



Innovatieve monitoringstechnieken voor rivierbeheer

Verkenning naar de mogelijkheden en de
meerwaarde van cameramonitoring

Opdrachtgever



Deltares



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Innovatieve monitoringstechnieken voor rivierbeheer

Verkenning naar de mogelijkheden en de
meerwaarde van cameramonitoring

Definitief eindrapport

Dit project is gefinancierd door:
Corporate Innovatieprogramma van Rijkswaterstaat WVL

Auteurs:

Bart Strijker (HKV)
Guy Dupuits (HKV)
Eelco Verschelling (Deltares)
Fedor Baart (Deltares)

PR4359.10

Maart 2021



Samenvatting

Rijkswaterstaat maakt in het kader van het netwerk- en prestatie management, oftewel het rivierbeheer en de daaraan gekoppelde onderhoudsopgave, veelal gebruik van hoge kwaliteit, laagfrequente monitoringstechnieken (1-2x per jaar), zoals LiDAR en fotogrammetrie. Daarnaast voert Rijkswaterstaat regelmatig visuele inspecties uit om een beter beeld te krijgen van de morfologische veranderingen als gevolg van bijvoorbeeld rivierkundige maatregelen. De hoogfrequenter dynamiek (hydrodynamiek en morfodynamiek) binnen het jaar of binnen een maand worden hiermee niet in beeld gebracht. Deze studie is een innovatief experiment voor een nieuwe manier van monitoren en gegevensverwerking: het inzetten van camerabeelden en beeldverwerkingsalgoritmes ('*computer vision*') om relevante informatie uit de beelden af te leiden. Het doel van dit experiment is om te evalueren of cameramonitoring een zinvolle aanvulling kan zijn op bestaande monitoringstechnieken van Rijkswaterstaat.

In een workshop met experts van Rijkswaterstaat, Deltares en HKV zijn allereerst twee proeflocaties geselecteerd in het rivierengebied: de nevengeul in de Pontwaard langs de Lek bij Vianen (Figuur 1), en de nevengeul 'de Horde' (Figuur 3) langs de noordoever van de Lek benedenstrooms van Vianen. Bij beide locaties vindt oevererosie plaats door een combinatie van getijstroming, scheepvaartgolven en hoogwatergolven. De mate waarin deze processen de morfologische activiteit beïnvloeden en welke processen dominant zijn voor oevererosie zijn belangrijke vraagstukken voor zowel beheer en onderhoud als planstudies.

Bij beide proeflocaties is vervolgens een camera geplaatst: bij de Pontwaard een videocamera en bij de Horde een fotocamera. De videocamera maakt 15 beelden per seconde (bruikbaar voor hoog- en laagfrequent fenomenen) en de fotocamera maakt één beeld per uur (alleen laagfrequenter fenomenen). Het project had een korte looptijd en nadat de camera's



ongeveer een maand lang beelden hadden geregistreerd, zijn de beelden nader verwerkt. Aansluitend bij één van de mogelijke toepassingen (evaluatie van hydromorfologische processen rondom maatregelen) lag hierbij de focus op het analyseren van de ligging van de oeverlijn en golfkarakteristieken.

In dit project hebben we gebruik gemaakt van twee beeldbewerkingstechnieken. De zogenoemde *classificatiemodellen* zijn gehanteerd om gebieden in de beelden automatisch in te kunnen delen in drie categorieën: water, de vegetatie en de klif (steilrand). Hiermee kan eventuele oevererosie gevolgd worden. Daarnaast is de ligging van de oeverlijn gevolgd aan de hand van zogenoemde *timestacks*: intensiteiten langs een vaste raai in het beeld gestapeld in de tijd. We hebben aangetoond dat het mogelijk is om de gehanteerde technieken de oeverlijn als functie van de tijd te volgen. Hoewel oevererosie in onze beelden niet kon worden geconstateerd - daar was de looptijd van het project te kort voor - verwachten wij dat de techniek hier wel geschikt voor is.

Verder is gekeken naar het bepalen van golfkarakteristieken op basis van videobeelden, waarbij de focus lag op de periode van golven die de geul bij de Pontwaard binnentreden. In een analyse van het signaal in het tijddomein hebben we de periode van individuele golven bepaald op basis van de videobeelden. Daarnaast hebben we met behulp van een frequentie-analyse het golfspectrum afgeleid, waarin de scheepsgolven die optraden in de geselecteerde tijdspanne herkenbaar waren. Hiermee kan inzicht worden verkregen in de lokale golfcondities. Dit is relevant voor het in beeld brengen van de processen die leiden tot bijvoorbeeld oeverafkalving. Het in kaart brengen en mogelijk kwantificeren van het afkalvingsproces van de oever kan bijdragen in het formuleren van kosteneffectieve en duurzame mitigerende beheermaatregelen.

Deze studie heeft laten zien dat het mogelijk is om met cameramonitoring de oeverlijn te volgen en een beeld te schetsen van de golfkarakteristieken ter plaatse van relevante locaties (bijvoorbeeld kribvakken of nevengeulen). Het is een meettechniek die bijdraagt aan de reeks bestaande technieken op meerdere vlakken:

1. De techniek is relatief goedkoop, makkelijk te onderhouden, snel inzetbaar en levert een hoogfrequente dataset op
2. De techniek geeft een ruimtelijk dekkend beeld en kan daarmee een goede aanvulling zijn op data verkregen met lokale sensoren (die kunnen dienen ter verificatie)
3. De techniek kan worden ingezet om meerdere parameters uit ieder beeld, afzonderlijk of in samenhang, af te leiden. Daarnaast gaan de ontwikkelingen op het gebied van beeldbewerking zodanig snel dat we kunnen verwachten dat er in de toekomst steeds meer mogelijk zal zijn.

Door eroderende oevers te kunnen volgen, kunnen de onderliggende fysische processen beter begrepen worden. Hiermee kunnen ingrepen geëvalueerd worden en kan ook de kennis gebruikt worden voor toekomstige ontwerpen van (neven)geulen en oevers langs de grote rivieren. Voor de casus

“oevererosie” kan cameramonitoring Rijkswaterstaat een uitstekende aanvullende meetmethode zijn. Ook kan deze meettechniek bruikbaar zijn voor lokale problematiek/ingrepen op andere plekken in het rivierengebied, zoals bij kribvaksuppleties en natuurvriendelijke oevers.

In dit project hebben we ons met de beeldverwerkingsalgoritmes beperkt tot het pixeldomein van de foto's. Het is echter eenvoudig om de resultaten met behulp van grondcontrolepunten te transformeren naar 'echte' veld coördinaten. Dit is uiteraard een noodzakelijke voorwaarde om de resultaten verder te gebruiken. Verder zijn de informatie over de oeverlijn en golfkarakteristieken binnen dit experiment niet gevalideerd aan de hand van andere datasets. Dit is ook een aspect dat bij toekomstige toepassingen aandacht verdient.

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Project op hoofdlijnen	1
2	Context	3
2.1	Usecase	3
2.2	Proeflocaties	5
2.3	Meetopstelling	8
3	Aanpak	13
3.1	Beeldverwerkingsalgoritmes in het algemeen	13
3.2	Georeferentie en orthorectificatie	16
3.3	Toepassing van timestacks: golfkarakteristieken	17
3.4	Toepassing van classificatiealgoritmes	19
4	Resultaten	27
4.1	Onbewerkte camerabeelden	27
4.2	Oevererosie	29
4.3	Golfkarakteristieken	32
5	Discussie	37
6	Conclusies en aanbevelingen	39
6.1	Conclusies	39
6.2	Aanbevelingen	40
7	Referenties	43

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Op verzoek van het Topteam Water en Maritiem is Rijkswaterstaat in 2018 gestart met de Proeftuin Duurzame Rivieren. Dit onderzoeksproject biedt ruimte om met partners praktijkgerichte experimenten te koppelen aan concrete opgaven en aldus een bijdrage te leveren aan een toekomstbestendig riviersysteem. De Proeftuin focust op een drietal gebieden: de Rijn-Maasmonding, Boven-Waal bij Nijmegen (rondom de vaste laag) en de IJssel van Arnhem tot Kampen inclusief het Twentekanaal.

Het is voor Rijkswaterstaat van groot belang om inzicht te hebben in het effect van innovatieve rivierkundige maatregelen voordat deze op grotere schaal in Nederland wordt toegepast. Innovatieve monitoringstechnieken kunnen hierbij helpen. Rijkswaterstaat, HKV en Deltares voeren daarom samen een proefproject uit waarbij de toegevoegde waarde onderzocht wordt van cameramonitoring in combinatie met Computer Vision ten opzichte van meer traditionele technieken (bijvoorbeeld LiDAR/Multibeam). Computer Vision is een relatief nieuwe interdisciplinaire techniek waarbij innovatieve beeldbewerkingstechnieken worden ingezet om relevante informatie te vergaren uit foto's of filmopnames.

Dit rapport beschrijft de resultaten van het proefproject dat door RWS, HKV en Deltares samen is uitgevoerd.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is het verkennen of cameramonitoring (camerabeelden en computer vision) voor Rijkswaterstaat meerwaarde kan bieden binnen rivierkundige aspecten – bijvoorbeeld bij het monitoren van innovatieve rivierkundige maatregelen voordat deze op grotere schaal worden toegepast.

1.3 Project op hoofdlijnen

- Stap 1: Vaststellen usecase en proeflocatie. In deze fase is een startbijeenkomst georganiseerd waarin samen met specialisten van Rijkswaterstaat, HKV en Deltares is gebrainstormd over 1) voor welk project/probleem ("usecase") cameramonitoring bruikbare informatie zou kunnen toevoegen en 2) op hoofdlijnen afgesproken welke proeflocaties voldoen aan de gestelde criteria (**paragraaf 2.1 en 0**)

- Stap 2: Inrichten meetlocatie. In deze fase zijn de proeflocaties ingericht met foto- en/of videocamera's, waarbij rekening gehouden wordt met de criteria die vanuit de *Computer Vision* (beeldbewerkingstechnieken) en de usecase gesteld worden aan de plaatsing en aan het type camera's. (**paragraaf 2.3**)
- Stap 3: Data verzamelen en processen. Nadat er gedurende de hiervoor beschikbare periode binnen dit project (circa één maand) visuele data verzameld is, zijn diverse algoritmes ontwikkeld en toegepast om bruikbare informatie te halen uit de beelden. Hierbij is gebruik gemaakt van de laatste inzichten op het gebied van Computer Vision en expertise bij Deltares op dit gebied. (**hoofdstuk 3 en 4**)
- Stap 4: Discussie en reflectie meettechniek. De resultaten van dit onderzoek worden geanalyseerd en beoordeeld op hun toepasbaarheid binnen het rivierbeheer. Ook de aandachtspunten van de uitgevoerde analyses worden beschreven. (**hoofdstuk 5**)
- Stap 5: Conclusies en aanbevelingen. (**hoofdstuk 6**)

2 Context

2.1 Usecase

Tijdens de startbijeenkomst is door specialisten van Rijkswaterstaat, HKV en Deltares op het gebied van rivierkunde (Matthijs Boersema van RWS-WVL, Michiel Reneerkens van RWS-ON, Hermjan Barneveld en Bart Strijker van HKV, Kees Sloff en Eelco Verschelling van Deltares) en beeldbewerking (Fedor Baart van Deltares) gebrainstormd over mogelijke usecases waar cameramonitoring gecombineerd met beeldbewerkingstechnieken van toegevoegde waarde kan zijn. Diverse mogelijke maatregelen, verschijnselen en processen werden genoemd, die uiteindelijk tijdens de bijeenkomst als volgt werden gegroepeerd:

- **Morfologie:** kribvaksuppletie, beddingvormen in kribvakken, natuurvriendelijke oevers langs de IJssel (KRW-opgave), morfodynamiek van kribverflauwing beter in beeld brengen, oevererosie door scheepsgolven
- **Gebruiksfuncties** gebruik van oevers door toerisme, vissers, (timelaps opnamen maken van grote infrastructurele projecten op de grote rivieren)
- **Ecologie:** effecten van begrazing, vogels tellen, vegetatieontwikkeling.
- **Waterkwaliteit:** afleiden van parameters als sedimentconcentraties, kleur, doorlatendheid, troebelheid, vervuiling met plastics.
- **Hydrodynamica:** afleiden bodemprofiel uit vervorming golven, effect van golfdemping van rivierhout (palenrij) meten, afvoer winterbed versus afvoer zomerbed (of door geulen afzonderlijk), scheepsgolven, stroompatronen in kribvakken (primaire golf van scheepspassage, circulatie), 2D stroombeeld in rivierhaven Waal rondom L-krib (concrete casus), goedkopere manier om stroomsnelheden over het dwarsprofiel af te leiden (en daarmee een schatting van de afvoer als functie van de tijd te kunnen maken).

Door de beperkte doorlooptijd van het huidige onderzoeksproject was er slechts een maand beschikbaar om camerabeelden te verzamelen. Op deze tijdschaal is het beperkt mogelijk om morfologische veranderingen waar te nemen. Hydrodynamische processen zijn echter ook relevant, onder andere vanwege hun bepalende invloed op de morfologische ontwikkeling, en kunnen beter geobserveerd worden binnen de beschikbare tijd. Met name hoogfrequente processen als scheepsgolven zijn interessant vanwege hun impact op oevers en omdat ze goed te observeren zijn met camera's. Laagfrequente processen als de passage van een hoogwatergolf zijn weliswaar ook aantrekkelijk, maar helaas minder goed te observeren omdat de looptijd van het project daarvoor te kort is.

Uiteindelijk is besloten om te focussen op usecases die bij voorkeur zowel

1. hoogdynamisch zijn (omdat daarmee kan worden onderzocht of deze meetmethode werkt)
2. morfologisch actief en relevant zijn (omdat daarmee mogelijke problemen kunnen worden opgelost)

Gezien de vaste opstelling van de camera's ligt het voor de hand om voor de usecase een ruimtelijk afgebakend gebied uit te zoeken, zoals bijvoorbeeld kribvakken. **Kribvakken** zijn interessante locaties omdat zij het grensvlak vormen tussen zomerbed en winterbed, waarbij sprake is van diverse goed waarneembare dynamische ecologische en morfologische processen. Naast natuur en morfologie spelen de kribvakken vaak ook een rol bij de recreatieve functie (strandjes). Er zijn slechts weinig meetgegevens beschikbaar van zowel waterbeweging en van de bodemligging in die kribvakken. Ruwweg geldt dat door de golven van passerende schepen bij lage en middelhoge afvoeren dat de kribvakken geleidelijk eroderen (vooral de 'primaire' golf zorgt voor snelle leegloop en vulling van het gehele kribvak met opwerveling en transport van het sediment, hoewel de rol van de secundaire golven in een rivier als de Waal mogelijk ook een rol spelen). Tijdens hoogwater worden de kribvakken vervolgens weer aangevuld met sediment. Voor het ontwerp en uitvoering van de beoogde kribvaksuppleties (gekoppeld aan de Proeftuin vaste laag Nijmegen) is dit essentiële kennis. Een gedetailleerde visuele observatie van optredende processen zal in grote mate bijdragen aan het kalibreren en valideren van rekenmodellen voor deze processen.

Een andere interessante usecase zijn **Nevengeulen** die in vele uiterwaarden in het rivierengebied zijn geïntroduceerd als rivierverruimende maatregel met een hoge natuurwaarde en ruimtelijke kwaliteit. De geulen zijn eenzijdig of aan beide zijden aangetakt aan de rivier, en meestal is er sprake van een vrije instroomopening (niet beïnvloed door een inlaatwerk). In bepaalde nevengeulen is niet alleen sprake van een continue door de rivier opgewekte stroming, maar ook van in- en uitlopende golven veroorzaakt door passerende schepen. Bij diverse geulen heeft dit geleid tot forse (lokale) oevererosie, onder andere de geulen bij Gameren en bij Vianen. Bij hoogwater stromen in alle gevallen de geulen mee, en is vaak ook sprake van morfologische veranderingen.

Hoewel de kennis van erosie en sedimentatieprocessen van belang is voor zowel beheer en onderhoud van het stroomvoerend profiel, is dit ook van belang voor natuurbeheer. Hoogfrequente informatieinwinning van de dynamiek draagt bij aan het vermeerderen van gegevens en kennis voor inzicht in het gedrag van de geulen.

2.2

Proeflocaties

In de kustzone is al meer ervaring opgedaan met beeldbewerkingstechnieken en daar bleken de proeven het meest succesvol op een schaal van maximaal **enkele honderden meters**. Dit heeft te maken met de resolutie van de camera en de werkelijke dimensies die een pixel representeert. Op basis van deze praktijk en de besproken usecases is gekozen voor twee proeflocaties: Nevengeul de Pontwaard en geul De Horde.

2.2.1

Nevengeul bij de Pontwaard

De nevengeul in de Pontwaard langs de Lek bij Vianen is in 2015 aangelegd en ligt langs de zuidelijke oever. De geul stroomt alleen mee tijdens hoogwater (wanneer de waterstand de hoogte van de kades langs het toeleidingskanaal naar de Grote Sluis, Merwedekanaal, overschrijdt). Aan de benedenstroomse zijde heeft de geul een open verbinding met de Lek. Onder dagelijkse omstandigheden wordt de waterstand bepaald door de stand van stuw Hagestein en het getij op de Noordzee. Bij de Pontwaard is dagelijks een getijslag van 1-1.5 meter.

*Figuur 1
Aan de zuidelijke
oever van de Lek bij
Vianen ligt de
nevengeul.*



Bij ieder passerend schip zorgt de primaire golf (waterspiegeldaling) voor een forse in- en uitlopende stroming in de geul en daaropvolgend een reeks secundaire golven. Door de inlopende golf kan oeverafkalving optreden langs beide zijden van de geul. De golf en de erosie van de oever moet in principe goed zichtbaar moeten zijn op camerabeelden waarmee dit een relevante proeflocatie is voor dit experiment. Dergelijke datasets zijn daarmee relevant voor het kwantificeren van de scheepsinvloeden in dergelijke geulen en voor het treffen van voorzieningen om erosie te voorkomen of te verminderen.

*Figuur 2
Nevengeul in de
Pontwaard bij
Vianen.*



2.2.2

Geul bij de Horde

De geul in de uiterwaard De Horde is gelegen langs de noordoever van de Lek (Figuur 4) en de eigenaar is Staatsbosbeheer. In het kader van de dijkverzwaring kon in 1989 een natuurontwikkelingsproject tot stand komen in de uiterwaard De Horde. Bij dit project kwam enerzijds klei en zand vrij voor de dijkverbetering en anderzijds werd een situatie geschapen waarbij de natuur nieuwe kansen kreeg. In De Horde is een doodlopende geul aangelegd met een lengte van ongeveer een kilometer met een smalle verbinding naar de Lek.

*Figuur 3
Kaart met aan de
noordoever van de
Lek de Horde en de
geul.*



Door erosie is de afgelopen jaren een deel van de oevers in dit gebied en de daarop voorkomende vegetatie verdwenen. In onderstaand figuur zijn de veranderingen van de oeverlijnen weergegeven voor de jaren 2016 en 2019. Het verloop van de lijnen is geschat aan de hand van luchtfoto's. Het westelijk deel van de noordelijke oever tussen de tweede erosiegaten is in een periode van drie jaar circa 3 meter geërodeerd. Bij de zuidelijke landtong loopt de erosie lokaal op tot 8 meter in drie jaar. Deze oevererosie kan veroorzaakt worden door getijdestroming, scheepvaartgolven en hoogwatergolven. De mate waarin deze processen de morfologische activiteit beïnvloeden en welke processen dominant zijn voor oevererosie is onbekend.

Dit zijn belangrijke vraagstukken voor zowel beheer en onderhoud als planstudies. Het getij zorgt hoofdzakelijk voor verzadiging van de oevers waarna bij terugtrekkend water van de klif instabiel kan worden en erodeert. Dit gebeurt hoofdzakelijk bij steilere oevers. Als de oevers niet te steil zijn, is de verwachting dat er weinig gebeurt door het getij. Ook scheepsgeïnduceerde stroming en golfslag oefenen krachten uit op de oevers en dragen bij aan erosie. Ook de stroming door het leeglopen van het gebied, bij afgaand water draagt waarschijnlijk bij aan oevererosie.

*Figuur 4
Oevererosie bij de Horde te zien vanuit luchtfoto's. In rood en groen visueel de oeverlijn/steilrand ingetekend.*



De landtong was in februari 2020 nog maar 3 m breed. De eroderende oevers in de geul zijn getracht te stabiliseren door in het einde van het voorjaar 2020 drie maatregelen te nemen:

1. Het plaatsen van een palenrij bij de instroom van de geul
2. De landtong (zuidelijke oever) is verbreed naar 20m
3. De zuidelijke geuloever is vervolgens ingeplant met riet

Een beeld van deze maatregelen is te zien in onderstaande figuren. Het doel van de eerste maatregel is de oorzaken van oevererosie te verminderen door indringende scheepsgolven te dempen met een palenrij.

*Figuur 5
Foto's van de aanleg
van de maatregel
(van Michiel
Reneerkens).*



2.3

Meetopstelling

Bij de Pontwaard en De Horde willen we een meetopstelling plaatsen gebaseerd op camera's. Het is belangrijk om een robuuste meetopstelling neer te zetten die bestand is tegen de elementen en voldoende bescherming biedt tegen vandalisme en diefstal. Bevestiging op een stevige, rigide paal is in de meeste gevallen ideaal. Bij cameramonitoring maken we onderscheid tussen fotocamera's en videocamera's.

Een **videocamera** maakt per seconde meerdere beelden. Veranderingen in de omgeving kunnen met hoge frequentie worden vastgelegd. Golfontwikkeling en stromingen zijn fenomenen die met een videocamera kunnen worden gevolgd. Voor een videocamera geldt dat er 230V stroomvoorziening aanwezig moet zijn. Verder krijg je met videobeelden veel meer data, aangezien je per dag één miljoen beelden kunt krijgen. Dit is een belangrijk aandachtspunt bij de definitie van de procedure om de data van de camera te halen (handmatig of via een 4g dataverbinding).

Met **fotocamera's** worden op gezette intervallen foto's gemaakt. De tussenposes zijn orde minuten/uren. Alleen laagfrequentere processen kunnen worden gemonitord. Hydrodynamica, zoals scheepsgolven en stromingen, kunnen niet worden geanalyseerd. Morfologische processen als oevererosie kan wel geanalyseerd worden als de camera langere periode (maanden) blijft staan. Het grote voordeel van een fotocamera is dat deze langer kan blijven functioneren zonder vaste stroomvoorziening.

De keuze voor de locatie van de camera (foto of video) is afhankelijk van:

1. De plek waar de camera bevestigd kan worden (aan een bestaande of te plaatsen mast) met een kijkhoek waarin de relevante omgeving goed in beeld is.
2. Voor de videocamera is van belang dat er aanwezige stroomvoorziening is. In dit project is uitgegaan van toegankelijke bestaande stroomvoorziening.

2.3.1

Locatie en nauwkeurigheid beelden

Voor het monitoren van de processen rond morfologie en hydrodynamica is het nodig om te kijken naar de resolutie van de camera en de werkelijke dimensies die een pixel representeert in het beeld. Als voorbeeld nemen we een camera met hoge resolutie (4K, 3840 x 2160 pixels). Afhankelijk van de kijkhoek van de camera en de afstand van de camera tot de relevante omgeving representeert de pixel een werkelijke afmeting. Dit wordt uitgedrukt in Pixeldichtheid (px/m) of Ground Sampling Distance (cm/px). De pixeldichtheid is hierbij gedefinieerd als het aantal pixels (van het beeld) per meter terrein.

*Tabel 1
Tabel met de pixel nauwkeurigheid voor verschillende kijkhoeken (FoV) en afstanden voor een 4k camera.*

	Brede kijkhoek		Smalle kijkhoek	
FoV (graden)	109	109	37	37
Afstand (m)	100	200	100	200
Pixel dichtheid (px/m)	20,2	10,1	59,5	29,7
GSD (cm / px)	5.0 cm	9.9 cm	1.7 cm	3.4 cm

* Bepaald via <https://www.axis.com/nl-nl/tools/lens-calculator>

Voor toepassing op de proeflocaties lijkt een nauwkeurigheid van enkele centimeters voldoende. Met een camera willen we enerzijds zoveel mogelijk informatie over de omgeving hebben (breedbeeld) en anderzijds ook voldoende nauwkeurigheid. Met een 4K camera kunnen we met voldoende nauwkeurigheid de omgeving tot een afstand van circa 100-200 meter in beeld brengen.

Camera keuze

We gebruiken voor de **videocamera** een Axis P1448-LE camera. Dit is een 4K 8 megapixel camera met een optische zoomlens tussen 37° en 109°. Deze camera is gehuurd via Netcam Center¹ en heeft een livestream (lage resolutie). De hoge resolutie videobeelden worden lokaal opgeslagen maar kunnen via een 4G dataverbinding worden gedownload. Deze videocamera is geplaatst bij de Pontwaard, omdat bekend is dat hier scheepsgolven de geul binnentreden. Dit is een hoogfrequent fenomeen dat beter is waar te nemen met een videocamera dan met een fotocamera. In onderstaand figuur is de locatie en de kijkhoek (in paars) van de videocamera weergegeven bij de Pontwaard.

¹ <https://netcamcenter.nl/nl/diensten/rent-a-cam#section2127133>

*Figuur 6
In paars is de
kijkhoek van de
videocamera bij de
Pontwaard
weergegeven.*



Voor de **fotocamera** gebruiken we een Wildlife camera: Bolyguard BG668-E36WG 4G 4K Wireless. Deze camera maakt op gezette tijdsintervallen foto's en verstuurt lage kwaliteit beelden via het 4G mobiele netwerk naar een ingesteld mailadres. Verder worden de hoge kwaliteit beelden (14MP) lokaal op een SD-kaart opgeslagen. Deze fotocamera is geplaatst bij De Horde op de landtong (zie Figuur 7 met in rood de kijkhoek). De camera heeft zicht op de erosiegaten en een eroderende oever aan de noordkant van de geul.

*Figuur 7
In rood is de
kijkhoek van de
fotocamera bij De
Horde weergegeven.*



2.3.2

Impressie meetopstelling

Onderstaande foto's geven een impressie van de meetopstellingen op beide proeflocaties. Voor de videocamera is een aparte paal geplaatst, terwijl de fotocamera is bevestigd tegen een bestaande paal.

De Pontwaard



De Horde





3 Aanpak

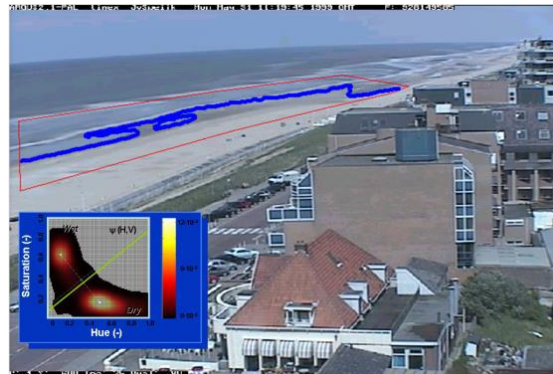
3.1 Beeldverwerkingsalgoritmes in het algemeen

Computer Vision is een relatief nieuwe interdisciplinaire techniek waarbij innovatieve beeldbewerkingstechnieken worden ingezet om relevante informatie te vergaren uit foto's of filmopnames. Het inwinnen, verwerken en analyseren van digitale beelden heeft als doel om de data om te zetten in afgeleide indicatoren welke bruikbaar zijn voor beslisproblemen. Voor de kust worden deze techniek al sinds 2000 door Rijkswaterstaat ingezet om meer inzicht te krijgen in het kuststelsel. Er zijn een aantal meetlocaties opgezet op plekken met veel dynamiek en grote interventies (Egmond, Noordwijk, Scheveningen, Zandmotor). Op dit moment worden deze sites vooral nog voor academische doelen ingezet en beheerd, door de Technische Universiteit Delft (Zandmotor) en door de Universiteit Utrecht (Egmond). Voor nieuwe interventies, bijvoorbeeld proefsuppletie bij de Wadden, worden tegenwoordig meer diverse instrumenten ingezet (naast vaste camera's ook radar, satellieten en drones).

In deze sectie laten we een aantal voorbeelden zien van indicatoren die aansluiten bij de eerdergenoemde usecases. Per indicator zullen we een voorbeeld geven van hoe dit in de praktijk wordt toegepast en hoe computer vision daaraan bijdraagt

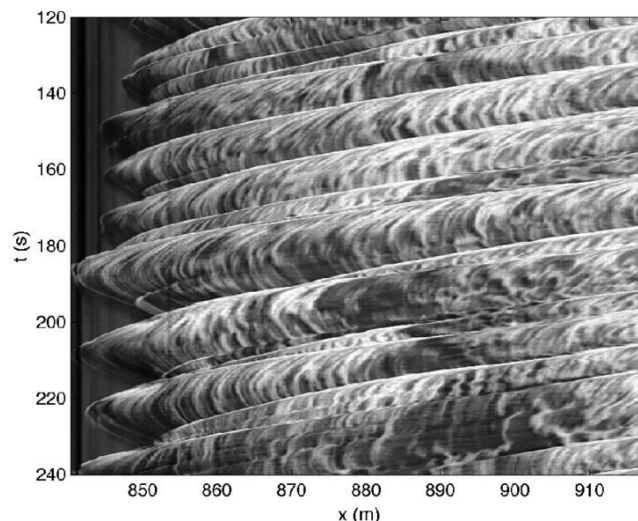
Het detecteren van **erosie** kan gezien worden als een classificatie van twee classes (land vs water) en het volgen daarvan over tijd. Traditioneel werd de classificatie gedaan op basis van regels: als een pixel een beetje geel of lichtgrijs is zal het wel zand zijn, als het wat blauwer is, dan zal het wel water zijn. In de laatste 5-10 jaar zijn er veel geavanceerdere technieken doorontwikkeld voor classificatie. Voorbeelden van opgekomen technieken zijn support vector machines, random forests, naive bayes en deep neurale netwerken, vaak in combinatie met meta-algoritmen zoals bagging of boosting. Deze technieken vereisen wel een training dataset (een set aan voorbeelden om de parameters in een model te bepalen), waardoor het opzetten meer werk is dan de "handmatige formule" gebaseerde classificatie. Een voorbeeld is hiernaast weergegeven. Voordat de pixels worden geclassificeerd is eerst een ruimte voor detectie aangewezen (rode box). De pixels zijn eerst omgerekend naar de hue, saturation, value ruimte. Dit voorbewerken van beelden noemt men feature engineering.

*Figuur 8
Land water detectie
op basis van
handmatige functie
door de HSV
kleurruimte.*



Een vergelijkbaar voorbeeld is het detecteren van **golfoploop**. Hierbij wordt ook gekeken naar de land/water grens over tijd. Maar daarnaast ook naar eigenschappen van golven. Als golven breken ontstaat er schuim. Dit schuim is witter van kleur dan de omgeving. Door niet alleen naar de intensiteit te kijken, maar ook naar het gemiddelde en de variantie van intensiteit ontstaat er een duidelijker beeld van de golfoploop. Het genereren van deze features (gemiddelde en variantie over tijd) gebeurt door een algoritme op de computer die bij de camera staat. Hierdoor hoeven niet alle individuele beelden (frames) bewaard te worden, maar wordt alleen het geaggregeerde beeld overgestuurd. Door deze beelden over tijd te analyseren kunnen veranderingen in golfbreking en golfoploop worden geanalyseerd. Een andere aanpak is om op een dwarsprofiel naar een zogenaamde **timestack** te kijken (intensiteit uitgezet tegen ruimte en tijd). Hierdoor zijn individuele golven terug te zien (hierover in de volgende paragraaf meer).

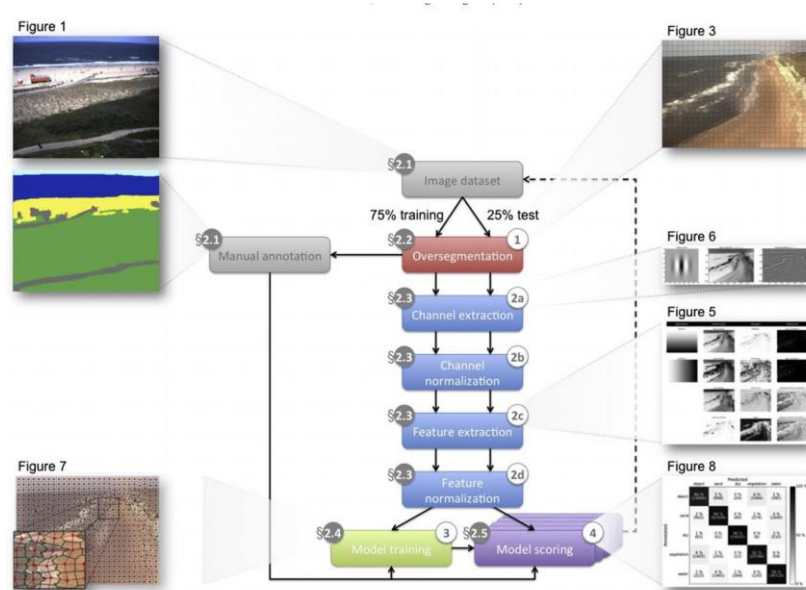
*Figuur 9
Voorbeeld van een
"timestack" image.*



Om het zand in de kust en op de rivierdijken goed vast te houden is het belangrijk dat er **vegetatie** aanwezig is. Als zowel land, water als vegetatie gedetecteerd moeten worden dan spreekt men van een *multiclass classification* probleem. Niet alle algoritmen zijn hier geschikt voor. Vaak is het nodig om iets meer "features" te verzamelen, meerdere eigenschappen die kunnen helpen tussen de meerdere classes onderscheid te maken. Dit kan door meer te meten (bijvoorbeeld met een infraroodcamera) maar het kan ook door extra features te berekenen.

Het omzetten naar andere kleurruimten, en het verzamelen van extra data over tijd (variantie, gemiddelde) kan helpen. Een andere aanpak is het gebruik van zogenaamde superpixels. Door pixels samen te voegen door samengestelde (super) pixels kunnen veel meer eigenschappen verzameld worden. De superpixels krijgen eigenschappen als vorm eigenschappen, gemiddelde kleur, etc... Met deze extra features (en minder pixels) is het tegenwoordig goed mogelijk om meer complexe classificaties toch succesvol te laten werken. In plaats van superpixels worden ook op plaatjes voorgetrainde *deep neural networks* toegepast (*transfer learning*).

Figuur 10
Workflow voor
superpixel
gebaseerde
classificatie,
doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.07.010



Het is ook mogelijk om "objecten" te detecteren. Dat zijn elementen in een foto waarvan niet van tevoren vaststaat of deze aanwezig is en hoe groot deze is. Deze lijn van technieken (object detection) wordt gebruikt om **gebruiksfuncties** te monitoren. Vindt er recreatie plaats, varen er schepen langs, laten mensen hun hond uit? Hierbij kan tegenwoordig gebruik gemaakt worden van een breed pallet aan voorgetrainde netwerken en verificatie datasets. Er zijn algemene technieken die duizenden objecten kunnen herkennen (bijv. yolo, ssd). Daarnaast zijn er specifieke modellen voor **ecologische** toepassingen die gebruikt kunnen worden om verschillende diersoorten te detecteren.

Een laatste voorbeeld is het meten van **stromingsnelheden aan het wateroppervlak**. Hiervoor zijn verschillende technieken beschikbaar. Door herkenbare elementen in het water toe te voegen (particles) kunnen met particle image velocimetry (PIV) technieken snelheden worden afgeleid. Deze techniek wordt ook in hydrodynamische laboratoria toegepast. Als het niet mogelijk is om actief deeltjes in de vloeistof onder te brengen kunnen optical flow technieken gebruikt worden. Deze kijken ook naar herkenbare objecten (sparse) of probeert vormverandering op verschillende ruimtelijke niveaus (dense) te detecteren. Dit kan gebruikt worden om de golf en schuimsnelheid te volgen. Hiermee kunnen aan de kust muizen worden gedetecteerd. Omdat er dan verschillende snelheden door elkaar lopen (al dan niet windgedreven

golven, stroming, schuimverplaatsing) is het niet altijd makkelijk om het in een echte stroomsnelheid te vertalen.

*Figuur 11
Een afbeelding van
het strand met
zwarte en groene
pijlen in het beeld
welke de geschatte
snelheden
weergeven o.b.v.
PIV algoritme.*



Tenslotte zijn camera's slechts een stap in een keten van meerdere metingen. Vaak worden de data geïntegreerd in een breder systeem. Dit kan van het ontsluiten van de beelden voor de website van een hoteleigenaar die zijn dak ter beschikking stelt, tot het integreren van indicatoren in een bestaand dashboard tot data-assimilatie in een operationeel systeem (bijvoorbeeld BeachWizard en cBathy) om de bodemveranderingen te schatten.

3.2

Georeferentie en orthorectificatie

Voor de meeste toepassingen binnen beeldverwerkingsalgoritmes geldt dat het pixelveld van het camerabeeld moet worden gerelateerd aan geografische coördinaten van locaties in de 'echte' wereld. Verder kijken de camera's vanuit een bepaalde hoek naar de omgeving en kan het handig zijn om een bovenaanzicht te hebben. Met standaard algoritmes kunnen we de beelden compenseren voor de invalshoek (orthorectificatie) en vertalen we elke pixel van het beeld naar een punt op aarde (georeferentie). Zoals eerder vermeld, hebben wij ons binnen dit proefproject beperkt tot het pixeldomein.

Met georefereren kennen we bekende coördinaten toe aan pixels en transformeren we de foto (verticale en horizontale pixels) naar een geprojecteerd coördinatensysteem zoals het in Nederland gebruikelijke Amersfoort RD. Voor het georefereren zijn in het algemeen twee methoden beschikbaar: direct en indirect georefereren. De directe manier gebruikt informatie van de camerapositie (pitch, roll, yaw en de exacte locatie x,y,z). Bij de indirecte methode worden grond controlepunten (GCP's) gebruikt in het opgenomen beeld. GCP's zijn visueel detecteerbare punten in het beeld, waarvan de exacte locatie (x,y,z) bekend is.

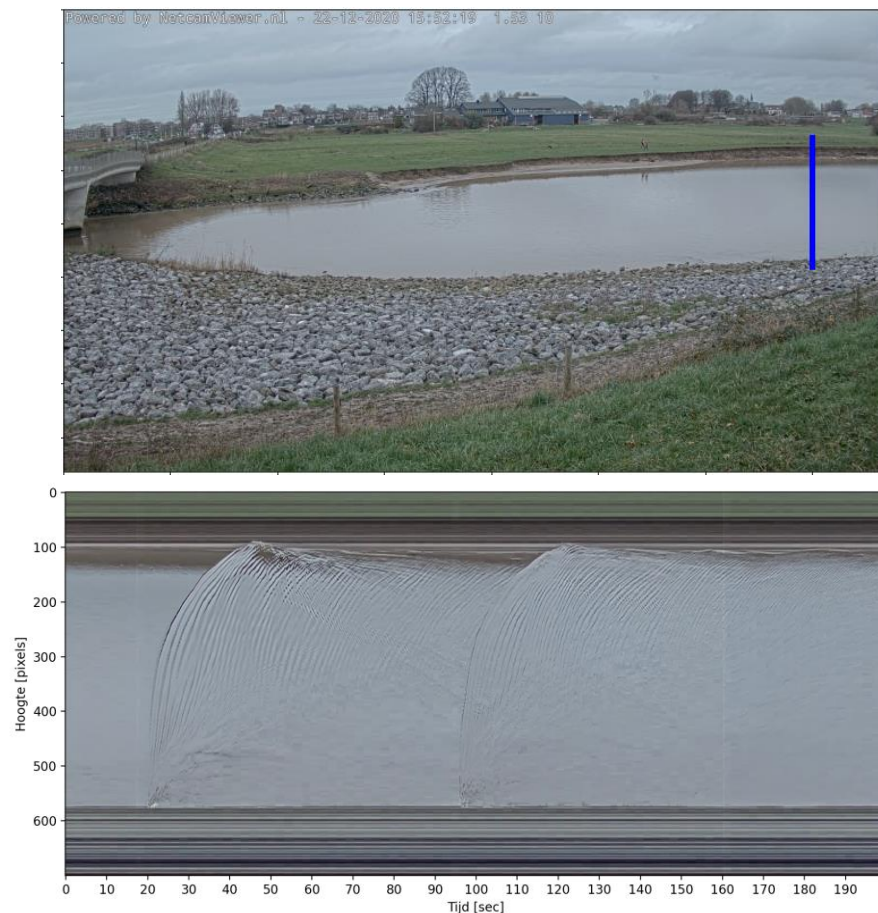
3.3

Toepassing van timestacks: golfkarakteristieken

Een timestack (of stapelbeeld) wordt gemaakt door de intensiteiten langs een vaste raai in het beeld te stapelen in de tijd. De gekozen frequentie van de beelden aansluiten het proces dat wordt geanalyseerd, en kan variëren tussen bijvoorbeeld één beeld per uur en meerdere beelden per seconde. Voor de analyse van morfologische veranderingen bij de proeflocaties zal een frequentie van 1/uur of 1/dag veelal voldoende kan zijn.

Als voorbeeld nemen we een timestack gemaakt op basis van beelden bij de Pontwaard. Het betreft een videobeeld van circa 3 minuten waarbij twee scheepsgolven de geul binnentreden en aldaar leiden tot kleurveranderingen van het water, welke zichtbaar zijn in de timestack.

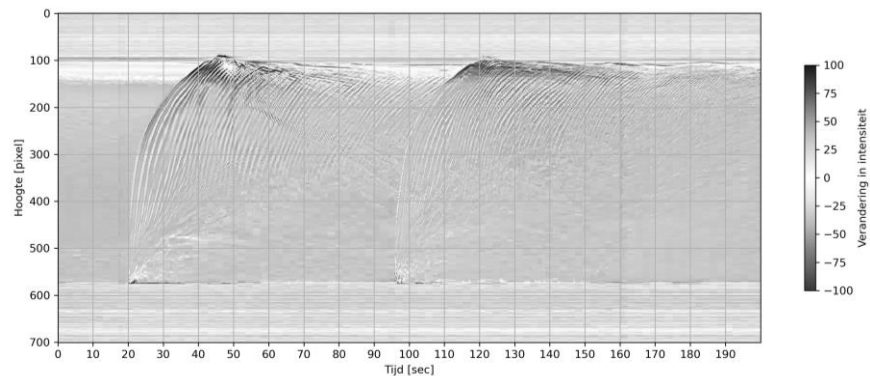
*Figuur 12
Timestack van de
Pontwaard o.b.v.
een videofragment
van 3 minuten. In
het bovenste figuur
is de raai
aangegeven
waarvan in het
onderste figuur de
timestack is te zien.*



Kleureninformatie wordt gebruikelijk uitgedrukt in de drie primaire kleuren Rood, Groen en Blauw (RGB), zoals ook in Figuur 12. Bij een RGB-beeld heeft elke pixel drie waarden, namelijk voor elke primaire kleur één. Dat kan het voor beeldverwerkingsalgoritmes lastig maken en hierom converteren we het beeld naar een grijsschaal, waarbij elke pixel één waarde heeft die de hoeveelheid licht (of intensiteit) representeert. Het contrast in het beeld loopt dan van zwart als zwakste intensiteit naar wit als sterkste intensiteit. Voor onze toepassing zijn we voornamelijk geïnteresseerd in veranderingen in het beeld en de intensiteiten. Hierom corrigeren we voor achtergrondbelichting en kijken we naar de afwijkingen in intensiteit. In figuur 14 is de afwijking

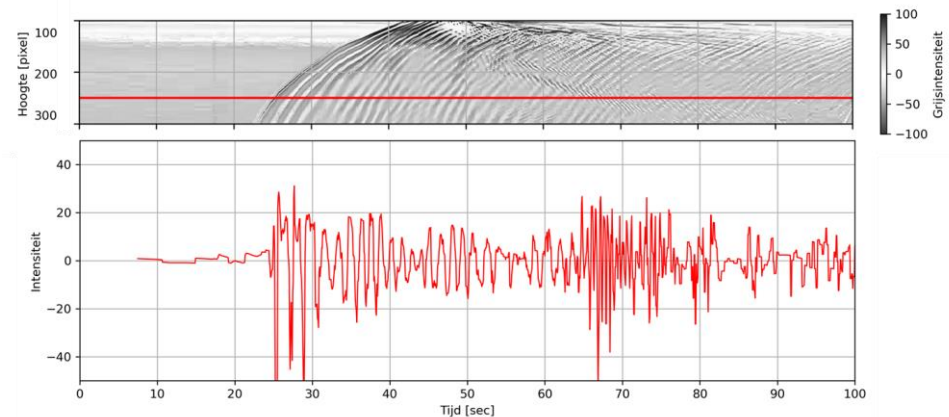
van intensiteit van hetzelfde beeld als hierboven te zien. Hier komen de veranderingen duidelijk naar voren en is daarmee bruikbaar voor analyses voor golfkarakteristieken.

*Figuur 13
Een timestack op basis van de afwijkingen in de intensiteit t.o.v. het gemiddelde van*



Het timestack geeft nog steeds ruimtelijke informatie, namelijk veranderingen langs één raai in het beeld. Als we vervolgens één rij nemen in de timestack (in dit geval: de rij ter hoogte van pixel 250) kijken we naar de veranderingen van de intensiteiten van één punt in het beeld. Figuur 14 toont ter illustratie een uitsnede van Figuur 13 (ingezoomd): voor pixels in de range van 100-300 (linker verticale as) is voor periode 0-100s (horizontale as) de intensiteit (als grijsintint) gevisualiseerd. Hierin is duidelijk het verloop van de golf zichtbaar en uit de intensiteitsveranderingen kan informatie over golfperiodes gehaald worden.

*Figuur 14
Bovenste figuur is ingezoomd op een timestack waarbij golven de geul binnenkomen. Onderste figuur is het signaal langs de rode lijn in het timestack. Een lijn in een timestack is de verandering in intensiteit van een punt in het beeld (rode punt Figuur 15).*



*Figuur 15
Bij een analyse van het signaal in een timestack, kijk je naar veranderingen in intensiteit van één locatie/pixel in het beeld.*



Dit signaal (intensiteitsveranderingen) kan geanalyseerd worden en hierin wordt veelal twee type analyses onderscheiden: 1) tijddomein analyses en 2) frequentiedomein analyses. De eerste focust op individuele golven en de tweede op de spectrale beschrijving van golven in een bepaalde tijdsperiode. Bij analyses in het frequentiedomein kan met behulp van een Fourieranalyse de periodieke componenten uit het signaal gehaald worden en de voorkomende golfperiodes bepaald worden.

Waar traditionele sensoren veelal op één locatie meten, kunnen timestack toegepast worden voor elke willekeurige raai in het beeld. Dit verschaft een ruimtelijk beeld waarmee we veranderingen/vervormingen in de ruimte kunnen registreren.

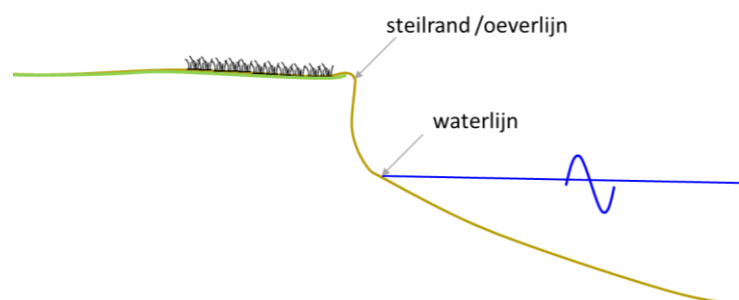
Let op: Opgemerkt moet worden dat we niet kijken naar golfhoogtes maar naar verandering in intensiteit; met één enkele camera is immers het niet mogelijk om 3D te kijken en hoogtes te bepalen. Maar andere golfkarakteristieken als golfperiode, golfrichting en voortplantingssnelheid kunnen wel uit beelden worden afgeleid. Dit voorbeeld met timestacks is gedaan met een videofragment van enkele minuten. Ook kunnen beelden met een andere frequentie (eens per uur) gestapeld worden tot een timestack volgens hetzelfde principe.

3.4

Toepassing van classificatiealgoritmes

Met behulp van classificatiemodellen is het mogelijk om gebieden in een beeld te classificeren. Hiermee is het mogelijk om water en land van elkaar te onderscheiden. Ook kale grond en vegetatie is van elkaar te onderscheiden. Op deze manier kan bijvoorbeeld de waterlijn (grens tussen water en land) en de oeverlijn / steilrand gedetecteerd worden uit de beelden (Figuur 16).

*Figuur 16
Dwarsdoorsnede van de oever waarin staat aangegeven wat wordt bedoeld met steilrand/oeverlijn en de waterlijn.*



Typische classificatiemodellen moeten eerst getraind worden op voorbeelden waarin classificaties al zijn aangegeven, voordat deze voor nieuwe beelden een voorspelling kan geven. Dit wordt ook wel 'supervised training' genoemd. 'Unsupervised training' bestaat ook, waarbij een model zelf verbanden en daarmee classificaties probeert te leggen. In theorie kan dit onverwachte en daarmee interessante resultaten opleveren. Hier staat wel een grote databehoeftte tegenover. Vanwege de beperkte scope (gras, oever en water herkennen) en de verwachte (relatief lage) inspanning voor het handmatig classificeren, is gekozen voor een 'supervised training'.

Zowel de training als de voorspelling verwerken een beeld op eenzelfde wijze:

1. segmentatie: het verdelen van een beeld in verschillende vlakken.
2. segmenteigenschappen afleiden: Eigenschappen van segmenten bepalen op basis van bijvoorbeeld de vorm en de kleurinformatie

Hierbij merken we op dat de locatie van het segment in het beeld niet is gebruikt, omdat juist de locatie van de oeverlijn kan veranderen. Als de locatie van segmenten wel gebruikt wordt, is het mogelijk dat initiële voorspelling goed zijn, maar zodra de locatie van de oeverlijn verplaatst en dus afwijkt van de trainingsbeelden zal de voorspelling mogelijk steeds slechter worden.

De training en voorspelling verschillen echter in de classificering van een segment. In de trainingsfase zijn beelden gebruikt die handmatig geclassificeerd zijn: de gebruiker van het model heeft aangegeven welk deel van het beeld gras, water of oever is. Het trainen van het model bestaat vervolgens uit het model een zo goed mogelijke relatie laten vinden tussen de eigenschappen van een segment enerzijds, en de handmatige classificatie anderzijds. Eenmaal getraind kan het model voor nieuwe beelden de classificatie voorspellen.

De gekozen segmentatie en segmenteigenschappen zijn verder toegelicht in paragraaf 3.4.1. Vervolgens is de training op basis van trainingsbeelden en segmentatie verder toegelicht in paragraaf 3.4.2. Tenslotte is de keuze voor het classificatiealgoritme verder toegelicht in paragraaf 3.4.3.

3.4.1 Segmentatie, segmenteigenschappen en segmentatiealgoritme

In principe kan een beeld pixel voor pixel geclassificeerd worden. Voor een 4K beeld betekent dit echter dat ongeveer acht miljoen pixels geclassificeerd moeten worden. Voor iedere individuele pixel kan echter weinig meer gezegd bepaald worden dan de kleurinformatie die de pixel bevat. Het is daarom efficiënter en beter om eerst groepen (segmenten) van pixels te definiëren die bijvoorbeeld qua kleur en/of contrast op elkaar lijken. Behalve dat er minder segmenten dan pixels in een beeld aanwezig zijn, geven de segmenten zelf ook nog extra informatie. Deze extra informatie betreft dan eigenschappen zoals bijvoorbeeld vorm en grootte.

Het segmenteren is gebeurd op basis van een algoritme. Er zijn verschillende algoritmes beschikbaar, waarvan wij twee algoritmes hebben getest: het SLIC en Felzenswalb algoritme. Implementaties van deze twee algoritmes zijn beschikbaar in bijvoorbeeld in de python module die in dit onderzoek gebruikt is: scikit-image².

² https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/segmentation/plot_segmentations.html

Een voorbeeld van een te analyseren beeld is te zien in Figuur 17. De toepassing van achtereenvolgens het SLIC (Figuur 18) en het Felzenswalb (Figuur 19) algoritme laat zien dat het SLIC-algoritme ongeveer dezelfde soort segmenten maakt, verspreid over het beeld. Daarnaast lijkt het SLIC-algoritme niet altijd op de oeverrand te segmenteren. Het Felzenswalb daarentegen maakt - voor deze specifieke toepassing - logischere segmenten: het gladde water en de lucht zijn grote segmenten, ruwe stenen zijn kleine segmenten én de segmenten liggen vaker dan bij het SLIC-algoritme, op de oeverlijn. Hierom is gekozen om het Felzenswalb algoritme te gebruiken voor het segmenteren van het beeld.

De segmenteigenschappen die bepaald kunnen worden zijn legio, en de beschikbare eigenschappen in de gebruikte python module scikit-image zijn in de documentatie van scikit-image terug te vinden³. Op basis van expert judgement zijn de eigenschappen in Tabel 2 gekozen.

*Tabel 2
Gebruikte
segmenteigenschappen*

Vorm eigenschappen	Kleur eigenschappen
Area	max_intensity
convex_area	mean_intensity
Eccentricity	min_intensity
euler_number	
Orientation	
Perimeter	
Solidity	
Moments	

We hebben hier expliciet gekozen om geen eigenschappen in de training te gebruiken die met locatie van het segment in het beeld te maken hebben: Als de oeverlijn in de toekomst opschuift, zou dit namelijk een goede training, maar uiteindelijk een slechtere voorspelling geven.

³ <https://scikit-image.org/docs/dev/api/skimimage.measure.html#skimimage.measure.regionprops>

*Figuur 17
Voorbeeld van een
niet-gesegmenteerd
beeld.*



*Figuur 18
Segmentatie van
Figuur 17 op basis
van het SLIC
algoritme.*



*Figuur 19
Segmentatie van
Figuur 17 op basis
van het Felzenswalb
algoritme.*



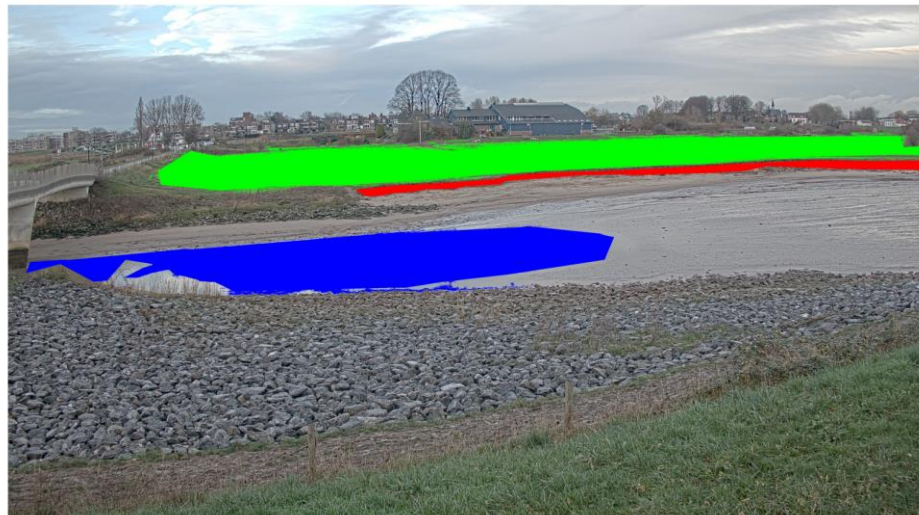
3.4.2 Trainingsbeelden

De totale beschikbare set aan beelden betreft een maand aan beelden tussen half december 2020 en half januari 2021. De beelden in de dataset zijn gekoppeld aan het tijdstip van opname, en vervolgens aan de lokale waterstand bij Hagestein. De dataset is vervolgens gefilterd op dagbeelden (tussen 9:00 en 16:00) en gesorteerd op waterstand. Dit is gedaan zodat er voldoende licht aanwezig is op de beelden en er dus voldoende informatie aanwezig is voor segmentatie en classificatie. Hiermee bestaat de totale dataset uit 2208 beelden.

De beelden met de laagste 100 waterstanden zijn vervolgens gebruikt als trainingsbeeld. Deze keuze is gemaakt zodat de drie classificaties (oever, gras, water) zo goed mogelijk in beeld gebracht kunnen worden tijdens training. Immers, bij laag water zal de oever niet of slechts gedeeltelijk te zien zijn. Dit is niet erg als een getraind model probeert te voorspellen, maar als de oever niet of summier in de trainingsdata zit, zal de oever ook niet voorspeld kunnen worden.

Vervolgens is handmatig met behulp van een fotobewerkingsprogramma (GIMP) in de kleuren groen (gras), rood (oever) en blauw (water) met grofweg aangegeven waar deze drie categorieën aanwezig zijn. Dit is gebeurd door één handmatige classificatie per tien beelden (gesorteerd op waterstand) te maken. Een voorbeeld van een dergelijke handmatige classificatie is te zien in Figuur 20.

*Figuur 20
Voorbeeld van een
handmatige
classificatie.*



Aangezien deze studie in de Pondwaard zich zal richten op het detecteren van de oeverlijn, is ervoor gekozen om maar een deel handmatig te classificeren (zoals te zien is in Figuur 20). Ditzelfde geldt ook voor de segmentering: er is een selectie van het beeld gemaakt waar de segmentatie plaatsvindt. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 21. Het beeld in Figuur 20 is gebruikt om een classificatie te geven aan de segmenten in Figuur 21.

*Figuur 21
Gedeeltelijke
segmentatie ter
plaatse van de
oeverlijn. De
segmenten zijn hier
met willekeurige
kleuren aangegeven.*



3.4.3 Keuze voor classificatiealgoritme

Met een classificatiealgoritme kunnen segmenten ingedeeld worden (dit wordt ook wel voorspellen genoemd) in vooraf bepaalde verzameling van categorieën (water, oever en gras) door de set trainingsgegevens te analyseren. In deze studie is gekozen om ensemble methodes te gebruiken als classificatiealgoritme. De keuze voor dit type methode is gemaakt op basis van ervaring en vanwege de scope van dit project is geen uitgebreide vergelijking gemaakt van verschillende beschikbare classificatiealgoritmes.

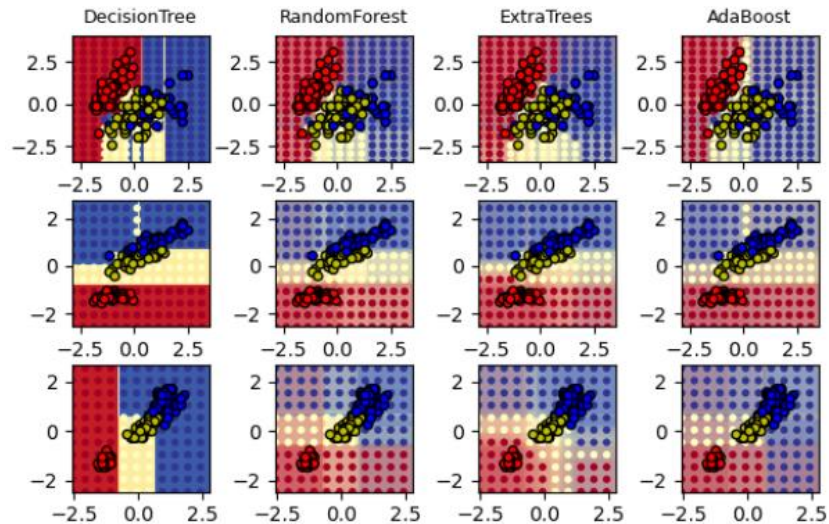
Ensemble methodes proberen voorspellingen van verschillende, relatief simpele, schatters te combineren tot een enkele, betere voorspelling. Een schatter is een vergelijking welke een uitkomst probeert te voorspellen. De 'beste' schatter (of de nauwkeurigste) in een classificatiemodel wordt bepaald op basis van de trainingsdata. Binnen de ensemble methodes zijn grofweg twee soorten te onderscheiden: *averaging methods* en *boosting methods*. Voor *averaging methods* worden de voorspellingen van de simpele schatters onafhankelijk van elkaar uitgevoerd en vervolgens gecombineerd door te middelen. Bij de *boosting methods* worden de simpele schatters achtereenvolgens uitgevoerd waarbij steeds de gecombineerde schatter wordt bijgestuurd. De gebruikte implementaties van deze ensemble methods zijn beschikbaar in de python module scikit-learn.

In onderstaand figuur zijn een aantal type classificatiemodellen grafisch weergegeven door middel van scatterplots⁴. Elke segment in een beeld heeft eigenschappen (vorm, grootte, kleur etc. zie 3.4.1) en in onderstaand figuur zijn in de scatterplots twee segmenteigenschappen tegenover elkaar uitgezet. De kleuren (rood, geel en blauw) geven aan welk categorie oordeel aan een segment is toegekent o.b.v. de trainingsbeelden: in ons geval gras, water of oever.

⁴ Figuur komt van <https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html#adaboost> en de beschrijving van het figuur is gebaseerd op onze toepassing.

Dit voorbeeld laat twee segmenteigenschappen zien, maar wij gebruiken uiteindelijk veel meer segmenteigenschappen. Het classificatiemodel bepaald de manier waarop segmenten in categorieën worden ingedeeld. Figuur 22 toont vier verschillende type ensemble methodes.

*Figuur 22
Enkele voorbeelden
van
classificatiemodellen
waarin de kleuren
categorie oordelen
zijn. Hierin zijn
verschillende twee
eigenschappen van
de segmenten
tegenover elkaar
gezet in een
scatterplot.*



In ons geval hebben we vier ensemble methodes gebruikt om met de trainingsdata het classificatiemodel te trainen: *random forest*, *extremely randomized trees*, *ADA boost* en *gradient tree boosting*. Deze algoritmes behaalden ieder, eenmaal getraind, ongeveer eenzelfde voorspelscore van gemiddeld 87%. De uitzondering hierop is *ADA boost*, die een lagere score van gemiddeld 79% behaalde. Omdat de keuze tussen de overige drie niet veel uitmaakte, is gekozen voor ***gradient tree boosting***.

4 Resultaten

Dit hoofdstuk laat resultaten zien van de gekozen beeldverwerkings-algoritmes om de oeverlijn en informatie over golfkarakteristieken uit de beelden te extraheren. We beschouwen de resultaten, maar de duiding van de resultaten en de vergelijking met andere meetresultaten blijft vanwege de beperkte scope van dit onderzoek achterwege. Ook beperken we ons met deze analyse in het pixeldomein; voor daadwerkelijke toepassing van de hier geteste algoritmes zal het noodzakelijk zijn om de in hoofdstuk 3 beschreven georeferentie- en orthorectificatietechnieken te hanteren om de resultaten te projecteren op geografische coördinaten.

4.1 Onbewerkte camerabeelden

We beginnen met een eerste beeld van de proeflocaties op basis van de onbewerkte camerabeelden. Bij beide proeflocaties vindt onder dagelijkse omstandigheden oevererosie plaats door scheeps-, getij en windgedreven golven en stromingen. Vanwege de doorlooptijd van dit project beschikken we over ongeveer één maand aan beelden. Dit is een relatief korte periode voor morfologische veranderingen.

In dit hoofdstuk zijn een aantal youtube-links **in groen** opgenomen waarmee de videobeelden te bekijken zijn. Versneld afgespeeld geven de beelden een mooi overzicht van hoe het systeem verandert door de tijd. En met de beeldverwerkingstechnieken kan de juiste informatie uit de beelden gehaald worden.

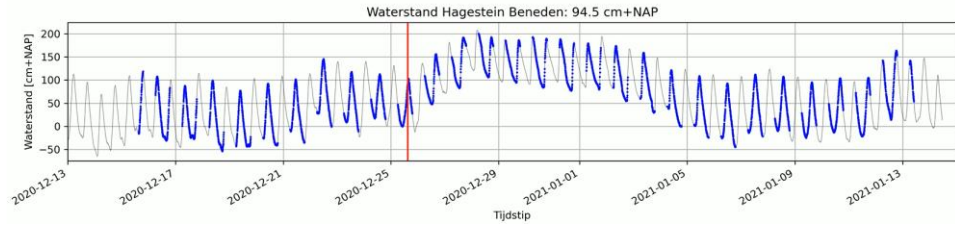
De Pontwaard

De beelden bij de Pontwaard geven een duidelijk beeld van de relevante processen op deze proeflocatie. Door de beelden te koppelen aan een waterstandsmeting op een relevante MSW-locatie (in dit geval: Hagestein Beneden) wordt tevens duidelijk hoe de waterlijn in het gebied zich verhoudt tot de rivierwaterstand, en onder welke omstandigheden het gebied volstroomt.

Passerende schepen (in bovenstroomse richting) in de hoofdgeul van de Lek genereren scheepsgolven die de geul binnentreden. Deze golven kunnen de oever bereiken afhankelijk van de lokale waterstand. De waterstand wordt beïnvloed door getijdewerking. Een screenshot van deze zogenoemde *timelapse* is te zien in Figuur 23 en in het bijschrift is de link naar de video gegeven.

Figuur 23
 Door een beeld te selecteren en te koppelen aan een waterstandsmeting in de buurt krijg je een goed beeld van de omgeving. Wat betekent een bepaalde waterstand voor golfaanval tegen de oever.

Timelapse:
<https://youtu.be/QoEUcd8AV5A>

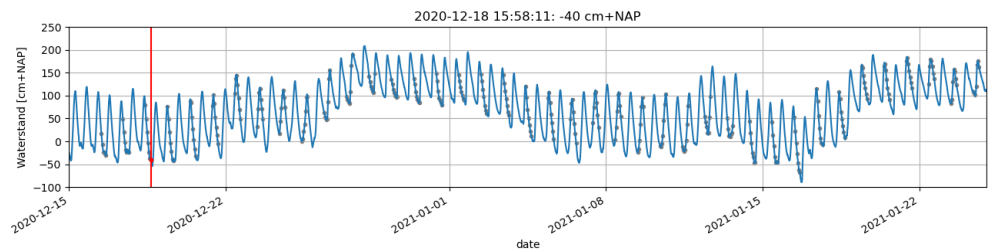


De Horde

De nevengeul bij De Horde laat een vergelijkbaar beeld zien. Figuur 24 toont de situatie bij laagwater. Op dat moment staat de bovenkant van de palenrij boven water (zichtbaar onderin figuur). Bij hoogwater is de palenrij helemaal verdwenen. Links in beeld is één van de twee erosiegaten te zien, met rechts daarvan is een steilrand waarvan bekend is dat deze in het verleden is geërodeerd. Met een timelapse video (zie youtube link in het bijschrift van het figuur) kan een eerste beeld gekregen worden van veranderingen in de omgeving en interactie tussen water en land.

Figuur 24
 Een beeld van de Pontwaard waarbij de waterstanden bij meetstation Hagestein Beneden is gekoppeld. Het geeft een beeld van het water in de omgeving.

Timelapse:
<https://youtu.be/BTOgqk9jgs>



Een timelapse op basis van de onbewerkte camerabeelden geeft een eerste indruk van relevante processen. Het zijn locaties waarbij getijwerking, scheepsgolven (en ongetwijfeld hoogwater) een rol spelen in het vormen van de oeverlijn. In paragraaf 4.3 en 4.2 laten we de resultaten zien voor het extraheren van de oeverlijn en golfkarakteristieken uit de beelden.

4.2 Oevererosie

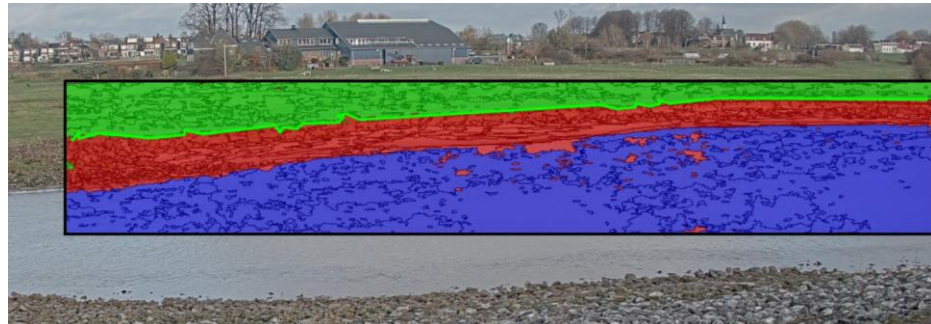
4.2.1 Detectie van oeverlijn en verandering in de tijd

Met het getrainde classificatiemodel van sectie 3.4 zijn 'voorspellingen'⁵ gemaakt voor de 2208 beelden bij de Pontwaard (waarvan 100 ook gebruikt zijn voor de training). Een voorbeeld van een voorspelling/classificatie is te zien in Figuur 25 en Figuur 26. Hierin is in Figuur 26 gras groen, de klif rood, en het water blauw gemarkeerd in de voorspelling.

*Figuur 25
Voorbeeld zonder
classificatie.*



*Figuur 26
Voorbeeld van
classificatie door het
classificatie-
algoritme. Groen is
gras, rood is oever,
blauw is water. De
voorspelde oeverlijn
is met een groene
lijn gemarkeerd.*



Figuur 26 laat zien dat zeker de overgang tussen gras en steilwand, in dit voorbeeld, goed voorspeld wordt. Daarom zijn de segmenten die als gras geassocieerd worden samengevoegd tot één segment. De omlijning van dit segment is vervolgens gebruikt om de oeverlijn te destilleren uit de segmenten. Dit is de groene lijn in Figuur 26.

⁵ Merk op dat het hier niet om 'voorspellingen' in de traditionele zin van het woord gaat – van wat er in de toekomst kan gaan gebeuren. Hier gaat het om 'schatten' van de oeverlijn in bestaande beelden op basis van het gekozen en getrainde algoritme.

Ligging van de oever in de tijd

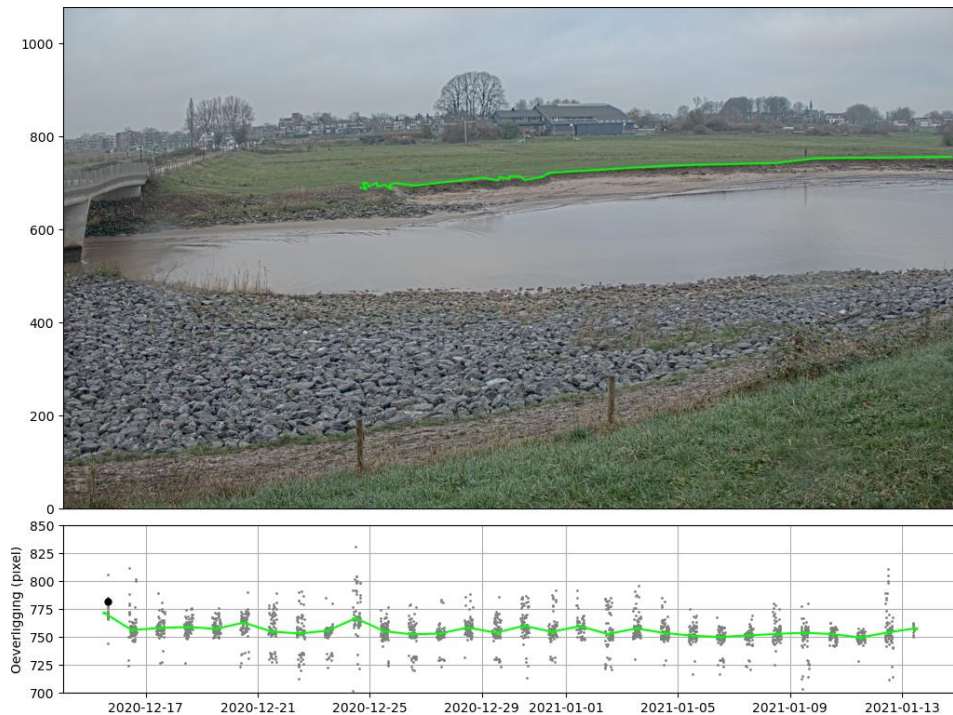
De ligging van de oever is in de vorige sectie in beeld gebracht voor een enkel beeld. Om de locatie van de oeverlijn over de tijd in beeld te vangen, kan de locatie van één of meerdere punten in de tijd gevolgd worden. In deze studie hebben we gekozen om de mediaan van de y-coördinaat (in pixels) van de gesimuleerde oeverlijn te volgen (Figuur 27). Hierbij is voor een enkel beeld eenzelfde soort beeld gemaakt als in Figuur 26, en is onder dit beeld een grafiek te zien die de mediaan van de y-coördinaat volgt. Hierbij is in deze grafiek ook nog een groene lijn te zien die het daggemiddelde van de oeverlijn-mediaan toont. Hiervoor is gekozen omdat in de grafiek te zien is dat de gesimuleerde mediaan op en neer springt. Dit is te verklaren deels omdat op deze dagen er water op de lens zat of dat het mistig was, maar ook deels omdat de mediaan van de y-coördinaten mogelijk een te grove benadering is. In een operationele toepassing kan het praktischer zijn om de y-coördinaat van de oeverlijn in één of meerdere verticale uitsnedes te volgen over tijd (zie volgende paragraaf). Desalniettemin, door een daggemiddelde toe te passen is de oeverlijn goed te volgen en volgt ook uit de grafiek dat de oeverlijn aan het begin en aan het einde van de bekeken periode op dezelfde plek ligt (wat overeenkomt met visuele inspectie).

Elk beeld is op deze manier bewerkt. Vervolgens zijn de beelden achter elkaar geplakt in een timelapse video (zie de link in het bijschrift).

Figuur 27 enkel beeld van een voorspelalgoritme (net zoals in Figuur 26) met daaronder een grafiek van de mediaan van de y-coördinaat van de oeverlijn voor alle beelden. De groene lijn in de grafiek is het gemiddelde van de medianen voor een bepaalde dag.

Timelapse 1:
<https://youtu.be/-1vTgFNEN-U>

Timelapse 2:
<https://youtu.be/2IRnDzWXTzA>



4.2.2

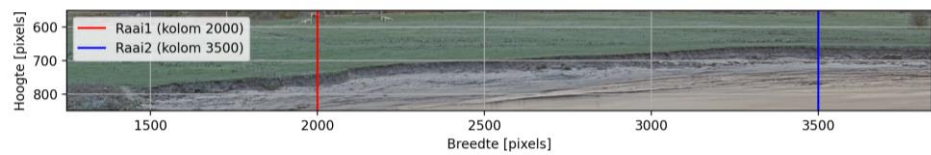
Lokale terugtrekking oever

De gehanteerde classificatiealgoritmes kunnen gebruikt worden om de hele oeverlijn in de tijd te volgen. Voor specifieke toepassingen kan het afdoende zijn om de ligging van de oever op één punt te volgen of langs één doorsnede. Timestacks zijn hier bij uitstek geschikt voor, waarbij langs een

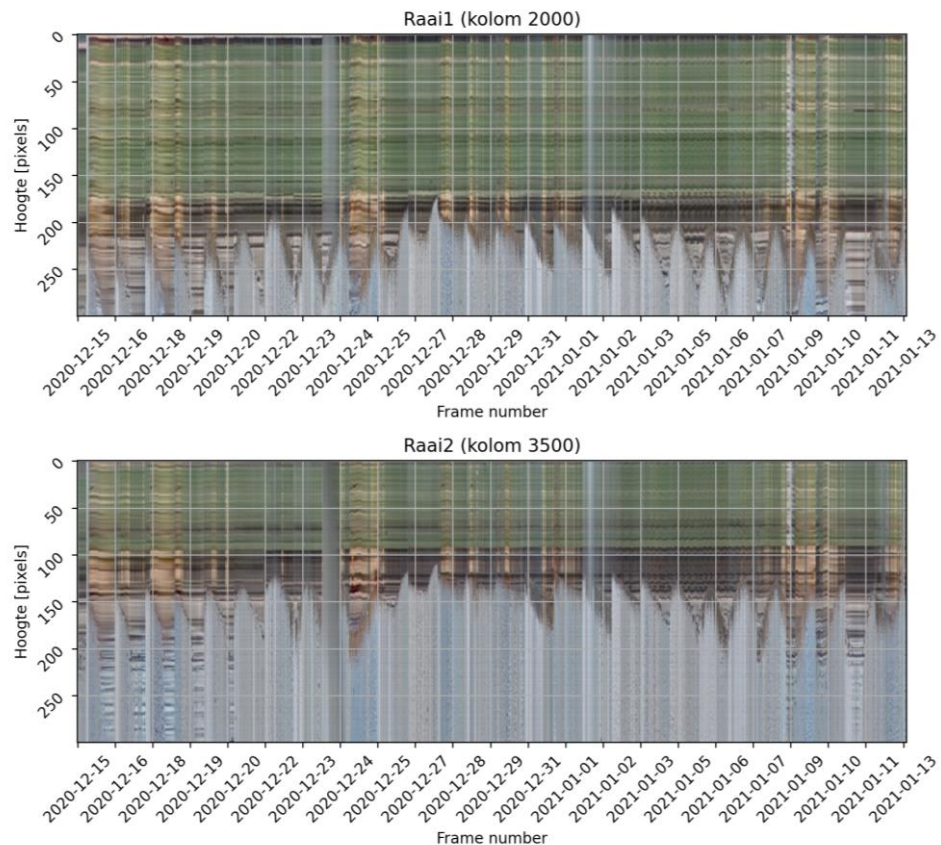
raai in het beeld wordt bekeken wat er verandert. Als eerste voorbeeld tonen we twee raaien bij de Pontwaard (Figuur 28). In deze timestacks valt het volgende op:

- In de timestack is te zien is dat de camera zelf wat beweegt in de tijd. Hiervoor kan gecorrigeerd worden, maar overall lijkt de camera redelijk stabiel. In dit project is hier geen correctie uitgevoerd. Dit geeft wel duidelijk het belang aan van een stabiele positie van de camera.
- De oeverlijn verandert niet van positie gedurende de meetperiode binnen dit onderzoek (orde 1 maand).
- Onder in de timestacks is de getijdeslag goed zichtbaar in het waterstandsverloop in de raai terug te zien.

*Figuur 28
Bovenste figuur laat de locatie van raaien zien waarvoor timestacks zijn gemaakt.*



Middelste en onderste figuur laten de timestacks zien waarbij verandering van de oever is te volgen. Ook is de variatie van de waterstand terug te zien in de beelden.

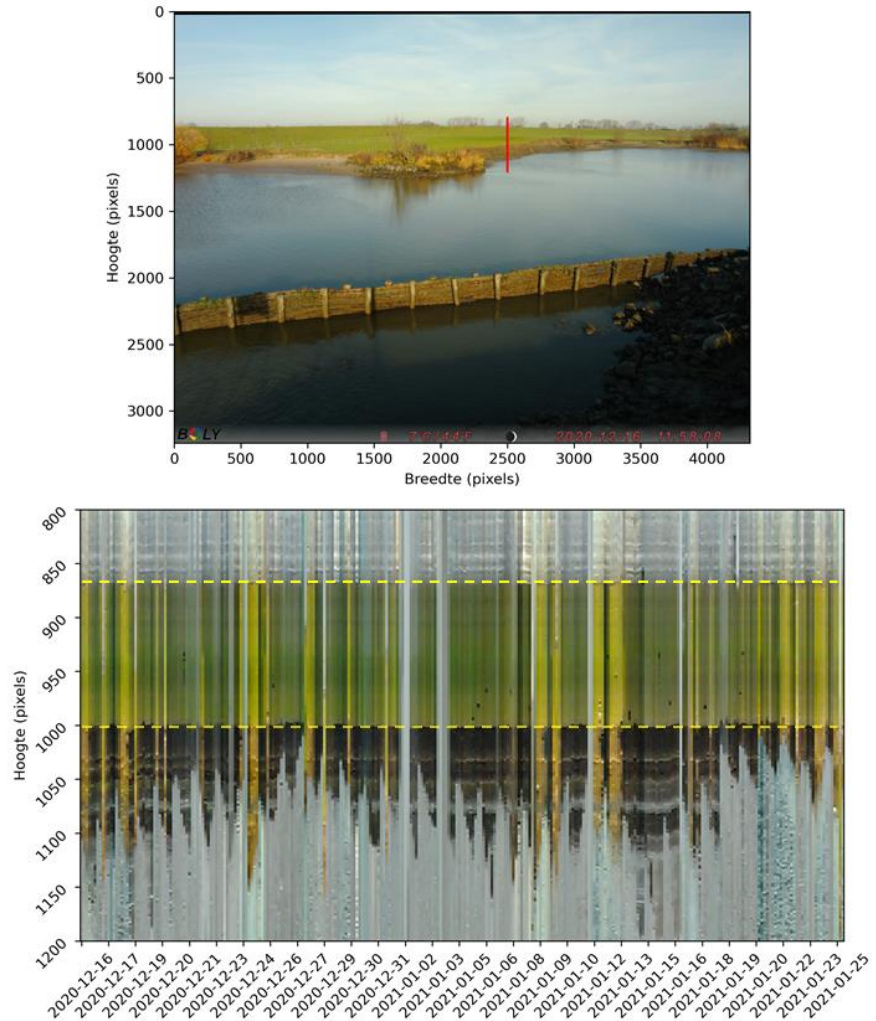


Dezelfde techniek hebben we ook toegepast voor De Horde. Bij De Horde bewoog de camera echter zodanig dat we de beelden hebben gecorrigeerd met behulp van zogenoemde *feature detection*. Deze techniek wordt normaliter gebruikt als manier om afbeeldingen te vergelijken. In ons geval vergelijken we ook *features* uit afbeeldingen met elkaar en vergelijken we de locatie van deze features in de verschillende afbeeldingen. Vervolgens corrigeren (shiften, roteren, schalen etc.) we het beeld zo dat deze features op elkaar liggen. Op deze manier kan gecorrigeerd worden voor de beweging van de camera, waarbij het nog van belang is dat de features die in

werkelijkheid kunnen bewegen niet worden beschouwd in deze correctie. De correctie moet worden uitgevoerd op basis van “vaste punten”, zoals een hek op de dijk en stenen op de voorgrond.

De resulterende timestack bij de Horde is te zien in onderstaand figuur. De raai waarvoor een timestack is gemaakt, ligt over een steilrand (bovenste beeld). In de Timestack zien we weinig variatie in de steilrand; in de geselecteerde raai heeft geen tot weinig erosie plaatsgevonden gedurende de meetperiode van 1 maand.

*Figuur 29
Boven: het beeld waarin met rood e locatie van de timestack is weergegeven.
Onder: de Timestack van de oever. De bovenste geel gestreepte lijn laat de ligging van de horizon zien (stabiel) en de onderste gele lijn de ligging van de steilrand (grens vegetatie en steilwand).*



4.3

Golfkarakteristieken

In paragraaf 3.2 is het concept van timestacks uitgelegd, evenals de twee beschikbare methodes (tijd domein en frequentie domein analyses) om uit deze timestacks relevante golfkarakteristieken af te leiden als golfperiode, voortplantingssnelheid en golfrichting. Deze twee methodes hebben we toegepast op een beeldfragment van 5min waarin golffronten van twee voorbijvarende schepen de geul bij de Pontwaard binnentreden. Dit beeldfragment is ook te zien in het volgende filmpje:

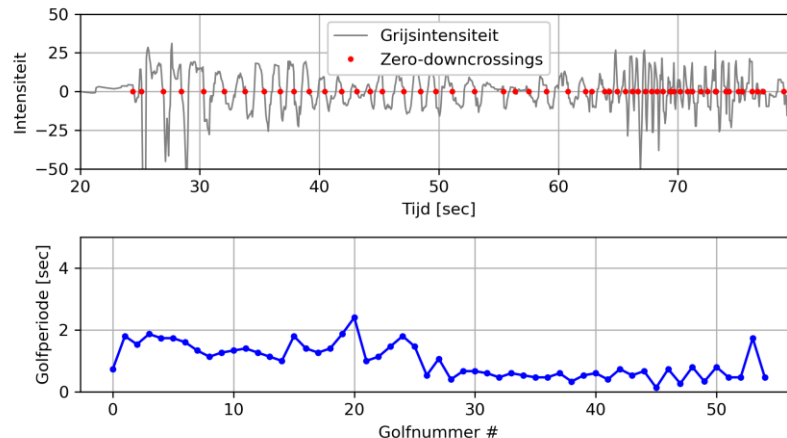
<https://youtu.be/t2WO1tVbKnA>

Tijddomein

Met de zogenoemde *zero-downcrossings* methode kan worden bepaald wat de golfperiode is van individuele golven. Dit gebeurt op basis van afwijkingen in intensiteiten en is weergegeven in Figuur 30. De bovenste grafiek laat de afwijkingen in intensiteit zien en de bepaalde zero-downcrossings. Te zien is dat de eerste golven een grote golfperiode hebben waarna de golfperiode in de loop van de tijd afneemt. Dit is te verwachten door de passage van een golf front waarin ook de grootste golven aan het begin langs komen. Na de 50^{ste} golf (onderste grafiek) ontstaan ook enkele golven met een grotere golfperiode. Als we de intensiteiten (bovenste grafiek) vergelijken met de timestack uit Figuur 14 zien we dat in die periode ook reflectiegolven (vanaf de oever) ontstaan die de golfperiodes kunnen beïnvloeden. Ook zien we de amplitude van de intensiteit afnemen. Voor de bepaling van de golfperiode is het mogelijk verstandig om een drempelwaarde te zetten op afwijkingen in intensiteiten, zodat kleine variaties in het wateroppervlak niet als golf worden aangeduid. Dit vergt aandacht en een analyse van een langere meetreeks.

Deze analyse laat zien dat uit videobeelden individuele golven gekarakteriseerd kunnen worden. Voordat de methode in de toekomst wordt ingezet in praktijktoepassingen is het wel noodzakelijk om hem te kalibreren aan de hand van andere (in-situ) meetdatasets.

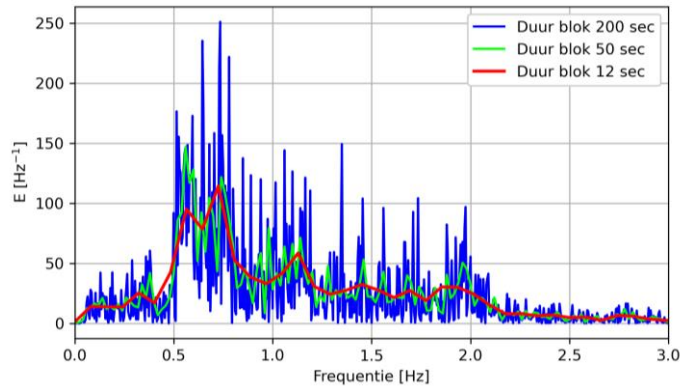
*Figuur 30
Individuele
golfperiodes. Boven:
afwijkingen in
grijsintensiteit en
zero-downcrossings.
Onder: de
golfperiode van de
optredende golven.*



Frequentiedomein

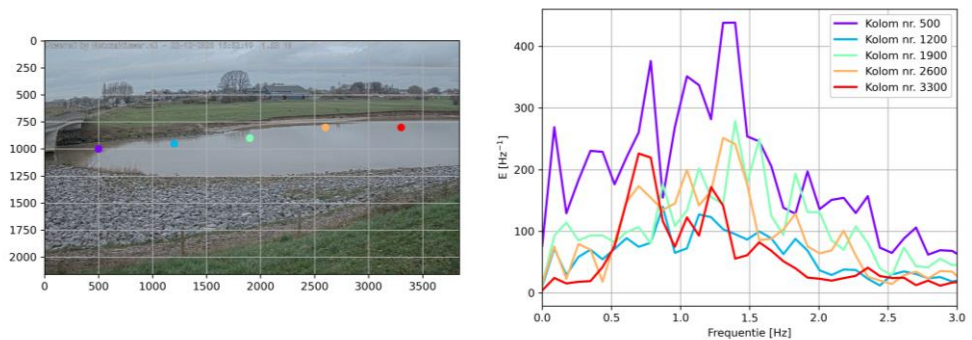
De analyse van het signaal in het tijddomein geeft inzicht in golfkarakteristieken gedurende een relatief korte periode en met een beperkt aantal golven. Voor langere periodes worden golfkarakteristieken veelal beschreven aan de hand van een analyse van het frequentiedomein. Hierbij wordt het golfspectrum bepaald met behulp van een Fourieranalyse van de timestacks. In Figuur 31 is het spectrum weergegeven voor verschillende blokduren. Het signaal kan worden opgesplitst in blokken en voor kleinere durven (meer blokken) wordt het spectrum bepaald, waarna deze worden gemiddeld om het spectrum te bepalen. Grotere blokduren leiden tot een spectrum met veel variaties, maar door te middelen over meerdere blokken komt duidelijker naar voren welke frequenties (of golfperiodes) veel voorkomen.

*Figuur 31
Golfspectrum
afgeleid d.m.v.
Fourier analyse en
middeling over
verschillende
blokduren.*



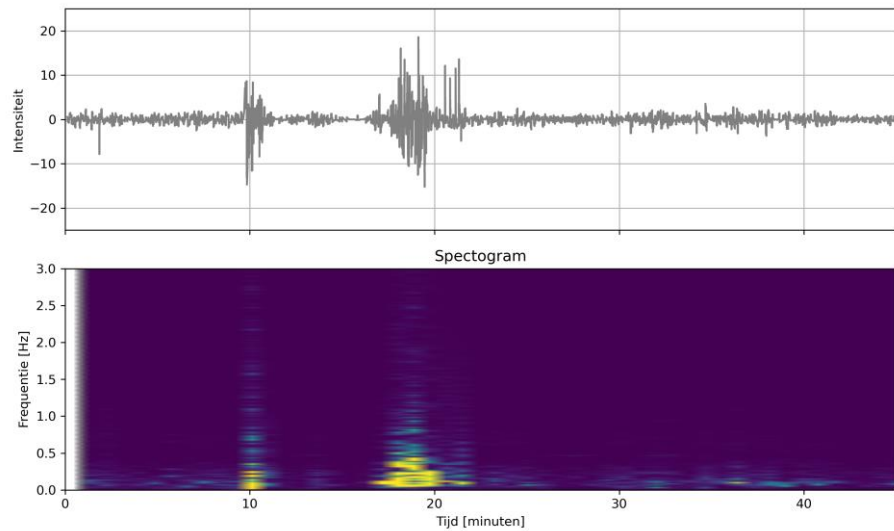
Het spectrum heeft een piek rond frequenties tussen 0.5-1 Hz. Dit is een realistische waarde voor de secundaire scheepsgolven. Dergelijke golfspectra kunnen voor willekeurige locaties in het beeld bepaald worden. Ter illustratie hebben wij de analyse uitgevoerd voor een vijftal locaties in de geul voor een blokduur van 12 seconden (Figuur 32).

*Figuur 32
Golfspectra voor
verschillende
locaties in de geul
bij de Pontwaard.*



Tenslotte passen we de methode toe op een langere periode (circa 50 minuten). Hiervoor maken we gebruik van een spectrogram waar we informatie krijgen over het golfspectrum in de tijd (Figuur 33). Op de horizontale as is de tijd uitgezet en de frequenties staan op de verticale as. De mate van kleur geeft de hoeveelheid energie aan (blauw= laag, geel=hoog). In het spectrogram zien we duidelijk de golven terug die zijn genereerd door schepen die gedurende de geselecteerde 50 minuten voorbijkwamen.

*Figuur 33
Spectrogram voor
een periode van 50
minuten.*



Hierbij wordt opgemerkt dat dergelijke korte golven ook door wind kunnen worden veroorzaakt. Dit verdient aandacht voor gebruik van deze methode voor het bepalen van golfcondities. Op basis van windgegevens en waargenomen golfrichting kan onderscheidt gemaakt worden tussen wind- en scheepsgolven.

5 Discussie

Korte reflectie cameramonitoring

Bij het beheer & onderhoud van Rijkswaterstaat kan cameramonitoring helpen met het monitoren van de uiterwaarden, de vele aanwezige (neven)geulen en kribvakken. In deze studie hebben we gefocust op de toepassing van cameramonitoring rond oevererosie. Op hoogfrequente tijdschalen kan het proces van oevererosie kwantitatief gevolgd worden en het kan inzicht geven in de processen die dit veroorzaken. Wanneer de oevererosie onacceptabele vormen aanneemt, kunnen gerichte maatregelen genomen worden. Ook na de uitvoering is het zeer relevant om te monitoren hoe de oever hierop reageert (met name in de beginfase na een maatregel): treedt opnieuw oevererosie op of blijft de oever na de maatregel stabiel? Met jaarlijkse luchtfoto's kan een beeld verkregen worden tussen twee momenten die ver uit elkaar liggen, maar met hoogfrequenter beeld krijg je beter zicht in de oorzaken; wanneer en ten gevolge van wat treedt er oevererosie op? Door hier meer inzicht in te hebben, kunnen maatregelen ook doelmatiger ontworpen worden.

De resultaten zijn in een presentatie op 10 februari met Rijkswaterstaat besproken. Vanuit Rijkswaterstaat waren hierbij Matthijs Boersema (RWS-WVL), Michiel Reneerkens (RWS-ON), Retze Talsma (RWS-ON) en Joshua Ike (RWS-ON) aanwezig. Gezamenlijk met hen hebben we kort gereflecteerd op de resultaten en de potentie van cameramonitoring voor Rijkswaterstaat.

Aandachtspunten uitgevoerde analyses

Verder puntsgewijs nog enkele aandachtspunten rond de uitgevoerde analyses in dit rapport:

- **IJking analysetechnieken:** Op hoofdlijnen is gekeken wat de meerwaarde voor het rivierbeheer kan zijn van het afleiden van relevante gegevens uit visuele data afkomstig van foto- en videocamera's. In dit verkennende stadium is niet de nauwkeurigheid van de meettechniek en bepaalde parameters (golfperioden en ligging oeverlijn) geëvalueerd door een vergelijking met referentiemetingen.
- **Hoeveelheid data:** de videocamera geeft voor één maand filmen circa 600GB aan data. Om te voorkomen dat al deze data via bijvoorbeeld een 4G/5G dataverbinding moet worden verzonden, kan het een goed idee zijn om ter plekke van de camera voorzieningen te treffen om de beelden al vóór verzending te kunnen *processen* met reeds ontwikkelde algoritmes. Dit is vanuit het perspectief van data-omvang handig, maar wanneer de algoritmes toch niet de juiste informatie uit de beelden haalt, is de informatie ook verloren. Hierom is in een verkennend stadium aan te raden om alle data wel op te slaan.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In deze studie zijn op twee proeflocaties langs de grote rivieren camera's geplaatst waar gedurende een periode van ongeveer een maand foto- en filmopnames zijn gemaakt. Beeldverwerkingsalgoritmes ('*computer vision*') zijn ontwikkeld en toegepast om enkele voor het rivierbeheer relevante parameters uit de beelden af te leiden. Het doel van dit experiment was om te evalueren of dergelijke innovatieve monitoringstechnieken een zinvolle aanvulling kunnen zijn op bestaande monitoringstechnieken van Rijkswaterstaat.

We hebben een classificatie-algoritme ontwikkeld waarmee het mogelijk bleek om automatisch de oeverlijn in de beelden te detecteren. Hiermee is het in principe mogelijk om met deze techniek mogelijke oevererosie in de tijd te kwantificeren. Ook hebben we laten zien dat golfkarakteristieken van sloop geïnduceerde golven – die oevererosie tot gevolg kunnen hebben – te herleiden zijn de beelden.

Hoofdconclusie

Deze studie heeft laten zien dat, afhankelijk van het doel en de gebruikte methode, met cameramonitoring meerdere processen (hydrodynamisch en waarschijnlijk ook morfologisch) gevolgd kunnen worden. Het is een meettechniek die van toegevoegde waarde kan zijn aan de bestaande meettechnieken, aangezien de techniek 1) relatief goedkoop is, 2) makkelijk te onderhouden, 3) een hoogfrequente dataset oplevert, 4) een ruimtelijk dekkend beeld kan opleveren en 5) ingezet kan worden om meerdere parameters uit dezelfde set beelden af te leiden. Cameramonitoring kan een toegevoegde waarde zijn door waargenomen gebiedsveranderingen, die mogelijk functies in het gebied bedreigen, te koppelen aan aanwezige (natuurlijke) processen. Voor de case oevererosie kan bepaald worden of de waargenomen oevererosie het resultaat is van bijv. een hoogwatergolf en / of wat het effect is van één of meerdere seizoenen aan sloopgolven en getijdencycli.

Deze techniek is geen reguliere monitoringstechniek voor het gehele rivierengebied. LiDAR en luchtfoto's zijn beter geschikt om vlakdekkende informatie te geven. Cameramonitoring kan wel gericht ingezet worden om inzicht en informatie te leveren bij "probleemlocaties". Het advies is om de techniek vooral op deze manier te gebruiken.

Tevens ontwikkelen de beeldbewerkingstechnieken zich op dit moment zo snel dat het goed mogelijk is dat in de nabije toekomst steeds meer parameters uit dezelfde camerabeelden kunnen worden afgeleid.

6.2 Aanbevelingen

De beschikbare meetperiode in dit project was te kort om morfologische veranderingen te kunnen waarnemen. Allereerst wordt daarom aanbevolen om door te gaan met de metingen met de geplaatste camera's. Aangezien de meetopstelling op dit moment nog volledig operationeel is, is het relatief goedkoop om de meetopstellingen langer te laten staan.

Verder is in Februari 2021 een hoogwatergolf door de Rijn (en Maas) getrokken met een piekafvoer van circa 7.400 m³/s, waarvan het goed mogelijk is dat dit heeft geleid tot verdere oevererosie ter plaatse van de proeflocaties. Het voordoen van een hoogwatergolf binnen de meetperiode biedt een unieke kans om meer te leren over de invloed van hoogwater op de morfologische ontwikkeling. Het kan de moeite waard zijn om dit te laten onderzoeken met behulp van de ontwikkelde algoritmes, zodat daadwerkelijk kan worden aangetoond dat de algoritmes echt in staat zijn om specifieke morfologische processen te kunnen kwantificeren. Daarbij kan het van toegevoegde waarde zijn de beelden te georefereren en de resultaten te vergelijken met veldmetingen om een uitspraak te kunnen doen over de nauwkeurigheid.

In meer algemene zin bevelen wij aan om bij wijze van proef de hier gepresenteerde innovatieve cameramonitoringstechnieken in een daadwerkelijk rivierkundig project in te zetten naast traditionele monitoringstechnieken. Op deze manier kunnen de kosten en baten van deze techniek beter worden afgezet tegen de andere technieken, zeker wanneer de aandachtspunten genoemd in deze studie (te korte meetperiode, geen vertaling naar geografische coördinaten, resultaten nog niet vergeleken met veldmetingen) worden aangepakt. Daarmee ontstaat een completer beeld van de toegevoegde waarde, wat kan leiden tot een groter draagvlak voor de inzet op grotere schaal van deze techniek.

Andere toepassingen:

- Op videobeelden is duidelijk het effect van windgedreven golven op het wateroppervlak zichtbaar. Onder andere op het Markermeer en in de Biesbosch is geconstateerd dat windgedreven golven kunnen leiden tot resuspensie van slib en daarmee geassocieerde negatieve consequenties (hoge sedimentconcentraties leiden bijvoorbeeld tot slechte leefomstandigheden voor vissen). Ook op de rivieren in Nederland is het mogelijk dat windgedreven golven in relatief ondiepe, stilstaande delen bij ongunstige strijklengte kunnen leiden tot bijvoorbeeld oevererosie.

Met camera's kan het mogelijk zijn om het verband nader te analyseren tussen **de optredende wind (richting en sterkte) en de groei/ontwikkeling van windgolven op de rivieren en meren.**

- Bodemvormen als rivierduinen zijn belangrijke morfologische fenomenen die invloed hebben op de functies van de rivier (belemmering voor scheepvaart en bepalend voor hoge waterstanden). De aanwezigheid van duinen beïnvloedt de stroming en bij hoge duinen kunnen wervels ontstaan achter de duintop die zelfs het wateroppervlak kunnen bereiken. Het is interessant om uit te zoeken bij welke hoogte van duinen dit optreedt en bij hoge waters kan het relevant zijn om ook het oppervlak van de rivier in kaart te brengen met luchtbeelden. **Dit kan een manier zijn om rivierduinen te monitoren op basis van de turbulentie die plaatsvindt aan het wateroppervlak.** Dit kan een aanvulling zijn op de bestaande Multibeam metingen die tijdens hoogwaters worden uitgevoerd.
- **Andere golfkarakteristieken:** De verplaatsing van een verstoring langs een transect in de loop van de tijd kan in een timestack worden weergegeven als een lijn waarvan de lokale richtingscoëfficiënt (dx/dt) de snelheid is waarmee de verstoring zich voortplant (golfsnelheid). Dergelijke lijnen heten karakteristieken en zijn als het ware paden waarlangs de informatie loopt.

Dankwoord

Binnen dit project hebben wij bij het plaatsen van de camera's hulp gekregen van meerdere personen binnen Rijkswaterstaat, gemeente Vianen, Staatsbosbeheer en omwonenden. Het ging om praktische zaken als bevestiging van de camera en elektriciteit, maar ook om vergunningen. Deze willen wij via deze weg bedanken. In het bijzonder bedanken we Maarten Kerkhof voor de medewerking en het meedenken bij het plaatsen van een videocamera bij de Pontwaard op zijn erf.

7 Referenties

Aarninkhof, 1999.

Argus & Kustbeheer. In opdracht van Rijkswaterstaat Oost Nederland.

Baar et al., 2014.

Oeverstabiliteit Rivieren Oost Nederland. Opzet van een conceptueel model en aanzet tot projectmonitoring. In opdracht van Rijkswaterstaat Oost Nederland.

RHDHV, 2016.

Beheerplan bijzondere natuurwaarden Uiterwaarden Lek. Beheerperiode 2015-2020.



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

0320 294242

info@hkv.nl

www.hkv.nl