



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

stowa

SANDTRACER - MONITORING VAN DUINDYNAMIEK MET SATELLIETDATA EN AI

PROTOTYPE-ONTWIKKELING EN EERSTE BEVINDINGEN



RAPPORT

2025
37

SANDTRACER - MONITORING VAN DUINDYNAMIEK MET
SATELLIETDATA EN AI

PROTOTYPE-ONTWIKKELING EN EERSTE BEVINDINGEN

RAPPORT

2025

37

ISBN 978.94.6479.116.7



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Mattijn van Hoek (HKV)
Michelle Rudolph (HKV)
Carolien Wegman (HKV)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE
Oscar van Dam (STOWA)
Jappe Jongejan (NSO)
Geert van Duinhoven (OBN)
Petra Goessen (HHNK)
Sem Jongejan (HHNK)
Albert Oost (Staatsbosbeheer)
Niels van Kuik (RWS)
Eline Sieben (RWS)
Lisa Gordeau (RWS)
Arnoud Schouten (PWN)
Inger van den Bosch (PWN)
Mark van Til (Waternet)

Dit project is deels gefinancierd vanuit het Programma Instandhouden Waterkeringen PIW4, een samenwerkingsverband van STOWA en Rijkswaterstaat.

FOTO OMSLAG Kerf Burgh Haamstede, Zeeland (foto: O. van Dam)
VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-37
ISBN 978.94.6479.116.7

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

De Nederlandse duinen vormen een uniek en dynamisch landschap dat van cruciaal belang is voor zowel kustveiligheid als biodiversiteit. Effectief beheer vereist nauwkeurige monitoring van deze dynamiek, maar traditionele methoden zijn vaak tijdrovend en kostbaar. Tegen deze achtergrond is binnen het project SandTracer onderzoek gedaan naar de inzet van kunstmatige intelligentie in combinatie met satellietbeelden en LiDAR-data.

Het product maakt het mogelijk om veranderingen in het duinlandschap frequent en gebiedsdekkend te volgen. Door gebruik te maken van geavanceerde AI-technieken voor beeldverwerking en een slim datamanagementsysteem, kunnen beheerders nu maandelijks inzicht krijgen in zandverstuivingen en hun effecten op natuur en infrastructuur. In dit rapport presenteren de onderzoekers de ontwikkeling en de resultaten van het SandTracer prototype.

De ontwikkeling van SandTracer is tot stand gekomen in nauwe samenwerking met waterschappen, natuur- en kustbeheerders. Door hun praktijkervaring en expertise actief te betrekken, kon de functionaliteit van het systeem worden afgestemd op de dagelijkse werkprocessen. Het onderzoek toont aan dat een slimme integratie van satellietdata, kunstmatige intelligentie en operationele kennis aanzienlijke meerwaarde biedt voor zowel beheerders als beleidsmakers.

De resultaten van dit onderzoek zijn niet alleen relevant voor het Nederlandse duinbeheer. De ontwikkelde methodiek biedt ook perspectief voor internationale toepassingen en kan bijdragen aan het monitoren van andere dynamische kustsystemen. De geplande doorontwikkeling en het komende leerjaar voor praktijkvalidatie vormen de opmaat naar een bredere implementatie van de methodiek.

Dit rapport is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. STOWA aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele onjuistheden in de gepresenteerde resultaten.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

SAMENVATTING

SandTracer is een innovatief product dat grootschalige precisie-monitoring van duinen mogelijk maakt. Het onderzoeksteam maakt daarvoor gebruik van satellietbeelden en LiDAR-hoogtemetingen, ondersteund door kunstmatige intelligentie (AI). Het doel is met deze vernieuwende vorm van monitoring inzicht te krijgen in duinontwikkeling langs de hele kustlijn. Operationeel inzicht is belangrijk voor waterveiligheid en natuurontwikkeling. Met deze innovatieve methode zijn onze potentiële gebruikers in staat de effecten van duinbeheer beter inzichtelijk te maken voor zowel de natuur als de waterveiligheid.

In dit project heeft het onderzoeksteam de resultaten uit een voorafgaand haalbaarheids-onderzoek verder uitgewerkt naar een eerste prototype, dat online te vinden is op <https://sandtracer-acceptatie.hkvservices.nl>.

GEBRUIKERSPERSPECTIEF

De primaire doelgroepen voor deze ontwikkeling zijn waterschappen en kustwaterbeheerders, natuurbeheerders en provincies met verschillende toepassingsmogelijkheden zoals strategische planning en waterveiligheidsbeheer, natuurherstel en adaptief beheer en de beoordeling van vergunningsaanvragen. Het project heeft geleid tot een methodiek die de monitoring van duinen aanzienlijk verbetert. Met SandTracer kunnen beheerders:

- duinveranderingen systematisch volgen
- de effecten van beheermaatregelen evalueren
- de impact van zandverstuivingen op infrastructuur en natuur analyseren en
- scenario's voor toekomstig beheer verkennen.

Met SandTracer is een hogere frequentie van observaties mogelijk (dagelijks tot wekelijks in plaats van jaarlijks). Daardoor kunnen gebruikers tussentijdse bijsturen, op basis van gebiedsdekkende in plaats puntsgewijze informatie. Dat geeft een vollediger beeld van de ruimtelijke dynamiek en toegankelijke gebruikersinterfaces voor brede en specialistische doelgroepen. Door de output te koppelen aan bestaande beheerinformatie ontstaat een actueler en rijker inzicht in het functioneren van duinlandschappen. Dit maakt efficiëntere inzet van mensen en middelen mogelijk.

TECHNISCH PERSPECTIEF

Het prototype combineert optische satellietbeelden en LiDAR-data (1 m² resolutie) om veranderingen in het duinlandschap te volgen. AI-modellen herkennen automatisch witte duinen en maken een schatting van veranderingen in het zandvolume. Daarnaast zijn de satelliet-afgeleide dataproducten gecombineerd met operationele winddata van het KNMI om de effecten van stormen op zandverstuivingen zichtbaar te maken.

Het onderzoek toont aan dat de onderzochte technologie mogelijkheden biedt voor verbeteringen binnen het werkveld van natuur- en kustbeheer. In de volgende fase ligt de focus op praktijkvalidatie en verdere doorontwikkeling van het prototype met een intensieve samenwerking met eindgebruikers.

Het onderzoek is tot stand gekomen in nauwe samenwerking met de financiële partners van Netherlands Space Office, STOWA en Kennisnetwerk OBN en de inhoudelijke partners PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland, Waternet, Rijkswaterstaat en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt STOWA zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die STOWA beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

SANDTRACER - MONITORING VAN DUINDYNAMIEK MET SATELLIETDATA EN AI PROTOTYPE-ONTWIKKELING EN EERSTE BEVINDINGEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Probleemstelling	1
	1.2 Haalbaarheidsstudie	1
	1.3 Doel van het project	2
	1.4 Leeswijzer	3
2	METHODE	4
	2.1 Projectfasering	4
	2.2 Projectorganisatie	4
	2.3 Werkmethodiek	5
3	RESULTATEN	8
	3.1 Gebruikersperspectief	8
	3.1.1 Maatschappelijke en beleidsmatige inbedding	8
	3.1.2 Stakeholders en toepassingsmogelijkheden	9
	3.1.3 Vertaling naar beheerpraktijk	10
	3.1.4 Aandachtspunten voor implementatie en opschaling	10
	3.2 Technische aandachtspunten	11
4	CONCLUSIES EN VOORUITZICHTEN	12
	4.1 Conclusies bruikbaarheid prototype voor duinmonitoring	12
	4.2 Conclusies ontwikkeltraject	12
	4.3 Voortuitzichten	13
	BIJLAGE A SCHERMOVERZICHT EN FUNCTIONALITEITEN VAN SANDTRACER	14
	BIJLAGE B TECHNISCHE TOELICHTING SANDTRACER	20
	BIJLAGE C LITERATUURLIJST	26

1

INLEIDING

1.1 PROBLEEMSTELLING

De Nederlandse duinen bieden een natuurlijke bescherming van onze kust en zijn een uniek leefgebied voor flora en fauna. Een afwisselend en soortenrijk duingebied draagt bij aan de veerkracht van duinen en versterkt de biodiversiteit. Het begrijpen en waarderen van deze biodiversiteit is niet alleen essentieel voor het behoud van onze natuurlijke omgeving, maar is ook gekoppeld aan wettelijke verplichtingen rondom het rapporteren van de natuurlijke toestand van de duinen. Daarbij horen de EU Vogelrichtlijn en Habitatrichtlijn voor het beschermen van Natura 2000 gebieden (omgezet in Nederland in de Wet Natuurbescherming) en het Subsidiestelsel Natuur en Landschap waarmee provincies subsidies aan terreinbeheerders verlenen voor het uitvoeren van duinbeheer om natuurbeheerdoelen te bereiken.

Duinbeheerders streven naar het herstel van jonge landschappen met zeldzame pioniersoorten. Deze waardevolle soorten worden schaars door overgroei van vegetatie en afname van overstuiving met kalkrijk zand. Deze beide problemen kunnen worden verminderd door de aanleg en het beheer van stuifkuilen waardoor meer verstuiving met kalkrijkzand in het kustgebied plaatsvindt (Kuipers et al, 2016; Löffler et al, 2016. Schwarz et al, 2019; Wesseling, 2018).

Het behoud en vergroten van de biodiversiteit in het duin- en kustlandschap is van groot belang. De mate zandverstuiving in tijd en ruimte in een gebied en kwantitatief zicht (hoeveel centimeter depositie of erosie) hierop is noodzakelijk voor het verhogen van de biodiversiteitswaarde en tegelijk faciliteert verstuiving van kalkrijk zand als een natuurvriendelijke methode om de stikstof problematiek tegen te gaan. Ook zorgen kerven (stuifkuilen verbonden met het strand) voor een verhoging en verbreding van het duin met strandzand wat de waterveiligheid ten goede komt (Wegman et al, 2022). Tot slot is veldwerk kostbaar waardoor er niet altijd goed zicht is op de gevolgen van maatregelen.

Voor effectief beheer is het noodzakelijk om veranderingen in het duinlandschap tijdig en nauwkeurig te kunnen volgen. Traditionele monitoringsmethoden zijn echter vaak arbeidsintensief, bieden beperkte actualiteit en zijn onvoldoende gebiedsdekkend. De groeiende beschikbaarheid van satellietbeelden, LiDAR-data en kunstmatige intelligentie biedt nieuwe kansen om duindynamiek grootschalig, frequent en objectief te monitoren. Deze behoefte aan innovatieve monitoring vormt de aanleiding voor het SandTracer-project.

1.2 HAALBAARHEIDSTUDIE

Er is een haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd waarin interviewgesprekken zijn gevoerd met provincies, terreinbeheerders, Rijkswaterstaat en waterschappen. Hierin zijn de verschillende processen in kaart gebracht die deze organisaties doorlopen voor het bereiken van biodiversiteits- en ook waterveiligheidsdoelen. Onderdeel van deze processen zijn het aanleggen en monitoren van stuifkuilen en kerven. Deze kunnen ervoor zorgen dat kalkrijk zand door verstuiving in duinen landt waardoor de effecten van stikstofdepositie, verzuring en

vermesting verminderd. Dat heeft een positief effect voor de biodiversiteit van de gewenste landschapstypes. Tegenwoordig is het monitoren van deze maatregelen (met hulp van zandvangers, drones, etc.) kostbaar. De geïnterviewde partijen geven aan dat mede daardoor het effect van maatregelen niet met de omvang wordt geanalyseerd als dat wenselijk zou zijn om maatregelen zo efficiënt mogelijk toe te passen en de bijdrage aan biodiversiteitsdoelen te optimaliseren. De organisatie hebben behoefte aan een systeem, een tool, dat onafhankelijk van veldonderzoek verstuingen kunnen worden gedetecteerd en een inschatting van verstuingvolumes kunnen worden gemaakt.

Een nieuw systeem of tool zou moeten voldoen aan:

- De inrichting van maatregelen te verbeteren;
 - maatregelen efficiënt toepassen voor biodiversiteits- en waterveiligheidsdoelbereik (bijv. verbeteren van schaal, richting en afmetingen van stuifkuilen en kerven).
- Het beheer van maatregelen te verbeteren;
 - efficiënt beheersen/beheren; afspraken na kunnen komen; vertrouwen opbouwen; ruimte creëren voor dynamisering.
- Ruimtelijke inrichting te verbeteren;
 - ruimte duurzaam en efficiënt inrichten (bijv. i.v.m. paviljoenvergunningen, fietspaden, drinkwaterwinning).
- Communicatie te verbeteren;
 - in rapporten en karteringen (bijv. voor Natura 2000) en tegenover bevolking (incl. bewoners, bezoekers, fietsers).
- Verantwoording af te leggen.
 - verantwoordelijkheid overnemen (of toewijzen) voor negatieve gevolgen (bijv. fietspaden die worden overstoven met zand).

1.3 DOEL VAN HET PROJECT

Het project SandTracer is gestart om een prototype te ontwikkelen dat grootschalige, frequente en objectieve monitoring van duinen mogelijk maakt. Door de inzet van satellietbeelden, LiDAR-data en kunstmatige intelligentie wordt beoogd, beheerders en beleidsmakers beter inzicht te geven in zanddynamiek, de effectiviteit van beheermaatregelen en de ontwikkeling van duinhabitats (Figuur 1). Dit rapport beschrijft de aanleiding, ontwikkeling en eerste resultaten van het SandTracer-prototype en hoe de methode in de praktijk beheerders en beleidsmakers kan ondersteunen.

Figuur 1 Twee kleine stuifkuilen op Texel (Van der Spek, 2018)



1.4 LEESWIJZER

Het rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 beschrijft de gehanteerde methode en projectaanpak. In hoofdstuk 3 worden de belangrijkste resultaten gepresenteerd, vanuit gebruikersperspectief en technisch perspectief. Hoofdstuk 4 bevat de conclusies en een vooruitblik op verdere ontwikkeling van SandTracer.

Bijlage A geeft een eerste impressie van de gebruikersschermen van SandTracer en kan gezien worden als een beknopte handleiding.

Bijlage B geeft technische details van de toegepaste technieken in SandTracer.

2

METHODE

2.1 PROJECTFASERING

In het project lag de aandacht vooral op de behoeften van de inhoudelijke partners, de potentiële eindgebruikers. Er zijn 3 projectfasen doorlopen:

1. **Initiële fase:** Om de gebruikersbehoeften en -perspectieven scherp te krijgen, heeft gebruikersconsultatie plaatsgevonden door middel van werksessies. Daarmee zijn 'user stories' opgesteld. Een *userstory* is een korte beschrijving van wat een (eind)gebruiker wil bereiken. Een *userstory* bestaat uit enkele zinnen in gewone spreektaal van de gebruiker, waarin staat wat de gebruiker doet of moet doen en wat daarmee bereikt kan worden.
2. **Ontwikkelfase:** Op basis van de *user stories* uit de werksessies zijn gebruikersschermen opgesteld. Vervolgens is er aan de *back end* een werkend datamanagementsysteem opgesteld op basis van de technische vertaling van de inhoudelijke eisen en wensen van de gebruikers. Die maakt het mogelijk de data daadwerkelijk te ontsluiten voor gebruik volgens de geïdentificeerde *user stories*.
3. **Hands-on werksessie:** De resultaten van het werkende model zijn teruggekoppeld in een werksessie, waarin de inhoudelijke partners gezamenlijk de gebruikersschermen hebben getest.

2.2 PROJECTORGANISATIE

Binnen het project waren de rollen en verantwoordelijkheden van de betrokken partijen als volgt gedefinieerd:

Partij	Rol en verantwoordelijkheid
Opdrachtnemer: 	Projectbegeleiding en organisatie en technische uitwerking, technische ontwikkeling en integratie door HKV.
Inhoudelijke partners:    Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 	Inhoudelijke validatie door organisaties en leden van het Deskundigenteam Kust en Duinlandschap, waaronder Rijkswaterstaat Noord-Nederland, Hoogheemraadschap Hollands Noorder Kwartier, Waternet, PWN en Staatsbosbeheer.
Financiële Partners:   	Inhoudelijke en financiële steun door NSO, STOWA en OBN, onder andere door deelname aan het start-, tussen- en eindoverleg en via maandelijkse bijpraatmomenten.

2.3 WERKMETHODIEK

Het project is uitgevoerd volgens een agile¹ aanpak met intensieve stakeholderbetrokkenheid. De belangrijkste activiteiten waren:

Activiteit	Beschrijving
Gebruikerssessies	Een serie interactieve werksessies met potentiële eindgebruikers heeft geleid tot gedetailleerde user stories per type gebruiker. Deze aanpak heeft gezorgd voor een grondige inventarisatie van behoeften en vereisten direct vanuit de praktijk (Figuur 2).
Interfaceontwikkeling	De user stories zijn vertaald naar een intuïtieve grafische gebruikersinterface. Een belangrijke succeselement was de implementatie van gepersonaliseerde schermen voor verschillende gebruikerstypen, waardoor elke gebruiker direct toegang heeft tot de voor hen relevante functionaliteiten.
Datamanagement	Een robuust datamanagement systeem ten behoeve van SandTracer is opgezet op basis van Delft-FEWS software, omgedoopt tot "SEWS" (Sand Early-Warning System). Dit systeem (1) importeert en verwerkt dagelijks KNMI windgegevens, (2) indexeert en verwerkt dagelijks nieuwe satellietbeelden vanuit het satellietdataportaal en (3) draait operationeel als basis voor het platform.
Algoritme-ontwikkeling	De ontwikkeling van beeldverwerkingsalgoritmes was technisch complex. Er is gewerkt aan drie onderdelen: automatische segmentatie van witte duinen, het meenemen van tijdsverloop in deze segmentatie, en hoogte-inschatting met AI. Alleen het segmentatie-algoritme (gebaseerd op U-Net) is gerealiseerd, met als doel om de kern van de automatische monitoring in SandTracer te worden.
Hands-on werksessie	Tijdens een hands-on werksessie gingen de betrokken inhoudelijke partners als specialisten actief aan de slag met SandTracer (zie Figuur 3). In deze sessie werd teruggekoppeld in hoeverre het prototype aansluit bij de gebruikersbehoeften en werd geïnventariseerd welke nieuwe inzichten tijdens het gebruik zijn ontstaan.
Kennisdeling en extern bereik	Kennisdeling was een integraal onderdeel van het ontwikkelproces van SandTracer. Om inzichten met de bredere wetenschaps- en beheerdersgemeenschap te delen, heeft het onderzoeksteam de bevindingen gepresenteerd op verschillende nationale en internationale platforms (Figuur 4): - Presentatie op de themadag van het NCK (Netherlands Centre for Coastal Research); - Presentatie tijdens de STOWA-conferentie over dynamisch kustbeheer; - Posterpresentatie op de ESA BioSpace '25 conferentie; - Posterpresentatie op de Coastal Dynamics '25 conferentie. Deze kennisdelingsactiviteiten hebben niet alleen bijgedragen aan het verspreiden van de projectresultaten, maar hebben ook waardevolle feedback en nieuwe inzichten opgeleverd die zijn meegenomen in de verdere ontwikkeling van het prototype.

Figuur 2 Interactieve werksessie met stakeholders tijdens SandTracer-ontwikkeling. Kustbeheerders, ecologen en ontwikkelaars bespreken gebruikersvereisten en visualisatiemogelijkheden in een collaboratieve ontwikkelingsmethodiek



¹ Agile is een manier van werken die flexibiliteit en aanpasbaarheid benadrukt en wordt vaak als projectmanagement-methode bij software ontwikkeling gebruikt.

Figuur 3 Demonstratie van de specialist-modus tijdens een werksessie. Duinbeheerders en morfologen testen geavanceerde analysetools en leveren direct feedback voor doorontwikkeling van het platform



Figuur 4 Kennis delen. Boven: presentatie van SandTracer op de STOWA conferentie over Dynamisch Kustbeheer. Michelle Rudolph en Mattijn van Hoek demonstreren het platform aan kustbeheerders, waterschappen en beleidsmakers. Linksonder: poster presentatie door Mattijn van Hoek ten tijde de ESA BioSpace '25 conferentie. Rechtsonder: posterpresentatie door Carolien Wegman en Petra Goessen (inhoudelijk partner HHNK) ten tijde van de Coastal Dynamics '25 conferentie in Portugal



3

RESULTATEN

3.1 GEBRUIKERSPERSPECTIEF

3.1.1 MAATSCHAPPELIJKE EN BELEIDSMATIGE INBEDDING

De Nederlandse kustduinen spelen een cruciale rol in zowel waterveiligheid als biodiversiteitsdoelstellingen. In dat licht is het verbeteren van inzicht in duindynamiek van maatschappelijk belang voor onder andere kustveiligheidsbeheer, natuurherstel en ruimtelijke planning. SandTracer is ontwikkeld om deze dynamiek grootschalig en frequent te monitoren, en zo een bijdrage te leveren aan integraal en adaptief beheer (voorbeeld Figuur 5).

Figuur 5 Zandverstuivingen in de duinen bij Castricum. Tussen oktober 2019 en maart 2023 is het zichtbaar duinoppervlak sterk toegenomen. Tegeltijdportaal (hkvservices.nl) – quadkey: 12020211001311100



Het prototype levert een platform (operationeel via <https://sandtracer-acceptatie.hkvservices.nl>) dat de monitoring van zanddynamiek in de Nederlandse duingebieden structureel verbetert, met significante voordelen ten opzichte van de huidige situatie:

1. ONDERSTEUNING VAN BIODIVERSITEITSDOELSTELLINGEN

Door tijdige detectie van verstarring en verruiging van duinen en inzicht in herstelbehoefte, ondersteunt SandTracer natuurdoelen zoals het behouden van stuivende witte duinen en vanuit successie ontstane grijze duinen (Natura 2000).

SandTracer draagt bij aan biodiversiteitsbehoud door:

- vroege detectie van ongewenste verstarring van duingebieden;
- identificatie van gebieden waar zanddynamiek hersteld moet worden;
- monitoring van de effectiviteit van beheersmaatregelen op dynamiek en vegetatie.

2. VERBETERING VAN KUSTVEILIGHEIDSBEHEER

Het systeem versterkt kustveiligheidsbeheer via:

- vroegtijdige detectie van erosiehotspots;
- ondersteuning van adaptief beheer bij extreme weersomstandigheden.

3. KWANTITATIEVE MONITORING VAN ZANDDYNAMIEK

Het prototype levert een significante verbetering in de monitoring van zanddynamiek door:

- hogere frequentie: Dagelijkse tot wekelijkse observaties in plaats van jaarlijkse metingen;
- grotere dekking: Gebiedsdekkende informatie in plaats van puntmetingen;
- data-integratie: Combinatie van satellietbeelden, LiDAR data en windgegevens voor een compleet beeld;
- gebruikersinterfaces voor brede en specialistische doelgroepen (Figuur 6 t/m Figuur 11 in Bijlage A).

De functionaliteiten van SandTracer sluiten daarmee aan op meerdere beleidskaders, waaronder Natura 2000 en de toekomstige Nature Restoration Law². De technologie biedt schaalbare monitoring die bestaande, vaak fragmentarische of arbeidsintensieve methoden aanvult.

3.1.2 STAKEHOLDERS EN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN

De doelgroepen voor SandTracer bestaan uit organisaties met complementaire behoeften:

- **Waterschappen en kustwaterbeheerders** de waterschappen langs de Nederlandse kust en Rijkswaterstaat hebben de taak om de kustlijn te monitoren langs de Hollandse kust en op de Waddeneilanden. Voor hen biedt SandTracer een efficiënte methode om grote kustgebieden frequent te kunnen monitoren en vroege signalen van erosie te detecteren.
- **Natuurbeheerders** zoals Staatsbosbeheer, Waternet, PWN en ook diverse waterschappen zijn verantwoordelijk voor het dagelijks beheer van duingebieden. Hun focus ligt op het behoud van biodiversiteit en het stimuleren van natuurlijke processen. SandTracer ondersteunt hen bij het nemen van gefundeerde beheerbeslissingen door inzicht te geven in zanddynamiek en vegetatieontwikkeling.
- **Provincies** hebben een dubbele rol. Enerzijds zij verantwoordelijk voor de rapportage over Natura2000-gebieden, waarbij een minimale eis is dat de natuurkwaliteit behouden moet worden. Anderzijds moeten zij anticiperen op de nieuwe Europese Nature Restoration Law, die meer ruimte biedt voor actief natuurherstel. Daarnaast hebben specialisten in ruimtelijke ontwikkeling binnen provincies behoefte aan inzicht in de effecten van duindynamiek op infrastructuur, toekomstige woningbouw en aangrenzende landbouw- en industriegebieden.

Voorbeelden voor concrete gebruikssituaties zijn weergegeven in Tabel 1. De analyse laat zien dat SandTracer veel toepassingsmogelijkheden heeft, zowel binnen als buiten het bestaande instrumentarium van water- en natuurbeheerders.

² **Nature Restoration Law:** De EU-wet inzake natuurherstel is de eerste continentale, bindende verordening van de Europese Unie die gericht is op het herstel van gedegradeerde ecosystemen, het vergroten van de biodiversiteit en het verbeteren van de weerbaarheid van de natuur tegen klimaatverandering. De wet stelt een gezamenlijke EU-doelstelling voor de lidstaten om tegen 2030 ten minste 20% van de land- en zeegebieden van de EU te herstellen en tegen 2050 alle gedegradeerde ecosystemen, wat bijdraagt aan de doelstellingen van de Europese Green Deal en de EU-biodiversiteitsstrategie. https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-regulation_en

Tabel 1 Voorbeelden voor concrete gebruikssituaties

Gebruiker	Informatiebehoefte	Toepassing
Kustbeheerders	Inzicht in duinontwikkeling na stormen en suppleties	Strategische planning en waterveiligheidsbeheer
Natuurbeheerders	Inzicht in zanddynamiek en vegetatieontwikkeling	Natuurherstel en adaptief beheer (Natura 2000, Habitatrictlijn)
Vergunningverleners	Inzicht in effecten van verstuiwing op infrastructuur en natuurwaarden	Beoordeling van vergunningaanvragen
Onderzoekers & adviseurs	Data-analyse van natuurlijke en mensgemaakte invloeden op duinen	Scenarioverkenningen en beleidsadvies
Recreatiespecialisten	Inzicht in hoeverre zandverstuivingen afkomen op de padenstructuur (fietspaden in duinen)	(Fiets)padbescherming voor recreatiedoelen
Communicatiemedewerkers	Visueel materiaal over landschapsverandering en beheermaatregelen	Voorlichting aan burgers en beleidsverantwoording

3.1.3 VERTALING NAAR BEHEERPRAKTIJK

Het prototype van SandTracer laat zien hoe satellietbeelden en AI-methoden kunnen worden ingezet binnen de beheerpraktijk van duingebieden. Met het prototype kunnen beheerders frequente en gebiedsdekkende informatie inzien voor het dagelijkse beheer. Concreet maakt SandTracer het mogelijk om:

- **Veranderingen in duinlandschappen systematisch te volgen**
Zicht op de mate en snelheid van zandverstuivingen in relatie tot stormen en windpatronen, over langere perioden en op landschapsniveau.
- **Effecten van beheermaatregelen te evalueren**
Inzicht in de impact van ingrepen zoals zandvangers, vegetatiebeheer of suppleties op zanddynamiek en vegetatieontwikkeling.
- **Impact van verstuiwing op infrastructuur en natuur te analyseren**
Detectie van effecten op beheerobjecten, zoals fietspaden, en op en op natuurwaarden, zoals overpoeding van grijze duinen of ontwikkeling van habitattypen.
- **Scenario's voor toekomstig beheer te verkennen**
Ondersteuning bij het afwegen van alternatieve beheerstrategieën, zoals het stimuleren van natuurlijke verstuiwing of het ontwerpen van nieuwe stuifduinen.

In bijlage A is informatie opgenomen hoe de proof-of-concept applicatie in detail is uitgewerkt. Door de data systematisch te koppelen aan bestaande beheerinformatie ontstaat een breder en actueler beeld van het functioneren van duinlandschap. Hiermee kunnen beheerders beter anticiperen op veranderingen en hun maatregelen bijsturen op basis van feitelijke trends.

3.1.4 AANDACHTSPUNTEN VOOR IMPLEMENTATIE EN OPSCHALING

Een succesvolle toepassing van SandTracer binnen het instrumentarium van water- en natuurbeheerders vereist naast technologische verfijning ook beleidsmatige en organisatorische inbedding. Daarbij spelen de volgende strategische aandachtspunten een centrale rol:

- **Toevoeging aan bestaande beheerpraktijken**
Beheerders hebben veel domeinspecifieke expertise, maar digitale innovatie is vaak geen kernactiviteit binnen hun dagelijkse werkprocessen. Het succes van implementatie hangt dan ook af van de gebruiksvriendelijkheid, betrouwbaarheid en flexibiliteit van de tool. Daarbij is het cruciaal dat SandTracer complementair wordt ingezet, in synergie met bestaande instrumenten zoals veldmetingen of luchtfotoanalyse — niet als vervanging, maar als verrijking van het bestaande monitoringsarsenaal.

- **Verbinding tussen monitoring en besluitvorming**
SandTracer maakt snellere detectie van veranderingen mogelijk dan traditionele methodes (weken i.p.v. jaren). Deze versnelling vraagt om reflectie op de huidige besluitvormingsstructuren binnen beheerorganisaties, die veelal zijn ingericht op jaarlijkse cycli. Wanneer actuele veranderingen sneller inzichtelijk zijn, kan dit leiden tot meer adaptief en responsief beheer. Dit vereist interne dialoog over planning, bevoegdheden en reactietijd, en mogelijk ook beleidsmatige herijking van het beheer-instrumentarium.

3.2 TECHNISCHE AANDACHTPUNTEN

De belangrijkste technische aandachtspunten voor de doorontwikkeling van SandTracer liggen op het gebied van volumetrische inschattingen en algoritme-optimalisatie.

Het bepalen van nauwkeurige volume-inschattingen van zand in duinen (habitattype witte duin) op basis van optische satellietdata is tijdens het project geïdentificeerd als een substantiële uitdaging. Uit de analyse blijkt dat wanneer optische beelden worden vergeleken met LiDAR-gebaseerde volumebepalingen, de subtiele variaties in zandverplaatsing nauwelijks zichtbaar zijn in de optische data. De aanvankelijke ambitie om diepte-inschatting uit optische beelden direct te koppelen aan volumetrische veranderingen (erosie en sedimentatie) blijkt momenteel te ambitieus.

Aanvullende technische ontwikkelpunten zijn opgenomen in bijlage B.

4

CONCLUSIES EN VOORUITZICHTEN

4.1 CONCLUSIES BRUIKBAARHEID PROTOTYPE VOOR DUINMONITORING

De belangrijkste conclusies voor de (eind)gebruiker van het prototype SandTracer, op basis van de eerder opgehaalde wensen uit de haalbaarheidsstudie, zijn:

- De inrichting van maatregelen te verbeteren;
 - Met het systeem kunnen schaal, richting en afmetingen van stuifkuilen en kerven worden ingepast in een bestaande duinomgeving als onderdeel van het planningsproces.
- Het beheer van maatregelen te verbeteren;
 - Met het systeem kan het (toekomstig) beheer van een nieuwe stuifkuil of kerk beter inzichtelijk worden gemaakt, waardoor er meer ruimte kan worden gecreëerd voor dynamisering in de duinen.
- Ruimtelijke inrichting te verbeteren;
 - Met het systeem worden de effecten van stuifkuilen en kerven de ruimte rondom paviljoenen, fietspaden, drinkwaterwinning, etc. beter in beeld gebracht.
- Communicatie te verbeteren;
 - Er is nog geen ervaring opgedaan met het gebruik van het systeem in rapporten en karteringen (bijv. voor Natura 2000) maar het is zeer aannemelijk dat een grote verbeter slag mogelijk is.
- Verantwoording af te leggen.
 - Er is nog geen ervaring opgedaan met het gebruik van het systeem om verantwoording af te leggen, maar het is zeer aannemelijk dat een grote verbeter slag mogelijk is.

4.2 CONCLUSIES ONTWIKKELTRAJECT

De ontwikkeling van het SandTracer prototype heeft waardevolle inzichten opgeleverd in zowel de mogelijkheden als de uitdagingen van AI-gedreven duinmonitoring. De belangrijkste conclusies uit het ontwikkeltraject zijn:

1. **Gebruikersgerichte aanpak:** De intensieve betrokkenheid van eindgebruikers heeft geleid tot een systeem dat direct aansluit bij praktische behoeften. Deze gebruikersgerichtheid is een kritische succesfactor gebleken en blijft leidend in de verdere doorontwikkeling.
2. **Toepasbaarheid:** Hoewel primair ontwikkeld voor duinmonitoring, is tijdens het project duidelijk geworden dat de methodologie breder toepasbaar is. Toepassingen voor kustveiligheid, vegetatiemonitoring en ruimtelijke planvorming zijn kansrijke uitbreidingsrichtingen.
3. **Technische haalbaarheid:** De basis voor een operationeel monitoringssysteem voor duinzand is succesvol gelegd, met name op het gebied van segmenteren van zand vanuit satellietbeelden en het verwerken van diverse databronnen. Hoewel er nog uitdagingen zijn in de volumetrische schatting van zandverplaatsing, biedt de huidige stand van techniek voldoende basis voor zinvolle monitoring.
4. **Systeemintegratie, schaalbaarheid en duurzaamheid:** De gekozen architectuur heeft bewezen schaalbaar, efficiënt en robuust te zijn. Dit biedt een solide basis voor verdere uitbreiding naar andere gebieden en aanvullende functionaliteiten.

5. **Co-creatie:** SandTracer bevindt zich op het kruispunt van verschillende ontwikkelingen: toenemende beschikbaarheid van satellietdata, groeiende AI-mogelijkheden, en een sterkere maatschappelijke focus op natuurbehoud en kustveiligheid. Het prototype demonstreert dat een intelligente combinatie van deze elementen substantiële meerwaarde kan bieden voor zowel beheerders als beleidsmakers.

4.3 VOORTUITZICHTEN

Een vervolgtraject kan zich richten op:

- Verbetering van de automatische kwaliteitscontrole van inkomende satellietbeelden;
- Optimalisatie van de verwerkingspipeline voor snellere analyse en visualisatie.

In het geplande leerjaar zal de nadruk liggen op de validatie van SandTracer in praktijkomgevingen. Daarbij worden onder meer de volgende aspecten onderzocht, die belangrijk zijn voor verdere implementatie en adoptie binnen beleid en beheer:

- Gebruiksgemak en integratie in bestaande werkprocessen;
- Bewezen meerwaarde ten opzichte van traditionele monitoringsmethoden;
- Opschaalbaarheid en overdraagbaarheid naar andere (ook internationale) kustgebieden.

BIJLAGE A

SCHERMOVERZICHT EN FUNCTIONALITEITEN VAN SANDTRACER

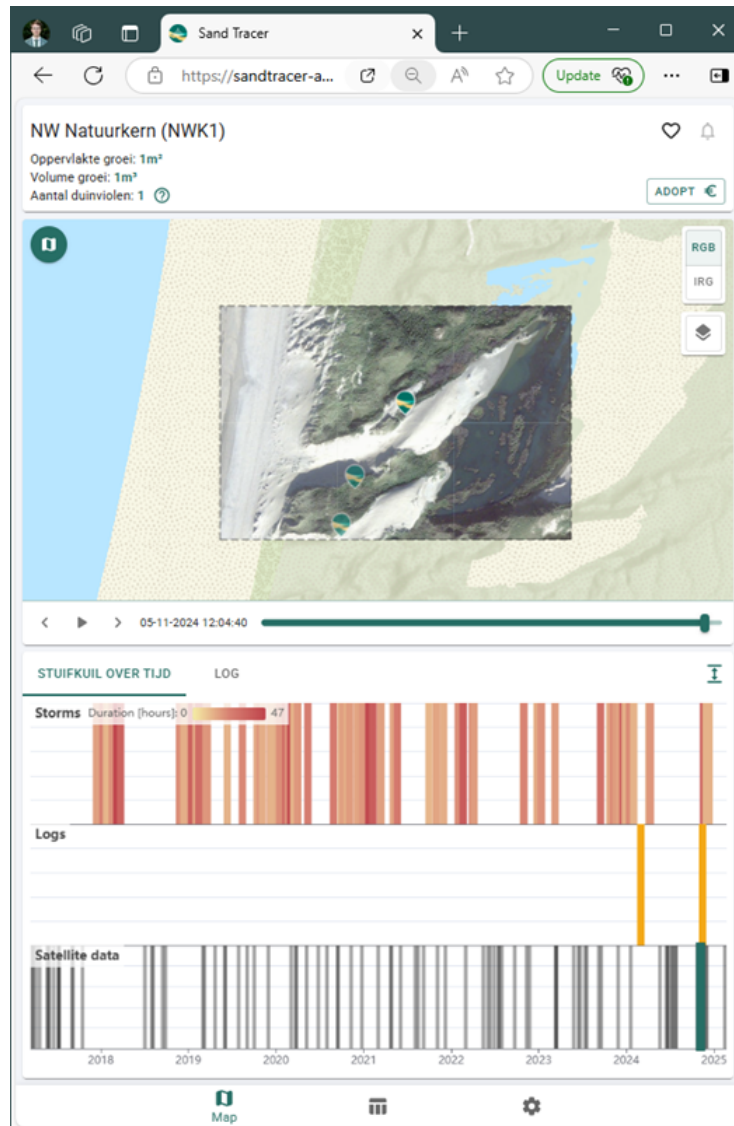
Het platform is beschikbaar voor algemene gebruikers via een mobiele interface en voor specialisten via een desktopomgeving.

De mobiele interface toont een interactieve tijdslijn (Figuur 6), waarmee gebruikers de veranderingen in verstuivingen per gebied als een doorlopende film kunnen bekijken. Deze beelden worden geladen via een eigen koppeling met de tileserver³ van het satellietdata-portaal.

Op verzoek van de eindgebruikers is deze functie uitgebreid met extra context: actuele en historische stormdata worden gekoppeld aan veranderingen in het landschap. Daarnaast kunnen beheerders een logboek bijhouden waarin zij toelichten welke maatregelen op welke plek en welk moment zijn genomen. Denk aan het plaatsen van zandvangers of verwijderen van struweel. Deze toelichting kan via tekst, foto's of video's gedeeld worden met het publiek.

3 Een tileserver is software die grote hoeveelheden satellietbeelden snel en efficiënt toegankelijk maakt.

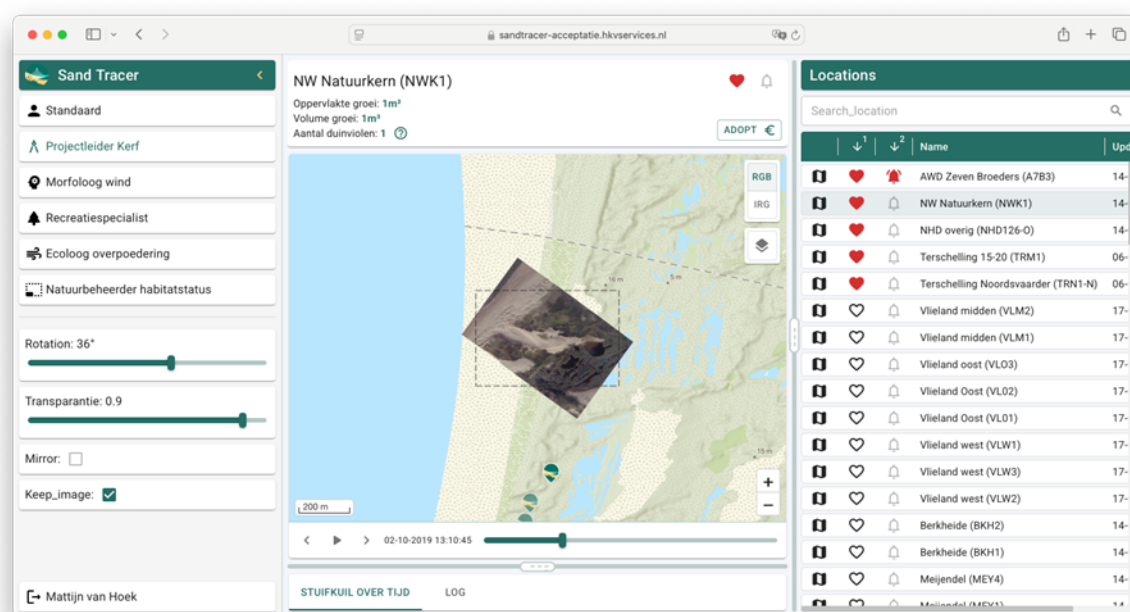
Figuur 6 Detailweergave van een stuivende duin met metrieken, satellietbeeld en interactieve tijdslijder. De driedelige grafiek toont stormgebeurtenissen, beheerlogboeken en satellietobservaties voor analyse



De specialistische gebruikers hebben elk vanuit hun eigen specifieke behoeften toegang tot een eigen interface. Deze interfaces zijn enkel beschikbaar via een login mogelijkheid. In het kort betreffen dit de volgende mogelijkheden (voor een breder overzicht wordt verwezen naar de handleiding van de applicatie SandTracer):

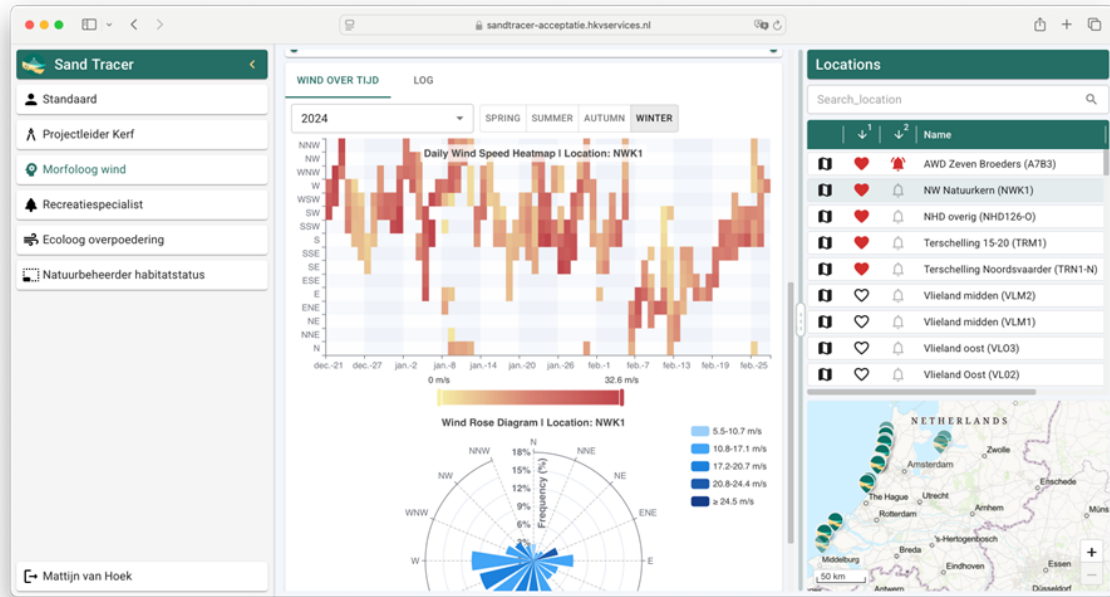
- Informatiescherm “**projectleider**”. Binnen dit scherm is het mogelijk om een bestaande kerf of stuifduin ‘als datakubus’ op te pakken en te slepen naar een andere locatie (Figuur 7). Eindgebruikers hebben aangegeven dat dit nuttig is in de discussiefase voor de aanleg van nieuwe stuifduinen, om zichtbaar te maken wat de aanleg kan betekenen voor de nieuwe planlocatie. Door visueel te maken wat het effect over tijd is, soortgelijk aan stuifduin van locatie X, kan je vroegtijdig aanpassingen maken in het ontwerp.

Figuur 7 Informatiescherm projectleider. Sleep een bestaande stuivende duin naar een nieuwe te plannen locatie en zie de te verwachten impact over tijd



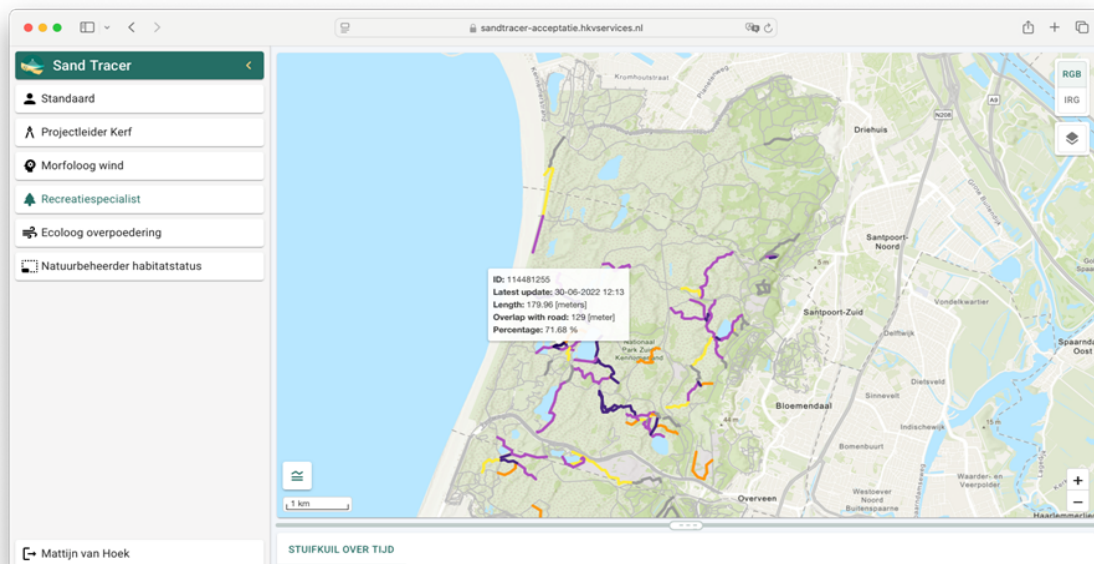
- Informatiescherm “**morfoloog wind**” (Figuur 8). Dit scherm toont de stuifduinen in combinatie met windstatistieken, zoals dagelijkse gemiddelden per windrichting en een seizoensgebonden windroos met frequentie en snelheid. Vanuit eindgebruikers is daarnaast de wens geuit om deze statistieken ook over de volledige meetperiode te kunnen vergelijken tussen locaties (bijv. Waddengebied vs. Zeeland). Deze functionaliteit is nog niet geïmplementeerd, maar meegenomen als waardevolle input voor vervolgstappen.

Figuur 8 Informatiescherm morfoloog wind. Krijg gevoel van de zichtbare verstuiwingen vanuit de wind



- Informatiescherm “**recreatiespecialist**”. Dit scherm laat zien wat de status is van zichtbaar zand op wegdelen. Dit is afgeleid op basis van het geïmplementeerde segmentatie algoritme. Via deze manier kan je bepalen in hoeverre de zandverstuivingen op de fietspadeninfrastructuur afkomen, zodat er tijdig mitigerende maatregelen ingezet kunnen worden. Zie Figuur 9 voor een voorbeeld hoe dit met kleurcodes per wegdeel is aangegeven.

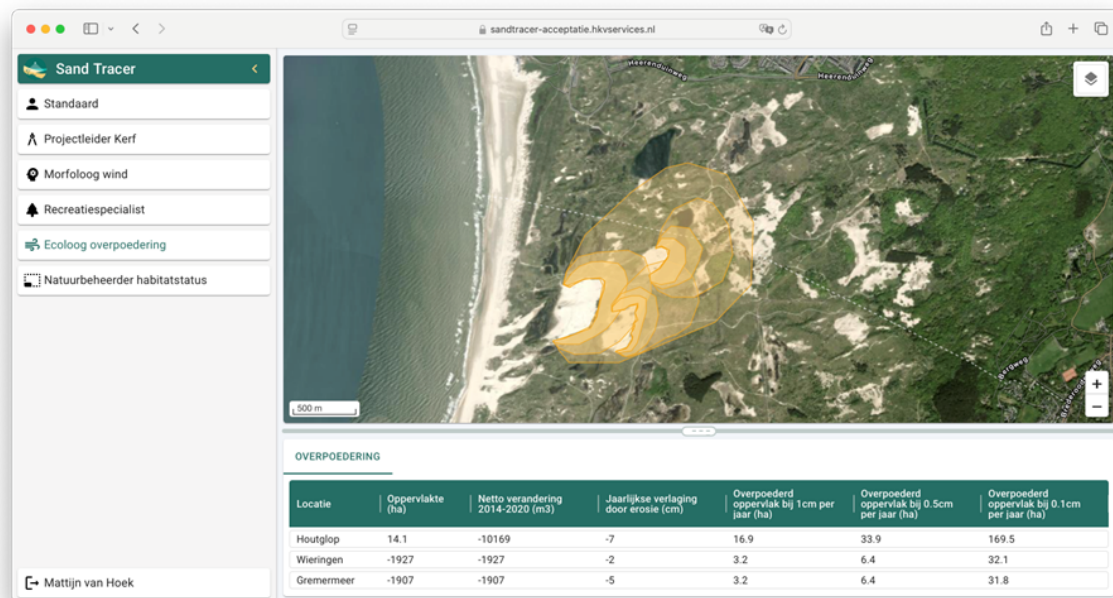
Figuur 9 Recreatiespecialist-interface voor padenbeheer. Kleurcodes tonen interactie tussen stuifkuilen en paden, met detailinformatie over zandbedekking per wegdeel



- Informatiescherm “**ecoloog overpoeding**” (Figuur 10). Dit scherm is ontworpen om inzicht te geven in de ruimtelijke reikwijdte van overpoeding bij verschillende drempels voor verstuiwing. De ambitie is om te kunnen visualiseren welk gebied is overpoe-

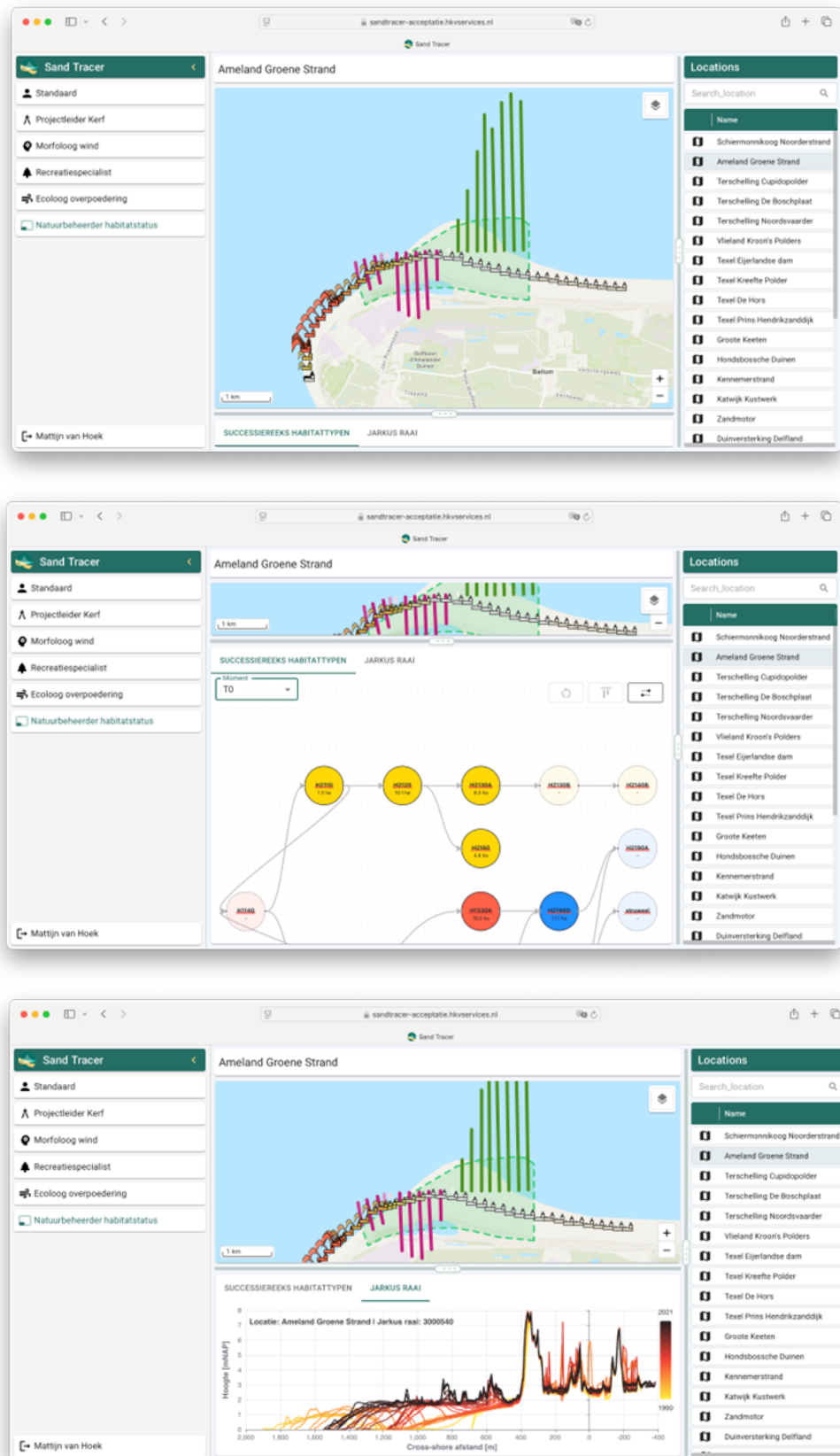
derd bij een bepaalde aanname over de laagdikte. Bijvoorbeeld: bij een drempel van 1 millimeter wordt een groter gebied aangeduid dan bij een drempel van 1 centimeter. Omdat de exacte overpoedings dikte vooraf onbekend is, biedt deze aanpak de mogelijkheid om scenario's te verkennen met verschillende aannames.

Figuur 10 Informatiescherm ecooloog overpoedering. Maak zichtbaar tot hoever de mate van overpoedering rijkt landinwaarts van een stuifkuil als forcing variable voor habitattypen grijze duin.¹



- Informatiescherm “natuurbeheerder habitatstatus” (Figuur 11). Dit scherm laat een gecombineerd beeld zien van de suppletiehoeveelheden, gecombineerd met de bijbehorende erosie en sedimentatie component, in combinatie met de successiereeksen van de habitattypen ontwikkeling. De aanvoer van zand vanuit suppleties en bijbehorende kwaliteit (korrelgrootte) is in grote mate bepalend voor de mogelijkheid tot zandverstuviging, en daarmee natuurontwikkeling. Deze keten is in beeld gebracht binnen dit informatiescherm en getoond in Figuur 11.

Figuur 11 Habitatstatus-interface voor natuurbeheerders. Visualiseert suppleties, kusterosie-trends en effecten op de successie van habitattypen en bijbehorende raaimetingen, ondersteunend voor geïnformeerde ecologische beheers beslissingen



BIJLAGE B

TECHNISCHE TOELICHTING SANDTRACER

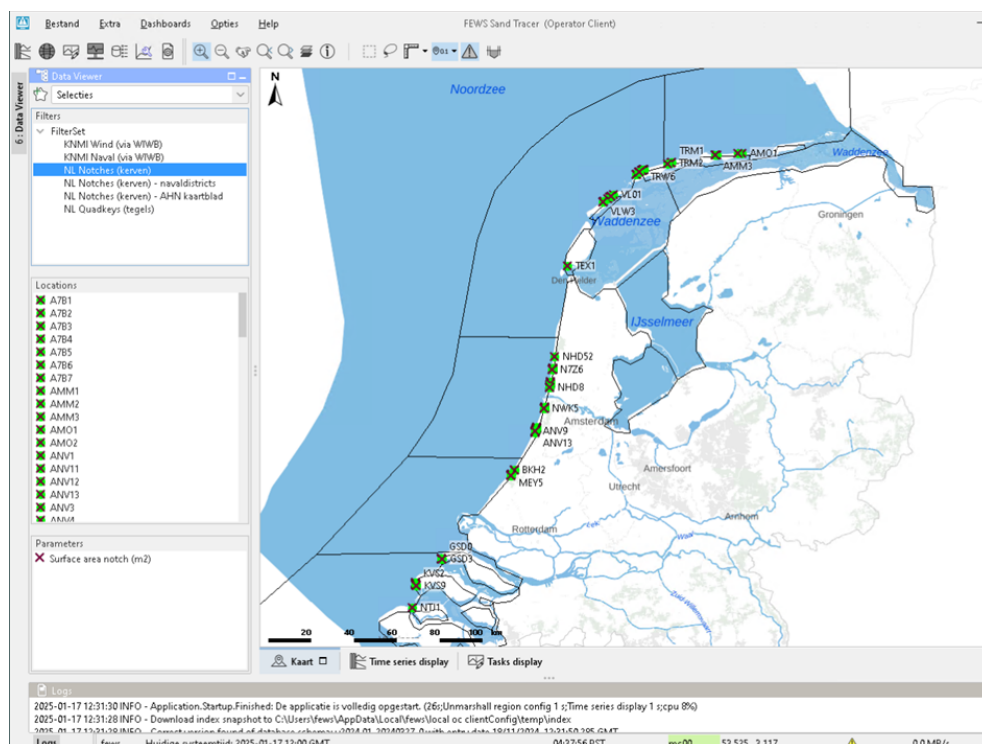
DATAVERWERKING

Voor de verwerking van satellietbeelden heeft het onderzoeksteam een aanpak ontwikkeld gebaseerd op het quadkey-systeem⁴ (niveau 17). Daarbij wordt het aantal gedetecteerde zandpixels per quadkey-tegel geteld en worden er tijdreeksen gekoppeld aan de geografische locatie. Deze benadering biedt twee belangrijke voordelen:

1. Er kan een operationeel datamanagement systeem ingericht worden zonder de omvangrijke ruwe satellietdata te importeren.
2. De data blijft bij de bron (satellietdataportaal) terwijl alleen gerenderde tegels via de tileserver gebruikt worden.

Deze methodiek is effectief in het verwerken van grote hoeveelheden satellietdata zonder overmatige opslagvereisten of verwerkingscapaciteit. Dit is toegepast binnen het Delft-FEWS datamanagementsysteem (Figuur 12 tot en met Figuur 14). Dit systeem wordt reeds als operationeel software product gebruikt voor het verzamelen van allerlei tijdreeksinformatie-producten (zowel vanuit telemetriesystemen als satellietdata).

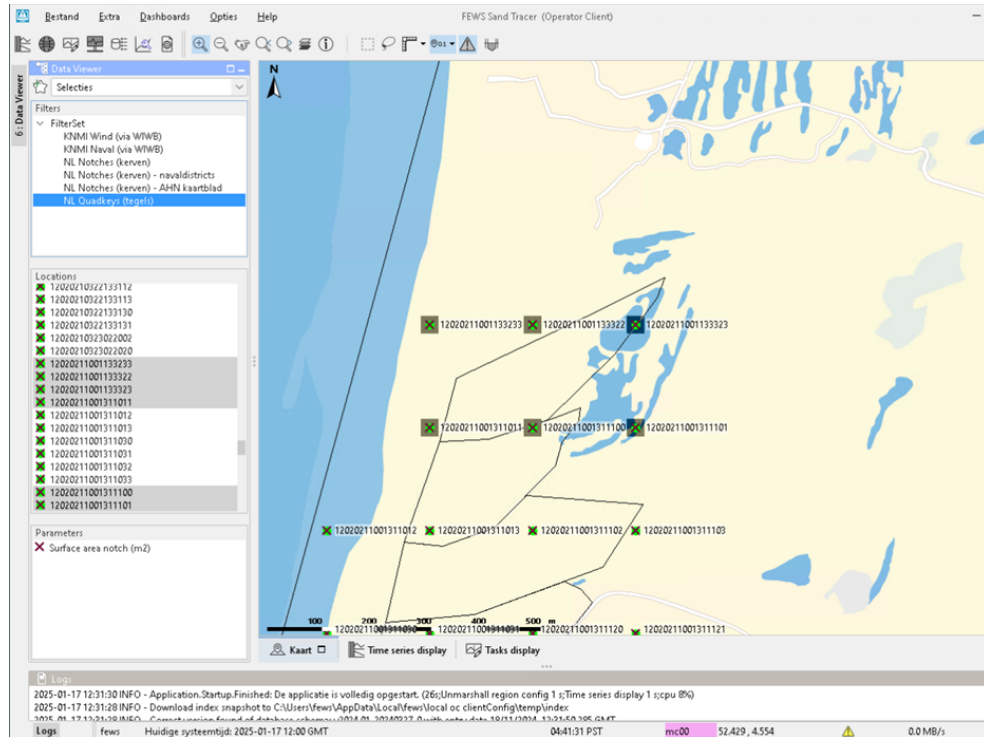
Figuur 12 Delft-FEWS implementatie voor SandTracer met geografische weergave van kerven. Dit systeem vormt de ruggengraat voor dataverwerking, integratie van bronnen en automatische verwerking van satellietbeelden



- 4 Een **quadkey** is een unieke, hiërarchische code die de locatie van een kaarttegel op een tegel-gebaseerde kaart bepaalt. Door een kaart op te delen in vier kwadranten op verschillende zoomniveaus, genereert een quadkey een reeks cijfers waarin elk cijfer een specifiek kwadrant vertegenwoordigt, waardoor efficiënte zoekopdrachten en ophalen van kaartgegevens mogelijk worden.

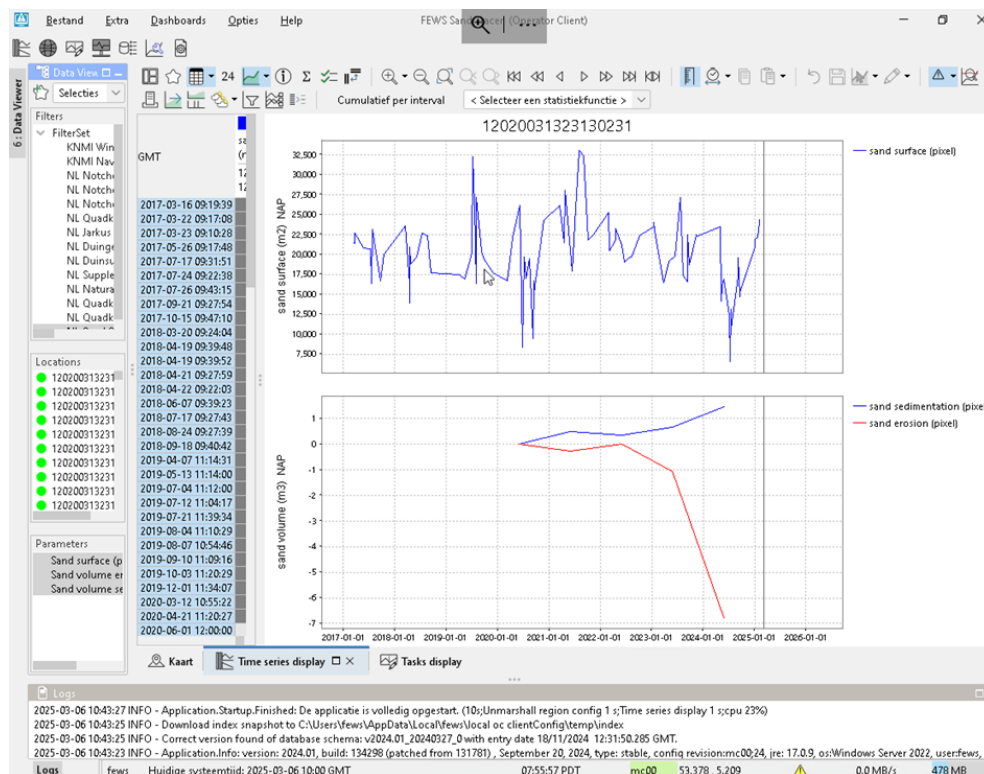
Figuur 13

Interface binnen het Delft-FEWS systeem, waar de quadkey-tegel locaties zichtbaar zijn per gebiedslocatie



Figuur 14

Interface binnen het Delft-FEWS systeem van SandTracer. Tijdreeksen voor de zandoppervlakte per quadkey tegel (12020031323130231) en de ingewonnen erosie en sedimentatie tijdreeksen verschillen vanuit LiDAR



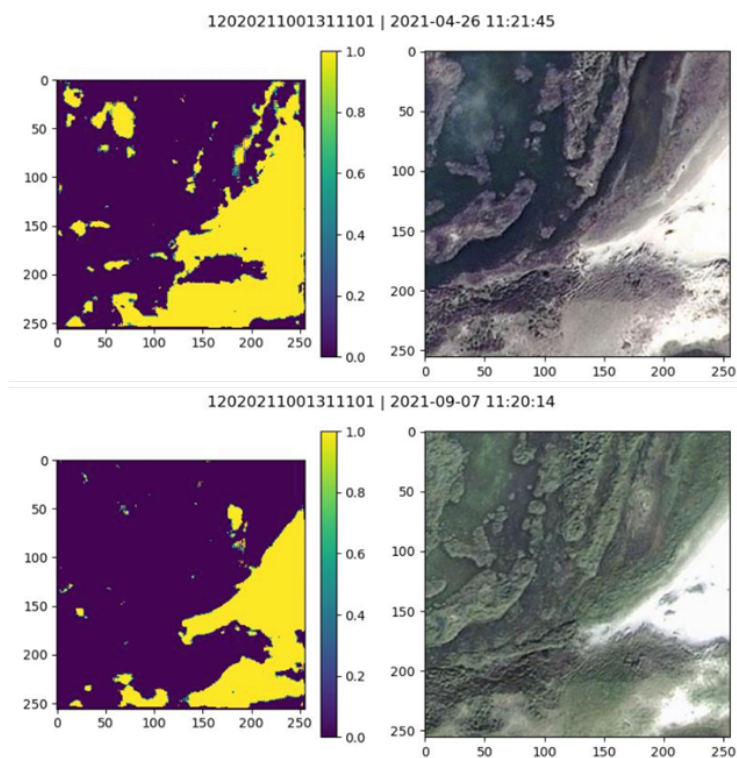
Daarnaast kan in het systeem windgegevens worden geïmporteerd. Deze data komt binnen via de WIWB API, en wordt beheerd door Het Waterschapshuis. Het bevat de dagelijkse windsnelheid en windrichting voor de verschillende kustdistricten, die KNMI gebruikt

voor scheepvaartberichtgeving. Deze data is beschikbaar vanaf 2017 en wordt automatisch verwerkt binnen het Delft-FEWS systeem. Het systeem leidt stormgegevens af volgens de Beaufortschaal van het KNMI, waarbij zeer zware stormen worden geïdentificeerd door het tellen van aaneengesloten uren boven gedefinieerde drempelwaarden zoals gehandhaafd door KNMI⁵. Deze methodiek maakt het mogelijk om windgebeurtenissen te correleren met zandverplaatsingen in de duinen.

AI-MODEL VOOR SEGMENTATIE

Bij aanvang van het project zijn verschillende AI-benaderingen verkend om duinzanddynamiek in kaart te brengen. Omdat zandduinen zich manifesteren in satellietbeelden als continue oppervlakken met geleidelijke overgangen en niet als een duidelijk afgebakende unieke objecten is gebruik gemaakt van een gespecialiseerde segmentatiemethode gebaseerd op recent onderzoek van Nguyen (2024): “Multi-temporal forest monitoring in the Swiss Alps with knowledge-guided deep learning”⁶. Deze methodiek combineert een U-Net⁷ component voor pixelgewijze segmentatie met een Irregular GRU component voor temporele consistentie, zie Figuur 15.

Figuur 15 U-Net segmentatiealgoritme toegepast op dezelfde duinlocatie voor twee tijdstappen. Het algoritme kwantificeert veranderingen in zandverstuiving pixelclassificatie



De implementatie van het U-Net component is succesvol verlopen, waarmee een eerste basis is gelegd voor automatische zandsegmentatie binnen het SandTracer-platform (zie Figuur 17). Daarnaast is onderzocht of ook een Irregular GRU-model kan worden geïntegreerd — een type AI-model dat geschikt is voor het verwerken van gegevens met onregelmatige tijdsintervallen. Dit zou het mogelijk maken om veranderingen in zandverstuivingen

5 Zie: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/windschaal-van-beaufort>

6 Zie <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114109> en <https://github.com/thienanhng/MultiTempForestMapping>

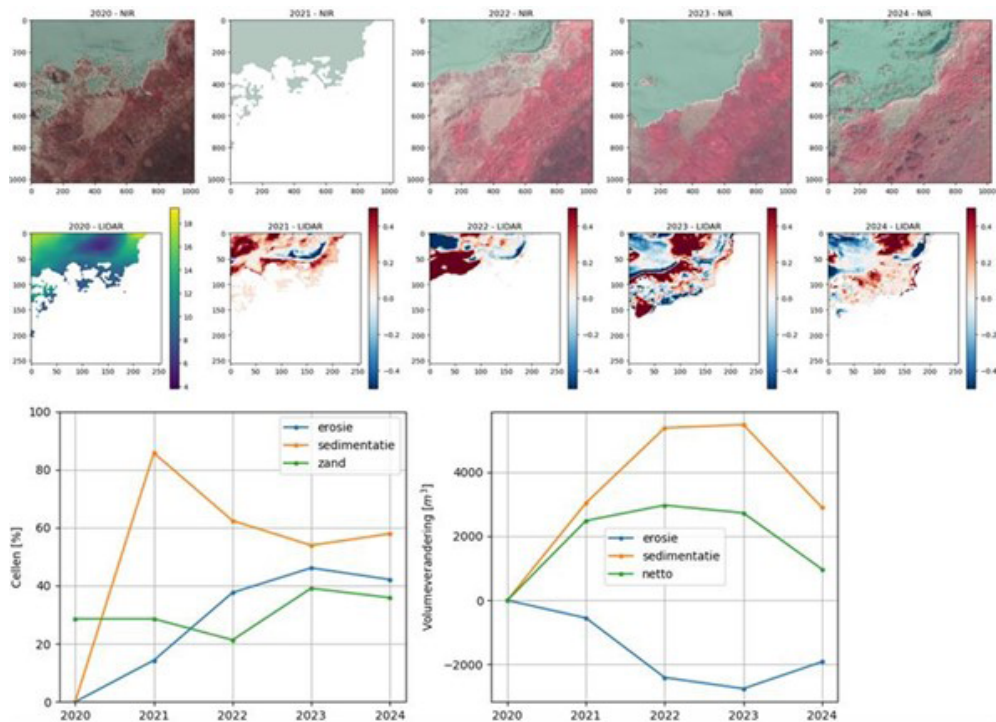
7 U-Net is een convolutioneel neurale netwerk dat is ontwikkeld voor beeldsegmentatie. Het netwerk is gebaseerd op een volledig convolutioneel neurale netwerk waarvan de architectuur is aangepast en uitgebreid om met minder trainingsbeelden te werken en een nauwkeurigere segmentatie te realiseren.

slimmer te analyseren, juist omdat satellietbeelden vaak onregelmatig in de tijd beschikbaar zijn. Deze integratie bleek echter technisch complex: het oorspronkelijke model is ontwikkeld voor jaartallen als tijdstappen, terwijl in dit project wordt gewerkt met dagen of zelfs uren. Door deze mismatch is het binnen de looptijd van dit project nog niet gelukt om dit model werkend te krijgen.

AI MODEL VOOR DUINHOOGTESCHATTINGEN

Parallel hieraan is gewerkt aan de implementatie van het Depth Anything v2 Model (DAM) voor het inschatten van duinhoogtes. Het gekozen algoritme behoort in de categorie monodepth estimation models. Hierbij liet het onderzoeksteam zich inspireren door een recente workshop paper uit 2024: “Depth Any Canopy, leveraging depth foundation models for canopy height estimation”⁸. De implementatie hiervan leidde tot complicaties. Op het oog zijn de grote variëteit aan volumetrische verschillen vanuit LiDAR moeilijk te koppelen aan het optische bovenaanzicht van stuifduinen. Zie bijvoorbeeld het verschil tussen 2023 NIR en 2022 NIR (optisch) in combinatie met gemeten volume verschil onder 2023 – LiDAR in Figuur 16.

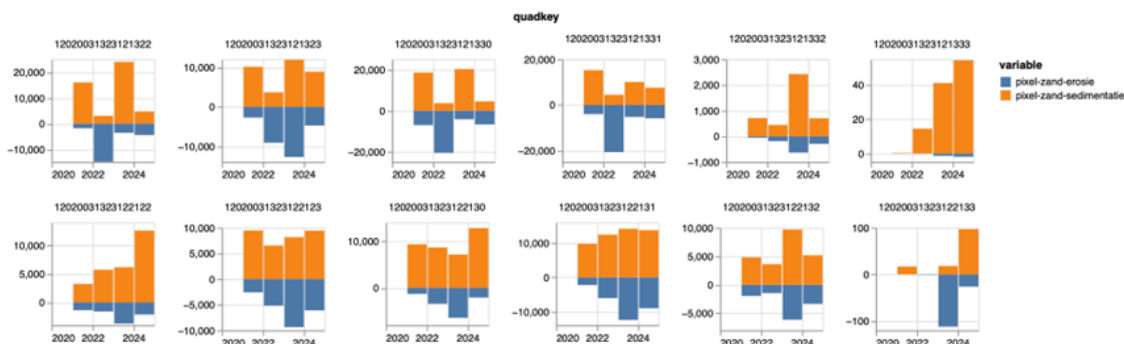
Figuur 16 Gecombineerd zicht op volumetrische jaarlijkse hoogte veranderingen (startpunt 2020) en bijbehorende optische beelden. Het groenachtig masker is het gesegmenteerde zand. Onderaan is de zandbalans van erosie en sedimentatie van deze tegel in oppervlak (linksonder) en volumeverandering (rechtsonder) inzichtelijk gemaakt



⁸ Zie <https://arxiv.org/abs/2408.04523> en <https://github.com/DarthReca/depth-any-canopy>

Dit beeld wordt verder bevestigd wanneer de resultaten over meerdere tegels in beeld worden gebracht zoals in Figuur 17.

Figuur 17 **Overzicht van de erosie en sedimentatie volumes van gesegmenteerd zand over twaalfstal tegels (geïdentificeerd per quadkey). Dit laat zien dat er in sommige tegels een balans is tussen erosie en sedimentatie en in sommige locaties een grotere mate van sedimentatie al dan niet erosie aanwezig is**



Ondanks aanzienlijke tijdsinvestering bleek de beschikbare broncode moeilijk aanpasbaar voor de specifieke toepassing in duingebieden. Het onderzoeksteam heeft wel succesvol de volledige pipeline voor het koppelen van LiDAR-data aan de quadkey-tegels opgezet, evenals de integratie van zeer hoge resolutie satellietbeelden.

Deze infrastructuur vormt een solide basis voor toekomstige algoritme-implementaties. Mogelijk kan een vervolg in samenwerking met de onderzoekers van Depth Any Canopy tot een doorbraak leiden. In hoofdstuk 4.2 wordt daarnaast op andere opkomende technologieën en alternatieve benaderingen gereflecteerd.

TECHNISCHE ONTWIKKELPUNTEN

Deze bevinding is waardevol voor de verdere ontwikkelrichting van het platform, omdat het heeft geholpen realistischere doelen te stellen voor wat met de huidige technologie haalbaar is. Voor de volumetrische component zijn verschillende alternatieve benaderingen geëxploreerd:

1. **Nieuwe generatie DEM-producten:** Upstream sensor bedrijven zoals CNES en Airbus ontwikkelen momenteel geavanceerde Digital Elevation Models (DEM) vanuit stereo beeldparen en fotogrammetrische algoritmen. Deze komen naar verwachting dit jaar of volgend jaar beschikbaar. Deze DEMs welke twee keer per jaar beschikbaar komen kunnen een waardevolle aanvulling vormen op de huidige monitoring.
2. **InSAR-gebaseerde metingen:** Het Copernicus Land Monitoring Service van de ESA heeft onlangs de European Ground Motion Service (EGMS) gelanceerd. Deze service biedt InSAR-data aan als een verwerkt product over grondbewegingen. Dit jaarlijkse product is onder andere gericht op het monitoren van kustdaling en kan mogelijk geïntegreerd worden in SandTracer.
3. **Maandelijks InSAR-afgeleide producten:** Een andere optie, naast het jaarlijkse grondbewegings product van EGMS is het zelf afleiden van een maandelijks grondbewegingsproduct op basis van ruwe InSAR-data, specifiek voor zandmonitoring in duinmassief. Hierbij zou de temporele revisittijd substantieel verbeterd worden in vergelijking met standaard LiDAR-opnamen, terwijl wel de volumetrische component behouden blijft.

De uitdagingen rond algoritme-optimalisatie vloeien voort uit de lessen die zijn opgedaan bij de implementatie van deep learning-modellen voor duinsegmentatie. De U-Net component functioneert goed voor pixelgewijze classificatie, maar voor consistente tijdreeksanalyse is verdere ontwikkeling nodig. In de volgende fase zullen we:

1. **de parameterisatie van het U-Net model** verder optimaliseren voor specifieke duinlandschappen;
2. **experimenteren met alternatieve architecturen** die beter presteren bij seizoensgebonden variaties in vegetatiebedekking;
3. **het aanbod van open-source algoritmen** omtrent het temporele component (zoals de Temporal-GRU-module) opnieuw evalueren, en mogelijk via een alternatief opnieuw implementeren welke beter aansluit bij de toepassing.

BIJLAGE C

LITERATUURLIJST

Kuipers, M, Arens, SM, Ruessink, G, 2016.

Grootschalig herstel van stuivende duinen. De Levende Natuur. 117(003), 90-93.

Löffler, M, Goessen, P, Hoogstrate, T, van der Valk, B, 2016.

Dynamisch kustbeheer veiligheid en natuur profiteren van stuifzand. Water matters. December issue, 4-7.

Schwarz C, Brinkkemper J & Ruessink, G, 2019.

Feedbacks between Biotic and Abiotic Processes Governing the Development of Foredune Blowouts: A Review. J. Mar. Sci. Eng., 7 (1), 2. doi:10.3390/jmse7010002.

Van der Spek, A, 2018.

Meer leven in het duin door stuifkuilen aanleg in de duinen van Texel. Boswachtersblog. <https://www.boswachtersblog.nl/texel/2018/12/11/meer-leven-in-het-duin-door-stuifkuilen-aanleg-in-de-duinen-van-texel/>

Wegman, C, Leenders, JKL en Arens, BG, 2022.

Redeneerlijnen kerven en suppleties. Eindrapport HKV in opdracht van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. PR3915.50

Wesseling M, 2018.

Hoe houden we de duinen levendig? Met de stuifkuil. Natuurkennis. https://www.natuurkennis.nl/Uploaded_files/Publicaties/hoe-houden-we-de-duinen-levendig-met-de-stuifkuil.48cc9d.pdf