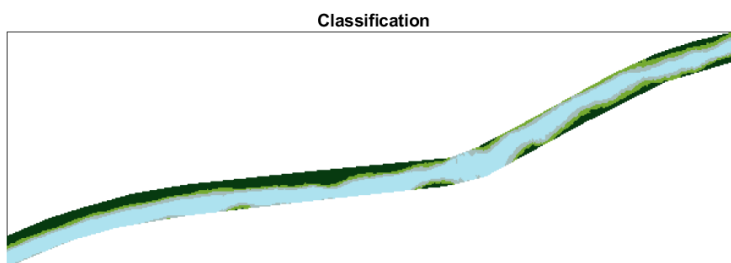
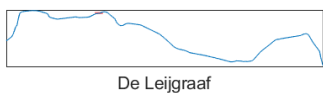
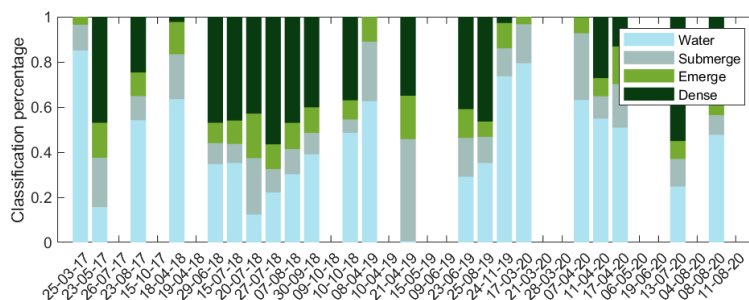
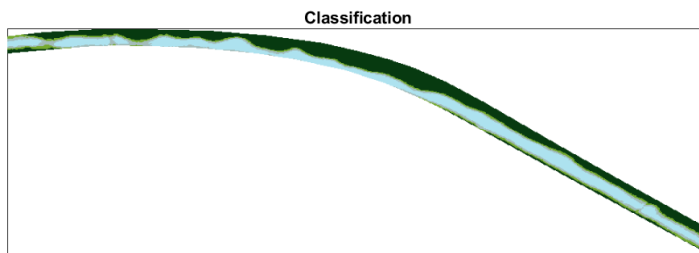


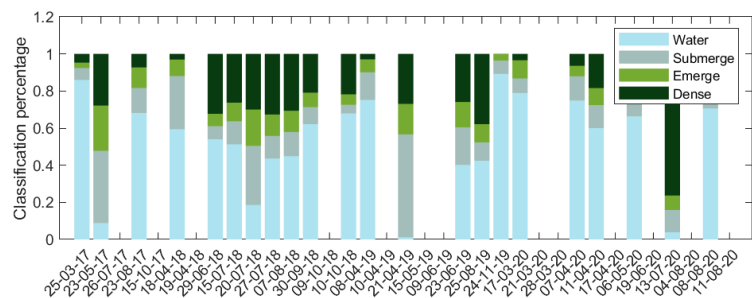
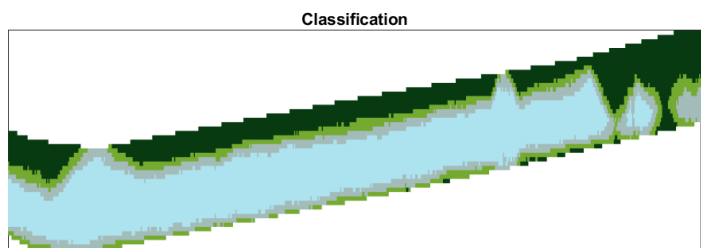
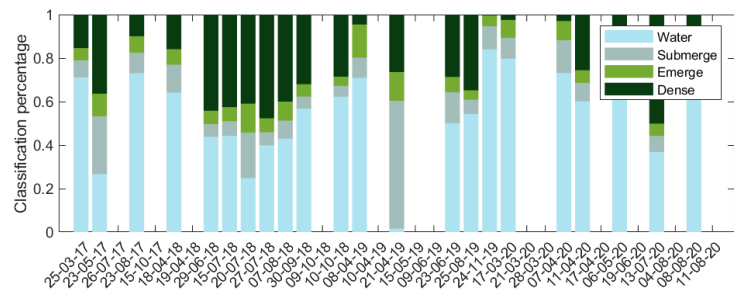
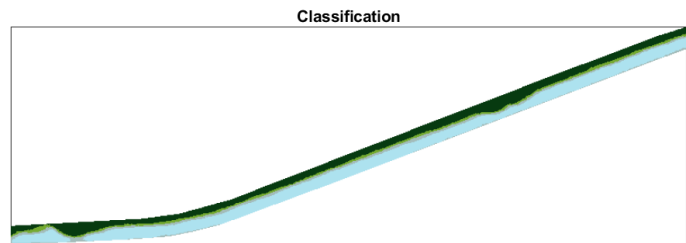
De Leijgraaf

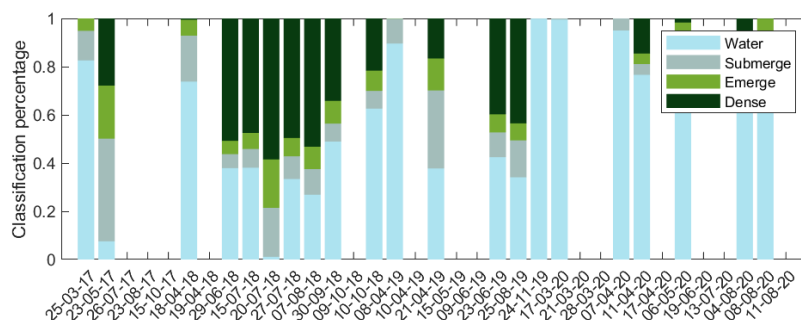
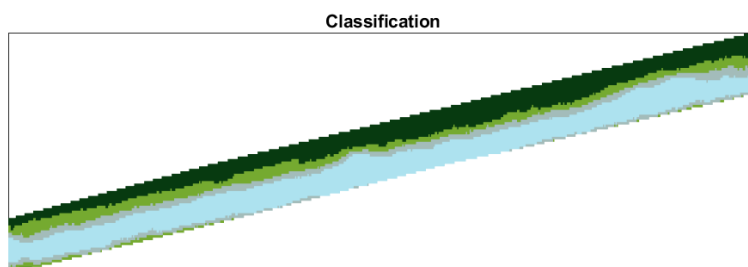
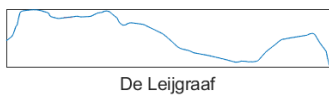
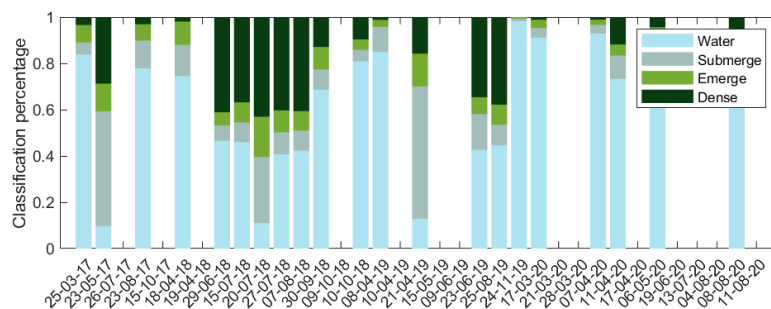
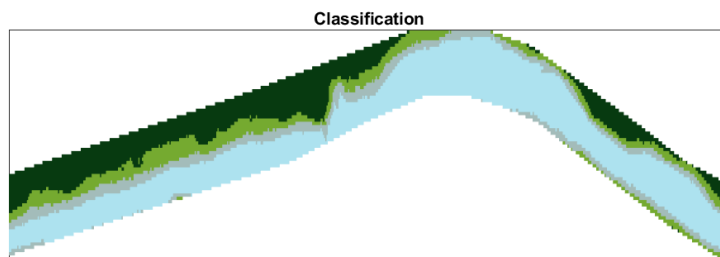


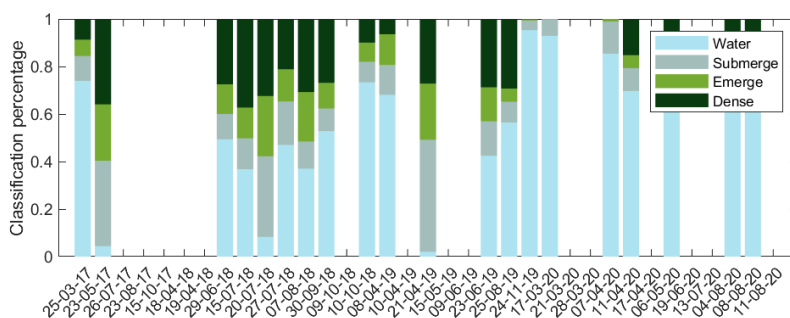
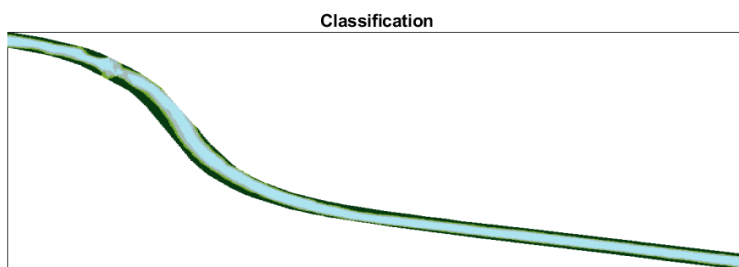
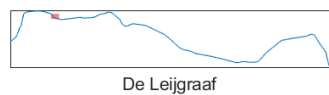
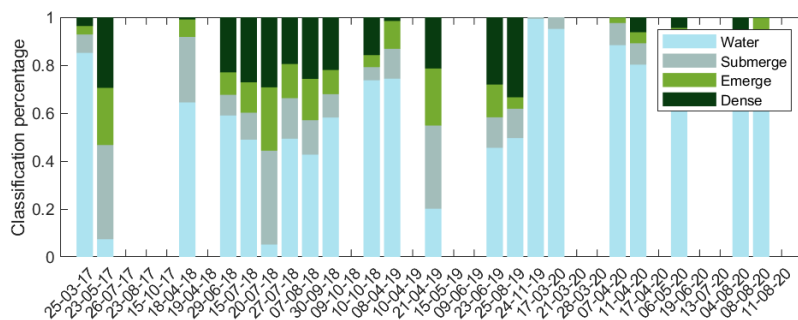
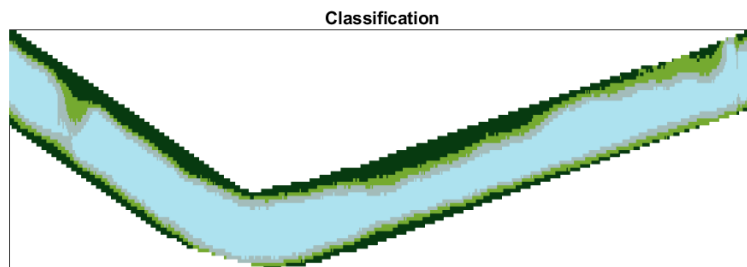
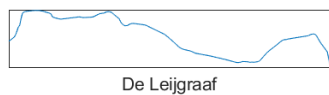


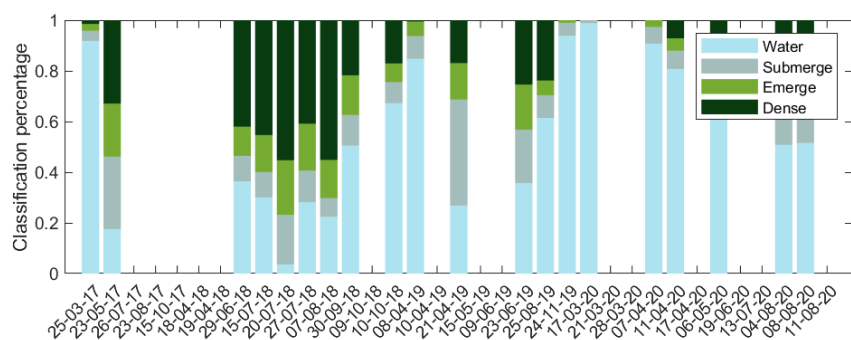
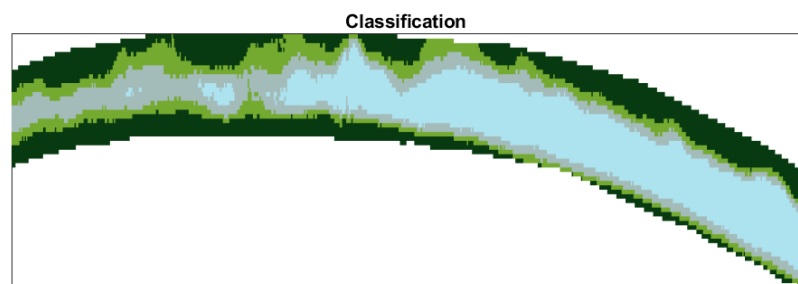
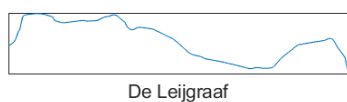
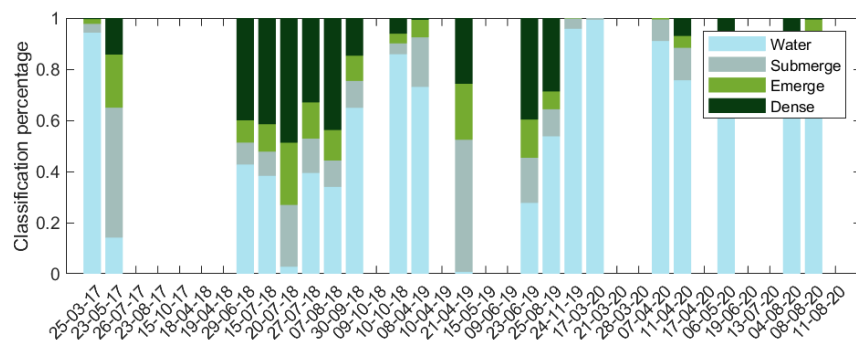
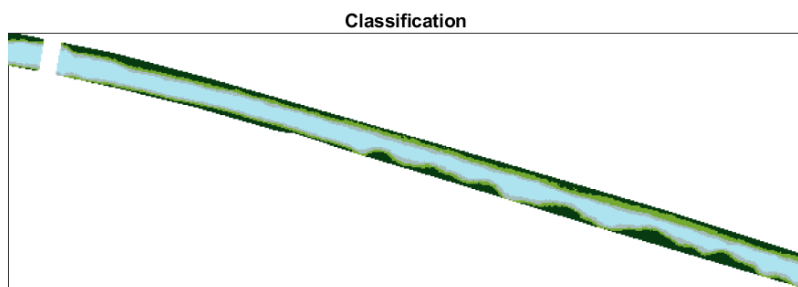


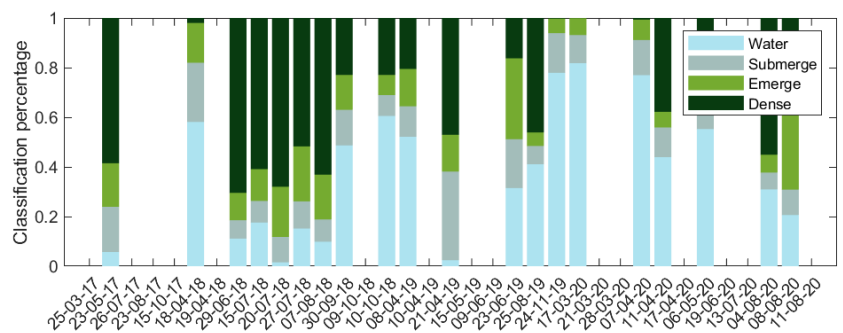
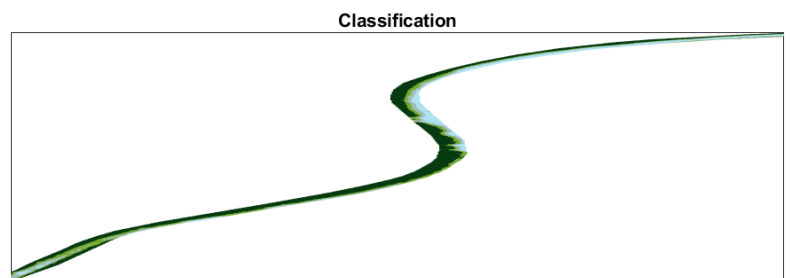
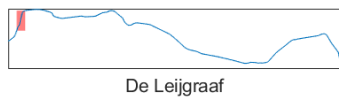
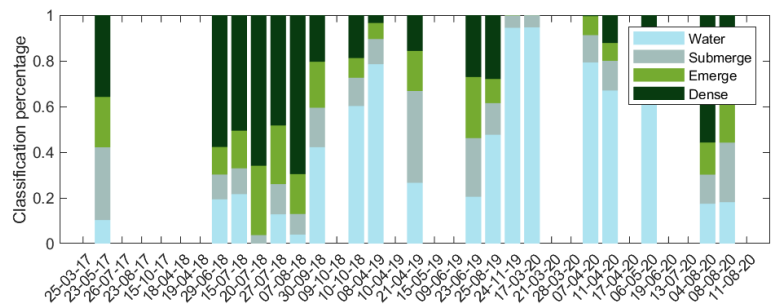
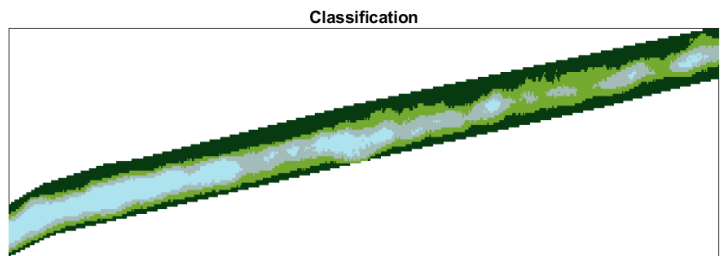












Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl