



Innovatieproject Hondsbossche Duinen

B2-P2: Analyse effecten maatregelen



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu



hoogheemraadschap
**Hollands
Noorderkwartier**



Project
Opdrachtgever

Ecoshape Hondsbossche en Pettemer Zeewering
Ecoshape

Document
Status
Datum
Referentie

B2-P2 - Analyse effecten maatregelen
Concept 03
12 november 2018
DDT169-18-017.256

Projectcode
Projectleider
Projectdirecteur

DDT169-13
ir. M.H.P. Jansen
ir. R. Bouw

Auteur(s)

Gecontroleerd door

Goedgekeurd door

ir. W.P. Bodde, Witteveen+Bos
dr. J.K. Leenders, HKV
ir. A.H. Verheijen, Witteveen+Bos
drs. C. Wegman, HKV
dr.ir. M.W.J. Smit, Witteveen+Bos
dr.ir. H. Steetzel, Arcadis
ir. M.H.P. Jansen, Witteveen+Bos

Paraaf



Adres

Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
Willemskade 19-20
Postbus 2397
3000 CJ Rotterdam
+31 (0)10 244 28 00
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veelelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	HPZ-gebied	8
1.3	Themalijn B	9
1.4	Doel van dit rapport	9
1.5	Status van dit rapport	9
1.6	Leeswijzer	10
2	GEBIEDSBESCHRIJVING	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Studiegebied	11
2.2.1	Studiegebied kustlangs	11
2.2.2	Studiegebied kustdwars	12
2.2.3	Definities geometrie duin en strand	13
2.2.4	Variatie in korreldiameter bij aanleg	14
2.3	Indeling in profieltypen	14
2.4	Aanleg Hondsbossche Duinen in de tijd	16
2.4.1	Maatregelen tijdens aanleg	16
2.4.2	Aanleg Hondsbossche Duinen in de tijd	16
2.5	Tussentijdse werkzaamheden door AC	18
2.5.1	Lokale zandverplaatsing na oplevering	18
2.5.2	Suppletie maart 2018	21
3	METHODIEK	23
3.1	Inleiding	23
3.2	Algemene aanpak	23
3.3	Hoogtemetingen en luchtfoto's	23
3.4	Expertsessies en veldbezoeken	27
3.5	Vorbereiding data-analyse	28
3.5.1	Interpolatie	29
3.5.2	Natte duinvallei	29
3.5.3	Zettingen	30

3.5.4	Tussentijdse werkzaamheden en overige objecten	30
3.5.5	Definitie raaien	31
4	TOTALE ACCUMULATIE ALS GEVOLG VAN EOLISCH TRANSPORT	33
4.1	Inleiding	33
4.2	Windklimaat	33
4.2.1	Globaal	33
4.2.2	Lokaal	35
4.3	Totaalvolume	37
4.3.1	Totale volumeverandering duin en strand	37
4.3.2	Vergelijking met voorspellingen ontwerpfase	38
4.4	Verdeling kustlangs	38
4.5	Verdeling kustdwars	42
4.5.1	Ontwikkeling dwarsprofiel duingebied per profieltype	42
4.5.2	Strand en intergetijdengebied	46
4.6	Samenvatting	47
5	EFFECT GROOTSCHALIGE GEOMETRIE OP VERSTUIVING EN DEPOSITIE	48
5.1	Inleiding	48
5.2	Grootschalige geometrie	48
5.2.1	Indeling in profieltypen	48
5.2.2	Analyse totale monitoringsperiode	49
5.2.3	Analyse per meetperiode	50
5.3	Indeling op basis van Multivariate Analyse	54
5.3.1	Korte uitleg analyse	54
5.3.2	Resultaten	55
5.3.3	Conclusie	58
5.4	Effect verschillende factoren op verstuiving en depositie HD	58
5.4.1	Aanlegmoment	59
5.4.2	Kustoriëntatie	60
5.4.3	Strand en intergetijdengebied	62
5.4.4	Helling buitentalud	71
5.4.5	Korrel diameter	72
5.5	Samenvatting, conclusies en vervolgstappen	72
6	EFFECT MAATREGELEN DUIN OP VERSTUIVING EN DEPOSITIE	74
6.1	Overzicht maatregelen	74
6.2	Luwe laagtes	74
6.3	Wilgenschermen	80

6.3.1	Profielontwikkeling door wilgenschermen	80
6.3.2	Effectiviteit	81
6.3.3	Conclusies	83
6.4	Vegetatie	83
6.4.1	Effect wel/geen vegetatie	83
6.4.2	Effect inplantpatroon	86
6.4.3	Effect aangroeisnelheid	86
6.4.4	Conclusies	86
6.5	Samenvatting	86
7	DISCUSSIE	88
7.1	Rol korreldiameter	88
7.2	Aanbod- of wind-gelimiteerd systeem	88
7.3	Herkomst van het zand	89
7.4	Achtergrond van verwachte waardes in ontwerpfase	89
7.5	Hypotheses verwachte ontwikkelingen	90
7.6	Vertaalbaarheid naar andere gebieden	90
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	91
8.1	Inleiding	91
8.2	Conclusies processen	91
8.2.1	Totaal volumes en trends	91
8.2.2	Kustdwarse verdeling van het aanzandingsvolume	92
8.2.3	Maatregelen	92
8.3	Conclusies onderzoeksvragen	93
8.4	Aanbevelingen	94
8.5	Toepassing	95
9	REFERENTIES	96
	Laatste pagina	96
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Luwe laagtes	15
II	Ontwikkeling dwarsprofiel per profieltype	13
III	Verklaring kustlangse trends en uitschieters	11
IV	Kohonenanalyse	1
V	Strandbegrenzungen over de tijd	5

VI	Effect strijklengte op hoogteverandering en volumeverandering	6
VII	Helling voorduin tegen aanzanding	5

INLEIDING

1.1 Achtergrond

In de periode van begin 2014 tot december 2015 is de zeedijk van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ) versterkt met een volledig zandige oplossing, later de Hondsbossche Duinen (HD) gedoopt. Het toegepaste ontwerp bestaat uit een zachte, ondiepe vooroever (strand) en verschillende onderdelen van een duinlandschap en had als dubbele ontwerpdoelstelling: primaire kustveiligheid en ruimtelijke kwaliteit.

Bij het project van de Kustversterking HPZ (KHPZ) wordt in lijn met de *Building with Nature (BwN)*-aanpak gebruik gemaakt van natuurlijke processen. De verwachting is dat daarmee betere en – over de gehele levensduur van een project gerekend – (kosten)effectievere ontwerpoplossingen kunnen worden bereikt dan met een traditionele aanpak. De praktische kennis die daarvoor nodig is, kan echter alleen worden verkregen en gevalideerd in grote uitvoeringsprojecten zoals de KHPZ.

De centrale vraag is in hoeverre vooraf geformuleerde (op natuur gebaseerde) ontwerpdoelstellingen daadwerkelijk te realiseren zijn. Om een bijdrage te leveren aan de beantwoording van die vraag is het Ecoshape HPZ innovatieproject gestart. In dat project wordt onderzocht welke verbeteringen mogelijk zijn in de aanleg van zandige kustversterkingen met de focus op kustveiligheid, ecologie en beleving. Het project richt zich daarbij specifiek op processen die boven water¹ plaatsvinden in het nieuw aangelegde gebied van de Hondsbossche Duinen, direct aansluitend op de oude HPZ-dijk.

Het project kent 3 themalijnen: ecologische habitatontwikkeling (thema A); geometrieontwikkeling en optimalisatie ontwerp (thema B); en beleving (thema C), die onderverdeeld zijn naar meerdere sub-thema's (tabel 1.1).

¹ Er is beperkt informatie onder water beschikbaar vanuit de Jarkusraaien. In mei 2018 is een student een stageopdracht gestart om te kijken naar de ontwikkeling en invloed van het intergetijdengebied en de vooroever. De bevindingen daaruit zijn in hoofdlijnen opgenomen in dit rapport.

Tabel 1.1 Hoofd- en subthema's Ecoshape HPZ-innovatieproject

Themalijn	Sub-thema	Onderwerp
habitatontwikkeling	A.0	werkplan thema A, thema-trekkerschap en afstemming
	A.1	vegetatiemonitoring
	A.2	morfologie en vegetatie
	A.3	toepassing andere locaties
ontwerptimalisatie	B0 en B0.1	werkplan thema B, thema-trekkerschap en afstemming
	B1	optimalisatieruimte
	B2	geometrieontwikkeling
	B3	optimalisatiemogelijkheden
meewegen beleving	C3	verstuiving

1.2 HPZ-gebied

De zandige versterking bij de HPZ is uitgevoerd vanaf begin 2014 tot december 2015. Het projectgebied beslaat ongeveer 8,5 km langs de kust, waarvan 5,5 km langs de oude dijk. Eerst is het zand opgespoten en in de gewenste vorm gebracht. Vervolgens is het gebied ingericht met helminplant, diverse maatregelen voor het sturen van verstuiving en recreatievoorzieningen. Een overzicht van de aanlegtopografie en maatregelen is gegeven in 'Inventarisatie maatregelen ontwerp HPZ' (product B1P1 - Ecoshape, 2016). Een impressie van het gebied wordt getoond in afbeelding 1.1.

Afbeelding 1.1 Zandige versterking van de HPZ met de ontwerpelementen: helminplant, luwe laagtes (de niet-ingeplante vakken), wilgenschermen en in de verte de vochtige duinvallei. (Foto: www.hoogwaterbeschermingsprogramma.nl)



1.3 Themalijn B

Binnen het Ecoshape innovatieproject HPZ richt themalijn B zich op kansen die eolisch transport van zand biedt voor ontwerp-optimalisaties aan (nieuwe) duingebieden. Themalijn B is medio 2015 gestart en loopt door tot en met 2018. Themalijn B heeft een raakvlak met Themalijn A (Voorspelbaarheid habitatontwikkeling) waar het de invloed van vegetatie op duinontwikkeling betreft en met Themalijn C (Beleving) waar het verstuiwingshinder betreft (werkpakket C3).

In 2015 tot en met 2017 lag de nadruk binnen Themalijn B voornamelijk op het inwinnen van data en de eerste interpretatie daarvan. Parallel aan voortzetting van het meetprogramma is in 2017 gestart met de analyse van de data. Om ontwerp-optimalisaties te kunnen onderzoeken, dient eerst de geometrie-ontwikkeling van het duingebied als gevolg van eolisch transport in kaart te worden gebracht. Dat gebeurt in het werkpakket B2 met analyse van de totale accumulatie van zand in het duingebied boven de duinvoet en de verdeling van het zand binnen het gebied. Deze verdeling is afhankelijk van de interactie met de grootschalige geometrie van de profieltypen en de kleinschalige maatregelen zoals wilgenschermen, luwe laagtes en vegetatie.

1.4 Doel van dit rapport

De resultaten van de analyse van de geometrie-ontwikkeling worden beschreven in de voorliggende rapportage: B2P2 - Analyse effecten maatregelen. De analyse vindt plaats aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

- (I) Hoe groot is het totale zandvolume dat accumuleert in het duingebied als gevolg van eolisch transport?**
- (II) Wat is het effect van vormgeving van het duin op verstuiwing en depositie (voor zover hier generieke conclusies aan te verbinden zijn)?**
- (III) Wat is het effect van maatregelen in het duin op verstuiwing en depositie (voor zover hier generieke conclusies aan te verbinden zijn)?**

De rapportage richt zich op het beschrijven van de ontwikkeling van de geometrie van het strand en de duinen van het gebied van de Hondsbossche Duinen, waarbij vooral de accumulatievolumes in het duingebied worden beschouwd. Vervolgens worden de onderliggende oorzaken onderzocht om de geobserveerde geometrie-ontwikkeling te verklaren. Daarbij speelt het effect van de grootschalige geometrie (profieltypen) en de kleinschalige maatregelen een belangrijke rol.

Het uiteindelijke doel hiervan is om tot guidelines te komen voor toekomstige vergelijkbare projecten. Op basis van de bevindingen van dit rapport kan een eerste aanzet voor dergelijke guidelines worden gegeven. De guidelines zijn project-overkoepelend en worden uiteindelijk als een apart eindproduct opgeleverd, waarin de bevindingen van alle themalijnen samenkomen.

Mogelijke ontwerp-optimalisaties op het gebied van het aangelegde volume en de aanlegmethode kunnen aan de hand van dit rapport worden onderzocht en worden vastgelegd binnen onderdeel B3 van dit project.

1.5 Status van dit rapport

Voorliggend rapport is een derde conceptversie van product B2P2. In het rapport zijn de discussies en bevindingen van de expert workshop op 22 mei 2018 en reviews vanuit themalijn B geïntegreerd.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het studiegebied en de gebruikte beschrijvingen en definities. In hoofdstuk 3 wordt de methode en aanpak beschreven om de onderzoeksvragen te beantwoorden. In hoofdstuk 4 wordt de totale accumulatie in het studiegebied beschouwd ter beantwoording van vraag (I). Hoofdstuk 5 gaat in op de effecten van de grootschalige geometrie op verstuiving en depositie in het studiegebied ter beantwoording van vraag (II). De effecten van kleinschalige maatregelen worden geanalyseerd in hoofdstuk 6 voor vraag (III). Hoofdstuk 7 bevat de discussie waarin met een kritische blik naar de resultaten wordt gekeken en een vergelijking met andere gebieden wordt gemaakt. De conclusies en aanbevelingen worden tenslotte beschreven in hoofdstuk 8.

2

GEBIEDSBESCHRIJVING

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het studiegebied, de verschillende aangelegde profieltypes en definities. Vervolgens worden zaken genoemd waar rekening mee wordt gehouden in de data-analyse zoals de aanlegfase en tussentijdse werkzaamheden.

2.2 Studiegebied

Het studiegebied beslaat een deel van het projectgebied van de Kustversterking HPZ (zie paragraaf 1.2). Voor een nadere definitie van het studiegebied is het allereerst van belang onderscheid te maken tussen de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ) en de Hondsbossche Duinen (HD). Met HPZ wordt alleen aan de bestaande, oude zeedijk gerefereerd. HD slaat op de zandige kustversterking die voor de HPZ is aangebracht. In het kader van dit project wordt met HD op het droge strand en het duingebied bedoeld.

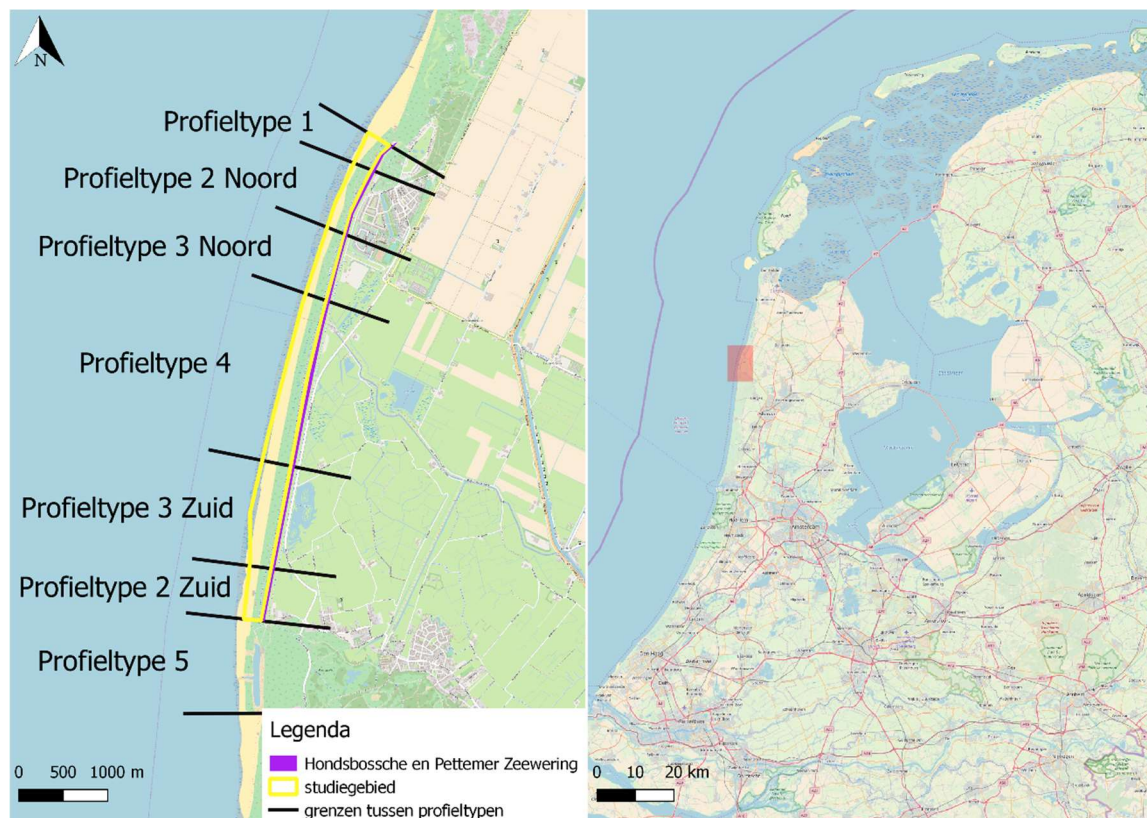
2.2.1 Studiegebied kustlangs

Voor deze studie is niet het gehele projectgebied van de HD beschouwd. Alleen de ontwikkeling van het deel van de HD dat grenst aan de bestaande HPZ is geanalyseerd (afbeelding 2.1). Het gebied dat wordt gemeten beslaat wel het hele projectgebied met aanvullend ongeveer 1 km ten zuiden en 2 km ten noorden daarvan.

Het duinprofiel in dwarsrichting varieert over het projectgebied. Daarbij is een aantal varianten te onderscheiden, zogenaamde profieltypen. De profieltypen worden nader toegelicht in paragraaf 2.3.

Het gedrag van het gedeelte met de strandlagune in het zuiden (ook wel: profieltype 5) wordt niet geanalyseerd. Hier wijkt de geometrie te veel af van de rest van het gebied. Dit valt buiten de scope van deze studie.

Afbeelding 2.1 Overzicht studiegebied Hondsbossche Duinen



2.2.2 Studiegebied kustdwars

In de dwarse richting wordt het gebied vanaf de gemiddeld hoogwaterlijn (0,84 m +NAP) geanalyseerd, tot en met het aangelegde duin dat eindigt bij de aansluiting op de dijk (afbeelding 2.2). Op de dijk zijn nauwelijks meetbare volumes waargenomen in data en veldobservaties, deze komen niet voor in de gepresenteerde resultaten. Uit zandvangers blijkt dat er enig transport over de dijk heeft plaatsgevonden in enkele perioden. Qua volume is dit verwaarloosbaar in vergelijking met wat in het duin is geaccumuleerd¹.

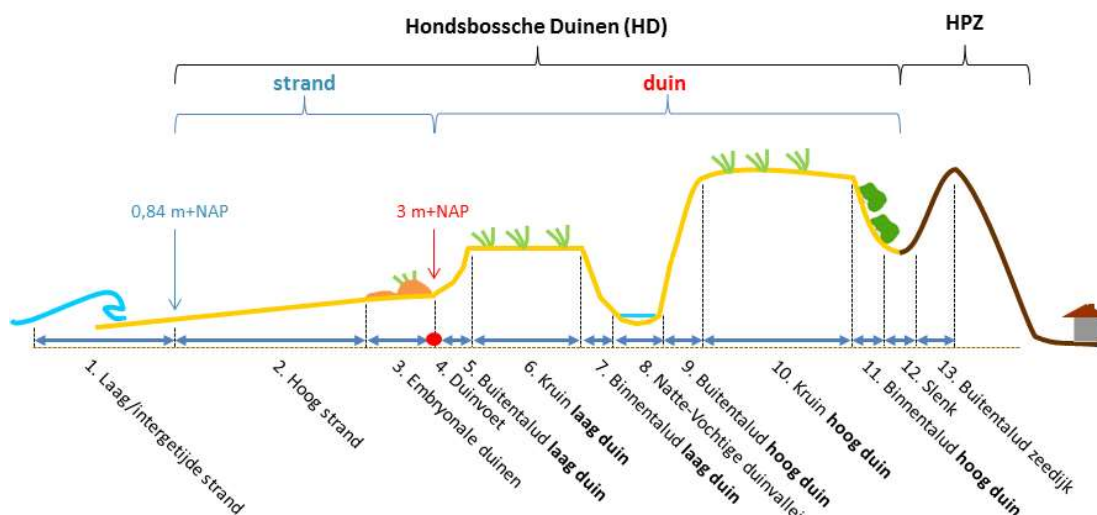
In de dwarsrichting kan onderscheid gemaakt worden in 4 zones (alleen de vetgedrukte zones zijn onderdeel van het studiegebied):

- | | |
|-----------------------------------|---|
| - duin | boven 3 m+NAP tot de aansluiting op de HPZ |
| - strand | boven 0,84 m+NAP tot 3,0 m+NAP |
| - intergetijdengebied/laag strand | tussen -0,76 m en 0,84 m+NAP |
| - (ondiepe) vooroever | <-0,76 m+NAP |

Het intergetijdengebied is inhoudelijk een interessante zone, daar dat zand aanlevert wat verstuipt richting het strand en duin. De dataset behelst deze niet continue doordat niet onder water gemeten kon worden. Informatie uit het intergetijdengebied kan daarom niet volledig dekkend en met dezelfde frequentie uit data gehaald worden als informatie uit de andere delen van het onderzoeksgebied. Op basis van gegevens uit de Jarkusraaien wordt aanvullend op de analyse van het droge deel, een inschatting gemaakt van de ontwikkeling onder water.

¹ Persoonlijke mededeling Bas Arens in review van dit rapport.

Afbeelding 2.2 Kustdwarse indeling van onderzoeksgebied en definities, niet op schaal (hier: duin met duinvallei, profieltype 4)¹



2.2.3 Definities geometrie duin en strand

Een voorbeeld van een aanlegprofiel van de HPZ met kenmerkende opbouw voor het middendeel is schematisch weergegeven in afbeelding 2.2. Voor de eenduidigheid gebruiken we in dit rapport voor de verschillende onderdelen van het duinprofiel zo veel mogelijk dezelfde benamingen (tabel 2.1).

Tabel 2.1 Benamingen van de duinprofiel-elementen

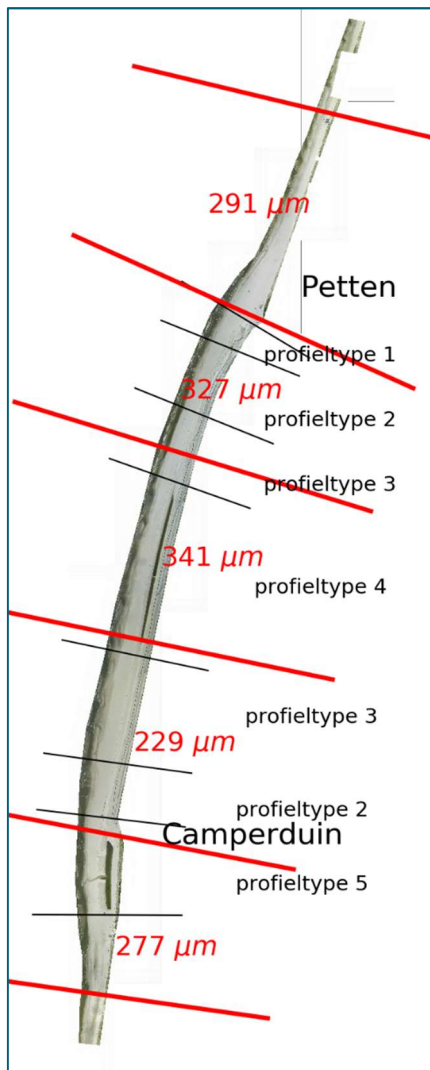
Indeling o.b.v. topografie	Indeling o.b.v. ingeplante vegetatie	Opmerking/alternatieve benamingen (in literatuur)
laag/intergetijden strand (tussen GLW en GHW)	-	intergetijden strand [gelegen tussen vooroever en droog strand]
hoogstrand (boven GHW)	-	droog strand [gelegen boven vooroever en nat strand], vanaf gemiddeld hoogwater (0,84 m+NAP)
embryonale duinen	-	overgangszone naar helmduinen
duinvoet	-	Beginnend bij 3 m+NAP
buitentalud laag duin	helmzone	zeereep (eerste duinenrij die direct grenst aan het Noordzeestrand, helmduinen)
kruin laag duin	helmzone	duinrichel
binnentalud laag duin	helmzone	zeereep
natte-vochtige duinvallei	-	natte (duin)vallei, zoet-zout gradiënt
buitentalud hoog duin	helmzone	binnenduinen, helmduinen
kruin hoog duin	helmzone	duinrichel
binnentalud hoog duin	struweelzone	binnenduinen, helmduinen
slenk	struweelzone	gebied onderaan oude zeedijk
buitentalud zeedijk	struweelzone	oude zeedijk

¹ Embryonale duinen komen vaak ook voor boven 3 m+NAP, dus voorbij de gedefinieerde duinvoet (persoonlijke mededeling Bas Arens, in review op dit document).

2.2.4 Variatie in korreldiameter bij aanleg

De korreldiameter van het zand dat is toegepast voor de aanleg van de kustversterking (afbeelding 2.3) is niet uniform over het hele gebied. Metingen door de AC van de korreldiameter op het strand na aanleg laten zien dat de mediane korreldiameter D50 varieert van 229-341 μm . Ten zuiden van de duinvallei is het fijnste zand gebruikt, terwijl ter plaatse van de duinvallei het grofste zand is gevonden. Naast de mediane korreldiameter is ook de verdeling van de korrelgrootte van belang voor eolisch transport. Hierover zijn geen gegevens beschikbaar.

Afbeelding 2.3 Korreldiameter D50 in μm zoals gebruikt bij aanleg HD¹



2.3 Indeling in profieltypen

In het ontwerp van de HD is gevarieerd met de grootschalige geometrie van het duinprofiel. In het ontwerp van de HD zijn 5 representatieve dwarsprofielen onderscheiden, ook wel profieltypen genoemd:

- 1 profieltype 1: hoog duin met een hoogtevariatie;
- 2 profieltype 2: hoog duin met een geringe hoogtevariatie (hoogte maximaal 11,8 m bij acceptatie van aanleg);
- 3 profieltype 3: overgangsduin: een laag duin met aansluitend hoog duin, beide rond 60 m breed;

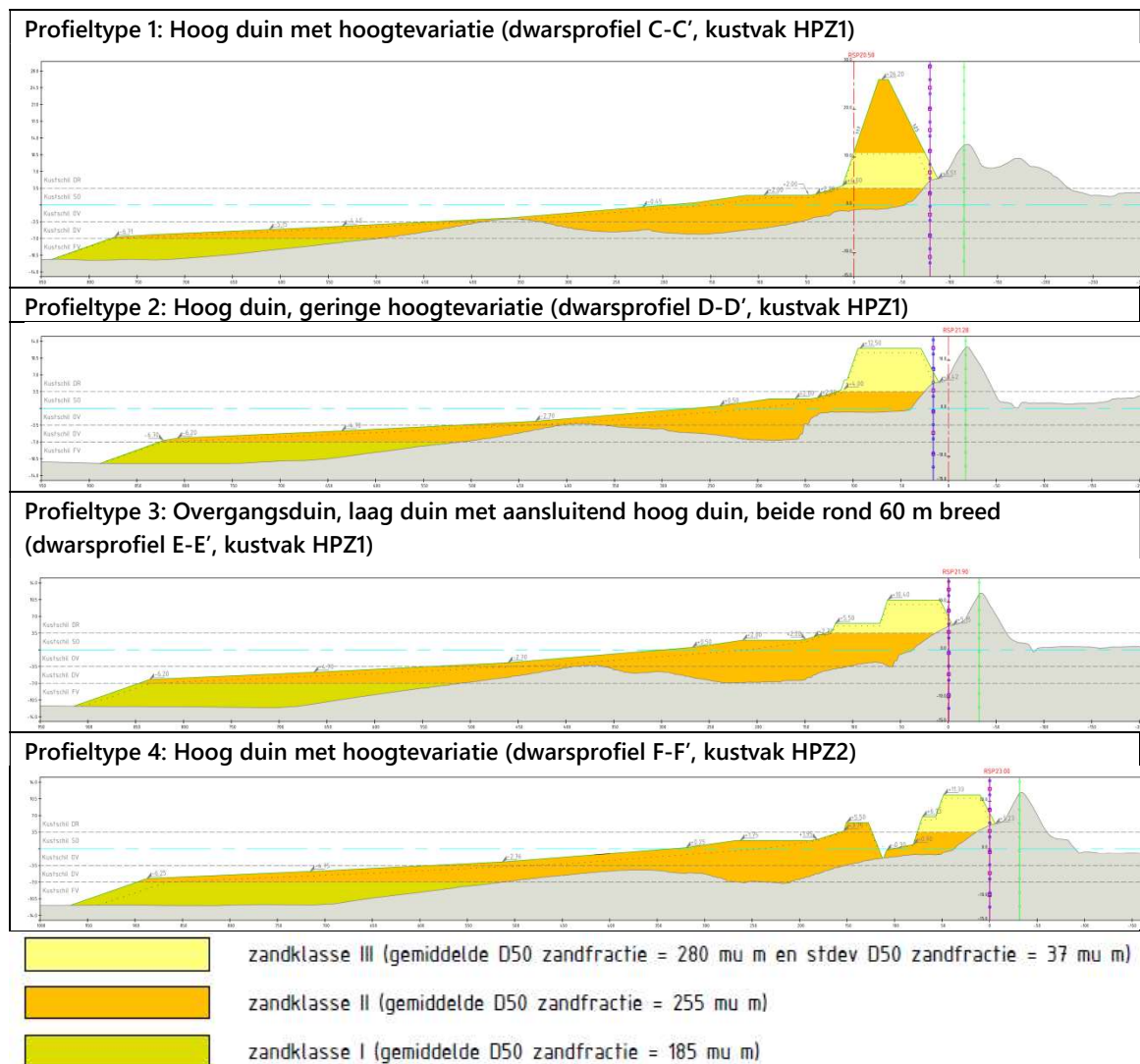
¹ Informatie van AC.

- 4 profieltype 4: 2 duinregels met daartussen een vochtige duinvallei;
- 5 profieltype 5: strandlagune (buiten scope van dit project).

Afbeelding 2.3 geeft voor elk van deze profielen een dwarsdoorsnede. De afbeelding is overgenomen uit de inventarisatie van maatregelen dat bij aanvang van deze studie is gemaakt [Leenders en Smit, 2016]. Een beschrijving van de profieltypen is opgenomen in de inventarisatie van maatregelen [Leenders en Smit, 2016].

De ligging van deze profieltypen in ons studiegebied is weergegeven in afbeelding 2.4. Profieltype 1 is gelegen in het noorden. De profieltypen 2 en 3 komen beiden 2 keer voor. In onze analyse benoemen we profieltype 2 en 3 ten noorden van de duinvallei respectievelijk P2N en P3N. Profieltype 2 en 3 ten zuiden van de duinvallei noemen we P2Z en P3Z. De profieltypen beslaan een verschillend oppervlak van de HD.

Afbeelding 2.3 Profieltypen HPD (Bron: Ontwerpnota eolisch verlies, 2013)



2.4 Aanleg Hondsbossche Duinen in de tijd

2.4.1 Maatregelen tijdens aanleg

Gedurende de aanlegfase is een aantal extra maatregelen getroffen om verstuiving van het pas opgespoten zand tegen te gaan. Bovenop de bestaande HPZ is een stuifscherm aangebracht. Dit was bedoeld om zand tegen te gaan wat eventueel richting kruin van HPZ zou stuiven. Verder is papierpulp aangebracht bovenop het opgebrachte zand. Hiermee werd beoogd het oppikken van zand door de wind tegen te gaan in de periode dat er nog geen vegetatie was om het zand vast te houden of het zand wat van het strand kwam in te vangen.

2.4.2 Aanleg Hondsbossche Duinen in de tijd

De aanleg van de Hondsbossche Duinen is uitgevoerd vanaf begin 2014 tot december 2015. Eerst is het zand opgespoten en in de gewenste vorm gebracht. Gedurende uitvoering is papierpulp op het zandlichaam aangebracht, ter voorkoming van grote stuifhinder en verliezen gedurende uitvoering. Vervolgens is het gebied ingericht met helminplant, overige vegetatie (struweel, binnentalud hoog duin), diverse stuifwerende maatregelen en recreatievoorzieningen. Een overzicht van de aanlegtopografie en maatregelen is gegeven in 'Inventarisatie maatregelen ontwerp HPZ' (Leenders en Smit 2016). Het gebied wordt getoond in afbeelding 2.4.

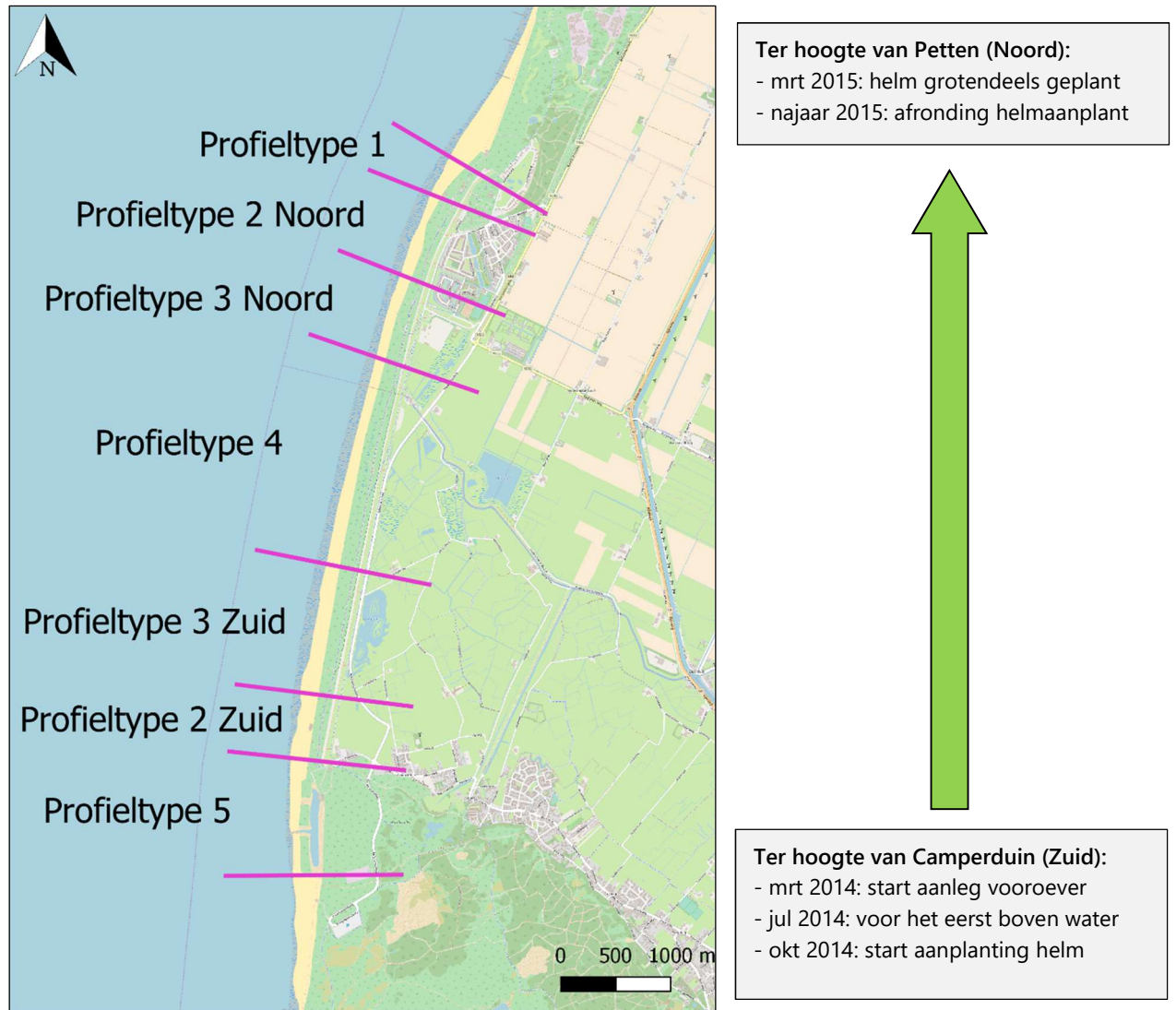
Vanwege de aanzienlijke omvang van het project (circa 8,5 km langs de kust, waarvan 5,5 km langs de dijk van de oude HPZ) is de aanleg van de HD over een periode van 2 jaar uitgevoerd. Het meest zuidelijke deel was eind 2014 al (vrijwel) volledig voltooid en ingeplant, terwijl het meest noordelijke deel pas eind 2015 klaar was. Daardoor heeft het zuidelijke deel zich langer kunnen ontwikkelen dan het noordelijke deel.

Globaal wordt na overleg met de AC¹ uitgegaan van het volgende tijdschema:

- maart 2014 start aanleg van de vooroever;
- juli 2014 voor het eerst boven water bij Camperduin;
- okt 2014 start aanplanting helm in het zuiden, bij Camperduin;
- mrt 2015 laatste helm geplant in noorden (niet volledig);
- najaar 2015 resterend deel helm ingeplant in het noorden;
- vanaf 2016 sporadisch bijplanten van helm in overleg met HHNK.

¹ Persoonlijke communicatie Peter Brandenburg (Van Oord) d.d. 02-03-2018.

Afbeelding 2.4 Overzicht ligging Hondsbossche Duinen



Meer gedetailleerde informatie is niet beschikbaar. Door aan te nemen dat de voltooiing van het gedeelte boven water geleidelijk/lineair is uitgevoerd in de tijd, kan per zone (profieltype) worden ingeschat wanneer het zandlichaam en de helmbepanting is voltooid. Dit is samengevat in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Voltooing aanleg HPZ per zone

Zone	Voltooing zandlichaam	Helm ingeplant	Toelichting
profieltype 1	03/2015	03/2015 (deels)	luchtfoto mei 2015: hoog duin niet ingeplant luchtfoto december 2015: volledig ingeplant
profieltype 2 Noord	02/2015	03/2015 (deels)	luchtfoto mei 2015: hoog duin 60% niet ingeplant luchtfoto december 2015: volledig ingeplant
profieltype 3 Noord	01/2015	03/2015 (deels)	luchtfoto mei 2015: laag duin niet ingeplant luchtfoto december 2015: volledig ingeplant
profieltype 4	12/2014	02/2015	
profieltype 3 Zuid	11/2014	12/2014	
profieltype 2 Zuid	10/2014	11/2014	
profieltype 5	09/2014	10/2014	

Er zit ongeveer een half jaar tussen de voltooiing van het zandlichaam boven water in het zuiden en het noorden. Datzelfde geldt min of meer voor de helmaanplant, waarbij een deel van het helm in het noorden nog eens een half jaar later is aangeplant. Dit leidt tot een aantal belangrijke effecten:

- 1 ontwikkeling en vitaliteit helm: het moment van aanplanten van helm varieert en daarmee (mogelijk) ook hoe goed de helm zich ontwikkelt tot vitale helm, omdat dit bepaald wordt door seizoensinvloeden;
- 2 morfologische ontwikkeling:
 - a) is eerder begonnen en is ten tijde van de eerste hoogtemeting in mei 2015 verder in het zuiden dan in het noorden;
 - b) de invloed van helm op deze ontwikkeling varieert doordat de vitaliteit en aanwezigheid van de helm varieert van zuid naar noord.

Bovenstaande effecten beïnvloeden (mogelijk) het beeld dat wordt verkregen uit de metingen. In het vervolg van het rapport wordt waar relevant besproken wat de rol is van deze effecten met betrekking tot waarnemingen en conclusies.

2.5 Tussentijdse werkzaamheden door AC

2.5.1 Lokale zandverplaatsing na oplevering

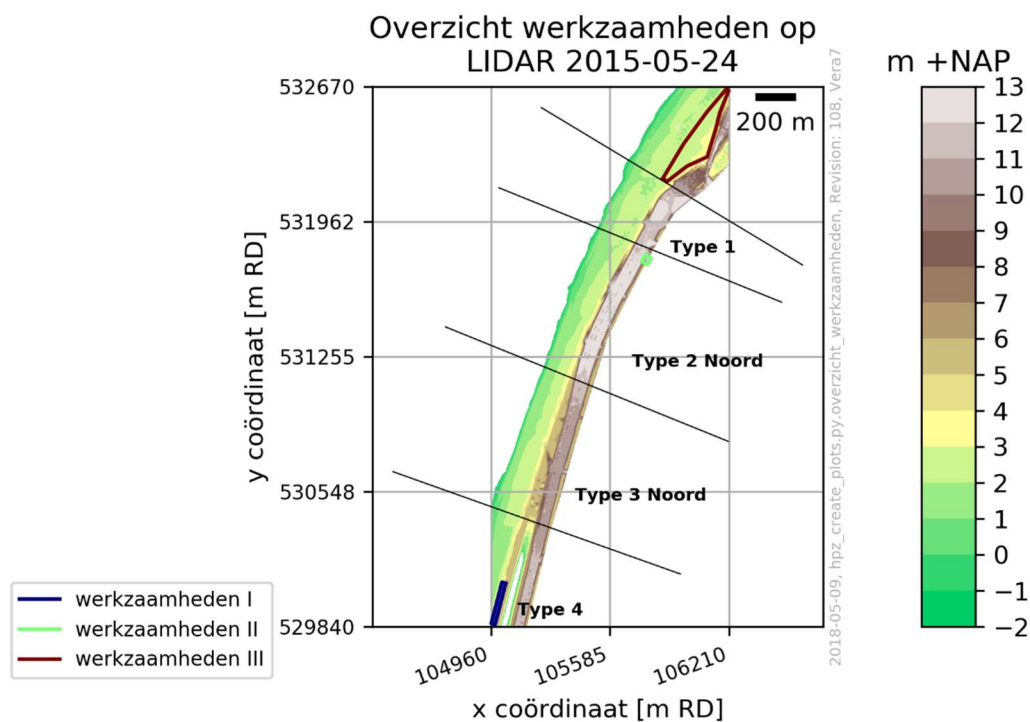
De AC heeft na de 'as-built' meting (24 mei 2015) en voor de tweede (28 december 2015) LiDAR meting op drie locaties werkzaamheden uitgevoerd die zijn vastgelegd. De werkzaamheden bestaan uit zandverplaatsing of -verwijdering binnen een beperkt gebied. Een overzicht van de werkzaamheden is te zien in afbeelding 2.5. De volumeveranderingen en de profieltypes waarin de werkzaamheden gezien worden, zijn getoond in tabel 2.2.

In de periode waarin de werkzaamheden zijn uitgevoerd, worden de betreffende locaties buiten beschouwing gelaten voor de analyses en volumeberekeningen in dit rapport.

De werkzaamheden worden getoond in afbeelding 2.6, afbeelding 2.7 en afbeelding 2.8. Een speels duinlandschap is gecreëerd met werkzaamheden III. Bij de andere twee werkzaamheden wordt er zand weggehaald.

Daarnaast worden er continu kleine werkzaamheden uitgevoerd, zoals het bijplanten van helm, het plaatsen van wilgenschermen en het vrijmaken van strandslagen en het fietspad. Deze zijn buiten beschouwing gelaten voor de analyses in dit rapport.

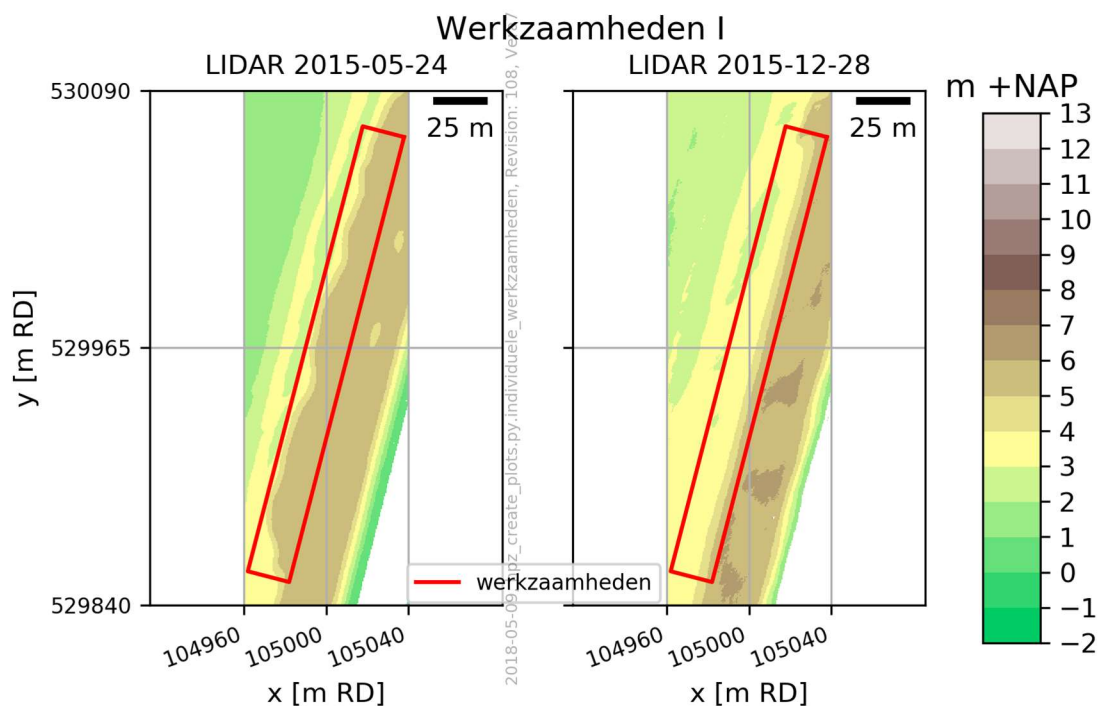
Afbeelding 2.5 Overzicht van de werkzaamheden en profieltypen



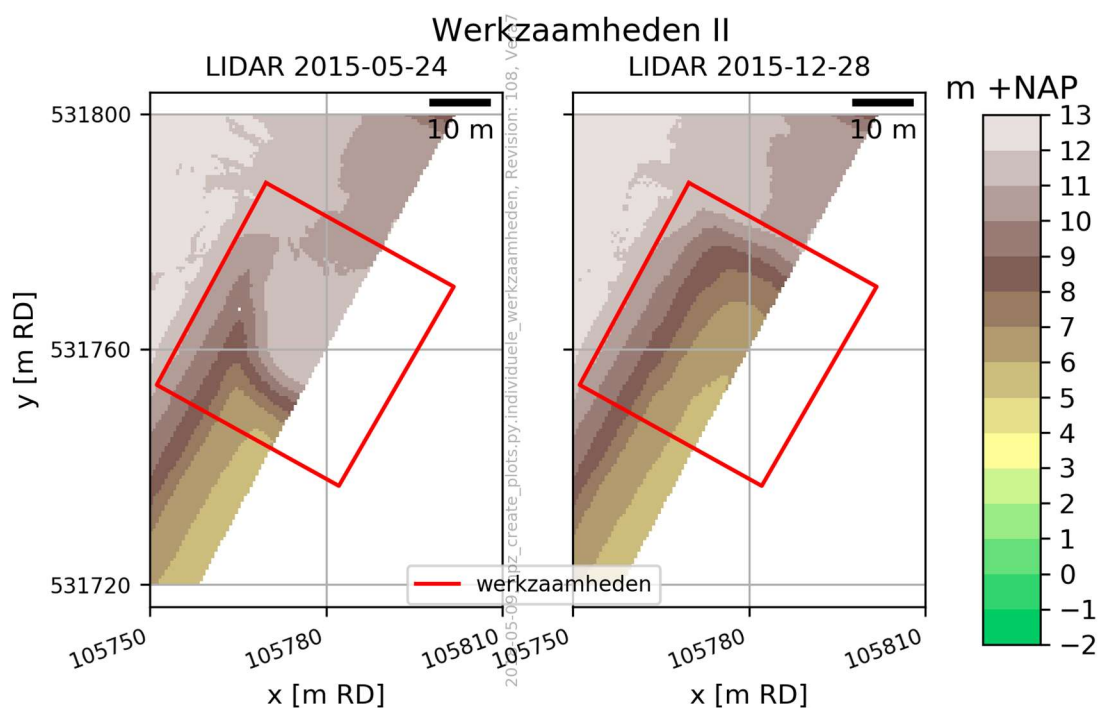
Tabel 2.2 Overzicht van de profieltypen en volumeveranderingen voor de tussentijdse werkzaamheden door AC

Werkzaamheden nummer	Profieltype	Volumeverandering [m³]
I	4	-4.430
II	2 Noord	-1.400
III	buiten studiegebied (noordzijde)	+10.380

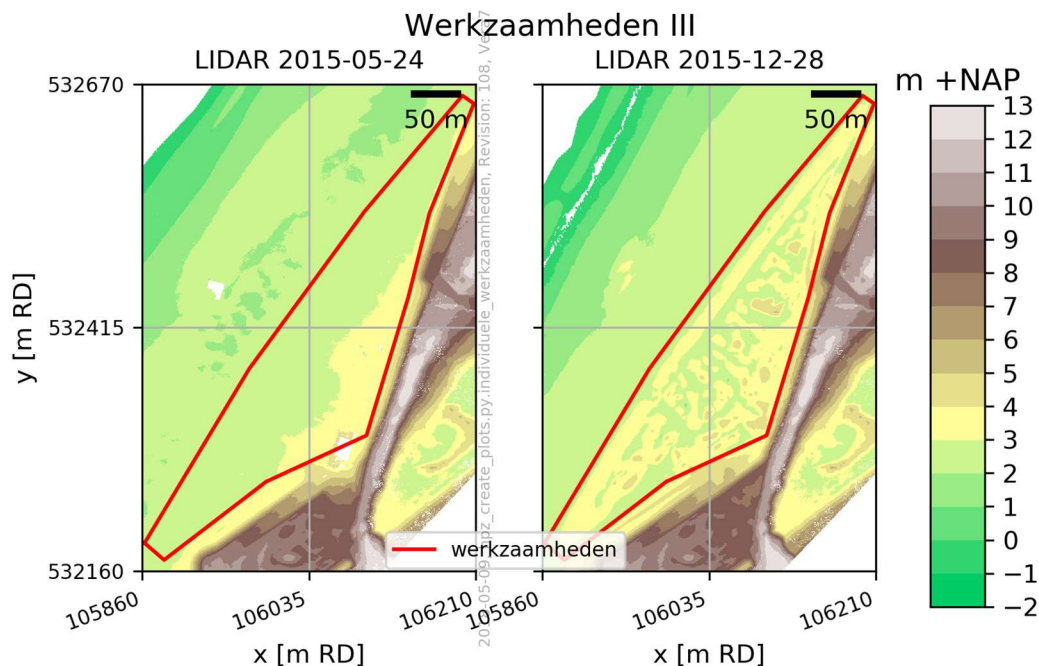
Afbeelding 2.6 Tussentijdse werkzaamheden (I) in profieltype 4: eerste (links) en tweede (rechts) LIDAR metingen



Afbeelding 2.7 Tussentijdse werkzaamheden (II) in profieltype 1: eerste (links) en tweede (rechts) LIDAR metingen



Afbeelding 2.8 Tussentijdse werkzaamheden (III) ten noorden van profieltype 1: eerste (links) en tweede (rechts) LIDAR metingen

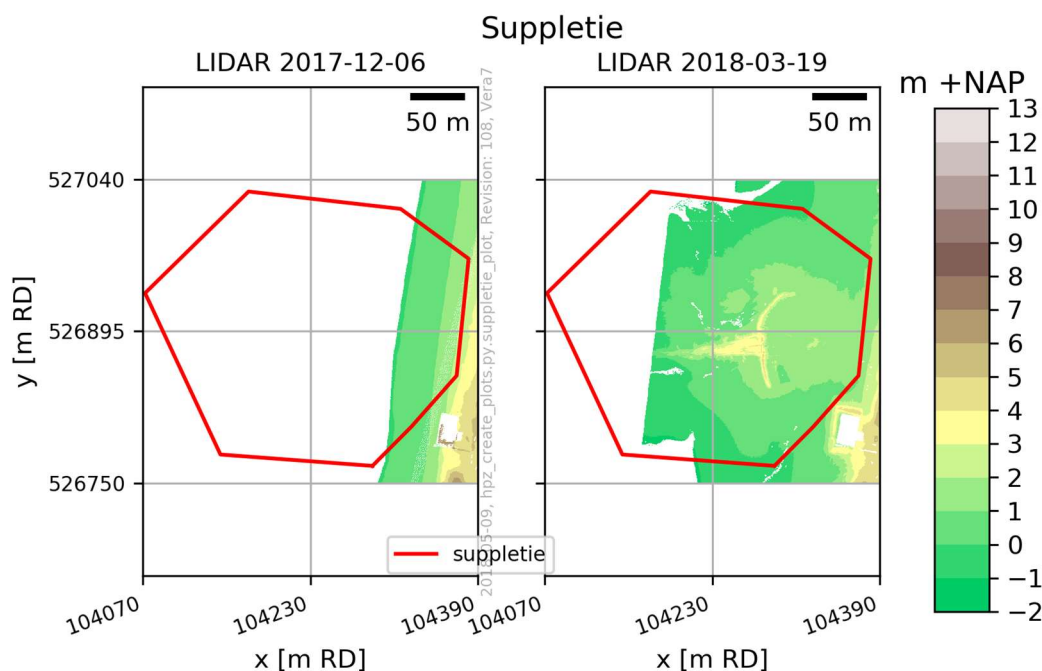


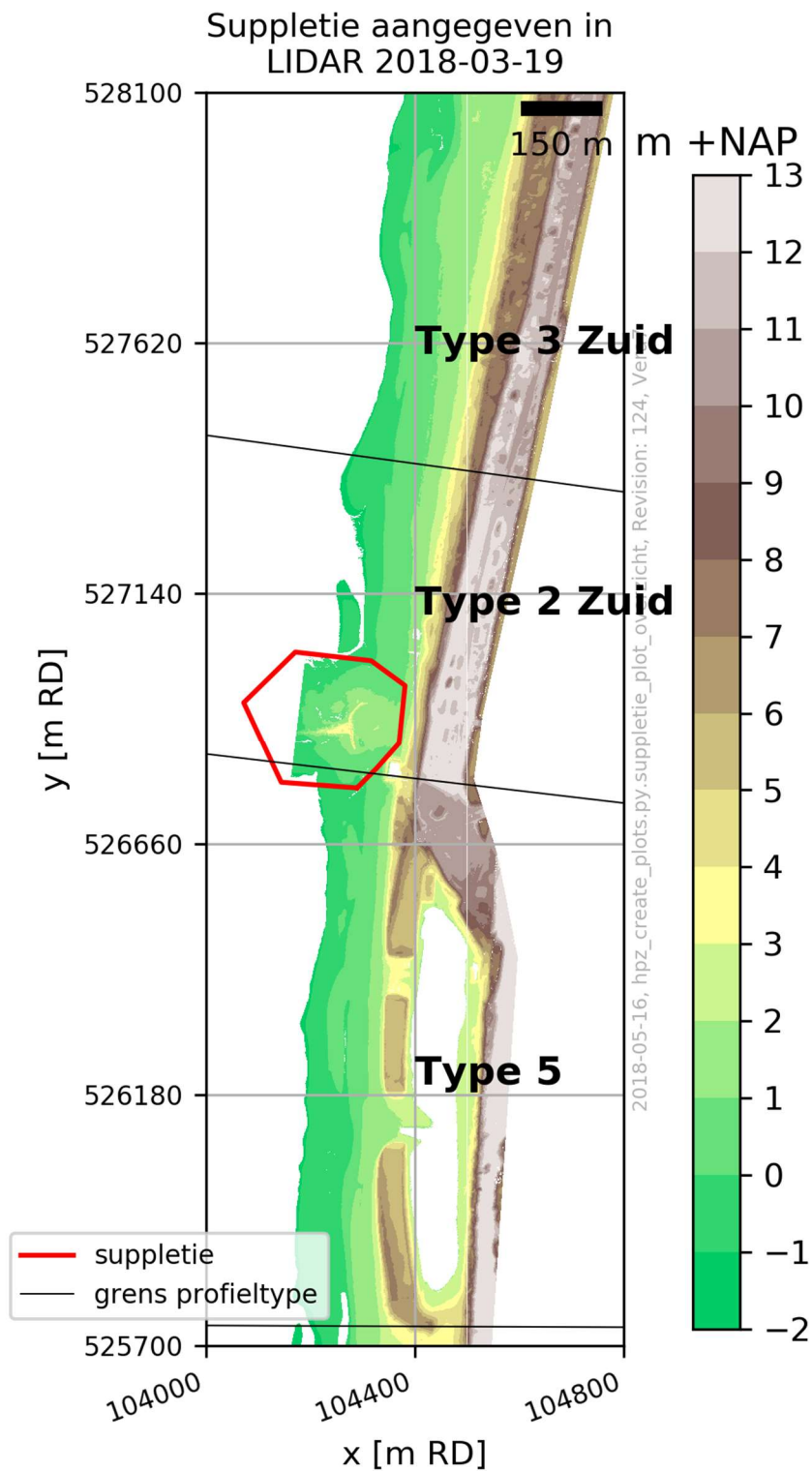
2.5.2 Suppletie maart 2018

De AC is vlak voor de negende LiDAR meting (19 maart 2018) begonnen met een suppletie in profieltype 2 Zuid. De locatie van deze suppletie is weergegeven in afbeelding 2.10. Afbeelding 2.9 laat de achtste en negende LiDAR meting zien voor het gebied rond de suppletie. Hierin is de suppletie duidelijk te herkennen.

Het suppletiegebied wordt buiten beschouwing gelaten in de volumeberekeningen van het strand. De meting is uitgevoerd tijdens de suppletie dus deze heeft naar verwachting de ontwikkelingen in het duingebied nog niet beïnvloed.

Afbeelding 2.9 Achtste en negende LiDAR meting rond het gebied van de suppletie





3

METHODIEK

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de gehanteerde methodiek voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Allereerst wordt de algemene aanpak beschreven en vervolgens worden de belangrijkste aannames, definities en beschikbare data gepresenteerd. Tot slot wordt beschreven welke datasets zijn gemaakt uit de beschikbare data.

3.2 Algemene aanpak

Voor dit project is een monitoringsprogramma opgezet om de onderzoeksvragen op het gebied van geometrie- en habitatontwikkeling te beantwoorden en kennis op te doen die in toekomstige projecten kan worden toegepast.

Voorliggend rapport richt zich op de analyse van alle data die relevant is voor de geometrische ontwikkeling van het studiegebied. Dit zijn LiDAR en GPS hoogtemetingen, luchtfoto's, gegevens van het ontwerp, werkzaamheden en aanpassingen in de tijd, omgevingsfactoren, zoals windmetingen en de halfjaarlijkse veldbezoeken.

Op basis van deze data wordt geanalyseerd hoeveel accumulatie en erosie optreedt en wat de invloed is van de grootschalige en kleinschalige geometrie op de geobserveerde patronen. De hoogtedata uit de LiDAR-metingen staat daarin centraal.

Met deze hoogtemetingen zijn 2 datasets gegenereerd:

- vlakdekkende hoogtedata voor het gehele gebied en alle metingen;
- hoogtedata op ongeveer 12.000 kustdwarse raaien die het volledige meetgebied beslaan.

In het vervolg van dit hoofdstuk worden de definities en aannames voor het genereren van de datasets en de daaropvolgende analyse verder uitgewerkt. De aanpak van verschillende analyses wordt in de relevante paragrafen in de volgende hoofdstukken waar nodig verder toegelicht.

3.3 Hoogtemetingen en luchtfoto's

In het begin van het project zijn verschillende meetmethoden gebruikt. Dit had er onder andere mee te maken dat de monitoring in 2015 nog moest worden opgezet, terwijl het vanwege de snelle ontwikkeling van het gebied nodig was om direct met de hoogtemetingen te beginnen. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de hoogtemetingen die zijn uitgevoerd gedurende de looptijd van dit project.

In mei 2015 is door de Aannemerscombinatie (AC) een zogenaamde 'as-built'-opname van het hele gebied gemaakt door middel van laseraltimetrie (LiDAR) en luchtfoto's, als onderdeel van de oplevering van de aanleg. Het gedeelte van de duinvallei dat onder water ligt, is ingemeten met een bestuurbare boot door middel van single-beam metingen, waarmee een gebiedsdekkend hoogtemodel is gemaakt. Ondanks dat er

later in 2015 nog veranderingen in het terrein zijn aangebracht (verplaatsing van zand, helmbepplanting), wordt de as-built opname als nul-situatie gehanteerd. Deze latere werkzaamheden en hun invloed op de metingen en analyses worden beschreven in paragraaf 3.5.4.

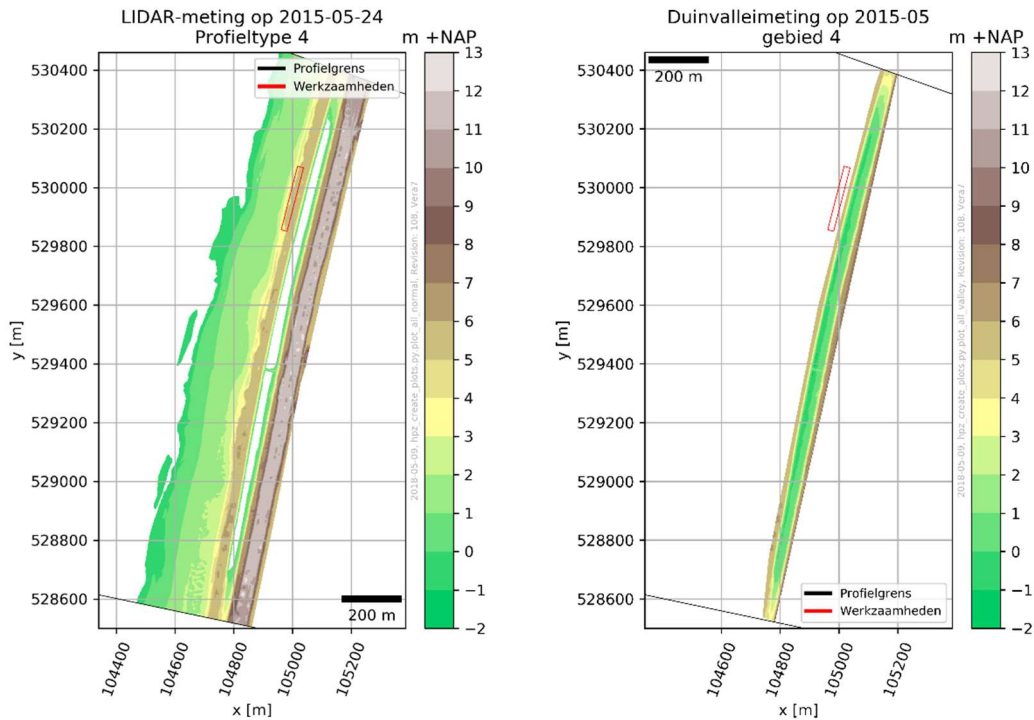
Tabel 3.1 Hoogtemetingen en luchtfoto's HPZ.. Resolutie staat voor horizontale resolutie

Nummer	Datum	Meting	Uitvoerende partij ^a	Gebied	Data	Type	punt dichtheid	resolutie
2015-1	24/05/2015	2015-mei	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2015-2	--/05-2015	2015-mei	AC	gebiedsdekkend in duinvallei	hoogtemeting	single-beam	variabel	0,5 m
2015-3	12/08/2015	2015-aug	WMR	midden van elk Ecoshape transect	RTK	RTK-DGPS	5 m (lijn)	< 0.02 m verticaal
2015-4	09/09/2015	2015-sep	Shore Monitoring i.o.v. Ecoshape	5 Ecoshape transecten	foto, hoogtemeting	fotogrammetrie	-	foto: 0,01 m; hoogtemodel: 0,1 m
2015-5	28/12/2015	2015-dec	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2016-1	16/2 + 13/3/2016	2016-feb	RWS	gebiedsdekkend	hoogtemeting	laseraltimetrie	>1 pts/m ²	2 m
2016-2	21/03/2016	2016-mrt	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2016-3	01/09/2016	2016-sep	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2016-4	06/10/2016	2016-okt	HHNK	dwarsprofielen duinvallei	RTK	RTK-DGPS	5 m (lijn)	< 0.02 m (verticaal)
2016-5	05/12/2016	2016-dec	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2017-1	11/03/2017	2017-mrt	RWS	gebiedsdekkend	hoogtemeting	laseraltimetrie	>1 pts/m ²	2 m
2017-2	19/04/2017	2017-apr	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2017-3	11/08/2017	2017-aug	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2017-4	--/09/2017	2017-sep	HHNK	dwarsprofielen duinvallei	RTK	RTK-DGPS	5 m (lijn)	< 0.02 m (verticaal)
2017-5	06/12/2017	2017-dec	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m
2018-1	19/03/2018	2018-mrt	AC	gebiedsdekkend	foto, hoogtemeting	laseraltimetrie	>8,2 pts/m ²	foto: 0,05 m; hoogtemodel: 0,5 m

^{a)} AC = aannemerscombinatie, HHNK = Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, RWS = Rijkswaterstaat, WMR = Wageningen Marine Research (voormalig IMARES).

Hoofdzakelijk zijn de LiDAR metingen gebruikt in de analyse in dit rapport. Een voorbeeld van de eerste LiDAR meting voor het gebied met de duinvallei is gegeven in afbeelding 3.1. Op de witte plekken is geen data. Het is te zien dat in de duinvallei geen data beschikbaar is. Dit komt doordat met LiDAR niet onder water gemeten wordt. Daarom zijn de separaat uitgevoerde metingen in de duinvallei gebruikt als aanvulling (toelichting in paragraaf 3.5.2). De eerste, gebiedsdekkende duinvallei meting is ook getoond in afbeelding 3.1.

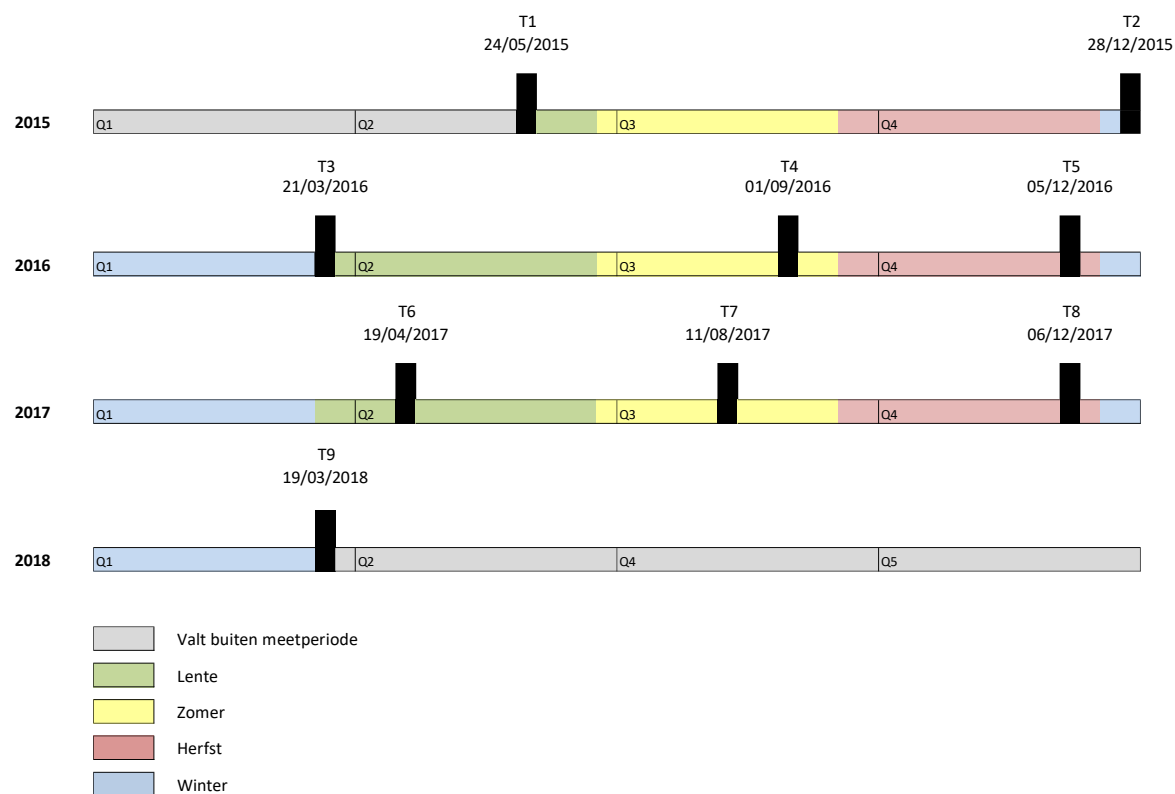
Afbeelding 3.1 Links: eerste LiDAR meting die hoort bij 'as-built' meting van de AC. Rechts: gebiedsdekkende duinvallei meting horend bij de 'as-built' meting van de AC. Zwart: gebiedsbegrenzing, Rood: tussentijdse werkzaamheden



Afbeelding 3.2 geeft een overzicht van de meetmomenten van de LiDAR en de periode tussen deze meetmomenten, met de 4 seizoenen van het jaar. In tabel 3.2 zijn de meetseizoenen voor de meetperiodes samengevat. De totale meetperiode bedraagt circa 3 jaar. We merken op dat bij het ontwerp rekening is gehouden met een verhoogde zandaccumulatie in de duinen gedurende de eerste 3 jaar na aanleg van de HD. Bij het ontwerp is voor de eerste 3 jaar een aanvoer van zand naar de duinen van jaarlijks gemiddeld 30 m³/m verwacht en voor de daaropvolgende jaren jaarlijks 10 m³/m. Het volume van 10 m³/m is gebaseerd op Jarkusraaimetingen bij Castricum. Van der Wal [2003] en ervaringen bij de Maasvlakte 2 en Vlugtenburg hebben laten zien dat in de eerste 3 jaren na aanleg er doorgaans meer eolisch transport is [Ontwerpnota eolische verliezen, 2013].

Voor de winterperiode is als afzonderlijk seizoen bemeaten. Er zijn 3 meetperiodes beschikbaar van de winterperiode (T2T3, T5T6, T8T9).

Afbeelding 3.2 Meetmomenten gedurende de looptijd van dit project



Tabel 3.2 Meetseizoenen per meetperiode.

Meetperiode	Meetseizoen
T1T2	zomer / herfst 2015
T2T3	winter 2016
T3T4	lente en zomer 2016
T4T5	herfst 2016
T5T6	winter 2017
T6T7	lente en deel zomer 2017
T7T8	deel zomer 2017 en herfst 2017
T8T9	winter 2018

3.4 Expertsessies en veldbezoeken

Om de hoogtemetingen goed te kunnen interpreteren is het noodzakelijk om ook in het veld de ontwikkeling van het gebied te volgen. Daarmee kunnen veranderingen die in de metingen worden vastgesteld, beter worden gerelateerd aan omstandigheden en processen in het veld en vice versa. Ook voor het volgen van de vegetatie-/habitatontwikkeling van het gebied zijn de veldbezoeken essentieel.

Twee keer per jaar (einde zomer en vlak voor de winter) wordt daarom een veldbezoek georganiseerd waarbij de ontwikkeling van het gebied in ogenschouw wordt genomen en besproken. Veldbezoeken hebben plaatsgevonden op:

- 1 juli 2015;
- 9 december 2015;
- 8 augustus 2016;
- 14 december 2016;
- 12 juli 2017;
- 20 december 2017;
- 4 juni 2018.

Aanwezig zijn experts van alle themalijnen, een vertegenwoordiger van HHNK en een externe duinexpert (Bas Arens). Daarnaast worden soms nog andere betrokkenen uitgenodigd, bijvoorbeeld van de AC. Elke keer worden zoveel mogelijk dezelfde locaties in het gebied bezocht. Van elk veldbezoek wordt een verslag gemaakt dat als afzonderlijk product wordt opgeleverd (dat wil zeggen: niet als onderdeel van deze rapportage)¹. Daarin worden ook de foto's getoond die tijdens de sessies (en eventueel andere veldbezoeken) worden gemaakt om de ontwikkeling van de HPZ in tijd en ruimte vast te leggen.²

Afbeelding 3.3 Halfjaarlijks veldbezoek (20/12/2017, foto: Bert van der Valk)



3.5 Voorbereiding data-analyse

De verschillende datasets zijn samengevoegd in 2 grote data bestanden in NetCDF format. De eerste dataset bevat gebiedsdekkende informatie voor het gehele gebied en alle meetmomenten, de tweede dataset bevat informatie op raai niveau zoals de hoogteligging per kustdwarse raai op alle meetmomenten.

In deze paragraaf wordt de totstandkoming van deze datasets nader toegelicht.

¹ De verslagen van alle veldbezoeken zijn te vinden op de data repository van dit project:
https://repos.deltares.nl/repos/hpz/trunk/docs/reports/field_reports

² Het gebruik van een webcam of timelapse-camera is onderzocht maar bleek niet kosteneffectief te zijn. In overleg is besloten om van de inzet van deze techniek af te zien.

3.5.1 Interpolatie

De gebiedsdekkende LiDAR en duinvallei data zijn op hetzelfde grid gezet om de data-analyse te faciliteren. Dit maakt het combineren van de verschillende data mogelijk. Het grid beslaat de hele Hondsbossche Duinen en heeft een horizontale resolutie van 0,5 m.

Op een aantal roosterpunten verspreid over het gebied komen ontbrekende waarden (NoData) voor in de aangeleverde dataset. De gebiedsdekkende LIDAR metingen zijn lineair geïnterpoleerd om deze waarden op te vullen.

Deze interpolatie is uitgevoerd voor punten boven NAP +0,84 m (gemiddeld hoogwater). Hierdoor zijn er globaal 2 zones te onderscheiden die worden beschouwd: het strand (NAP +0,84-3,0 m) en het duin (> NAP +3,0 m).

De duinvallei in profieltype 4 en de lagune in profieltype 5 vallen binnen het gebied dat is gedefinieerd als duin, ondanks dat ze deels onder de NAP +3,0 m liggen. Doordat een groot deel van deze gebieden onder water ligt, is daar geen data beschikbaar vanuit de LiDAR metingen. Het gebied van de lagune in profieltype 5 levert daardoor geen betrouwbare hoogtedata in het duingebied en valt buiten de scope van dit project. Daarom wordt het duingebied daar volledig buiten beschouwing gelaten in alle analyses en afbeeldingen. Gegevens van het strand worden wel getoond in overzichtsfiguren die het gehele meetgebied beslaan.

3.5.2 Natte duinvallei

Door de interpolatie is het verkregen hoogtemodel van de natte duinvallei niet juist. Het natte gedeelte wordt daarom in eerste instantie weggelaten uit het hoogtemodel op basis van de LiDAR. In werkelijkheid vindt daar wel accumulatie plaats, waardoor een onderschatting ontstaat in de accumulatievolumes in profieltype 4.

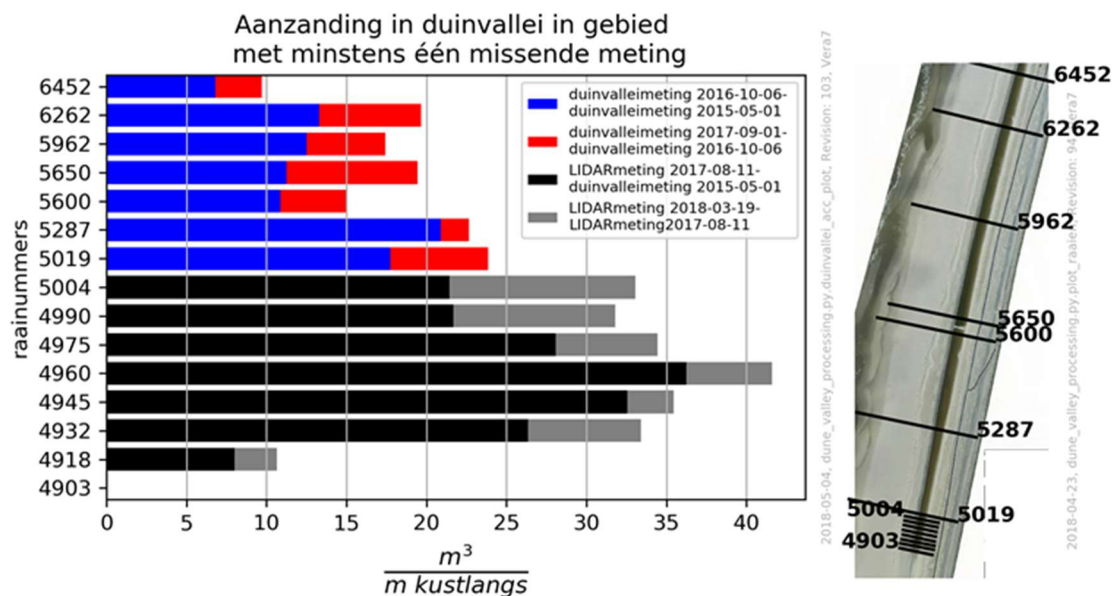
De onderschatting in de natte duinvallei is bepaald op basis van verscheidene raaien waarvoor wel metingen onder water beschikbaar zijn, (afbeelding 3.4 links: data en rechts: de locaties). Naast de as-built meting van het onderwatergedeelte, is een aantal raaien in de duinvallei 2 keer gemeten met GPS. Dit geeft 2 perioden waarover volumeveranderingen op deze raaien bepaald kunnen worden, die ongeveer overeenkomen met de eerste 2 jaren na de eerste meting.

De 7e LiDAR meting valt ongeveer samen met de laatste GPS meting. In deze en de negende LiDAR meting is ook het zuidelijkste stuk van de duinvallei gemeten, omdat dit ten tijde van de meting droog was. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om in detail het meest zuidelijke stuk van de duinvallei te bekijken en een grotere periode te analyseren. In dit meest zuidelijke gedeelte zijn ook raaien gedefinieerd en daarop de volume veranderingen bepaald. Deze raaien zijn ook aangegeven in afbeelding 3.4.

Het accumulatievolume in de natte duinvallei is gemiddeld ongeveer 30 m³/m kustlangs (afbeelding 3.4). De accumulatie is het grootst in het begin, tussen meting 1 en 2 in de duinvallei. Het volume toe neemt richting het zuiden tot raai nummer 4960. Daarna neemt de breedte van het natte gebied af. Hierdoor neemt ook het accumulatievolume af. Hetzelfde geldt in het noorden voor raainummer 6452.

Op basis van deze analyses wordt in het vervolg rekening gehouden met ongeveer 30 m³/m accumulatie in de duinvallei tussen raainummers 4932 en 6452.

Afbeelding 3.4 Accumulatie in de duinvallei in gebied met minstens 1 missende meting



3.5.3 Zettingen

Een andere onderschatting van de getransporteerde sedimentvolumes ontstaat door de zetting van het hele gebied na aanleg. Een inschatting van deze zetting is gemaakt door de zakking van het fietspad te bepalen. Het fietspad is gemiddeld over de hele Hondsbossche Duinen 0,09 m gezakt. De gemiddelde hoogte van het fietspad is ongeveer NAP + 11,3 m.

Als wordt uitgegaan van een gelijkmatige zetting van 0,09 m over het hoge duin, een gebied van ongeveer 6000 m in kustlangse richting en 100 m in kustdwarse richting, geeft dit een volume van 54.000 m³. Dit is ongeveer 10 % van het totale accumulatievolume in dit gebied (zie verderop in dit rapport).

Omdat het een grove schatting betreft en de geobserveerde trends niet wezenlijk veranderen, is ervoor gekozen de zettingen buiten beschouwing te laten in dit rapport.

Naast de zetting van het gehele zandlichaam, vindt er ook zetting plaats in het eolisch geaccumuleerde zand. Vers geaccumuleerd zand is losser gepakt. Dit werd bijvoorbeeld tijdens de expertsessies waargenomen doordat men wegzakte in dit zand. Naar verloop van tijd wordt de pakking langzaam dichter onder invloed van omgevingsfactoren, waarbij het volume iets afneemt. Dergelijke effecten hebben nauwelijks effect op de berekende volumes en worden daarom ook buiten beschouwing gelaten.

3.5.4 Tussentijdse werkzaamheden en overige objecten

De locatie van de tussentijdse werkzaamheden, de suppletie in het zuiden en strandbebouwing is in kaart gebracht. Bij bepaling van de aanzanding tussen de 1e en 2e LiDAR meting worden de gebieden met tussentijdse werkzaamheden weggelaten. Ter plaatse van de suppletie geldt dit voor de 8e en 9e LiDAR meting. Locaties met strandbebouwing (bijvoorbeeld strandpaviljoens) worden weggelaten in de analyse voor alle tijdstappen.

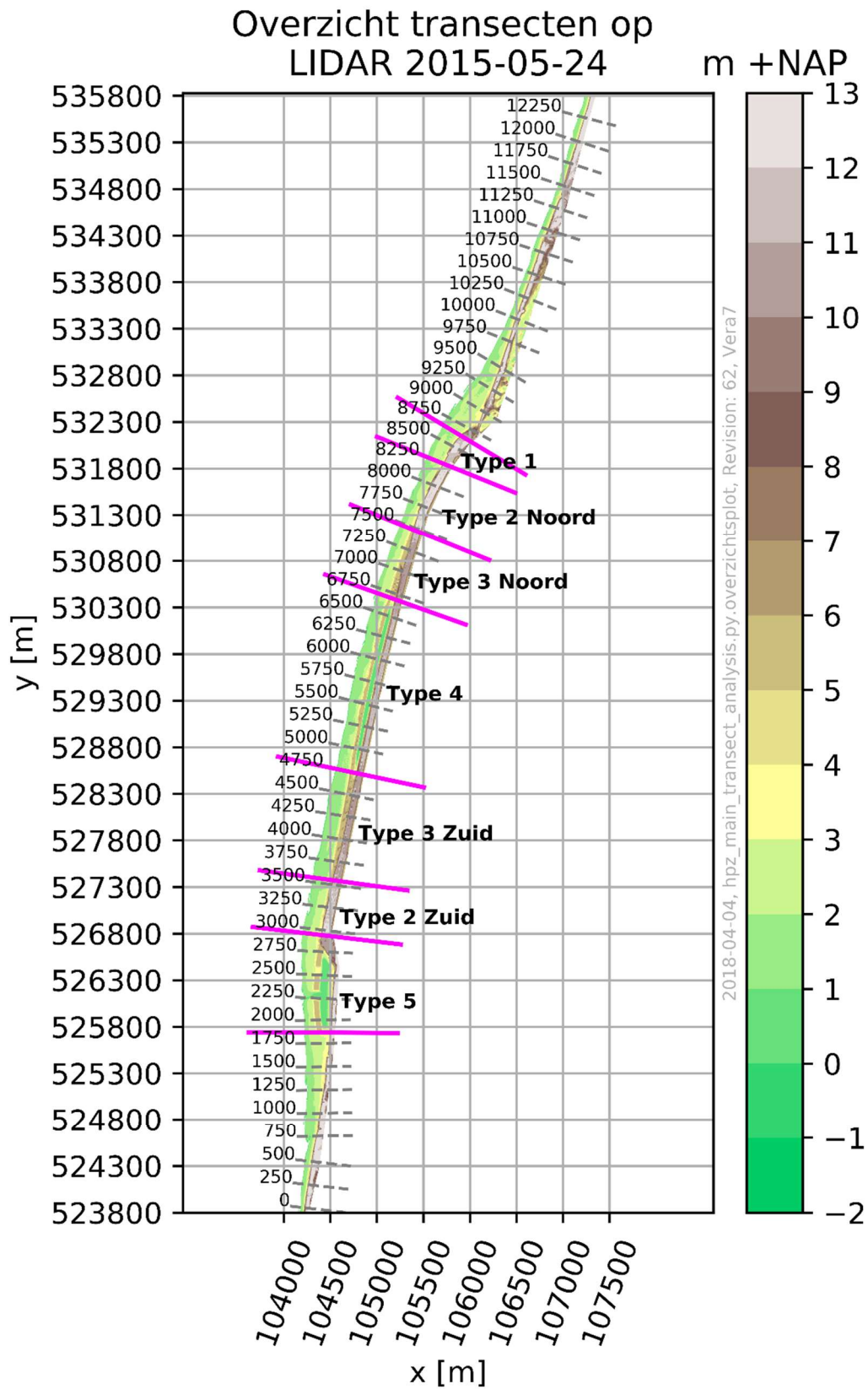
3.5.5 Definitie raaien

De bovengenoemde gegevens zijn op raaien in de kustdwarsrichting geprojecteerd voor de analyse op raainiveau. Deze raaien zijn zo haaks mogelijk op de 3 m NAP lijn gedefinieerd met zo min mogelijk overlap en liggen in kustlangs richting 1 m uit elkaar. De punten op de raaien zijn in kustdwarsrichting een halve meter uit elkaar geplaatst. De raaien zijn gegeven in afbeelding 3.5. De projectie is uitgevoerd door middel van een eerste orde spline interpolatie in 2D.

Er zijn raaien gedefinieerd in het hele meetgebied wat neerkomt op 12.000 raaien. Het studiegebied van profieltype 2Z tot en met profieltype 1 loopt van raai 2945 tot raai 8640 en bevat bijna 6.000 raaien.

Tabel 3.3 Raaien per profieltype

Profieltype	Van raai	Tot raai
2Z	2945	3547
3Z	3548	4743
4	4744	6690
3N	6691	7473
2N	7474	8253
1	8254	8640



4

TOTALE ACCUMULATIE ALS GEVOLG VAN EOLISCH TRANSPORT

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het windklimaat en de totale accumulatie en erosie in het duingebied en op het strand als gevolg van eolisch transport gedurende de meetperiode beschreven. Ook wordt beschreven hoe het zand zich verdeelt over het gebied. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in de kustdwarse en de kustlangse richting.

Dit hoofdstuk beschrijft trends en observaties en geeft daarmee een systeembeschrijving van het onderzoeksgebied. In de navolgende hoofdstukken worden de gevonden observaties en trends verder geanalyseerd en voor zover mogelijk verklaard.

4.2 Windklimaat

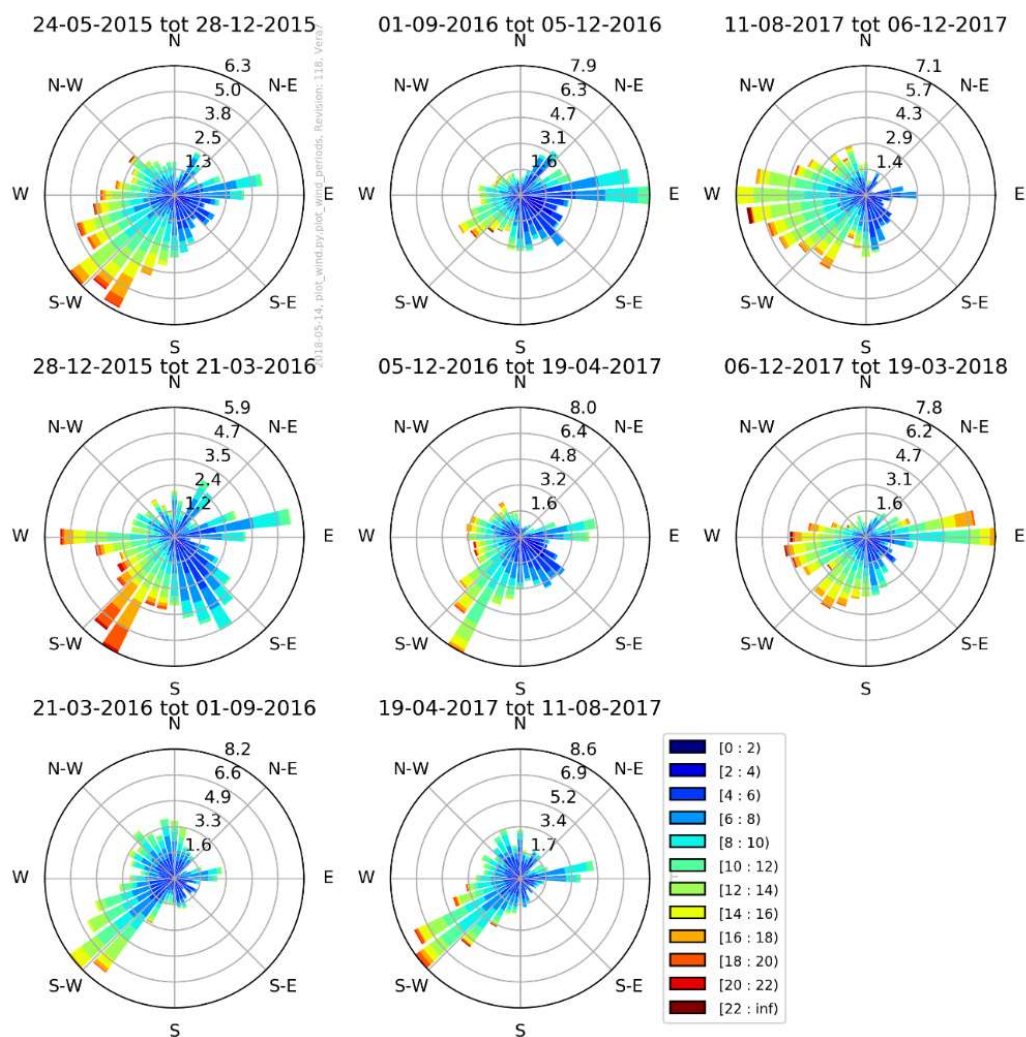
4.2.1 Globaal

Wind is de drijvend kracht achter het transport over de droge delen van het strand en de duinen. Voor inzicht in het globale windklimaat worden de metingen van het KNMI bij IJmuiden gebruikt. De windrozen per meetperiode laten zien dat wind uit de zuidwestelijke hoek veruit het meest voorkomt en dat daarin ook de hoogste windsnelheden optreden (afbeelding 4.1). De gemiddelde overheersende windrichting is ongeveer pal zuidwestelijk (225 graden).

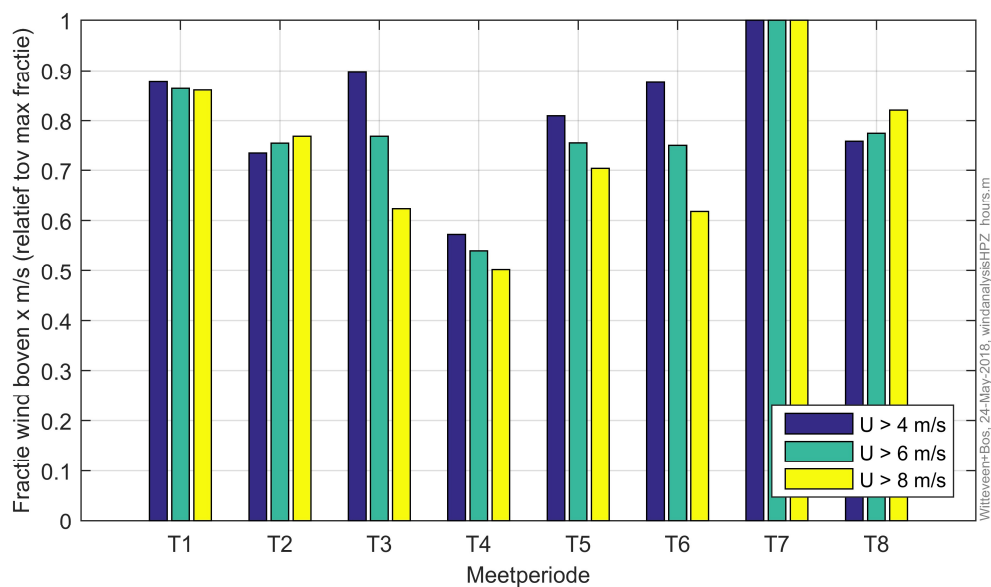
In het globale windklimaat is een seizoenseffect te zien met relatief mildere windcondities in de zomerperiode (afbeelding 4.1): T3 (21 mrt 2016-1 sep 2016), T4 (1 sep 2016-5 dec 2016) en T6 (19 apr 2017-11 aug 2017). Dit effect is ook duidelijk door de wind in de verschillende perioden onderling te vergelijken (afbeelding 4.2). Met name de windsnelheden boven 8 m/s komen het minst voor in bovengenoemde periodes in vergelijking met de rest van de tijd. 8 m/s wordt in literatuur genoemd als een drempelwaarde voor eolisch transport van zand voor het strand bij Egmond (Hage et al., 2018). Het accumulatievolume is het kleinst in deze drie periodes, zoals blijkt uit afbeelding 4.6 verderop in dit hoofdstuk.

Afbeelding 4.1 Windrozen per meetperiode tussen T1 (05-2015) en T9 (03-2018), op basis van gegevens van IJmuiden

Windroos per periode tussen twee LiDAR metingen. Windsnelheden vanaf 0 m/s



Afbeelding 4.2 Relatieve wind per periode ten opzichte van maximum (T7)



4.2.2 Lokaal

De geometrie van de duinen kan het lokale windpatroon op het strand en bij de duinvoet beïnvloeden door:

- 1 **afname** van de windsnelheid over het strand richting het duin;
- 2 **afbuiging** van de wind in kustlangse richting ter hoogte van de duinvoet bij schuin invallende wind.

De afbuiging van de wind hangt vooral af van de initiële hoek van inval van de wind en kan lokaal tot 21 graden oplopen, met als gevolg dat een deel van het aangevoerde zand in kustlangse richting wordt getransporteerd in plaats van het duin in. De combinatie van afname en afbuiging van de wind kan een vermindering geven van 52 % van de potentiële transportcapaciteit het duin in (Donker et al., 2018).

Gezien de oriëntatie van de duinvoet van de Hondsbossche Duinen (zie ook afbeelding 5.10) kan de lokale afbuiging van de wind variëren langs het gebied, en daarmee de potentiële transportcapaciteit de duinen in. De lokale windeffecten zoals afbuiging voor de HD zijn berekend door middel van een ruimtelijk windstromingsmodel (CFD) van de Universiteit Utrecht¹ voor een aantal dwarsprofielen. Voor nadere uitleg over deze methode wordt verwezen naar Donker et al. (2018).

De resultaten zijn voor één raai weergegeven in afbeelding 4.3. In de figuren zijn grofweg 3 zones te onderscheiden:

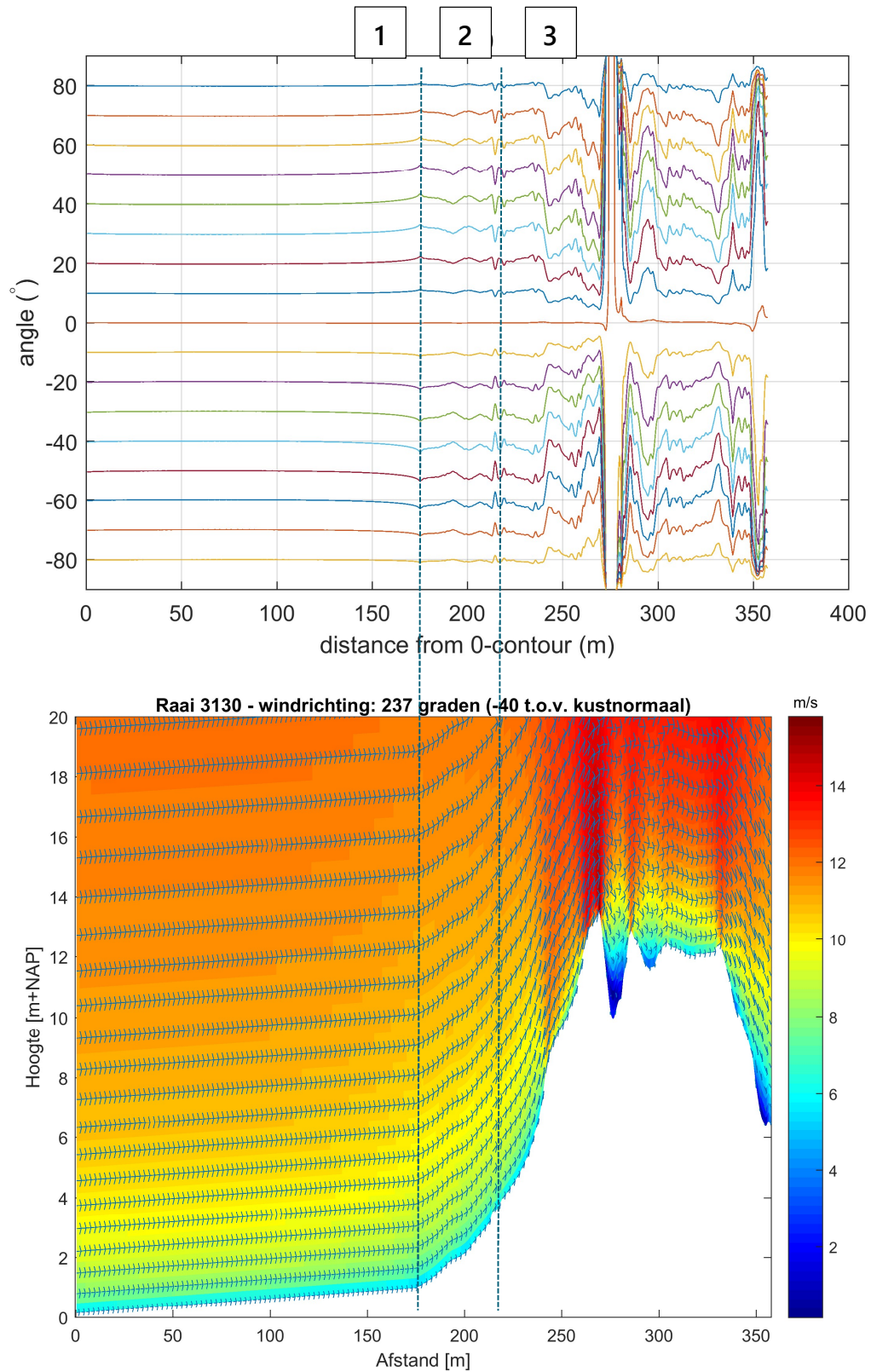
- 1 strand tot duinvoet - de windrichting blijft gelijk, de windsnelheid neemt iets af richting het duin;
- 2 duinvoet - de windrichting draait enkele graden bij in kustlangse richting, maar dit is zeer beperkt;
- 3 duintalud en kruin - de wind draait sterk bij, zodat deze meer loodrecht invalt op het duin (dichter bij 0 graden). Boven het duin is veel turbulentie, zodat de windrichting sterk varieert. De windsnelheid neemt toe rond de zeewaartse kruin en vervolgens sterk af boven de luwe laagte.

Het blijkt dat de bijdraaiing van de wind voor deze raai en voor de andere gemodelleerde raaien beperkt is tot maximaal enkele graden. Lokale bijdraaiing van wind lijkt daarom geen grote rol te spelen voor de HD. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat de profielen relatief laag en de taluds relatief flauw zijn.

Op basis van de lokale wind is de transportcapaciteit aan de duinvoet langs het gebied van de HD bepaald. Dit wordt beschreven in paragraaf 5.4.2.

¹ Werk van dr. Jasper Donker (Universiteit Utrecht) met behulp van een Open Foam CFD model.

Afbeelding 4.3 Resultaten CFD modellering lokale wind voor raai 3130 (P2Z) - Boven: afbuiging van wind voor verschillende hoeken van inval ten opzichte van kustnormaal; Onder: dwarsprofiel raai 3130 en windpatroon over dwarsprofiel voor wind uit 237 graden (40 graden ten opzichte van normaal)



4.3 Totaalvolume

4.3.1 Totale volumeverandering duin en strand

De totale volumeverandering in het duin en strand is bepaald op basis van de geïnterpoleerde, vlakdekkende LiDAR metingen. De correctie voor de duinvalei is verwerkt in de volumes. De volumeverandering is bepaald voor profieltype 2 Zuid tot en met profieltype 1. Dit gebied heeft een lengte in kustlangs richting van ongeveer 5600 meter. Dit betekent dat profieltype 5 uitgesloten is van deze analyse.

In deze paragraaf wordt eerst de totale volumeverandering voor de gehele monitoringsperiode besproken. Daarna wordt deze op een aantal aspecten in meer detail toegelicht, waarbij trends worden verklaard en de ontwikkeling in de tijd en de verdeling binnen het studiegebied worden beschouwd. Er wordt afgesloten met een vergelijking met de voorspellingen vanuit de ontwerpfase ([ref. 1]).

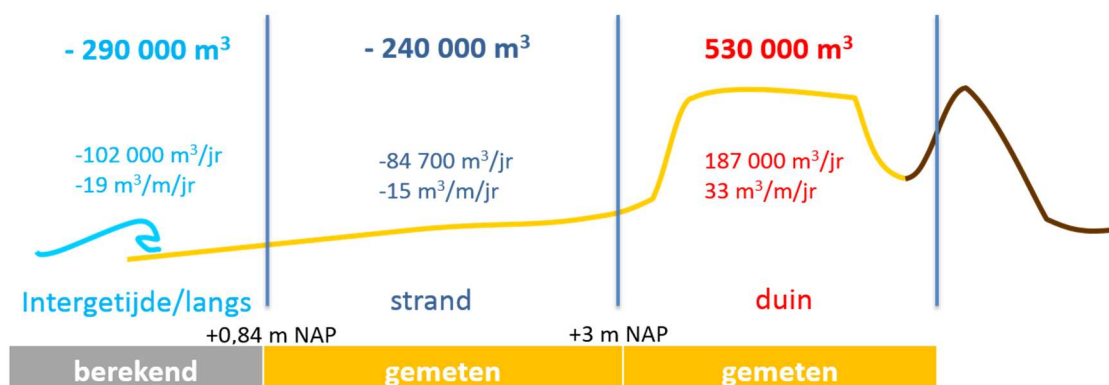
Het volume in het duin neemt toe met ongeveer 530.000 m³, of 33 m³/m/jaar, terwijl het volume op het strand afneemt met 240.000 m³ (15 m³/m/jaar) in de 34 maanden waarin de Hondsbossche Duinen gemonitord zijn, zie tabel 4.1 en afbeelding 4.4. In dit volume is de accumulatie in de duinvalei in het gedeelte onder water buiten beschouwing gelaten (ongeveer 45.000 m³).

De netto volumeafname op het strand bedraagt ongeveer 45 procent van de volumetoename in het duin. Dit betekent dat ongeveer 55 procent van de volumetoename in het duin van elders moeten komen. Als wordt aangenomen dat het transport de Hondsbossche Duinen in en uit in kustlangs richting gelijk is voor zowel de duinen als het strand, betekent dit dat de rest van het zand uit het intergetijdengebied moet komen, ongeveer 290.000 m³ (19 m³/m/jaar).

Tabel 4.1 Totale volumeverandering in het duin en op het strand in profieltype 2 Zuid tot en met profieltype 1

Gebied	Totale volumeverandering [m ³]	Totale volumeverandering per meter [m ³ /m]	Gemiddelde totale volumeverandering per meter per jaar [m ³ /m/j]
duin	+530.000	94	33
strand	-240.000	-43	-15

Afbeelding 4.4 Totale volumeverandering in een schematische weergave in dwarsdoorsnede van de Hondsbossche duinen



De totale monitoringsperiode kan opgesplitst worden in meerdere intervallen tussen de LiDAR metingen. Dit geeft de volumeveranderingen in tabel 4.2. De volumeverandering in het duin en op het strand is vanuit het grootst tijdens de eerste periode. Daarna neemt de accumulatie in het duin abrupt af, om vervolgens redelijk constant te blijven rond de 40.000 - 70.000 m³ per meting.

De volumeverandering op het strand varieert sterker en er is geen direct verband zichtbaar tussen volumeveranderingen op het strand en in het duin. Zo is te zien dat er zand bij komt op het strand in de zomerperiode in 2016 en 2017, terwijl er ook een volumetoename in het duin is.

Verder is te zien dat bij vrijwel alle meetintervallen zand vanuit het intergetijdengebied moet komen om de balans te sluiten, als wordt aangenomen dat de aanvoer in langsrichting beperkt is.

Tabel 4.2 Totale volumeveranderingen in het duin en op het strand in profieltype 2 Zuid tot en met profieltype 1 voor ieder meetinterval

Periode	Seizoen	Totale volumeverandering in het DUIN [m ³]	Totale volumeverandering op het STRAND [m ³]	Volume dat uit het intergetijdengebied moet komen om de balans te sluiten [m ³]
24-05-2015 t/m 28-12-2015	zomer	+160.000	-110.000	-50.000
28-12-2015 t/m 21-03-2016	winter	+48.000	-14.000	-34.000
21-03-2016 t/m 01-09-2016	zomer	+45.000	+29.000	-74.000
01-09-2016 t/m 05-12-2016	winter	+47.000	-6.000	-41.000
05-12-2016 t/m 19-04-2017	winter	+73.000	-67.000	-6.000
19-04-2017 t/m 11-08-2017	zomer	+34.000	+7.000	-41.000
11-08-2017 t/m 06-12-2017	winter	+61.000	-60.000	-1000
06-12-2017 t/m 19-03-2018	winter	+65.000	-21.000	-44.000

4.3.2 Vergelijking met voorspellingen ontwerpfase

Gemiddeld over de monitoringsperiode komt de gemeten aanzanding in het gebied van profieltype 2 Zuid tot en met 1 vrij goed overeen met de geschatte waarden in de ontwerpfase ([ref. 1]). Bij het ontwerp van de Hondsbossche Duinen was op basis van literatuur en vergelijkbare projecten voorspeld dat in de 1e 3 jaar gemiddeld 30 m³/m/jaar aan aanzanding gezien zou worden, waar tot nu toe 33 m³/m/jaar wordt gemeten.

Tabel 4.3 laat zien dat het eerste jaar meer aanzanding gemeten is dan voorspeld. In het tweede jaar is dit juist wat minder en in het derde jaar weer wat meer. De verschillen zijn in elk geval deels te verklaren vanuit het feit dat de voorspellingen zijn gebaseerd op langjarig, gemiddeld gedrag, terwijl de gemeten periode te kort is om uitschieters en lokale variaties uit te middelen.

Tabel 4.3 Vergelijking per jaar van gemeten aanzanding per meter in kustlangs richting per jaar met de voorspelde aanzanding

	Exacte periode	Gemeten aanzanding [m ³ /m/j]	Voorspelde aanzanding [m ³ /m/j]
jaar 1	24-05-2015 t/m 21-03-2016	44	35
jaar 2	21-03-2016 t/m 19-04-2017	27	30
jaar 3	19-04-2017 t/m 19-03-2018	31	25

4.4 Verdeling kustlangs

De kustlangs variatie van de volumeveranderingen op het strand en in het duin wordt beschouwd in deze paragraaf. De veranderingen zijn bepaald op basis van de LiDAR metingen die geprojecteerd zijn op raaien, zie ook paragraaf 3.5. Het gemiddelde per 20 raaien wordt getoond. Dit is equivalent aan 20 m in kustlangs

richting. Eerst worden de volumeveranderingen in het duin en op het strand gegeven voor de totale monitoringsperiode. Hierna wordt het gedrag in de tijd getoond voor het duin.

De kustlangs verdeling van de totale aanzandingsvolumes in de monitoringsperiode is berekend voor het strand (tussen NAP +0,84 en 3,0 m) en duin gebied (hoger dan NAP +3,0 m) in afbeelding 4.5. Ter correctie van de onderschatting voor de natte duinvallei is er 30 m³/m opgeteld bij de bepaalde accumulatievolumes tussen raainummer 4932 en 6452, voor verdere toelichting zie paragraaf 3.5. In profieltype 3 Zuid treedt gemiddeld de meeste accumulatie op in het duin. Hierna heeft profieltype 4 de meeste aanzanding in het duin.

Op het strand vindt vooral erosie plaats en in de duinen vooral accumulatie. Vooral aan de noordelijke en zuidelijke begrenzing van het studiegebied, waar het gebied van de Hondsbossche Duinen aansluit op de bestaande kustlijn, treedt erosie op van het strand.

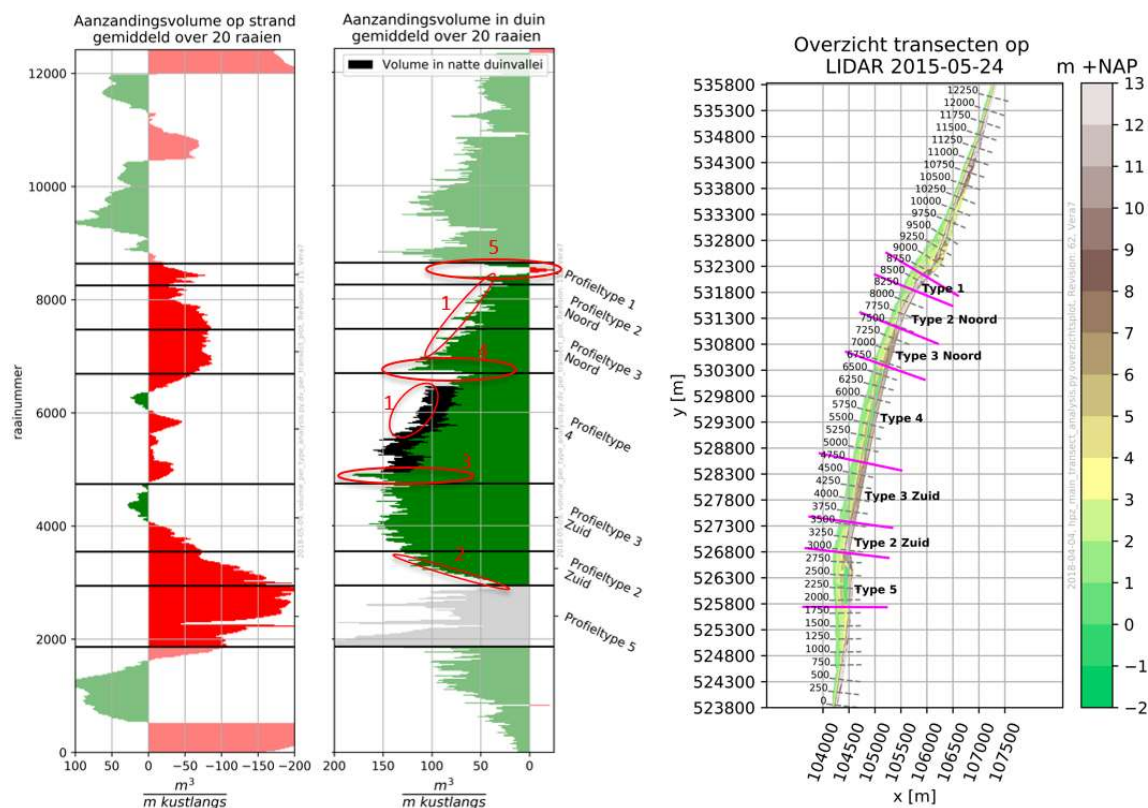
In deze gebieden is de aanzanding in het duin niet hoger dan bij de rest van de Hondsbossche Duinen, eerder minder. Erosie op het strand betekent niet meer aanzanding in de duinen, in kustdwarse richting beschouwd. De locatie van de erosie pieken op het strand - nabij de noordelijke en zuidelijk schouders waar de kustkromming het sterkst is - suggereert dat deze erosie vooral gedreven wordt door mariene effecten. De piek aan de zuidzijde is het grootst omdat de dominante wind- en golfrichting zuidwestelijk is. De verwachting is daarom dat de aanvoer van zand richting de duinen grotendeels vanuit de vooroever en het intergetijdengebied plaatsvindt, zie ook paragraaf 4.3.1.

Op basis van afbeelding 4.5 kan een aantal trends en uitschieters worden onderscheiden. Deze trends en uitschieters worden hieronder kort beschreven. Ze worden in detail geanalyseerd in bijlage III. Door deze trends en uitschieters te analyseren, wordt inzicht verkregen in een aantal verklarende factoren voor het accumulatiegedrag zoals dat wordt geobserveerd in de metingen.

De trends en uitschieters die te zien zijn in afbeelding 4.5 zijn:

- 1 afnemende trend in de accumulatie in noordelijke richting over de noordelijke helft van profieltype 4, profieltype 3 Noord en 2 Noord. Deze trend zou verklaard kunnen worden doordat de Hondsbossche Duinen in deze gebieden steeds verder van de gemiddelde windrichting af gaat afwijken als richting het noorden gekeken wordt, zie paragraaf III.1;
- 2 toenemende trend in de accumulatie richting het noorden in profieltype 2 Zuid. Dit kan verklaard worden door 4 factoren, zie III.2. Ten eerste doordat in het noorden van dit profieltype de helling van het buitentalud flauwer is. Ten tweede zijn er meer wilgenschermen aanwezig in het noorden. Ten derde wordt er in het zuiden een scherpe hoogte overgang gezien in het duin die zand afvangt dat in kustlangs richting transporteert. Tot slot wordt er ook zand afgevangen door de aanwezigheid van een strandpaviljoen;
- 3 een piek in de accumulatie in het zuidelijk deel van profieltype 4. Deze ontstaat door het invangen van zand in het zuidelijkste stukje van de duinvallei, zie III.3. Vermoedelijk komt dit doordat dit stuk lager gelegen is dan de omgeving. Daardoor vangt het zowel zand in bij transport in kustdwarse richting als bij transport in kustlangse richting;
- 4 een sprong in het aanzandingsvolume bij de overgang van profieltype 4 naar profieltype 3 Noord. Deze wordt gevormd door 2 factoren die samenvallen in kustlangse richting, zie III.4. De eerste factor is een verschil in gedrag achter de wilgenschermen. Opvallend is ook het verschil in afstand tussen vegetatie en wilgenschermen. Noordelijk van de sprong wordt aanzanding gezien achter de wilgenschermen en is de afstand kleiner dan zuidelijk van de sprong, waar juist erosie wordt waargenomen. De tweede is de overgang van erosie naar aanzanding in het noordelijke puntje van de duinvallei. De gebieden met deze 2 gedragingen vallen respectievelijk samen met het niet en wel beplante stuk;
- 5 alleen in profieltype 1 treedt erosie op. Deze wordt veroorzaakt door de uitkijkduin, zie III.5. Dit zou kunnen komen doordat de uitkijkduin erg hoog is en doordat het helm slecht aanslaat, zoals blijkt uit veldbezoeken.

Afbeelding 4.5 Totale accumulatie op het strand (linker afbeelding) en in het duin (middelste afbeelding). Heldere kleuren: raaien binnen projectgebied. Rode genummerde cirkels: opvallende zaken in de duinaccumulatie; Rechts: Raaien en nummering (eerste LIDAR meting)

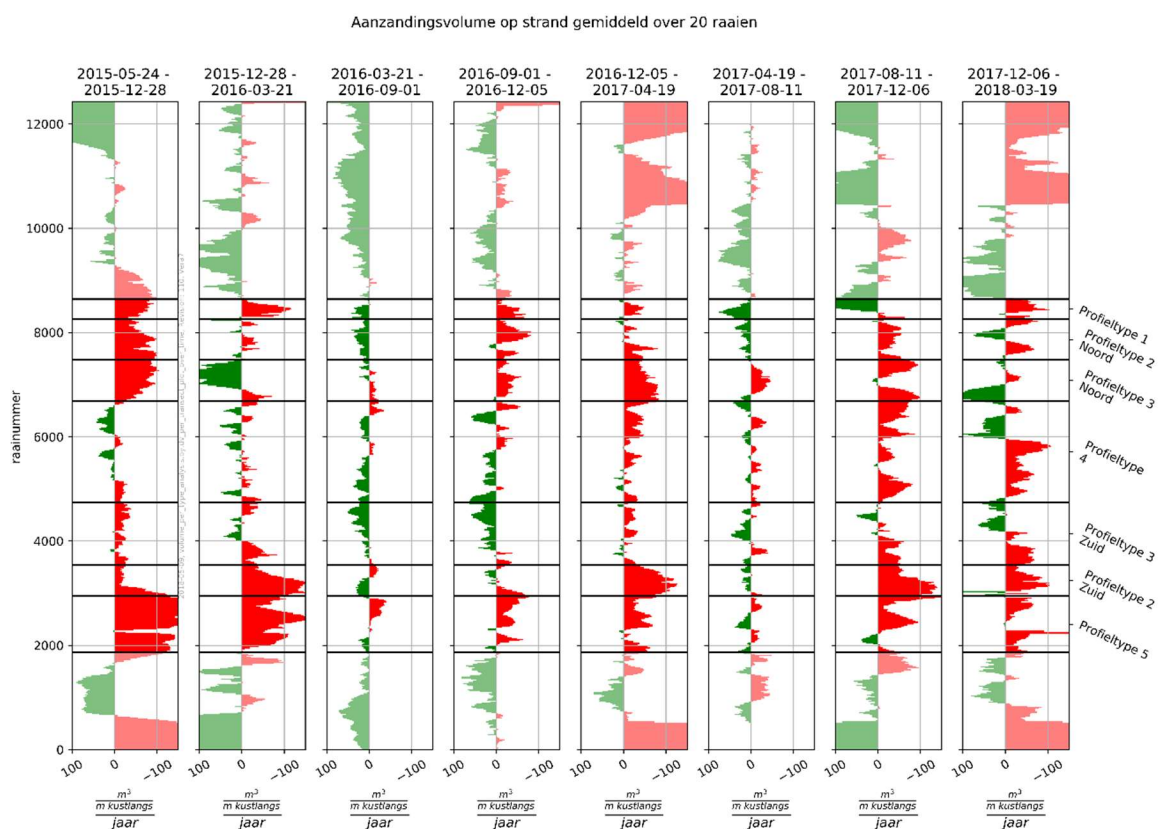
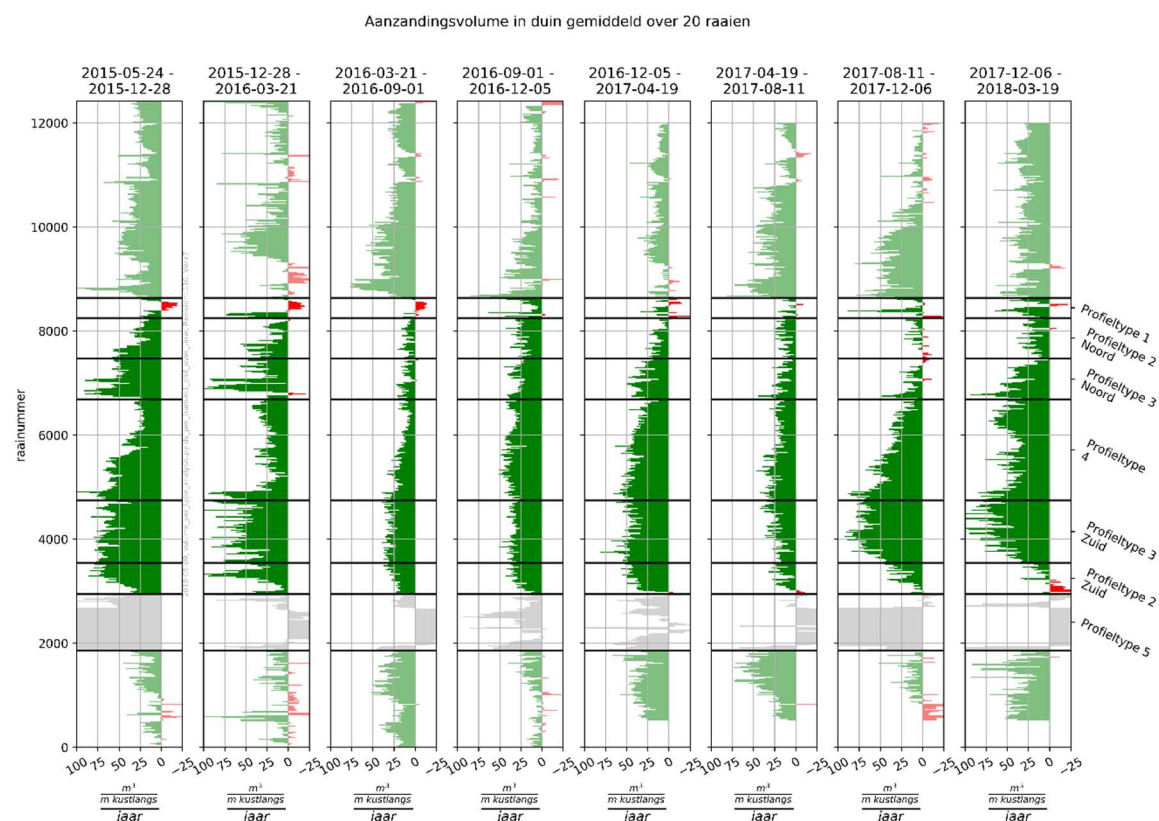


Afbeelding 4.6 laat de duinaccumulatie per periode tussen 2 LiDAR metingen zien. Het valt op dat de accumulatie per periode behoorlijk kan verschillen. De volumeveranderingen zijn sterker variabel in de ruimte als deze per periode worden beschouwd dan wanneer de gehele monitoringsperiode beschouwd wordt, vergelijk afbeelding 4.5 en afbeelding 4.6. De verschillen tussen meetperiodes worden op de langere termijn rechtgetrokken.

Het reeds beschreven seizoenseffect met kalmere wind in de zomer is terug te zien in de accumulatievolumes per meetperiode. In T3, T4 en T6 is het accumulatievolume gemiddeld het kleinst wat min of meer overeenkomt met de zomerperiode en met de periode met de minste wind (paragraaf 4.1). In deze perioden is er ook gemiddeld netto aangroei van het strand.

De netto volumeverandering per tijdstap in het duin is over het algemeen anders dan de netto volumeverandering op het strand. In enkele periodes zijn beide positief. Dit suggereert dat een groot deel van de accumulatie in de duinen niet direct van het strand komt, maar wordt aangevoerd vanuit de vooroever en het intergetijdengebied (via het strand).

Afbeelding 4.6 Volumeveranderingen; boven: in het duin tussen alle LIDAR metingen in m³ per meter in kustlangs richting per jaar. Onder: op het strand tussen alle LIDAR metingen in m³ per meter in kustlangs richting per jaar. Het accumatievolume in het duin bij profieltype 5 is grijs gemaakt, dit is niet representatief, zie paragraaf 3.2



4.5 Verdeling kustdwars

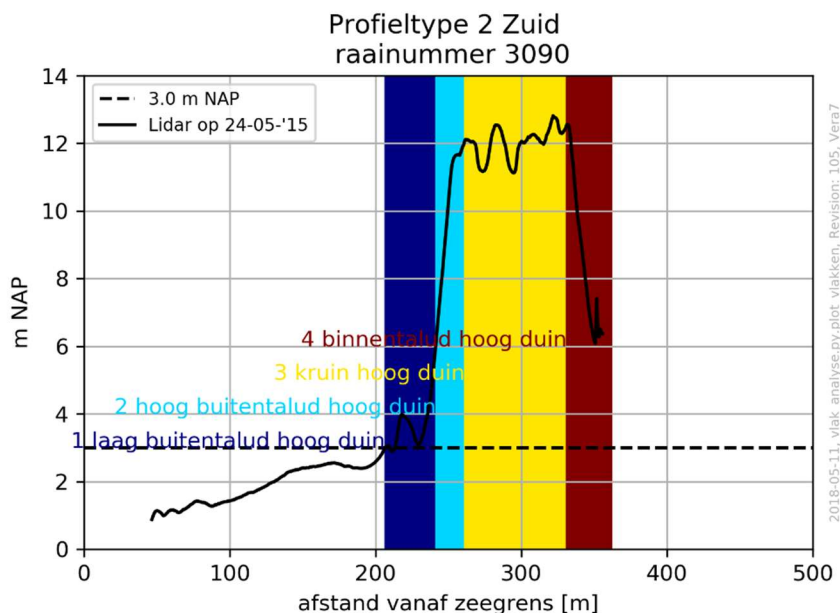
4.5.1 Ontwikkeling dwarsprofiel duingebied per profieltype

Deze paragraaf beschrijft de ontwikkeling van het dwarsprofiel van het duin waarbij het gedrag van de profieltypen 2, 3 en 4 wordt beschouwd. Profieltype 1 wordt buiten beschouwing gelaten, gezien het atypische gedrag ter hoogte van het uitkijkduin.

Per profieltype zijn op basis van expert judgement 1 of 2 raaien geselecteerd die representatief zijn voor een bepaald type profiel. Vervolgens wordt de ontwikkeling van het profiel in de tijd beschreven. Daarnaast wordt beschouwd hoe het instuivende zand zich verdeelt over het dwarsprofiel. Hiervoor zijn zones gedefinieerd in het duin conform de definities uit paragraaf 2.2. De accumulatie in deze zones is vervolgens gemiddeld voor alle dwarsprofielen in een profieltype.

De belangrijkste observaties en conclusies worden hieronder beschreven en toegelicht. De volledige beschrijving van de ontwikkeling en accumulatieverdeling per profieltype is te vinden in bijlage II.

Afbeelding 4.7 Definitie zones voor bepaling kustdwarse verdeling accumulatie



Ontwikkeling dwarsprofiel en accumulatieverdeling

Aan de hand van de hoogtekaarten, verschilkaarten en dwarsprofielen op de raaien is de ontwikkeling van het dwarsprofiel in de tijd en de verdeling van de accumulatie beschouwd.

Accumulatie grotendeels op zeewaartse delen

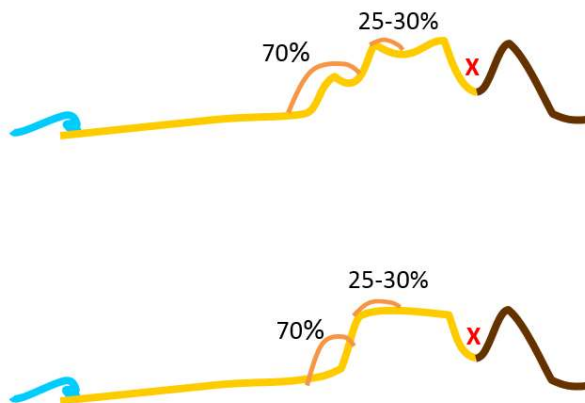
Overall in het gebied vindt ongeveer 70 % van de totale accumulatie in het dwarsprofiel plaats op het lage duin en/of het buitentalud dat initieel onder NAP +6 m ligt. Alleen in P2Z treedt relatief veel aanzanding hoger op het buitentalud plaats, 40 % van het totaal onder NAP +6 m en 30 % daarboven. De overige 30 % accumulatie vindt hoofdzakelijk hoog op het buitentalud plaats en op het zeewaartse deel van de kruin van het hoge duin. De verdeling is schetsmatig samengevat in afbeelding 4.8.

In de voorspellingen uit de ontwerpfase was voor P2 aangenomen dat 40 % van de accumulatie op het binnentalud van het hoge duin zou optreden. Dit is een flinke overschatting ten opzichte van de metingen waaruit blijkt dat dit voor profieltype 2 kleiner dan 1 % is. Voor P3 en P4 was aangenomen dat dit percentage 5 % zou zijn. Dit komt ongeveer overeen met de metingen voor P3. Voor P4 wordt nauwelijks

accumulatie waargenomen landwaarts van de duinvallei. De profielen met een laag voorduin en hoog duin (type 3) hebben relatief wat meer doorstuiving naar het binnentalud dan profielen met alleen een hoog duin.

Het feit dat de meeste accumulatie relatief laag en op de zeewaartse delen is geconcentreerd is fysisch gezien logisch aangezien het meer energie kost om het zand hoger op het duin te krijgen. Daarnaast is een groot deel van de wilgenschermen laag in het profiel geplaatst rond de duinvoet, waardoor hierin extra gestuurd wordt en het effect wordt versterkt. Verder is tijdens de aanlegfase papierpulp gebruikt om verstuiving te beperken. Mogelijk heeft dit het doorwaaien van zand in de eerste fase -waar nog geen vegetatie was ingeplant- zeer beperkt. Hier zijn geen specifieke metingen naar gedaan.

Afbeelding 4.8 Schematische accumulatieverdeling - deze is gelijk voor profielen met een laag en hoog duin (boven) en voor profielen met alleen een hoog duin (onder)



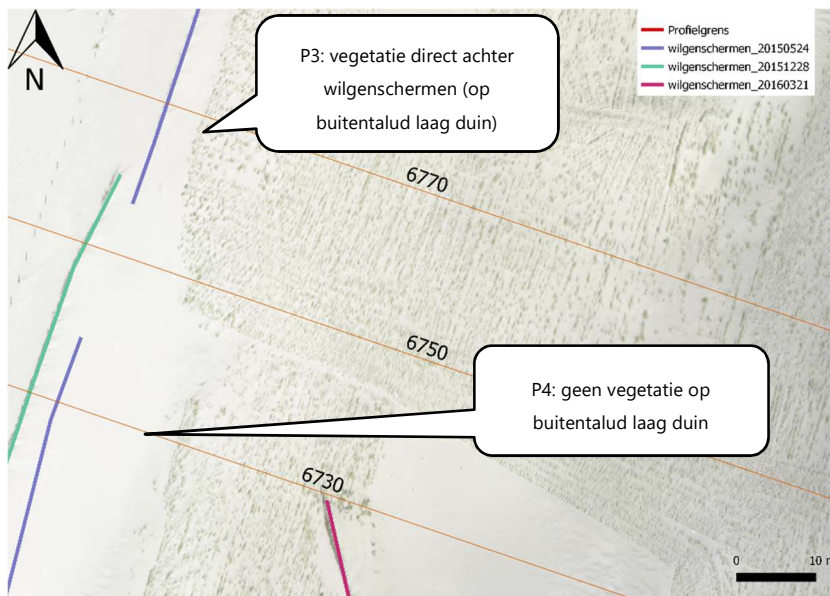
Rol vegetatie

Ook de vegetatie speelt een belangrijke rol in het feit dat accumulatie laag in het profiel plaatsvindt. Dat blijkt bijvoorbeeld uit het relatief kleine percentage accumulatie dat optreedt op het buitentalud van het lage duin in P4 (9 %) in vergelijking met P3Z (26 %). Dat heeft te maken met het feit dat er minder vegetatie is aangeplant in P4 op het buitentalud van het lage duin, zoals blijkt uit de luchtfoto in afbeelding 4.9.

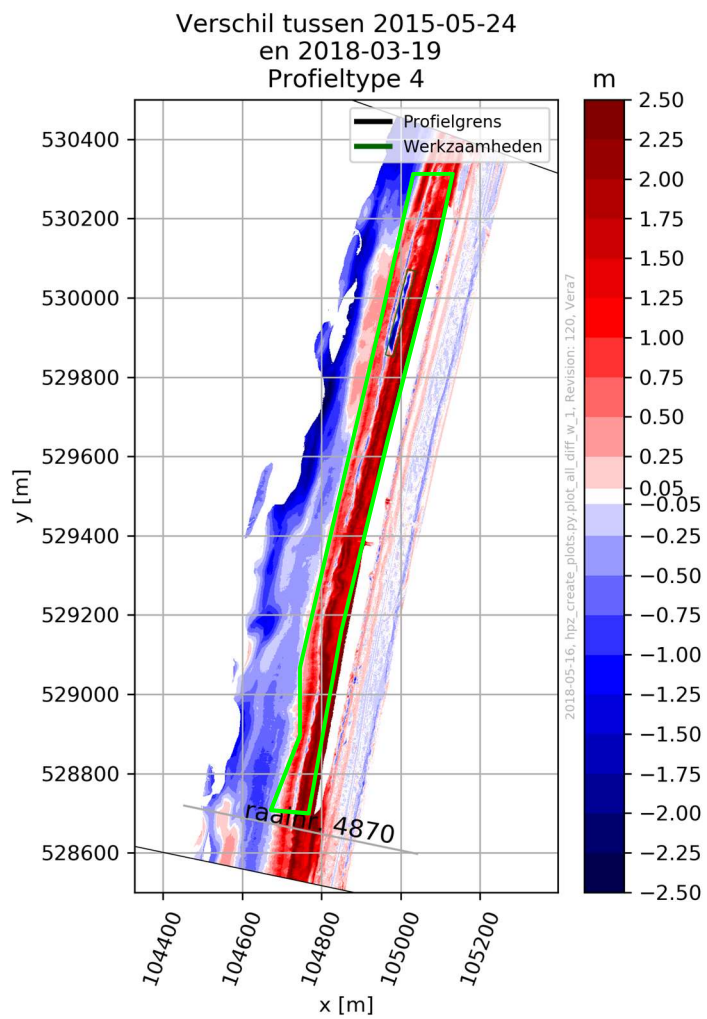
Het effect hiervan is terug te zien in de vershilkaart van het gebied met P4 (duinvallei, afbeelding 4.10). Met het groene kader is een groot gebied met accumulatie (rood) aangegeven ter hoogte van het lage duin. Daarbinnen is door het gehele gebied een smalle band met minder accumulatie en/of erosie te onderscheiden (wit/lichtblauw). Deze band komt overeen met het onbeplante deel van het talud en geeft het effect weer van de afwezigheid van vegetatie op de accumulatie in het dwarsprofiel.

Uit de ontwikkeling van de dwarsprofielen blijkt daarnaast dat het initiële reliëf en vegetatiepatroon herkenbaar blijven in de hoogtevariatie, zie bijvoorbeeld afbeelding II.9. De vegetatie bepaalt mede hoe snel het duin kan groeien, waardoor bij gelijk aanbod van zand de hoogtetoename in een gebied ook ongeveer gelijk blijft.

Afbeelding 4.9 Deze afbeelding geeft de luchtfoto van 01-09-2016. Ook de wilgenschermen zijn aangegeven. Deze luchtfoto is gekozen vanwege het contrast waardoor de vegetatie duidelijk te onderscheiden is



Afbeelding 4.10 Verschilkaart profieltype 4 laatste meting minus eerste meting

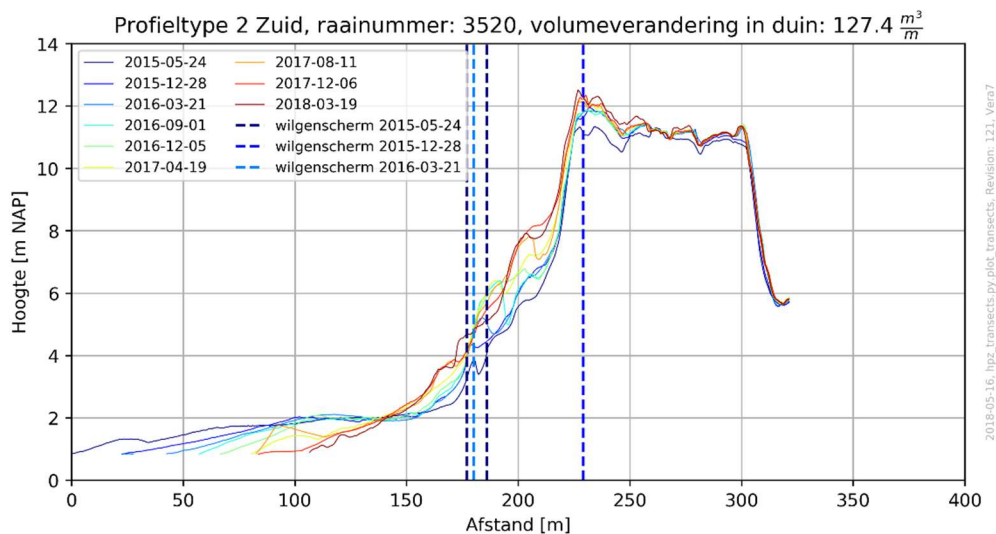


Noord-zuid verschil

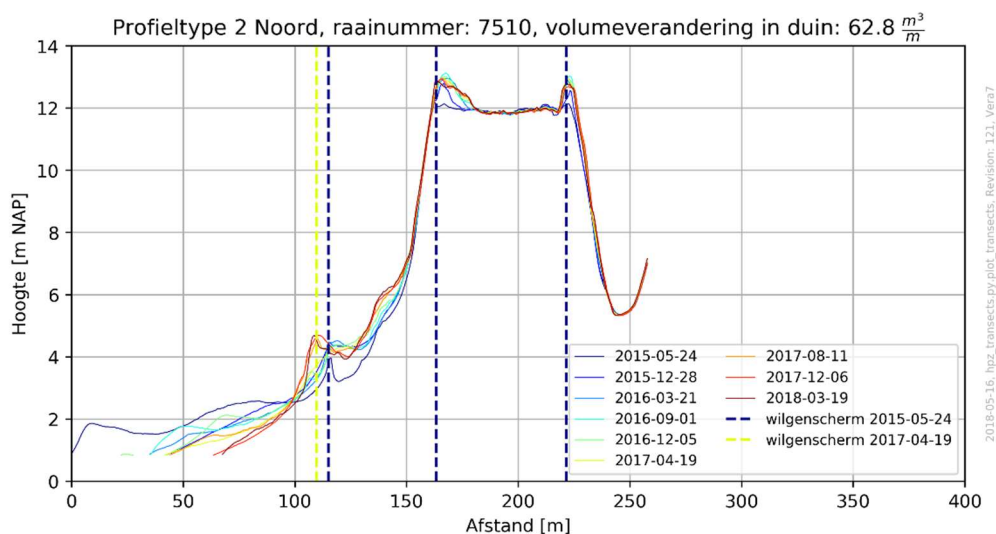
Er zijn twee noord-zuid verschillen onderscheiden. Allereerst is de accumulatie over het algemeen hoger in het zuiden dan in het noorden. Deze trend is al eerder benoemd in paragraaf 4.4. Daarnaast vindt de accumulatie in het noorden over het algemeen lager in het profiel plaats dan in het zuiden. Dit blijkt uit de vergelijking van P3Z met P3N en P2Z met P2N (afbeelding 4.11 en afbeelding 4.12).

Het verschil in oriëntatie tussen het noorden en het zuiden is ongeveer 10-15 graden (zie verderop in paragraaf 5.4.2). Mogelijk speelt de kustoriëntatie ten opzichte van de dominante windrichting hier een rol doordat zand bij een meer loodrechte windinval op het profiel verder omhoog getransporteerd wordt. Bij schuine inval zal een groter deel van het zand kustlangs worden getransporteerd.

Afbeelding 4.11 Profielontwikkeling profieltype 2 Zuid, raai 3520



Afbeelding 4.12 Profielontwikkeling profieltype 2 Noord, raai 7510



Accumulatieverdeling in de tijd

Accumulatie op de kruin van het hoge duin treedt voornamelijk over de eerste meetperiode op (zie ook afbeelding 4.11 en afbeelding 4.12). Daarna treden er overwegend alleen nog kleine hoogteveranderingen op in dit gebied. Dit lijkt een gevolg van een grotere invangcapaciteit in de lagere delen. Dit kan veroorzaakt zijn door de ontwikkeling van vegetatie (vitalere helm) en de plaatsing van wilgenschermen (menselijk ingrijpen).

Variatie binnen profieltype

Het blijkt dat binnen een profieltype het aangelegde dwarsprofiel en het gedrag kan variëren en meestal geleidelijk verloopt richting de aansluiting met het naastgelegen profieltype over het gehele gebied dat wordt beslagen door 1 profieltype. Dit is het geval in P2Z waar de hoogte enigszins afneemt en het buitentalud flauwer wordt richting het noorden. Het gebied met accumulatie wordt geleidelijk breder richting het noorden. Dit verloop in de accumulatie is benoemd in paragraaf 4.4 en wordt nader geanalyseerd in bijlage III.

In P3Z is het lage duin smal in het zuiden en wordt steeds breder in het noorden. Dit geeft weinig verschil in gedrag en accumulatievolumes, behalve dat er bij een smaller laag duin initieel wat meer zand doorstuift naar de kruin van het hoge duin.

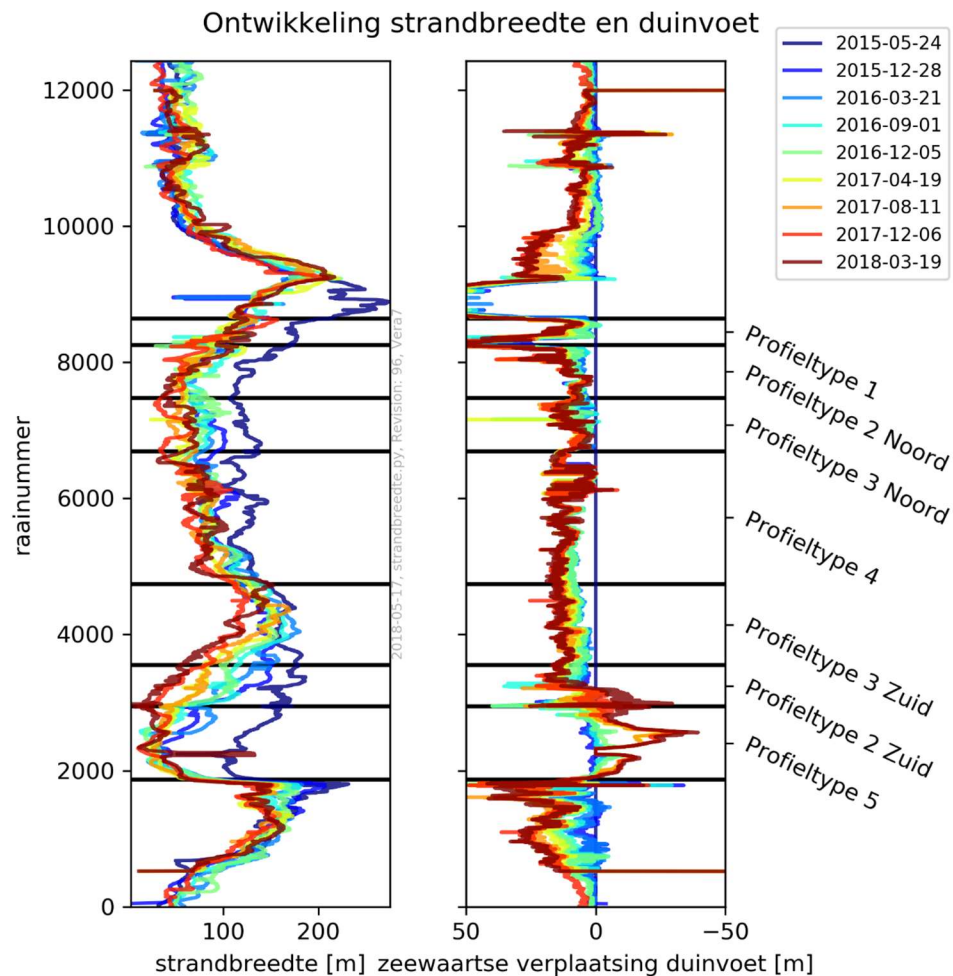
4.5.2 Strand en intergetijdengebied

De strandbreedte neemt af over de hele Hondsbossche Duinen terwijl de duinvoet over bijna het hele gebied uitbouwt, alleen niet in profieltype 5 en het zuidelijkste stukje van profieltype 2 Zuid (afbeelding 4.13). De strandbreedte neemt het sterkst af in P2Z en P5. Dit beeld sluit goed aan bij de geobserveerde erosie op het strand en de accumulatie in de duinen (afbeelding 4.5).

Het valt op dat de strandbreedte sneller afneemt dan dat de duinvoet zich in zeewaartse richting verplaatst. De positie van de duinvoet blijft redelijk constant na de eerste twee metingen, terwijl de strandbreedte geleidelijk blijft afnemen. Het profiel wordt daardoor langzaam gemiddeld steiler.

Verder valt de grote uitbouw van de duinvoet tussen profieltype 2 Noord en 1 op en noordelijke van profieltype 1. De uitbouw tussen type 2 Noord en 1 heeft waarschijnlijk te maken met de strand opgang die hier ligt. De uitbouw noordelijk van profieltype 1 heeft te maken met de tussentijdse werkzaamheden van de aannemer, zie 3.5.4.

Afbeelding 4.13 Links: Strandbreedte voor iedere raai in alle LiDAR metingen. Rechts: Zeewaartse verplaatsing van duinvoet



4.6 Samenvatting

Gemiddeld over de onderzoeksperiode waaide $33 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ zand het duin in. Dit komt overeen met de verwachtingen tijdens de ontwerpfase. 45 % daarvan kwam van het strand en de overige 55 % moet daarom van het niet-gemeten intergetijdengebied of van gradiënt in kustlangs transport komen. In de kustdwarse richting is gezien dat het zand vooral (ongeveer 70 %) op de zeewaartse zijde, op het onderste deel van het duin terecht kwam (tot NAP +6 m). Een klein deel kwam boven op het duin en dan met name aan de zeewaartse zijde. Er stook nauwelijks zand door richting de oorspronkelijke HPZ. Kustlangs is variatie in aanzandingsvolumes waargenomen. In de navolgende hoofdstukken worden de oorzaken van de verdeling van het eolisch getransporteerd zand verder onderzocht.

5

EFFECT GROOTSCHALIGE GEOMETRIE OP VERSTUIVING EN DEPOSITIE

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is beschreven dat gedurende de meetperiode de duinen van de HD overwegend aanzanden. Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van het effect van de grootschalige geometrie van de HD op deze aanzanding. Daarmee draagt dit hoofdstuk bij aan de tweede onderzoeksvraag van dit project:

(II) Wat is het effect van vormgeving van het duin op verstuiwing en depositie (voor zover hier generieke conclusies aan te verbinden zijn)?

Doel van de analyse in dit hoofdstuk is inzicht te krijgen in de oorzaken van de ontwikkeling van de HD gedurende de meetperiode. Op basis van de analyse naar grootschalige geometrie worden 'lessons learned' afgeleid voor toekomstige zandige versterkingsoplossingen.

De analyse richt zich in paragraaf 5.2 op de bij het ontwerp onderscheiden profieltypen: Is er een verschil in aanzanding tussen de profieltypen te onderscheiden? In paragraaf 5.3 wordt onderzocht of op basis van een multivariate analyse waarbij de indeling in profieltype buiten beschouwing wordt gelaten ook groepen worden onderscheiden op basis van gemeten aanzanding en gegevens van kustoriëntatie, strandbreedte, helling voorduin en korreldiameter: komen deze groepen overeen met de bij het ontwerp onderscheiden profieltypen? Paragraaf 5.4 gaat vervolgens in op de relatieve invloed van de afzonderlijke parameters op de aanzanding. In paragraaf 5.5 is een samenvatting opgenomen met conclusies op basis van dit hoofdstuk en worden aanbevelingen gedaan voor mogelijke vervolgstappen.

5.2 Grootschalige geometrie

5.2.1 Indeling in profieltypen

Zoals beschreven in paragraaf 2.3 zijn in het ontwerp van de HD 5 representatieve dwarsprofielen onderscheiden:

- 1 profieltype 1: hoog duin met een hoogtevariatie;
- 2 profieltype 2: hoog duin met een geringe hoogtevariatie (hoogte maximaal 11,8 m bij acceptatie van aanleg);
- 3 profieltype 3: overgangsduin: een laag duin met aansluitend hoog duin, beide rond 60 m breed;
- 4 profieltype 4: 2 duinregels met daartussen een vochtige duinvallei;
- 5 profieltype 5: strandlagune (buiten scope van dit project).

De ligging van deze profieltypen in ons studiegebied is nogmaals weergegeven in afbeelding 5.1.

Afbeelding 5.1 Locatie profieltypes HD



5.2.2 Analyse totale monitoringsperiode

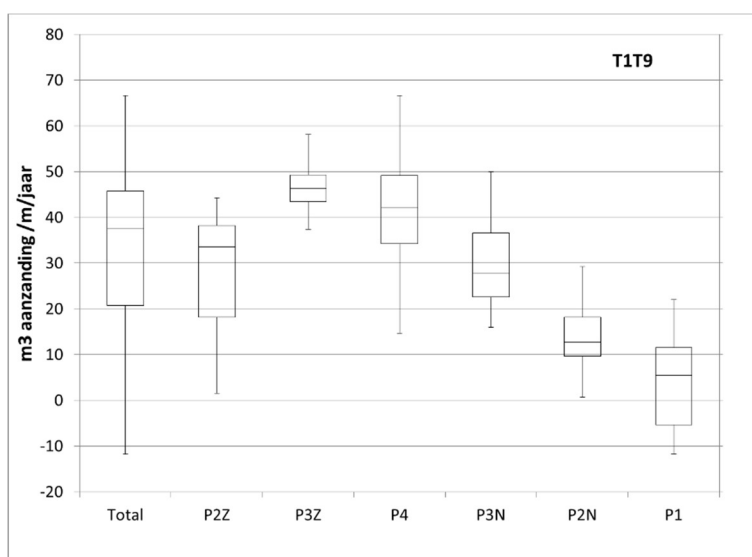
De volumeverandering in het duin is beschreven in paragraaf 4.4 en afbeelding 4.5. In afbeelding 5.2 is per profieltype de totale aanzanding over de meetperiode in m^3/m per jaar weergegeven. In afbeelding 5.2 zijn de kwartielwaarden, de mediaan en minimale en maximale waarde van aanzanding in $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ weergegeven. Het geeft daarmee een beeld van de variatie van aanzanding over de HD en binnen het profieltype. Voor profieltype 4 is hierbij een correctie in de aanzanding gedaan van $30 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze correctie volg uit de separate metingen van de duinvallei (zie paragraaf 3.5.2).

De volumeverandering is het grootst in profieltype 3Z en profieltype 4 (afbeelding 5.2). In profieltype 4 is de maximale waarde van volumeverandering gemeten en is het verschil tussen de maximale en minimale waarde het grootst van alle profieltypen. In profieltype 3Z is het verschil tussen de maximale en minimale waarde het kleinst van alle profieltypen. In profieltype 3Z is de aanzanding gemiddeld gezien het grootst. De maximale waarde van gemeten aanzanding in profieltype 1 en 2N is kleiner dan de minimale aanzanding in profieltype 3Z. De verdeling van aanzanding van profieltype 1 en 2N. Vanaf profieltype 3Z is er een afnemende trend te zien in aanzanding richting het noorden.

In hoofdstuk 4 is gezien dat er een sprong in aanzanding is te zien in de overgang van profieltype 4 naar 3N. In de verdeling van de aanzanding over het gehele profiel (afbeelding 5.2) is deze sprong niet zichtbaar. De toename in aanzanding op deze locatie betreft een variatie in aanzanding door lokale omstandigheden.

Profieltype 2, gelegen zowel ten noorden als ten zuiden van de duinvallei laat een verschil in aanzanding zien in het noorden en in het zuiden. In het zuiden vindt meer aanzanding plaats dan in het noorden. Dit geldt ook voor profieltype 3. Hieruit valt te concluderen dat het profieltype op zichzelf niet een verklarende factor is voor de mate van aanzanding in de HD. In paragraaf 5.4 worden de parameters geanalyseerd die de aanzanding mogelijk verklaren.

Afbeelding 5.2 Boxplot met minimale, 25 %, 50 %, 75 % en maximale waarde van aanzanding kustlangs in $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ tussen T1 (05-2015) en T9 (03-2018) per profieltype. Voor profieltype 4 is een correctie toegepast van $30 \text{ m}^3/\text{m}$ voor de gehele meetperiode



5.2.3 Analyse per meetperiode

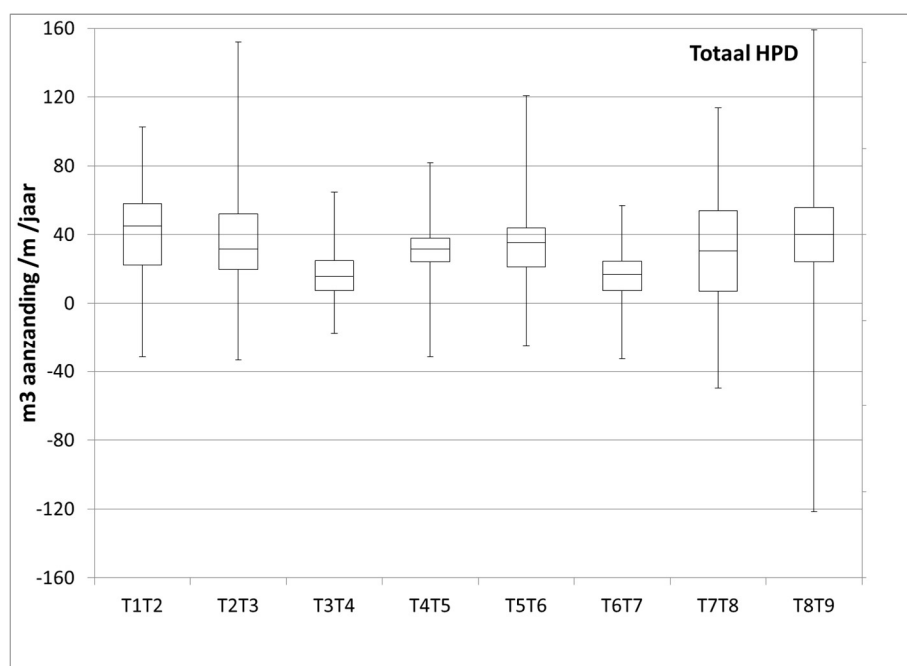
De aanzanding per profieltype varieert per meetperiode (afbeelding 5.3). In periode T1T2 is de mediane waarde van de aanzanding groter dan in de volgende perioden. Naar verwachting treedt in de periode direct na aanleg meer aanzanding op dan in latere perioden. Opvallend genoeg treedt er juist in de laatste meetperiode (T8T9) ook weer meer aanzanding op. In deze laatste meetperiode is de spreiding in aanzanding (verschil tussen maximaal en minimaal gemeten aanzanding per meter kustlangs) het grootst van alle perioden. We merken op dat in afbeelding 5.3 de correctie van $30 \text{ m}^3/\text{m}$ voor de duinvallei niet is opgenomen, aangezien het niet bekend is wanneer deze aanzanding in de duinvallei heeft plaatsgevonden.

In afbeelding 5.3 valt op dat in meetperiode T3T4, T4T5 en T6T7 het verschil tussen maximaal en minimaal gemeten aanzanding per meter kustlangs kleiner is dan in de overige meetperioden. T3T4 beslaat de lente en zomer van 2016, T4T5 beslaat de periode herfst 2016 en T6T7 de lente en een deel van de zomer in 2017. In de windrozen van deze meetperioden (afbeelding 4.1) is te zien dat in periode T3T4 de gemiddelde windsnelheden lager zijn in vergelijking met de overige meetperioden en in periode T4T5 en T6T7 was er een relatief groot aandeel oostenwind.

In afbeelding 5.4 is per meetperiode de aanzanding uitgezet. We merken op dat ook in afbeelding 5.4 de correctie van 30 m³/m voor de duinvallei niet is opgenomen. Op basis van afbeelding 5.4 lijkt de aanzanding in de duinvallei met name plaats te hebben gevonden in periode T1T2 en T2T3. Dit is gebaseerd op de observatie dat in deze perioden de aanzanding in profieltype P4 afwijkt van de trend in de aanzanding in afbeelding 5.2, waar wel gecorrigeerd is voor de duinvallei. Vanaf periode T3T4 is in elke periode een trend zichtbaar van afname in aanzanding richting het noorden.

Over de gehele monitoringsperiode is sprake van aanzanding in profieltype 2Z, 3Z, 4, 3N en 2N (in afbeelding 5.2). Er is over de gehele monitoringsperiode alleen in profieltype 1 sprake van erosie. Per meetperiode bezien, zijn er ook in de profieltypen 2Z, 3Z, 4, 3N en 2N negatieve waarden in de aanzanding (afbeelding 5.4) Met name in profieltype 2Z zijn er in periode T7T8 en T8T9 negatieve waardes te zien.

Afbeelding 5.3 Boxplot met minimale, 25 %, 50 %, 75 % en maximale waarde van aanzanding kustlangs in m³/m/jaar per profieltype tussen T1 (05-2015) en T9 (03-2018)



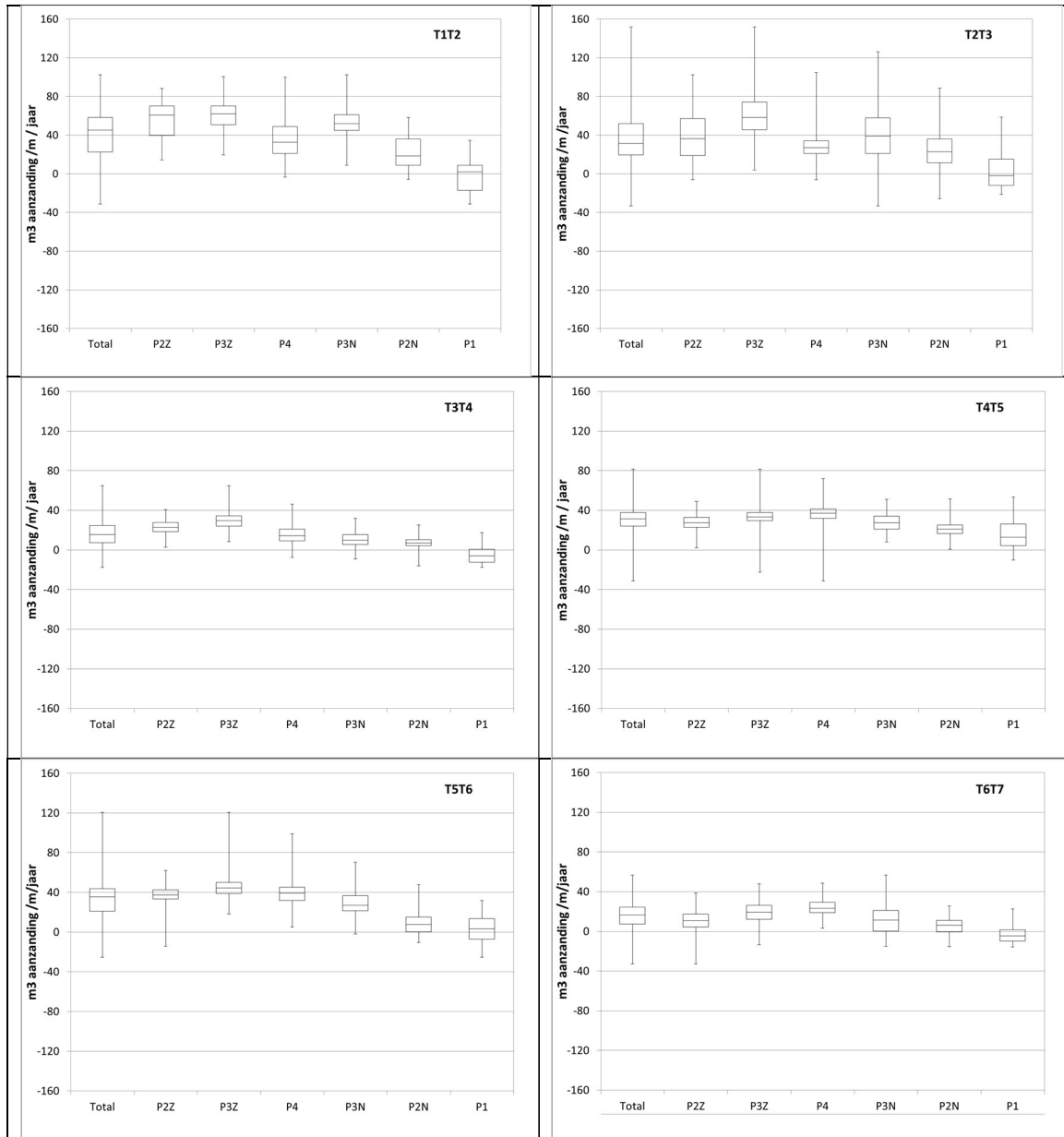
Het zeewaartse talud van het duin wordt mogelijk ook beïnvloed door effecten van mariene processen, voornamelijk afslag ten gevolge van stormoploop. In de meetperiode van de HD zijn er 25 gebeurtenissen geweest waarvoor Rijkswaterstaat een stormvloedflits heeft uitgebracht¹. Van 3 gebeurtenissen is ook een stormvloedrapportage uitgebracht, waarbij op minstens één van de basislocaties van Rijkswaterstaat het grenspeil overschreden is en daarmee sprake was van een stormvloed. Bij de kust van de HD, gelegen tussen meetlocatie Den Helder en IJmuiden heeft bij deze gebeurtenissen geen overschrijding van het grenspeil plaatsgevonden. Het grenspeil bij meetstation Den Helder is 2,30 m+NAP. De maximale waterstand tijdens deze gebeurtenissen bij meetlocatie Den Helder waren, 2,11 m+NAP (13/14-01-2017), 1,39 m+NAP (29 oktober 2017)) en 1,90 m+NAP (3/4-01-2018) (afbeelding 5.5).

Deze waterstanden liggen onder het niveau van de duinvoet, en bij de HD hebben deze niet geleid tot veel kustafslag; in de metingen wordt geen afslag geobserveerd binnen het studiegebied, er is vooral sprake van aanzanding. Mogelijk dat deze gebeurtenissen juist hebben bijgedragen aan meer zandtransport. De beschikbaarheid van zand wordt naast eolische processen namelijk ook beïnvloed door mariene processen. Het intergetijdengebied wordt als een belangrijke schakel gezien in de aanvoer van zand naar het duin.

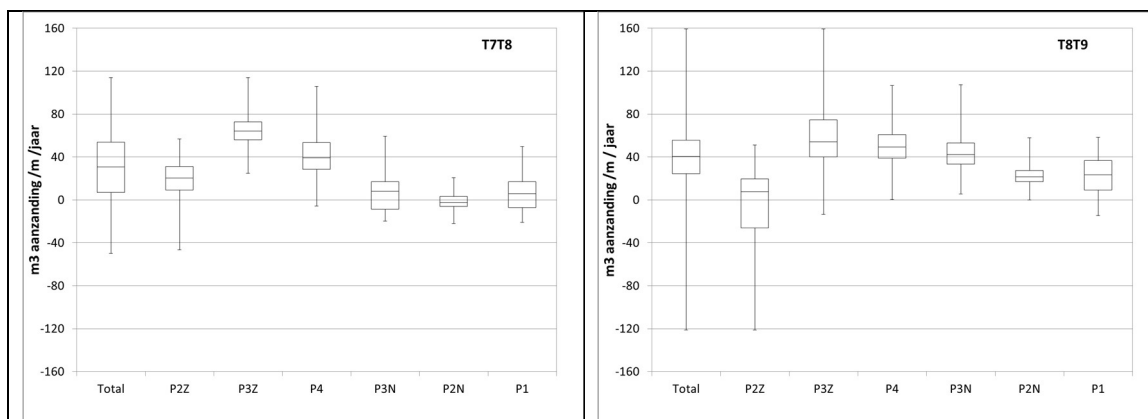
¹ <https://waterberichtgeving.rws.nl/water-en-weer/verwachtingen-water/water-en-weerverwachtingen-waternoordzee/stormvloedrapportages>

Onder invloed van het getij wordt het gebied omgewoeld door golven. De grotere zandkorrels en schelpen die het fijne zand ter plaatsen hebben gehouden, verplaatsen zich. Hierdoor komt het fijne zand weer aan het oppervlak te liggen. Bij laag water kunnen deze korrels door de wind worden getransporteerd richting het duin. In paragraaf 5.4.3 wordt dit aspect beschouwd.

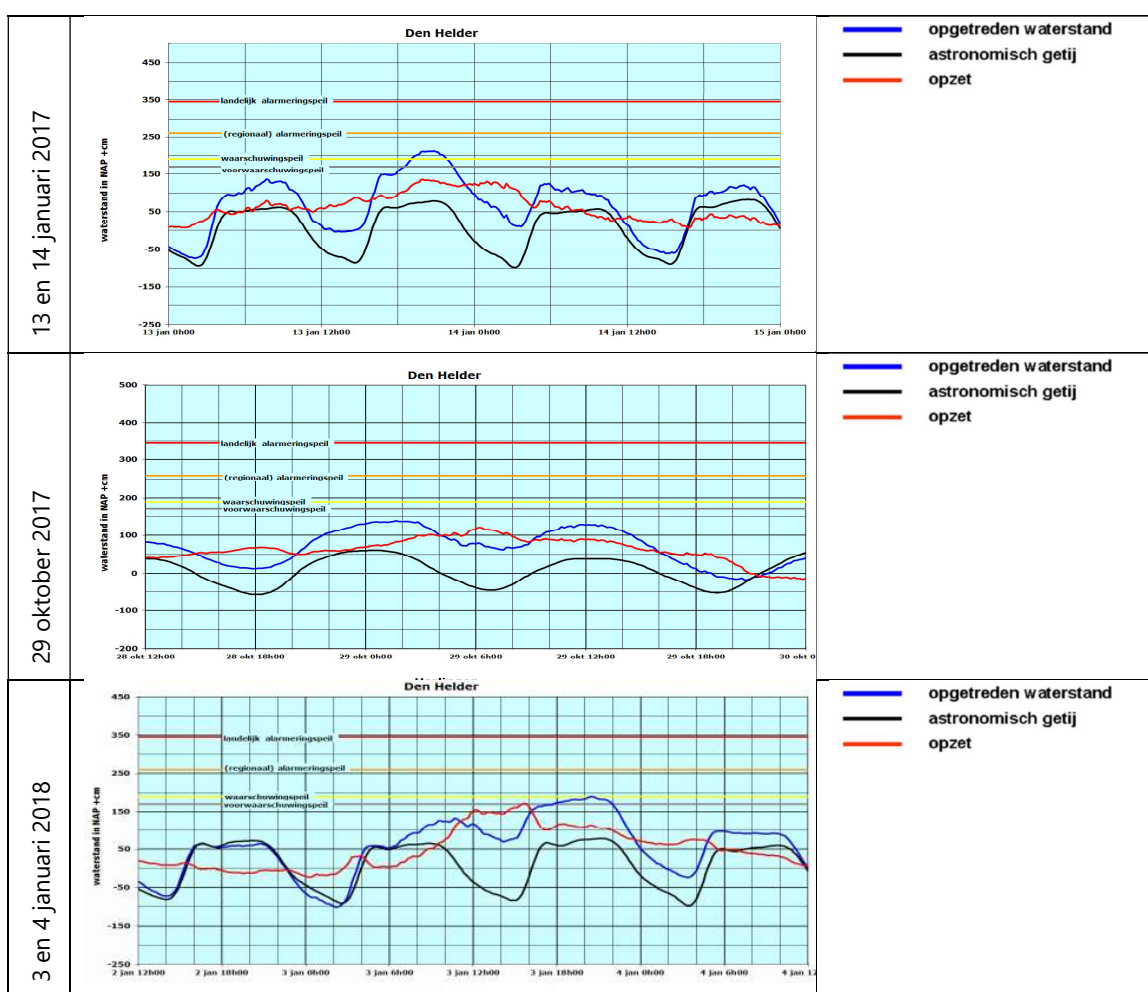
Afbeelding 5.4 Boxplot met minimale, 25 %, 50 %, 75 % en maximale waarde van aanzanding kustlans in m³/m/jaar per profieltype per meetperiode tussen T1 (05-2015) en T9 (03-2018).¹⁾



¹⁾ In afbeelding 5.4 s de toename van de 30 m³/m over de gehele meetperiode voor de duinvallei niet meegenomen. Hierdoor is aanzanding van profieltype 4 onderschat. De werkzaamheden (T1) zijn wel meegenomen, de transecten waarop dit plaatsvindt hebben een zeer lage aanzanding.



Afbeelding 5.5 Opgetreden en astronomische waterstanden en opzetten bij Den Helder voor 3 stormvloed en opzetten tijdens meetperiode



5.3 Indeling op basis van Multivariate Analyse

Uit de meetgegevens blijkt dat de aanzanding in het zuiden sneller gaat dan in het noorden van het studiegebied. In paragraaf 5.2 is het patroon geanalyseerd voor de in het ontwerp onderscheiden profieltypen. Ter ondersteuning van de analyse en de bevindingen is met een multivariate analyse onderzocht of ditzelfde patroon optreedt, als de indeling in profieltypen buiten beschouwing wordt gelaten en de volgende 6 parameters worden beschouwd voor de bijna 6.000 raaien:

- aanzandingsvolume in duingebied (boven NAP +3 m);
- strandbreedte;
- helling strand;
- oriëntatie duinvoet;
- helling buitentalud;
- korreldiameter.

Dit lijken op voorhand de meest belangrijke factoren voor de bepaling van de aanzanding.

Deze parameters worden in paragraaf 5.4 afzonderlijk besproken. Het aanlegmoment is buiten beschouwing van deze multivariate analyse gehouden, aangezien deze gekoppeld is aan de profieltypen (zie ook paragraaf 2.4). Als deze parameter wel in de analyse meegenomen zou worden, wordt daarmee toch de indeling in profieltypen meegenomen. Bij de analyse naar het effect van de afzonderlijke variabelen (paragraaf 5.4) wordt het aanlegmoment wel meegenomen in de analyse.

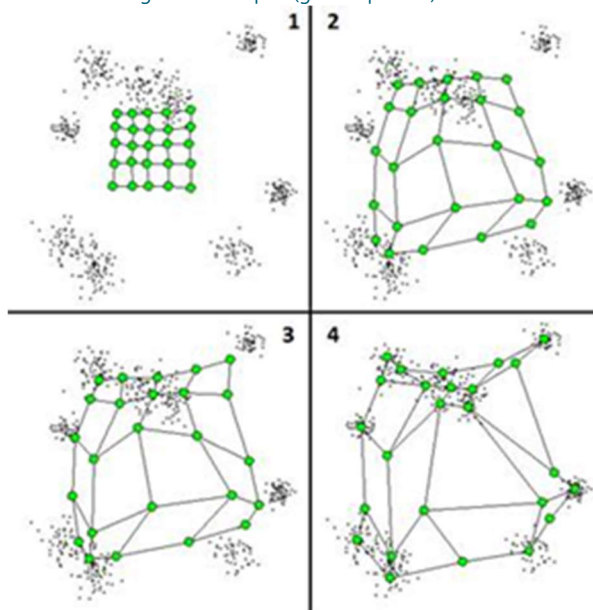
Doel van de analyse in deze paragraaf is op basis van een automatisch gegenereerde clustering op de overige variabelen buiten de profieltypen, inzicht te krijgen in de patronen van de gegevens. Zijn de bij het ontwerp onderscheiden profieltypen te onderscheiden op basis van de beschouwde variabelen?

5.3.1 Korte uitleg analyse

Een zogenaamde 'kohonen / self organizing map' analyse is uitgevoerd (http://www.scholarpedia.org/article/Kohonen_network). Dit is een methode van multivariate analyse waarbij op basis van meetgegevens van meerdere variabelen ruimtelijke patronen inzichtelijk worden gemaakt. Anders verwoord, een visualisatie van de dataset waaruit cluster structuren zichtbaar worden. Voor de HD wordt deze analyse ingezet om inzicht te verkrijgen in de gegevens en na te gaan welke clusterstructuren zichtbaar worden op basis van de inputvariabelen.

De methode reduceert het aantal dimensies in de analyse tot 2 en 'projecteert' deze in een grid van 50 x 60 knopen. Het projecteren wordt in iteraties uitgevoerd waarbij het grid stapsgewijs om de datawolk van de invoergegevens gevouwen wordt. In afbeelding 5.6 is als illustratie een voorbeeld getoond van een datawolk van 2 dimensies (zwarte punten) welke geprojecteerd wordt op een grid van 5 x 5 knopen. De knopen van het grid hebben zich in het voorbeeld in 4 gevisualiseerde stappen dusdanig verplaatst over de datawolk dat er meerdere knopen bij veel datapunten geplaatst zijn zonder dat daarbij de benen tussen de knopen gekruist of gebroken zijn. Dit betekent dat nabijgelegen knopen meer op elkaar lijken dan knopen die ver van elkaar af liggen. Elke knoop zal dan ook in de buurt komen van een datapunt in de dataset waar deze op lijkt en de omliggende knopen zullen ook verplaatst worden voor een betere afstemming. Door de projectie op het grid krijgt elke knoop een waarde toegekend van soortgelijke gebeurtenissen in de dataset. Een knoop wordt in dit geval dan representatief voor een aantal datapunten in de dataset. Op die manier is het mogelijk om een grote dataset te visualiseren op een kleiner grid. In de analyse worden alle input variabelen genormaliseerd en worden daarmee met dezelfde weging meegenomen.

Afbeelding 5.6 Illustratie kohonenanalyse voor data. De data is weergegeven met zwarte puntenwolken. Door iteraties wordt het grid met knopen (groene punten) om de data heen gevouwen



Het resultaat van de analyse is een U-matrix, wat een soort platgestreken versie is van het grid dat zich om de data heeft gevouwen. Hierin krijgen knopen die dicht bij elkaar liggen een lage waarde en knopen die ver van elkaar af liggen een hoge waarde. Met de methode wordt een clustering in de dataset zichtbaar en kan vervolgens gekeken worden naar:

- 1 de onderliggende factoren die deze clustering bepalen;
- 2 waarom er verschillende clusters worden onderscheiden.

Voor de analyse van de HD worden in deze analyse de raaien die over de 6 inputvariabelen gezien het meeste op elkaar lijken geclusterd. Omdat de raaien niet vooraf ingedeeld zijn op locatie of profieltype worden de clusters onafhankelijk van profieltype ingedeeld. Als de profieltypes duidelijk terug te zien zijn in de clustering (dat wil zeggen de raaien die binnen 1 profieltype vallen liggen bij elkaar in een cluster), dan kan uitgezocht worden welke inputvariabelen deze clustering verklaren: in welke inputvariabelen is dezelfde clustering terug te zien als in de overkoepelende clustering.

Voor de analyse van de HD zijn analyses uitgevoerd over de gehele monitoringperiode (05-2015 tot 03-2018) en per meetperiode. De analyse over de gehele periode is 2 keer uitgevoerd:

- voor de 6 parameters genoemd aan begin van deze paragraaf (aanzandingsvolume in duingebied, strandbreedte, helling strand, oriëntatie duinvoet, helling buitentalud en korreldiameter). Hierbij is gecorrigeerd voor aanzanding in profieltype 4 van 30 m³/m over de gehele meetperiode;
- voor de parameters genoemd aan begin van deze paragraaf, met uitzondering van oriëntatie en korreldiameter. De analyse is daarmee uitgevoerd voor de parameters van: aanzandingsvolume in duingebied, strandbreedte, helling strand en helling buitentalud.

Paragraaf 5.3.2 beschrijft de resultaten van deze analyse. Ook is een analyse per meetperiode gedaan. De locatie van de resultaten (U-matrix en matrices van de parameters) van deze analyses zijn opgenomen in bijlage IV.

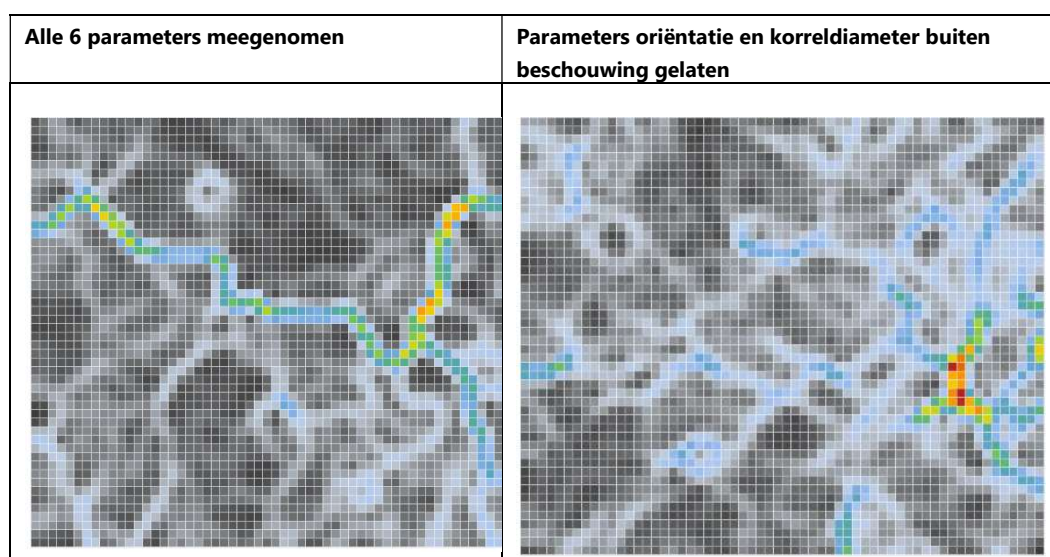
5.3.2 Resultaten

In afbeelding 5.7 zijn 2 U-matrices te zien voor de analyse over de gehele monitoringperiode. Deze U-matrices maken inzichtelijk wat de afstand tussen elke knoop (gridcel) in de dataset is. Hierbij zijn de hoge waarden (weergegeven in rood/geel lichtblauw) de knopen tussen de clusters en de lage waarden

nabijgelegen knopen die duiden op clusters (kleur richting zwart). Clusters worden van elkaar gescheiden door knopen met hoge waarden (licht blauw/geel/rode kleur). Hoe roder de kleur hoe groter de afstand tussen de clusters. Een aantal zwarte knopen omgeven met donkerrode knopen duidt dan op een geïsoleerd cluster van een groep raaien.

Aandachtspunt bij de analyse is dat de manier van vouwen van het grid in de verschillende analyses anders kan zijn. Dit betekent dat de U-matrices niet zomaar met elkaar kunnen worden vergeleken. Ook hebben de U-matrices op zichzelf zijn geen koppeling met een geografische locatie. Maar door de gegevens van de U-matrices te koppelen aan de locatie van de raaien kunnen de data wel ruimtelijk worden geïnterpreteerd. Deze gegevens zijn opgenomen in een aantal webpagina's. De links hiervan zijn weergegeven in bijlage IV van dit rapport, met daarbij een korte uitleg van het gebruik van de pagina om de gegevens te kunnen bekijken.

Afbeelding 5.7 Resultaten U-matrix kohonen analyse voor periode tussen T1 (05-2015) en T9 (03-2018)

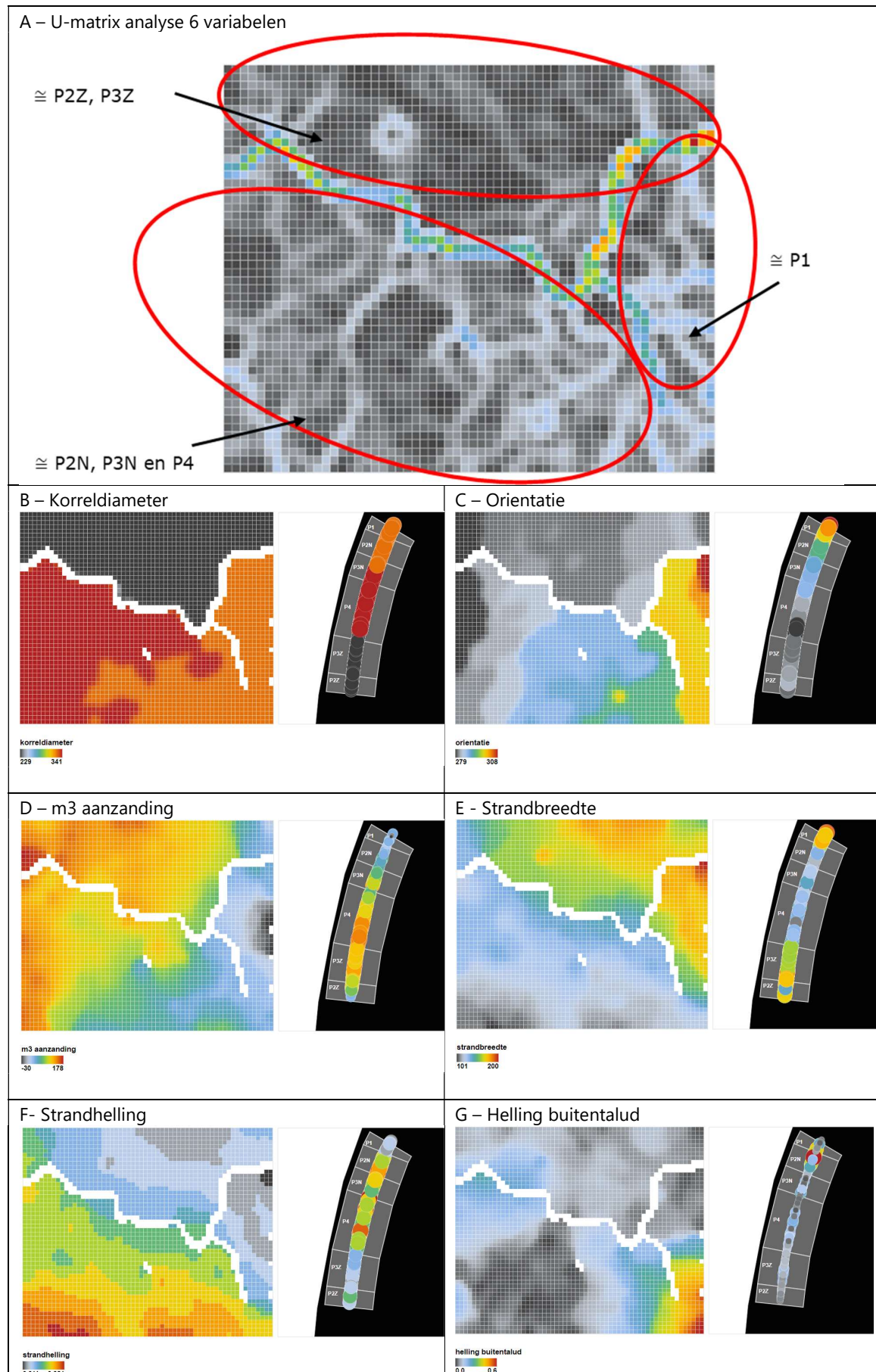


Op basis van de U-matrices van de analyse met 6 parameters (Afbeelding 5.7, links) zijn 3 clusters te onderscheiden. In de kohonenanalyse worden globaal de raaien van profieltype 1, profieltype 2Z en 3Z en profieltype 2N, 3N en 4 geclusterd (afbeelding 5.8A).

Onder de U-matrix van afbeelding 5.8 is de clustering die op basis van de U-matrix is bepaald per variabele weergegeven (B – G). De witte cellen vormen de scheiding tussen de clusters en de kleuren hangen samen met de waarden van de variabele en zijn terug te vinden op de HD (afgebeeld rechts van de matrix van elke variabele). Door de kleuren per deelvariabele (B-G) te vergelijken met de clustering in de U-matrix (A) krijgen we inzicht welke variabelen een relatief grote rol spelen in de clustering.

In dit geval is te zien dat de korreldiameter (B) een belangrijke variabele lijkt. De contour van de korreldiameter bij P2Z en P3Z is duidelijk zichtbaar. De oriëntatie (C) komt ook duidelijk terug. De rode en gele kleur bij de variabele oriëntatie hoort bij profieltype 1 en is een cluster in zijn eentje. Bij het volume aanzanding (D) is profieltype 1 ook terug te zien, op basis van de laagste waarden van aanzanding. De strandbreedte (E) en strandhelling (F) laten een minder duidelijke overeenkomst met de clustering zien. Bij de helling buitentalud (G) is de clustering eigenlijk helemaal niet terug te vinden in de variabele.

In de analyse waarbij de korreldiameter en oriëntatie niet zijn meegenomen is een minder duidelijke clustering zichtbaar (afbeelding 5.7, rechts). Hierbij wordt eigenlijk alleen P1 als apart cluster onderscheiden.



5.3.3 Conclusie

Op basis van de clusteranalyse waarin de indeling in profieltypen niet meegenomen is, is ook een clustering zichtbaar op basis van de variabelen die zijn gebruikt. In deze clustering wordt profieltype 1 als onderscheidend profieltype gezien. Verder zijn de profieltypes 2Z en 3Z in een cluster terecht gekomen, en P2N met P3N en P4 in een ander cluster. Dit verschil wordt met name gezien in de analyse van alle 6 variabelen. De korreldiameter in de profieltypen 2Z en 3Z is ook kleiner dan in overige profieltypen (zie paragraaf 2.2.4). Ook is de oriëntatie bij deze 2 profieltypen anders dan bij de andere profieltypen (zie volgende paragraaf). In de analyse bij 4 variabelen is een verschil te zien tussen deze profielen, maar deze is minder groot dan wanneer de korreldiameter en oriëntatie als variabelen ook zijn meegenomen. Op basis van deze analyse zijn de variabelen van oriëntatie, strandbreedte en korreldiameter relatief belangrijk voor de clustervorming.

Op basis van de voorgaande paragrafen en deze analyse wordt geconcludeerd dat vanuit de beschouwde factoren bezien het profieltype op zichzelf geen verklarende factor is voor de aanzanding in de HD. Op basis van alleen het profieltype kunnen geen uitspraken worden gedaan over de aanzanding. In de volgende paragraaf wordt voor verschillende parameters het effect onderzocht op de aanzanding. Bij de bespreking en in de afbeeldingen wordt nog wel de indeling in profieltypen gebruikt, aangezien het inzicht geeft in de variabelen op verschillende locaties van zuid naar noord in de HD.

5.4 Effect verschillende factoren op verstuiving en depositie HD

De mate van invloed van de verschillende factoren op de aanzanding in het duin is onderzocht. De volgende factoren zijn onderzocht:

- aanlegmoment;
- kustoriëntatie;
- strandbreedte;
- strijklengte;
- helling buitentalud;
- korreldiameter.

Deze factoren en hun invloed op de aanzanding in het duingebied worden in de deelhoofdstukken hieronder één voor één besproken. In veel van de afbeeldingen in dit hoofdstuk wordt de R²-waarde weergegeven. Deze waarde geeft de correlatie tussen de 2 variabelen in de afbeelding weer. In onze analyse is steeds de R² -waarde bepaald bij het veronderstellen van een lineair verband tussen de variabelen. Onderstaande box geeft een korte uitleg over de R²- waarde (MathWorks Support corrcoef, 2018; Wikipedia correlation coefficient, 2018).

R²-waarde

De R²-waarde wordt in deze studie bepaald als het kwadraat van de correlatie coëfficiënt. In Matlab is dit de uitkomst van de corrcoef-functie in het kwadraat. Een waarde van 0 geeft aan dat er geen verband is tussen de twee variabelen. Een waarde dichtbij 1 geeft aan dat er een verband is (positief of negatief) tussen de variabelen.

Als er geen correlatie is tussen de twee variabelen in de afbeelding, vermeerderen of verminderen de variabelen niet tegelijkertijd. Echter, de variabelen zijn dan niet per se onafhankelijk, ze kunnen ook een niet-lineair verband hebben.

5.4.1 Aanlegmoment

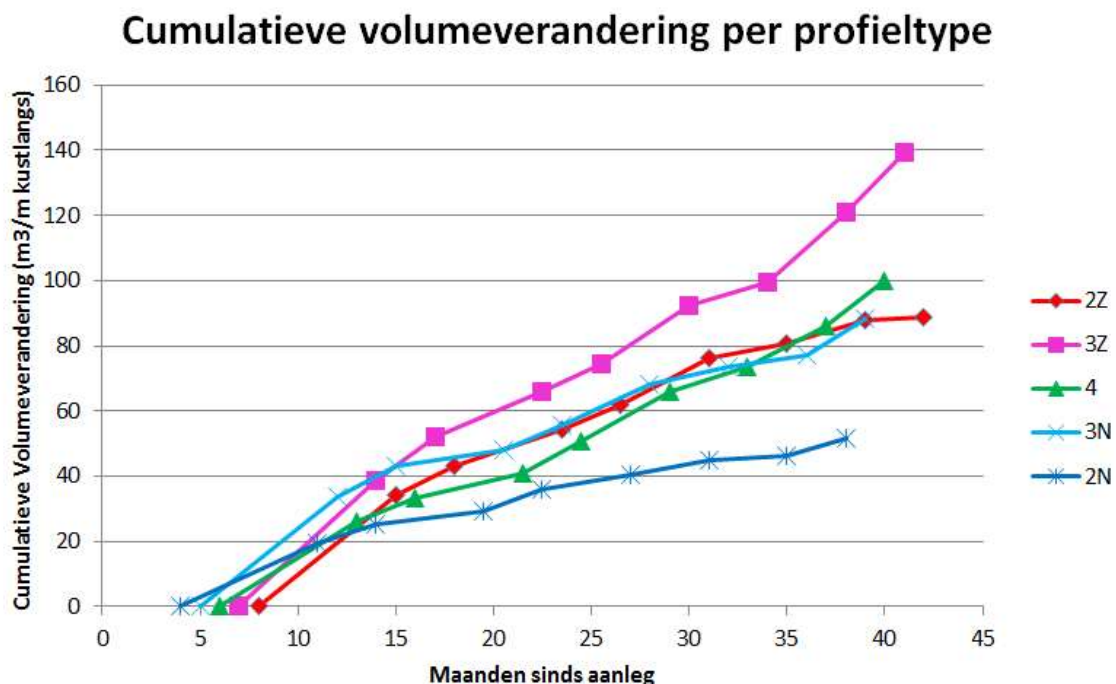
De Hondsbossche duinen zijn van het zuiden naar het noorden aangelegd. Dit betekent dat op moment van de eerste meting T1 (24-05-2015) de profieltypes een verschillende tijd bestonden. Het aanlegmoment per profieltype is in hoofdstuk 2 weergegeven.

Op basis van literatuur en ervaringen van eerdere suppleties is de hypothese dat het strand en duin meer aanzanding vertoont op het moment van aanleg en de periode direct daarna dan later in de tijd. Naarmate de tijd verstrijkt neemt de hoeveelheid sediment dat getransporteerd wordt af over de tijd. Daarom is bij de prognose van volumes van verstuiving en eolisch verlies in de eerste 3 jaren na aanleg rekening gehouden met meer verstuiving dan in de jaren daarna. In de periode direct na aanleg zijn nog geen stabiliserende planten aanwezig en ook het fijnste, makkelijkst transporteerbare sediment bevindt zich nog in het gebied.

Als het eerste meetmoment (T1) dicht op het aanlegmoment zit, dan is de verwachting dat meer aanzanding te zien is in de eerste gemeten tijdperiode (T1T2) dan als het profieltype al langere tijd aangelegd is op het moment van de eerste meting. Uit afbeelding 5.9 valt af te lezen dat het aanlegmoment van profieltype 3N en 2N het dichtst op de eerste meting van 24 mei 2015 zit.

Afbeelding 5.9 laat de gemiddelde cumulatieve volumeverandering per meter kustlangs zien per profieltype uitgezet tegen de maanden sinds aanleg. De punten op de lijn geven de verschillende meetmomenten T1 t/m T9 weer. Het eerste meetmoment T1 van profieltype 2N zit dus na een kleiner aantal maanden sinds aanleg (4) dan die van profieltype 2Z (8). Dit is ook de reden dat de monitoringsperiode sinds aanleg van profieltype 3Z een groter aantal maanden beslaat dan profieltype 3N.

Afbeelding 5.9 Gemiddelde cumulatieve volumeverandering per profieltype (m³/m kustlangs) t.o.v. maanden sinds aanleg



Dat de profieltypes die het laatst zijn aangelegd meer aanzanding vertonen in de eerste meetperiode (T1T2) komt niet naar voren uit afbeelding 5.9. Profieltype 2N heeft na de eerste meetperiode T2 (na 11 maanden) niet meer aanzanding in het duingebied dan de andere profieltypes. Sterker nog, profieltype 2N laat zelfs de laagste hoeveelheid aanzanding zien van alle profieltypes. In paragraaf 5.2.2 was dit ook al te zien.

Naast de aanleg van het profieltype is ook een belangrijk onderdeel van de aanleg de inplant van helm geweest. In paragraaf 2.4 is benoemd dat de inplant van helm in Profieltype 2Z, 3Z en 4 is gedaan in najaar

2014 en winter 2015. De profieltypes 3N, 2N en 1 zijn in de zomer (3N) en herfst (2N en 1) van 2015 ingeplant. Voor profieltype 2N en 1 waarschijnlijk net na het groeiseizoen van helm. Helm is een grassoort die snel kan groeien en goed tegen onderstuiven kan. Sterker nog, helm heeft ondersteuning nodig om goed te kunnen groeien. Daarmee bevordert helm de duinvorming en gaat de duinvorming sneller in gebieden met vitale helm dan minder vitale helm. In profieltypes 2N en 1 is op basis van veldobservaties te zien dat de helm minder vitaal is dan in de profieltypes 4, 3Z en 2Z. In profieltypes 2N en 1 wordt ook minder aanzanding waargenomen dan in de overige profieltypes (afbeelding 5.9). Of en de mate waarin de latere aanplant van helm in het seizoen bijgedragen heeft aan de mindere vitaliteit van de helm in profieltype 2N en 1 is moeilijk te bepalen. In ieder geval treedt er minder aanzanding op in de profieltypen met minder vitale helm.

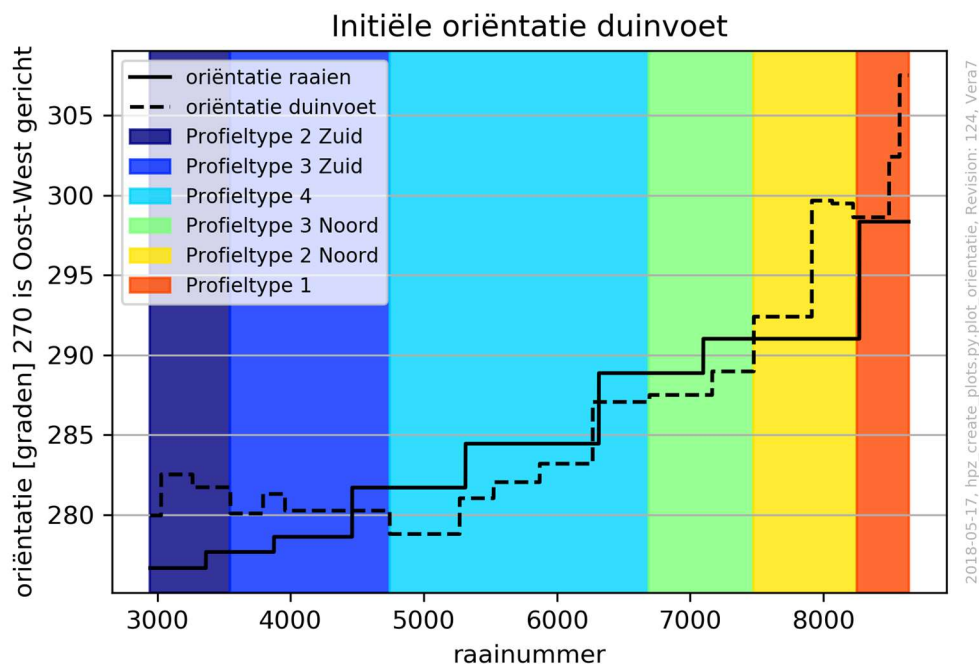
5.4.2 Kustoriëntatie

Tijdens de meetperiode van de HD was de dominante windrichting ~225 graden ten opzichte van het noorden (afbeelding 4.1). De verwachting is dat hoe dichterbij de oriëntatie van een raai bij de dominante windrichting in de buurt komt, hoe groter de aanzanding in het duingebied is. Dit komt doordat de kustdwarse component dan het grootst is waardoor het transport tegen het duin op sterker zal zijn.

De kustoriëntatie van de duinvoet van de HD is nergens gelijk aan de dominante windrichting van 225 graden. Dit komt door de vorm van de HD en de Hollandse kustlijn in het algemeen. De kustoriëntatie varieert van 280 graden in het zuiden (P2Z) tot 307,5 graden in het noorden (P1) (afbeelding 5.10).

De gedefinieerde raaien zijn kustdwars op de 0 m hoogtelijn van de HD getrokken. Hierbij is rekening gehouden met het snijden van raaien om dubbeltellingen te voorkomen. Hierbij is niet alleen naar het duin maar ook naar het strand gekeken. Door dit tweede criteria komt de oriëntatie van de duinvoet niet een op een overeen met de oriëntatie van de raaien, dit wordt getoond in afbeelding 5.10. Voor de accumulatie in het duin is de oriëntatie van de duinvoet bepalend dus deze wordt gehanteerd in onderstaande analyses.

Afbeelding 5.10 Initiële oriëntatie Hondsbossche Duinen, o.b.v. oriëntatie raaien en duinvoet



Om het belang van de kustoriëntatie te toetsen is de aanzanding van de profieltypes uitgezet tegen de oriëntatie (afbeelding 5.11A). Er is een duidelijke trend zichtbaar. Alleen profieltype 2Z lijkt buiten deze trend te vallen.

We kwantificeren deze trend door de R^2 te bepalen tussen de aanzanding en de windsnelheid in de kustdwarse richting (afbeelding 5.11B). Dit is gebaseerd op de gedachte dat de wind zand transporteert richting het duin waar sedimentatie van het zand plaatsvindt en dat de wind een transportcapaciteit heeft die door de kustoriëntatie wordt beïnvloed. De transportcapaciteit van wind is te beschouwen als de hoeveelheid sediment die de wind kan transporteren. De transportcapaciteit hangt niet alleen af van de eigenschappen van de wind, maar ook van de beschikbaarheid van zand. Als er voldoende zand beschikbaar is wordt de transportcapaciteit bepaald door eigenschappen van de wind en is de hoeveelheid aanzanding transport gelimiteerd. In het geval van een beperkte beschikbaarheid aan zand, wordt de transportcapaciteit niet meer beïnvloed door de wind (Hoonhout, 2017). De situatie is dan aanvoer gelimiteerd.

Er zijn verschillende zandtransportformules beschikbaar voor het bepalen van de transportcapaciteit. De meeste transportformules gaan ervanuit dat er voldoende sediment beschikbaar is voor transport en beschrijven een relatie tussen de hoeveelheid zandtransport en parameters als schuifspanning en luchtdichtheid. Deze formules zijn gebaseerd op de basisformule van Bagnold. Er zijn ook een aantal formules die de relatie tussen sedimenttransport en windsnelheid beschrijven, zoals de formule van O'Brien en Rindlaub (1938, uit Leenders, (2006)):

$$Q = C_1 \cdot (\rho/g) \cdot u^3,$$

Waarin:

C_1 = Constante

ρ = Luchtdichtheid [kg/m^3]

g = Gravitatieversnelling [m/s^2]

u = Windsnelheid [m/s]

Op basis van de meteorologische gegevens is de dominante windrichting (i.e. de windrichting die het meest voorkomt) en de gemiddelde windsnelheid in deze windrichting bepaald over de monitoringperiode. Hiervan is de dwarscomponent ten opzichte van de duinvoet bepaald. Deze is uitgezet tegen het aanzandingsvolume. Dit is gedaan per 100 m, de aanzanding en duinvoet oriëntatie is gemiddeld over 100 raaien. Het resultaat is een correlatiecoëfficiënt van 0.84. Dit wordt beschouwd als een goede correlatie.

Een dergelijke analyse als hierboven beschreven is ook gedaan door dr. Jasper Donker. Op basis van de gemeten wind en de Bagnold transportformule voor eolisch transport heeft hij de potentiële transportcapaciteit aan de duinvoet dwars op het duin bepaald met behulp van de transportformule van Bagnold (1954), zie afbeelding 5.11C¹. Hieruit volgt dat het verschil in kustoriëntatie tussen het zuiden het noorden een deel van het verschil in aangroei volume kan verklaren, omdat de potentiële transportcapaciteit het duin in lager is in het noorden dan in het zuiden.

De kustoriëntatie lijkt dus invloedrijk voor de aanzanding in het duin waarmee de reeds benoemde afnemende trend in de duinaangroei - zoals beschreven in paragraaf 4.4 en III.1 - deels wordt verklaard.

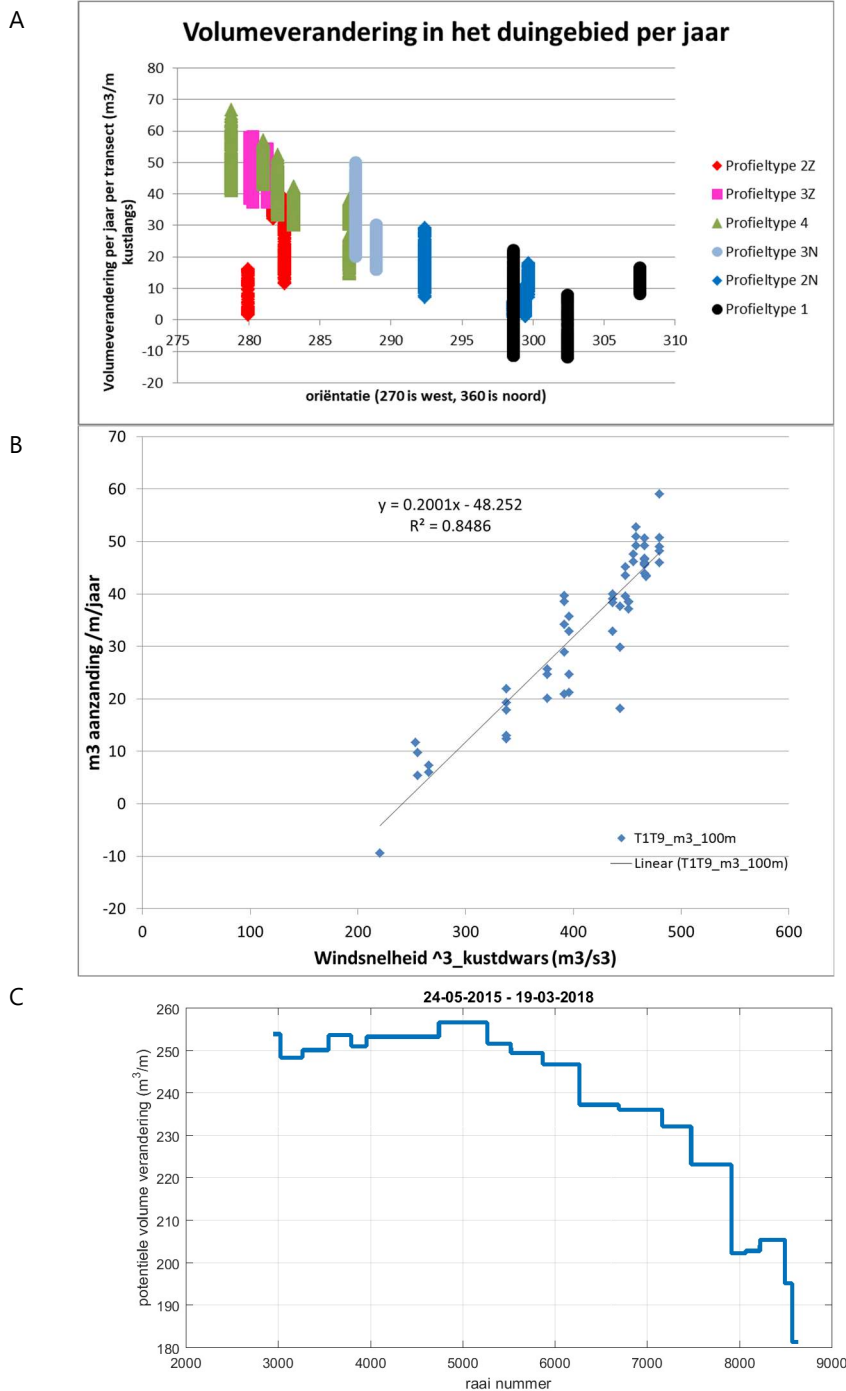
Vanuit deze beschouwing verder redenerend, zou een grotere kustdwarse wind-component in de duinen ten noorden van de HD, waar de kustlijn weer wat afbuigt, moeten leiden tot meer aanzanding in dat gebied. Uit de metingen blijkt inderdaad dat ten noorden van de Hondsbossche Duinen meer aangroei optreedt dan in het noordelijk deel van de HD zelf (afbeelding 4.5).

¹ Dank aan dr. Jasper Donker (Universiteit Utrecht).

Afbeelding 5.11 A) Volumeverandering bij verschillende oriëntatie per profieltype

B) Volumeverandering per 100 m over de HD ten opzichte van oriëntatie (uitgedrukt in windsnelheid 3)

C) Potentiële volumeverandering over de gehele meetperiode op basis van de gemeten wind volgens Bagnold, uitgezet tegen kustoriëntatie



5.4.3 Strand en intergetijdengebied

Strandbreedte

De strandbreedte is bepaald op de raaien (dwars op de kust) door de afstand te bepalen tussen de hoogte van 0,84 m+NAP en 3,0 m+NAP. De aangelegde strandbreedtes (afbeelding 5.13A) zijn ongeveer een factor 2 tot 3 breder aangelegd dan de in de VSE (2013) gestelde eis van een minimale breedte van 50 m in de recreatiezone voor het droog strand.

De breedte van het strand bij de HD neemt flink af over de meetperiode (afbeelding 5.13B). Dit is met name het geval in profieltype 2Z. Met name de benedengrens van het strand gelegen op NAP +0,84 m verschuift landwaarts in de tijd. Kustdwarse breedte wordt 'verloren' aan het intergetijdengebied. De duinen (gebied boven NAP +3 m) breiden zich in zeewaartse richting uit op enkele locaties. Rond de 3 m NAP lijn is er sprake van embryonale duinvorming. Ter illustratie is in afbeelding 5.12 de verplaatsing van de begrenzing over de meetperiode zichtbaar voor profieltype 2N. Te zien is dat de lijn met 0,84 m+NAP zich landwaarts verplaatst en de lijn met 3,0 m+NAP zeewaarts. De afbeeldingen voor de overige profieltypes zijn opgenomen in de bijlage B. De afbeeldingen zijn gemaakt voor meetmoment T8, omdat tijdens T9 een strandsuppletie heeft plaatsgevonden die de 0,84 m lijn beïnvloedt. Dit geldt vooral voor profieltype 2Z.

Afbeelding 5.13 geeft de verandering in strandbreedte over de tijd weer. Met name in profieltype 2Z is er een forse afname van de strandbreedte. Bij meetperiode T8 is de mediane waarde van de strandbreedte 45 m. Dit is minder dan de in de VSE [2013] gestelde eis van een minimale breedte van 50 m in de recreatiezone voor het droog strand. In maart 2018 heeft bij profieltype 2Z ook een strandsuppletie plaatsgevonden (zie paragraaf 2.5.2). In afbeelding 5.4 is te zien dat bij profieltype 2Z in periode T7T8 en T8T9 de aanzanding afwijkt van de andere profieltypes, terwijl dit in de eerdere meetperioden niet (of in ieder geval minder) het geval is. In afbeelding 5.11A was te zien dat profieltype 2Z afwijkt van de zichtbare trend tussen kustoriëntatie en aanzanding: Volgens de trend zou op basis van de kust oriëntatie bij profieltype 2Z er meer aanzanding in het duin bij profieltype 2Z te verwachten zijn dan is gemeten. Aangezien juist bij profieltype 2Z de strandbreedte aan het eind van de meetperiode het smalst is, is bij profieltype 2Z aan het eind van de meetperiode mogelijk de situatie ontstaan dat de sedimentbeschikbaarheid beperkend is geworden voor aanzanding. Door het smallere strand is er minder sediment beschikbaar en vindt er minder aanzanding in het duin plaats vindt. Voor profieltype 3Z is de strandbreedte tegen het eind van de meetperiode het grootst (afbeelding 5.13C). In dit profieltype wordt gemiddeld gezien ook de grootste aanzanding gemeten.

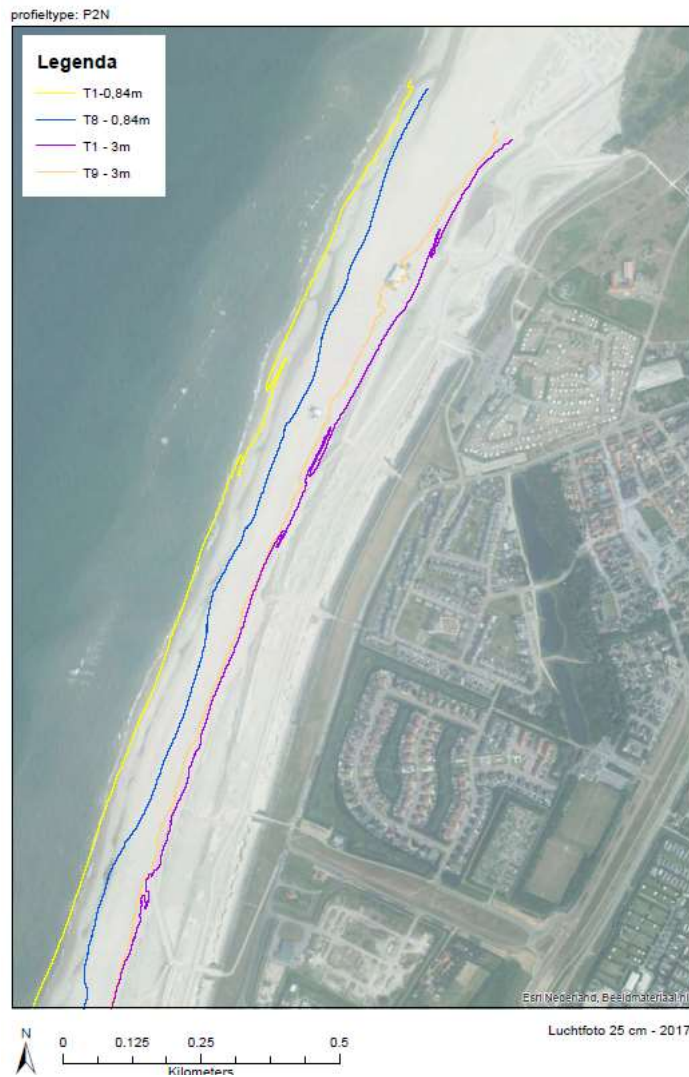
Deze bevindingen komen overeen met literatuur waarin is aangetoond dat bredere stranden leiden tot sneller groeiende duinen (Rauwoens et al., 2018), maar betreffen enkele observaties. Als de volumeverandering van het duin van de HD over de meetperiode (24-05-2015 tot 19-03-2018) uitgezet wordt tegen de initiële strandbreedte per raai is geen duidelijk verband te zien tussen de strandbreedte en de volumeverandering van het duin (afbeelding 5.14). In deze afbeelding is de strandbreedte steeds op de eerste tijdstap bepaald en de volumeverandering bepaald voor het duingebied ($> 3 \text{ m} + \text{NAP}$ hoogte) per meter kustlangs. Een flinke spreiding op strandbreedte en volumeverandering is zichtbaar binnen de profieltypes. Een mogelijke verklaring voor het niet zien van een duidelijk verband is dat er zo kort na de aanleg van de HD zoveel zand beschikbaar is voor aanzanding van het duin, dat deze niet limiterend is voor de aangroei van het duin. We merken op dat de strandbreedte bij aanleg van de HD relatief breed is ten opzichte van de strandbreedtes van droog strand langs de kust van Noord en Zuid-Holland. Deze is ca 50 m (op basis van Decisio, 2011). Als de analyse breder wordt getrokken naar de gehele Noord Hollandse kust of kustlijn van Noord en Zuid-Holland, is mogelijk een ander beeld van deze relatie te zien. Immers is er bij de HD in de meetperiode van mei 2015 tot maart 2018 sprake van brede stranden en relatief veel aanzanding in vergelijking met een gemiddelde van de Nederlandse kust. De gemiddelde breedte van droog strand langs de kust van Noord- en Zuid-Holland is ca. 50 m (Decisio, 2011). De gemiddelde netto groei van duin (inclusief effect van duinafslag) voor de Nederlandse kust bedraagt $8,7 \text{ m}^3/\text{m}$ per jaar (gebaseerd op analyses van de Vries (2012) en van der Wal (2004)).

In hoofdstuk 4 hebben we ook opgemerkt dat de aanlegprofielen binnen de profieltypes kunnen verschillen. Daarom is er in deze studie voor gekozen om ook van ieder profieltype de middelste 200 raaien (200 m kustlangs) te bekijken omdat deze het oorspronkelijke aanlegprofiel het best representeren. Als alleen de middelste 200 raaien geplot worden per profieltype en profieltype 1 uit de analyse laten vanwege grote erosie van het uitkijksduin resulteert dit in afbeelding 5.15. In deze afbeelding is een duidelijker verband te zien tussen strandbreedte en aanzanding (volumeverandering) dan in afbeelding 5.14, maar het verband is nog niet sterk te noemen.

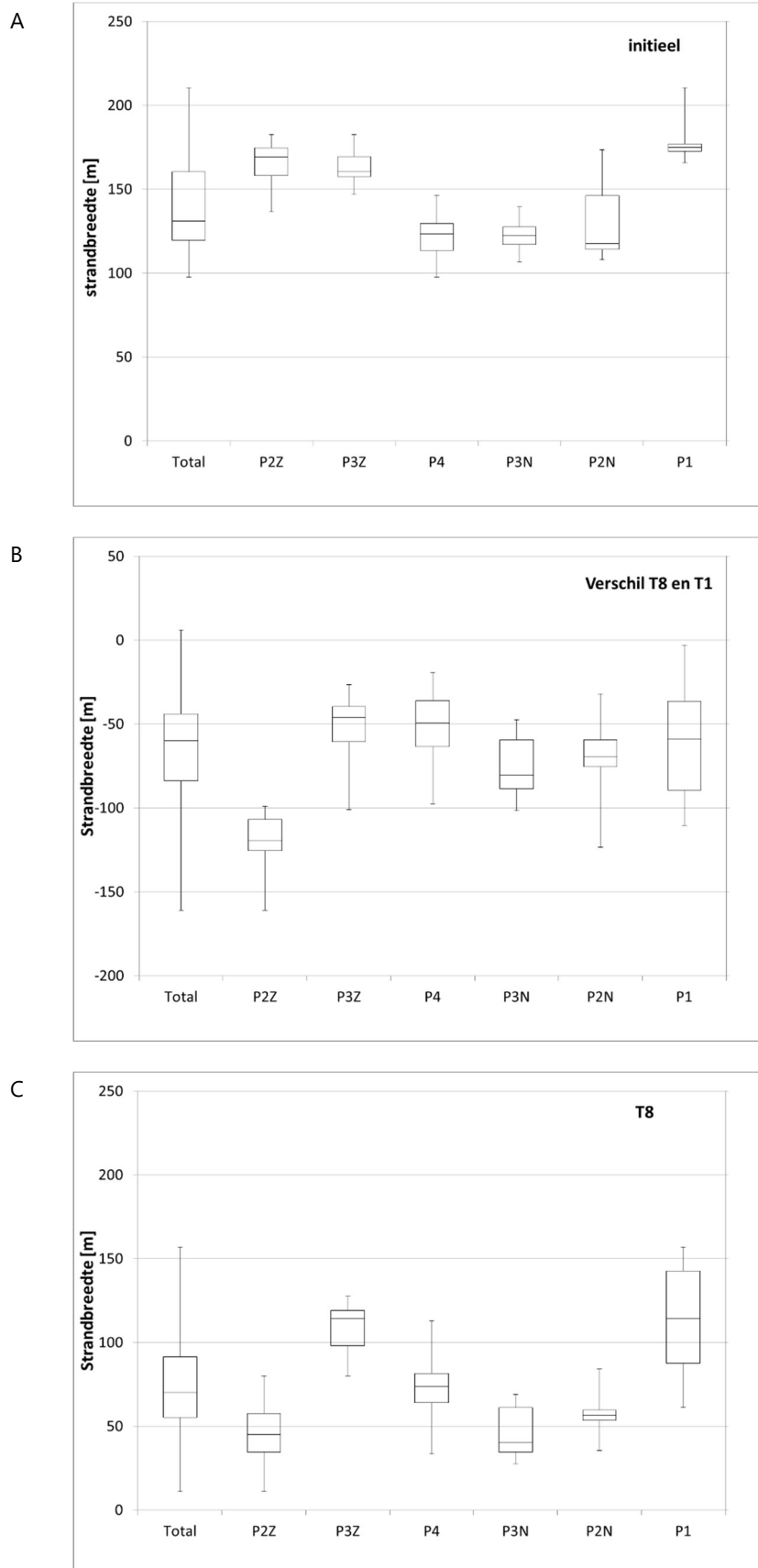
De meest voorkomende windrichting in Nederland is zuidwest. De kustdwarse oriëntatie van de HD is west tot noordwest. De strijklengte is daarom een groot deel van de tijd niet gelijk aan de strandbreedte, zoals hierboven gedefinieerd. Daarom is ook een analyse gedaan op de strijklengte over het strand bij

verschillende windrichtingen. Deze analyse is opgenomen in bijlage VI, maar laat geen correlatie zien tussen de strijklengte bij de dominante windrichting en de aanzanding. Een mogelijke verklaring voor het niet vinden van een duidelijke correlatie tussen strandbreedte, gezien vanuit de strijklengte is dat de strandbreedte in strijklengte dusdanig van lengte is dat deze niet limiterend is voor de aangroei van het duin, waardoor een relatie tussen deze parameters niet zichtbaar wordt.

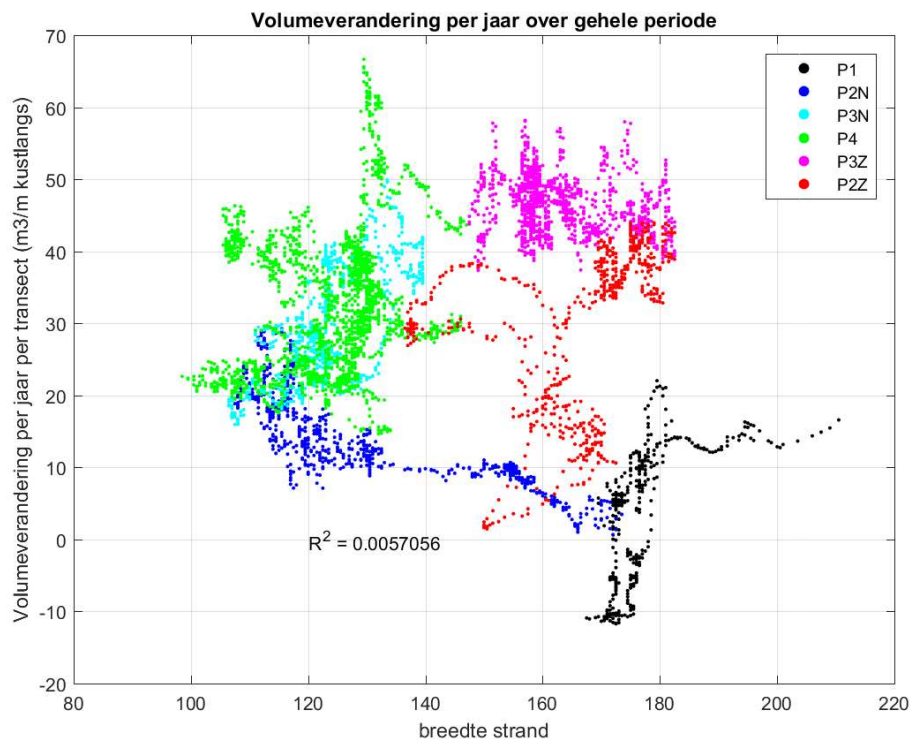
Afbeelding 5.12 Ontwikkeling strandbreedte over de meetperiode voor profieltype 2N



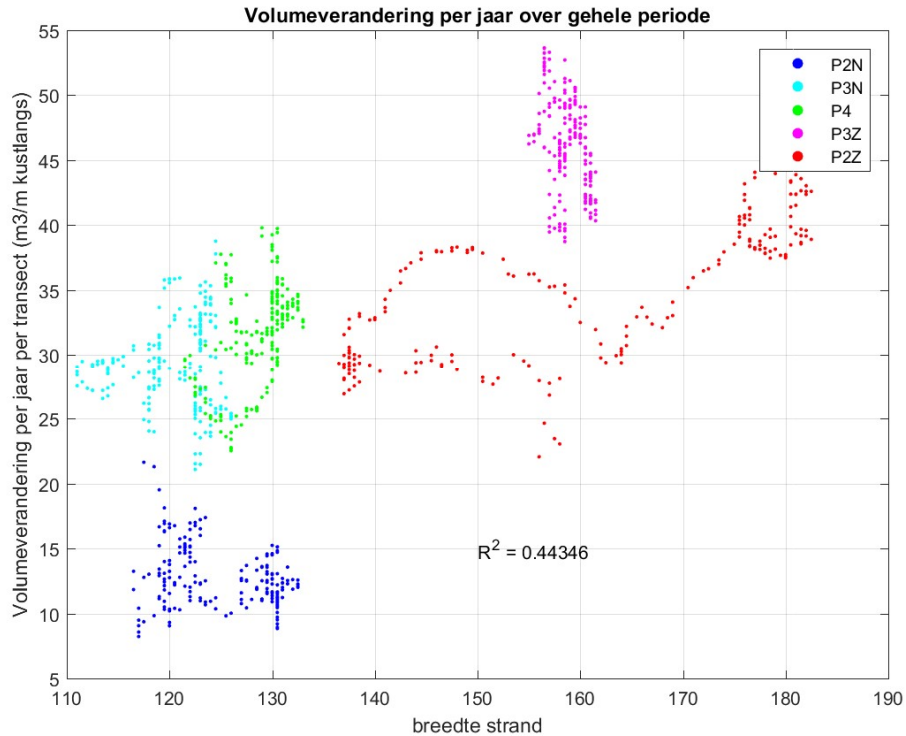
Afbeelding 5.13 Verandering van strandbreedte over de tijd



Afbeelding 5.14 Volumeverandering tussen T1 & T9 (m3/m kustlangs) voor alle profieltypes uitgezet tegen strandbreedte op T1



Afbeelding 5.15 Volumeverandering tussen T1 & T9 (m3/m kustlangs) voor alle middelste 200 transecten van de profieltypes uitgezet tegen strandbreedte op T1 zonder profieltype 1



Intergetijdengebied

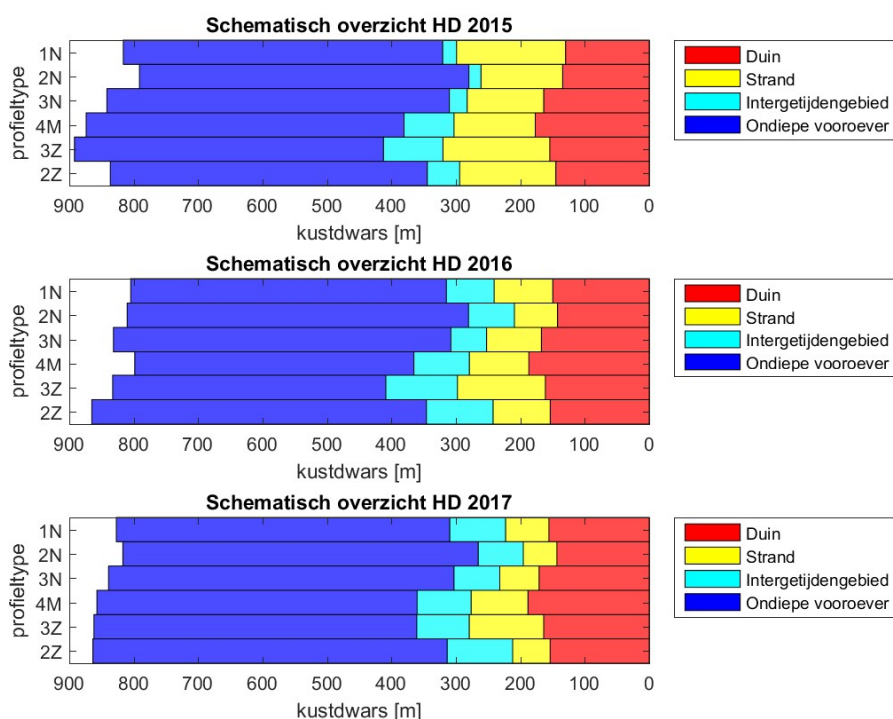
De beschikbaarheid van zand wordt naast eolische- ook beïnvloed door mariene processen. Het intergetijdengebied wordt als een belangrijke schakel gezien in de aanvoer van zand naar het duin (Hoonhout en de Vries, 2017b). Onder invloed van het astronomisch getij wordt het gebied omgewoeld door golven. De grotere zandkorrels en schelpen die het fijne zand ter plaatsen hebben gehouden, verplaatsen zich. Hierdoor komt het fijne zand weer aan het oppervlak te liggen. Bij laag water kunnen deze korrels door de wind worden getransporteerd richting het strand en duin. De samenhang van het intergetijdengebied (NAP -0,84 m tot NAP +0,84 m) op de duinvorming is door een stagiair van de TU Delft onderzocht op basis van metingen van Jarkusraaien in 2015, 2016 en 2017 (Van Maanen, 2018). In deze paragraaf zijn de bevindingen van zijn stage opgenomen.

Kustlangs gezien liggen de Jarkusraaien relatief ver van elkaar verwijderd. Hoewel er verschillen zijn tussen de datasets van Jarkus en de Lidardata die binnen dit monitoringsproject zijn gemeten qua resolutie van metingen en frequentie van metingen is de trend van aanzanding en strandbreedte, zoals gezien in de LiDAR metingen ook bij de Jarkusraaien terug te zien.

Afbeelding 5.16 geeft een schematisch overzicht van de breedtes van de zones van het duin (zone vanaf 3,0m+NAP tot oude HPZ), het strand (zone tussen 0,84 m+NAP en 3,0 m+NAP), het intergetijdengebied (zone tussen -0,84m+NAP en 0,84m+NAP), en de ondiepe vooroever. (zone tussen -0,84 m+NAP en -7,0 m+NAP) op basis van Jarkusraaimetingen uit 2015, 2016 en 2017. Kort na aanleg van de HD (meetmoment 2015) is er een duidelijk verschil te zien in de breedte van het intergetijdengebied tussen noord en zuid. In profieltype 3Z en 2Z is deze significant breder dan in het noorden. Dit is opmerkelijk gezien profieltype 2 en 3 gelegen zijn in het zuiden en noorden. Op basis van profieltype zou dit verschil dus niet direct worden verwacht.

Het overzicht van 2016 en 2017 geeft een duidelijke verandering weer van de breedtes van de verschillende zones in vergelijking met 2015. De breedte van het duin is in elk profieltype toegenomen. De breedte van het strand neemt over het gehele gebied af. De breedte van het intergetijdengebied neemt over het gehele gebied toe.

Afbeelding 5.16 Schematisch overzicht breedte zones van duin

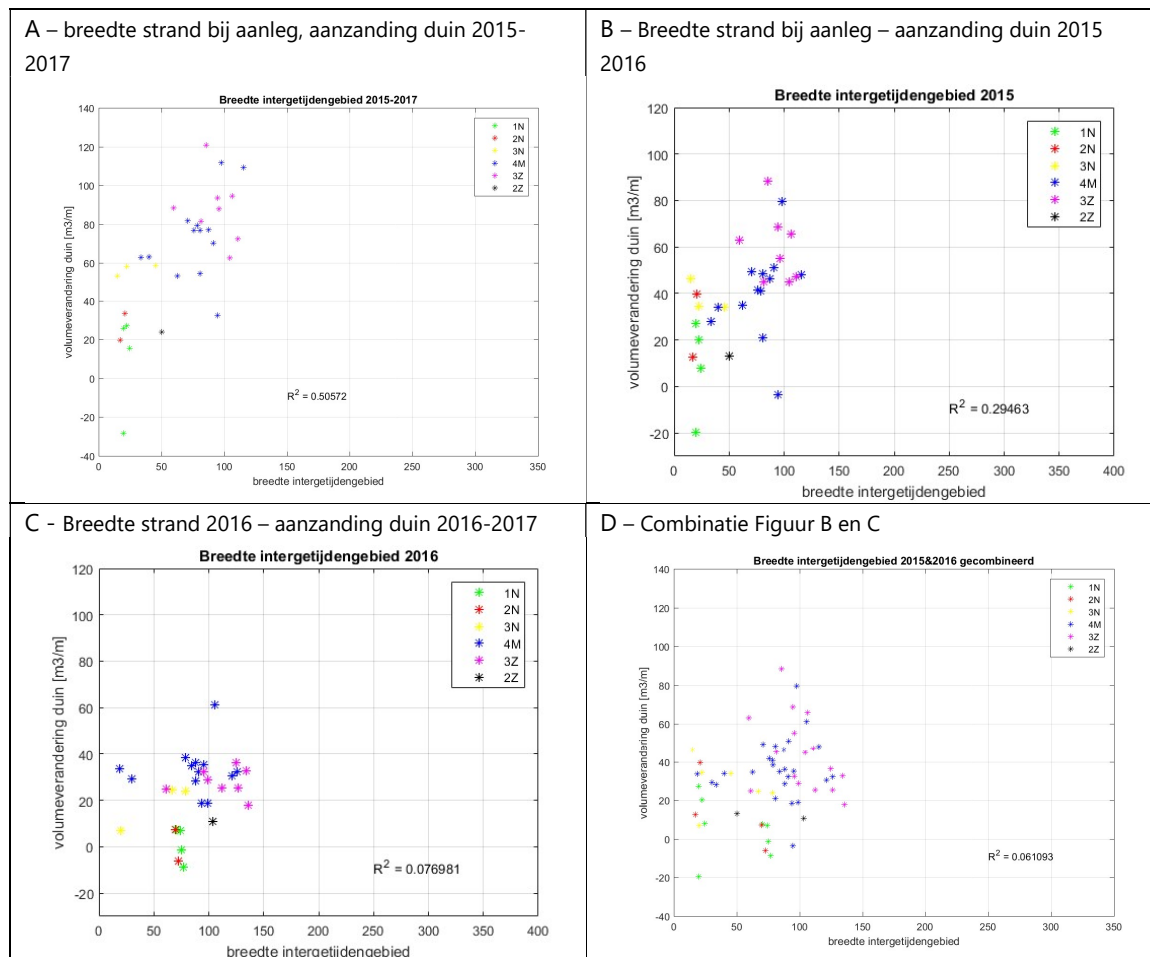


Op basis van de Jarkusraaien binnen de HD is er geen relatie tussen de breedte van het strand en de aanzanding in het duin (de R^2 -waarde tussen deze variabelen is kleiner dan 0.15).

Afbeelding 5.17 toont scatterplots waarin de breedte van het intergetijdengebied is uitgezet tegen de aanzanding van het duin voor verschillende situaties. De R^2 -waarde tussen de variabelen van breedte van het intergetijdengebied bij aanleg en de aanzanding van duin tot 2017 is 0,51. Dit is de grootste R^2 -waarde uit de analyse. In het eerste jaar na aanleg is deze R^2 0.29 (afbeelding 5.17B), in het tweede jaar is deze 0.08 (afbeelding 5.17C). Combinatie van jaar 1 en jaar 2 als afzonderlijke jaren geeft een R^2 van 0.06.

De resultaten geven geen eenduidig beeld van de relatie tussen de breedte van het intergetijdengebied en aanzanding. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat zo kort na de aanleg van de HD er nog geen evenwichtspatroon heeft ingesteld en dat er sprake is van veel kustlangse mariene processen in het intergetijdengebied. We merken ook op dat het studiegebied mogelijk te klein is en de meetreeks te kort en grof om dergelijke trends te ontdekken.

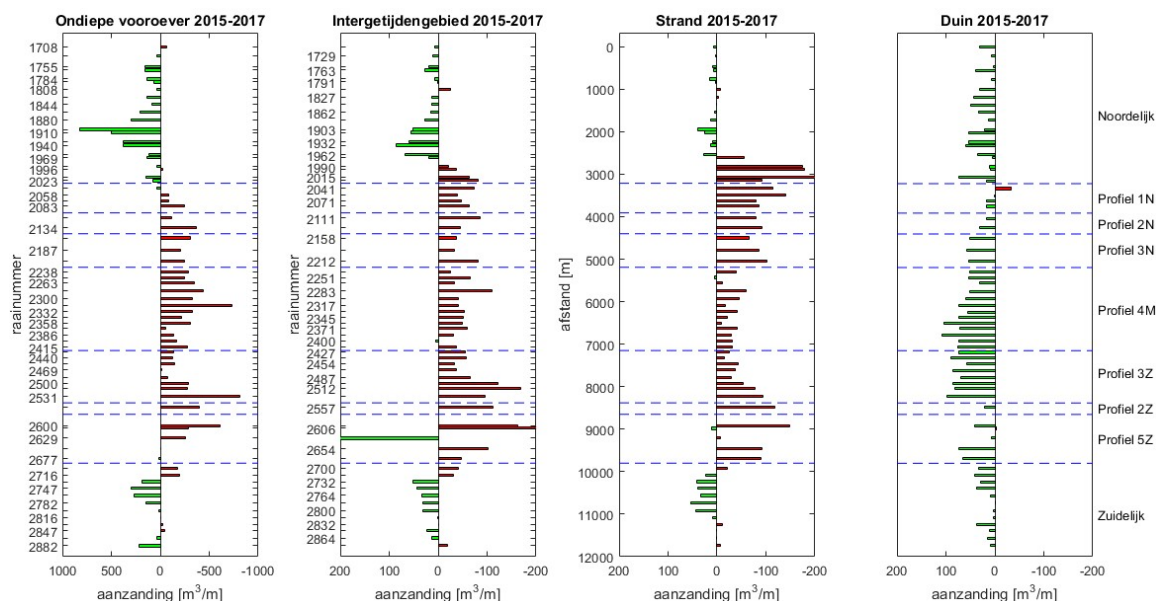
Afbeelding 5.17 Scatterplot breedte intergetijdengebied (2015) versus volumeverandering van het duin



Afbeelding 5.18 geeft de volumeverandering van de ondiepe vooroever, intergetijdengebied, strand en duin op basis van Jarkusraaien over de periode 2015 – 2017. De begrenzing van de HD en profieltypen is met blauwe stippellijnen weergegeven. In de volumeverandering van het duin is dezelfde trend zichtbaar als in de LiDAR metingen van het monitoring project. In het zuidelijke gedeelte van de HD (profiel 3Z en 4) vindt meer aanzanding van het duin plaats dan in het noordelijke gedeelte van de HD (profiel 3N en 2N). Uitzondering hierop is profieltype 2Z. De aanzanding van het duin op basis van Jarkusraaimetingen is 33 m³/m/jaar kustlangs en komt overeen met de resultaten van het monitoringsprogramma.

Afbeelding 5.18 laat zien dat in de ondiepe vooroever, het intergetijdengebied en het strand volumeverlies op is getreden. Het volumeverlies in het dwarsprofiel over de HD, is voor de ondiepe vooroever, het intergetijdengebied en het strand groter dan het aanzandingsvolume van het duin. Hieruit concluderen we dat deze gebieden ook volume verliezen richting noorden en zuiden door middel van langstransport. In het gebied 2km ten zuiden en 3km ten noorden van de HD, vindt netto aanzanding plaats in alle zones. De hoeveelheid compenseert echter niet voor de verliezen in de zones van de ondiepe vooroever, intergetijdengebied en strand langs de HD.

Afbeelding 5.18 Volumeverandering van ondiepe vooroever, intergetijdengebied, strand en duin op basis van Jarkusraaien over de periode 2015 – 2017

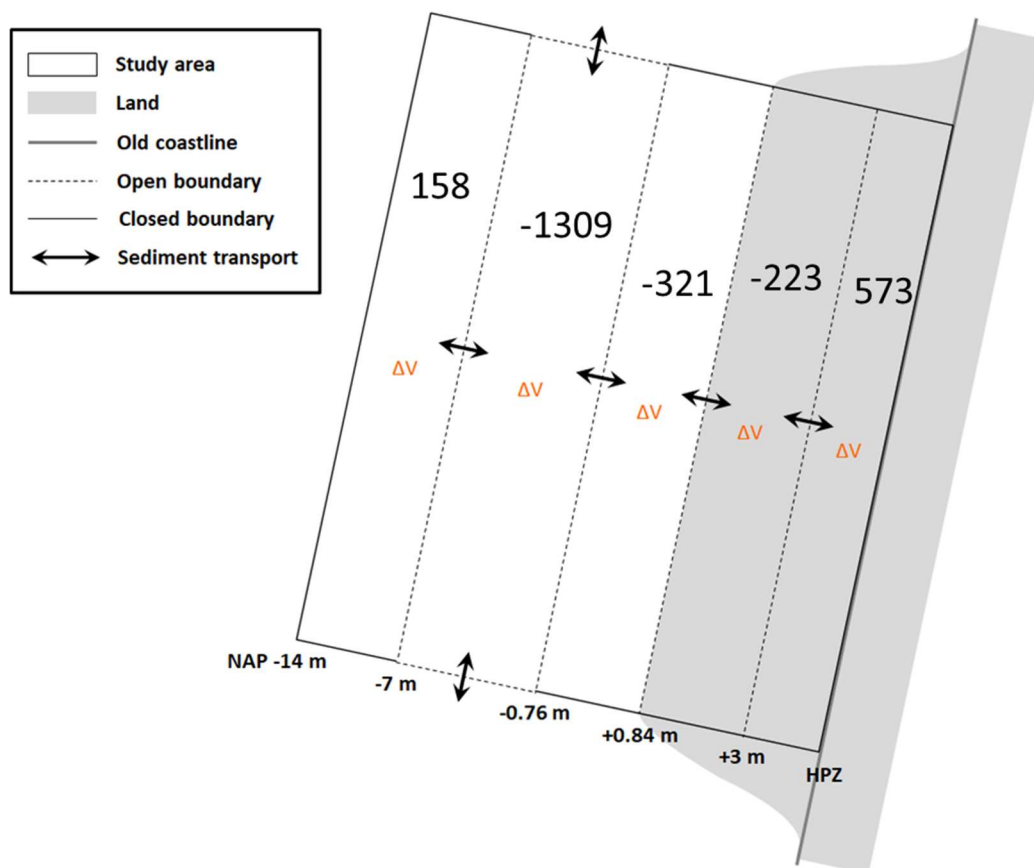


Op basis van de volumeanalyse op dwarsprofielen van Jarkusraaien is de totale volumebalans voor de HD opgenomen in tabel 5.1 en afbeelding 5.19. De getallen zijn iets anders dan de getallen gepresenteerd in paragraaf 4.3 door een verschillende wijze van berekenen. De volumebalans is niet sluitend en laat zien dat er netto een volumeafname van ongeveer 1,1 Mm³ optreedt uit het gebied tussen de -14 m+NAP dieptecontour en de oude zeedijk van de HPZ. Dit verlies treedt op als gevolg van langstransport naar gebieden ten noorden en ten zuiden van het studiegebied, zoals deels is terug te zien in de metingen van de Jarkusraaien (afbeelding 5.18). Het totale aangroei-volume in de duinen is ongeveer 1/3 van de verliezen onder water en op het strand.

Tabel 5.1 Volumeverandering (afgerond op 1000 m3) per profieltype van ondiepe vooroever, intergetijdengebied, strand en duin op basis van Jarkusraaien over de periode 2015 – 2017 (Bron, Pak, 2018)

Profieltype	Ondiepe vooroever	Intergetijdengebied	Strand	Duin
2N	-130	-49	-47	41
3N	-179	-27	-61	70
4	-496	-81	-29	238
3Z	-226	-104	-13	169
2Z	-200	-46	-72	55
Total	-1,309	-320	-223	573

Afbeelding 5.19 Totaal volumeverandering (in 1000 m³) van ondiepe vooroever, intergetijdengebied, strand en duin op basis van Jarkusraaien over de periode 2015 – 2017 (Bron, Pak, 2018)



Uit de analyse van volumes op basis van Lidar gegevens (paragraaf 4.3.1) en de analyse van de Jarkusraaien blijkt dat de netto volumeafname op het strand ongeveer 40-45 % bedraagt van de volumetoename in het duin. Hieruit wordt geconcludeerd dat het overige volume uit het intergetijdengebied moet komen en dat het intergetijdengebied een belangrijke bron van sediment vormt voor de aanzanding van het duin.

Uit een onderzoek naar de Zandmotor is gebleken dat 58 % van het totaal wind gedreven zandtransport, afkomstig is uit het intergetijdengebied. Het droge strand draagt de overige 42 % bij. Dit is opmerkelijk gezien het intergetijdengebied 40 %-60 % smaller is dan het droge strand. Daarnaast wordt het intergetijdengebied periodiek minder blootgesteld aan de wind. Het astronomisch getij zorgt namelijk voor een periodieke wisseling van de waterstand. Het intergetijdengebied komt daardoor periodiek onderwater te staan, waardoor de wind geen zandtransport kan initiëren. Hoonhout en de Vries (2017) concluderen op basis van deze gegevens dat het intergetijdengebied een belangrijke factor is in de aanvoer van zand.

In dit project constateren we ook dat het intergetijdengebied een belangrijke bron van zand is, waarbij wordt geconstateerd dat dit zich in het studiegebied niet uit in een relatie tussen de breedte van het intergetijdengebied en de mate van aangroei van de duinen. Op basis van de resultaten kan echter ook niet worden geconcludeerd dat deze relatie er niet is. Daarvoor is de monitoring periode te kort en de gegevens op basis waarvan de analyse is gedaan te grof.

We merken op dat het gebruik van Jarkusraaien voor het intergetijdengebied beperkingen heeft. Het intergetijdengebied en de ondiepe vooroever zijn zones met veel dynamiek. Op basis van een jaarlijkse meting over een periode van 2 jaar is het lastig om een trend of algemene ontwikkeling te zien. De jaarlijkse kustmeting wordt uitgevoerd met vaar- en vliegtuigen. Het vliegtuig is uitgerust met Lidar-techniek welke de morfologie van het droge strand en het duin vastlegt. De boten zijn uitgerust met Sonar-techniek, welke de

morfologie onderwater vastlegt. Door de beperkingen van de boot (afmetingen - diepteligging) en de Lidar-techniek, kan er geen data worden ingewonnen van het intergetijdengebied. Deze data wordt daarom geïnterpoleerd tussen de 2 datasets. Hierdoor ontstaat er een onzekerheid in de data van het intergetijdengebied. Deze onzekerheid heeft invloed op de resultaten.

Voor toekomstige zandige kustversterkingen waarbij de relatie tussen het onderzoek moet worden gedaan naar het intergetijdengebied, is een geschikt monitoringsprogramma nodig.

5.4.4 Helling buitentalud

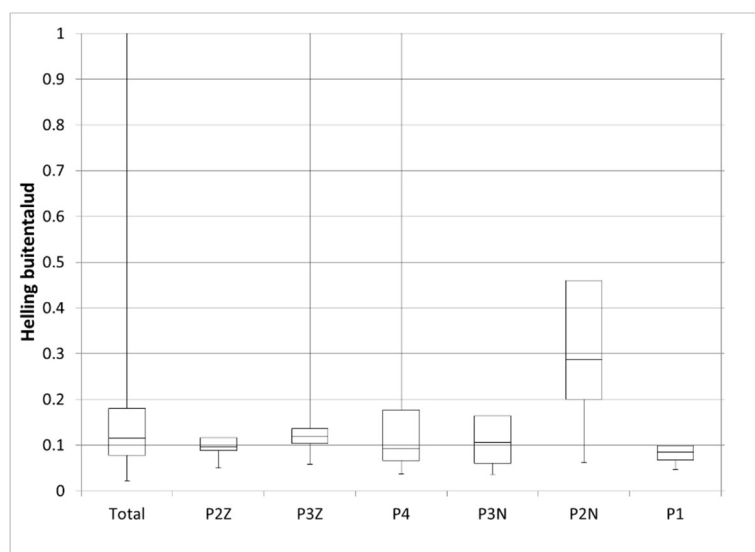
De helling van het (lage) buitentalud van het duin verandert over de tijd. Bovendien is het vanwege dips in het buitentalud veranderlijk over welke hoogte de helling van het buitentalud het beste bepaald kan worden. De locatie van het buitentalud is per profieltype bepaald en ingeschat in GIS op basis van expert judgement.

Tabel 5.2 De waarden waartussen het buitentalud bepaald is voor de verschillende profieltypes

Profieltype	(stabele) Buitentalud locatie
1	3 - 4 m
2N	4 - 6 m
3N	3 - 4 m
4	3 - 4 m
3Z	3 - 4m
2Z	3 - 6 m
5	3 - 4m

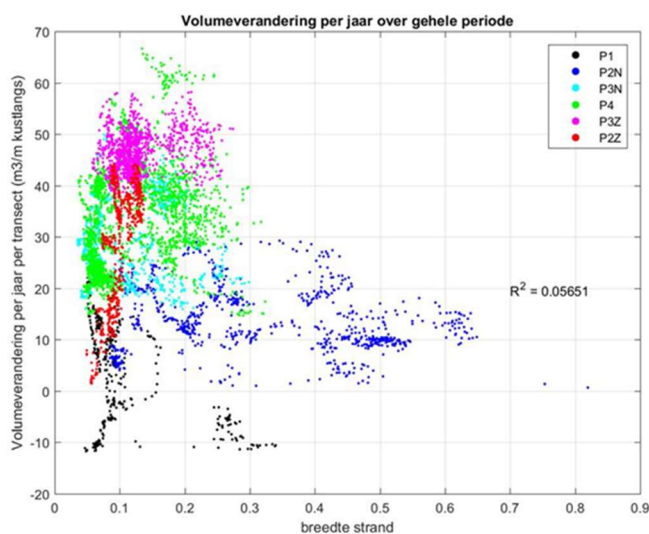
De helling van het buitentalud is bepaald door per transect de hoogteverandering tussen de 2 waardes in tabel 5.2 te delen door de kustdwarse afstand tussen deze 2 punten. In afbeelding 5.20 is de helling van het buitentalud van de verschillende profieltypes weergegeven bij aanleg. Hieruit blijkt dat alleen profieltype 2N een significant andere helling van het buitentalud heeft dan de andere profieltypes.

Afbeelding 5.20 Helling buitentalud voor de verschillende profieltypes



Tussen de volumeverandering van het duin van de HD over de meetperiode (24-05-2015 tot 19-03-2018) en de helling van het buitentalud bij aanleg is geen verband te zien (afbeelding 5.21). Aangezien er op basis van afbeelding 5.20 geen significante verschillen lijken te zijn tussen de helling van het buitentalud en de profieltypes (met uitzondering van profieltype 2N) is dit te verklaren. In bijlage VII zijn figuren van deze analyse per meetperiode opgenomen. Geen van de meetperiodes toont enig verband tussen de helling van het buitentalud en de volumeverandering. (bijlage VII). De helling van het buitentalud lijkt daarom niet bepalend voor de volumeverandering voor de grootschalige geometrie. Lokaal zou een verandering in buitentalud wel tot verschillen in verstuing kunnen leiden, maar dit zijn dan lokale effecten die niet direct terug te vinden zijn in de analyse voor grootschalige geometrie zoals in dit hoofdstuk toegepast.

Afbeelding 5.21 Scatterplot helling buitentalud en volumeverandering duin (m3/m/jaar)



5.4.5 Korreldiameter

In hoofdstuk 2 is de geografische variatie van de korreldiameter (D_{50}) weergegeven. Bij het uitsluiten van profieltype 1 en 5 uit de analyses zijn er 3 verschillende korreldiameters in het interessegebied gemeten. In de multivariate analyse is de korreldiameter wel als variabele meegenomen maar vanwege de zeer beperkte data van de korreldiameter kunnen we op deze parameter geen relevante analyse uitvoeren. Wel kan in het algemeen gesteld worden dat de korreldiameter in het noorden van de HD groter is dan in het zuiden. Dit zou mogelijk een (deel) van de verklaring kunnen zijn voor de afnemende aanzanding richting het noorden vanaf profieltype 4.

5.5 Samenvatting, conclusies en vervolgstappen

Er is op verschillende manieren naar de meetdata gekeken en de relatieve invloed van de verschillende factoren bepaald. Uit deze studie komt naar voren dat over de afgelopen meetperiode het profieltype op zichzelf geen verklarende factor voor de aanzanding is. Op basis van alleen het profieltype zijn de patronen in aanzanding niet te verklaren.

Met name de kustoriëntatie is van invloed op de aanzanding in het gebied van de HD (zie paragraaf 5.4.2). Als de kust haaks op de dominante windrichting georiënteerd is, is de transportcapaciteit van wind voor sediment in kustdwarse richting groter en kan meer sediment in het duingebied belanden.

Voor de strandbreedte en het intergetijdengebied is een minder duidelijk verband te zien met de aanzanding van de duinen (zie paragraaf 5.4.3). De verwachting was dat er een verband zichtbaar zou zijn tussen de breedte van het strand en/of intergetijdengebied en de aanzanding van het duin; bij een breder strand is, meer sediment aanwezig om richting het duin te transporteren en in het duin aan te zanden. Een mogelijke verklaring voor een minder duidelijk verband tussen deze parameters bij de HD over de meetperiode, is dat de aanzanding voornamelijk verklaard wordt door de transportcapaciteit. Ook de relatief smallere delen van het strand vormen nog geen belemmering voor de sedimentbeschikbaarheid en daarmee is een duidelijk verband tussen deze parameters nog niet gevonden. Mogelijk dat dit in de toekomst verandert als er zich meer een evenwichtsprofiel heeft ontwikkeld. Aan het eind van de meetperiode lijkt in het zuiden van de HD (bij profieltype 2Z) de strandbreedte wel van invloed op de aanzanding. Op basis van alleen de oriëntatie zou bij dit profieltype, bij voldoende sediment beschikbaarheid, namelijk meer aanzanding te verwachten zijn. Mogelijk dat de smallere strandbreedte de sedimentbeschikbaarheid beperkt. In maart 2018 heeft in het zuiden van de HD een suppletie plaats gevonden. Op basis van de bevindingen in dit rapport is de verwachting dat de aanzanding in profieltype 2Z toeneemt als gevolg van deze suppletie.

Uit de volumeanalyses van Hoofdstuk 4 is geconcludeerd dat het intergetijdengebied bij de HD een belangrijke bron van sediment vormt voor de aanzanding van het duin. Dit komt overeen met bevindingen van Hoonhout en de Vries (2017b) bij de Zandmotor. Op basis van de analyses in dit hoofdstuk is er geen eenduidig beeld van de relatie tussen de afmetingen en de volumeverandering van het intergetijdengebied en aanzanding van het duin. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat zo kort na de aanleg van de HD er nog geen evenwichtsprofiel heeft ingesteld en dat er sprake is van veel kustlangse mariene processen in het intergetijdengebied. We merken ook op dat het studiegebied mogelijk te klein is en de meetreeks van 3 jaren van Jarkusraaien te kort en grof om dergelijke trends te ontdekken.

De rol van de korreldiameter en aanleg van helm spelen mogelijk ook een rol spelen bij de aanzanding van het duin. Dit is voornamelijk gebaseerd op observaties. De korreldiameter is kleiner in het zuiden, waar meer aanzanding plaats heeft gevonden dan in het noorden. Voor wat betreft de helmaanplant geldt dat er minder aanzanding is te zien in de profieltypen met minder vitale helm (profieltype 2N en 2N).

Voor wat betreft de grootschalige geometrie zien we geen verband tussen de helling van het buitentalud en de aanzanding. Op het niveau van profieltype is er weinig verschil in helling van het buitentalud over de HD. De verwachting is dat er lokaal wel verschillen in aanzanding en/of verstuiving kunnen plaatsvinden door verschillen in helling van het buitentalud, maar dat deze op niveau van analyse van de HD in zijn geheel niet zichtbaar zijn.

6

EFFECT MAATREGELEN DUIN OP VERSTUIVING EN DEPOSITIE

6.1 Overzicht maatregelen

Er zijn verschillende typen maatregelen toegepast om het zand ofwel vast te houden (doelen: vasthouden voor veiligheid en beperken van hinder) of lokaal te laten verstuiwen ten behoeve van ecologische ontwikkeling. In het inventarisatie document [ref. 1] staan de precieze hoeveelheden toegepaste maatregelen beschreven. Het gaat hierbij om (afbeelding 6.1):

1. luwe laagtes: lokale verdieping om zand in te vangen en lokaal zand te laten verstuiwen;
2. wilgenschermen: om zand in te vangen;
3. vegetatie: om zand vast te houden en in te vangen, voornamelijk helmgras of vergelijkbare soorten.

Afbeelding 6.1 Links: wilgenschermen; rechts: luwe laagtes. In beide figuren is helmgras zichtbaar

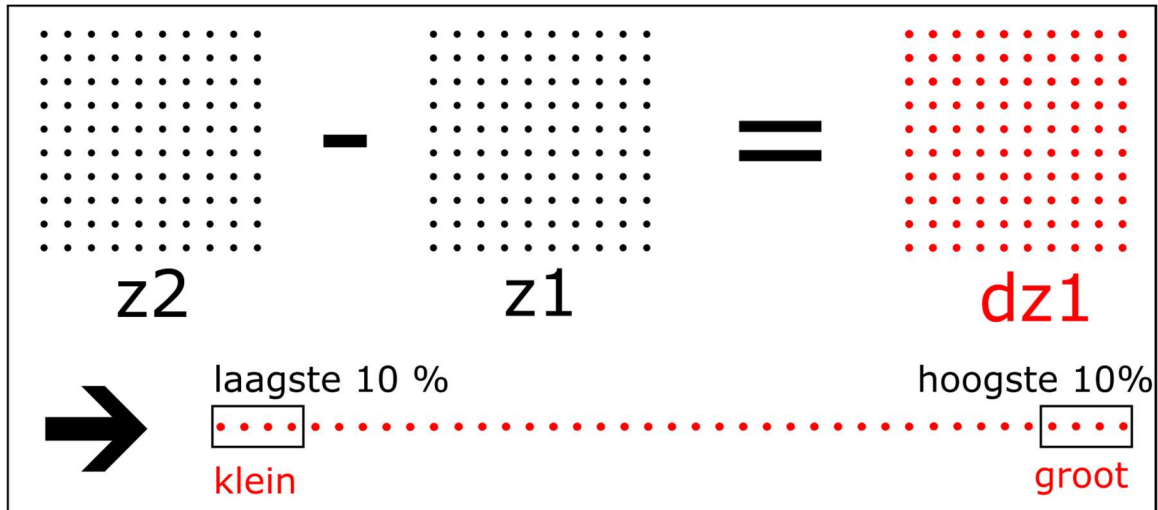


6.2 Luwe laagtes

Op de kruinen van de duinen zijn luwe laagtes toegepast: lokale, onbeplante verdiepingen. De focus van de analyse ligt op de invloed van de luwe laagtes op de lokale dynamiek en gemiddelde aanzanding. Lokale dynamiek is gedefinieerd als het verschil in hoogte verandering binnen een luwe laagte (afbeelding 6.2).

Een luwe laagte kan dus veel lokale gemiddelde aanzanding hebben maar weinig lokale dynamiek of andersom. Er zijn ook referentiegebieden gedefinieerd om te kijken of het geobserveerde gedrag wel door de luwe laagtes komt. Een uitgebreide beschrijving van de analyse van de luwe laagtes is opgenomen in bijlage I.

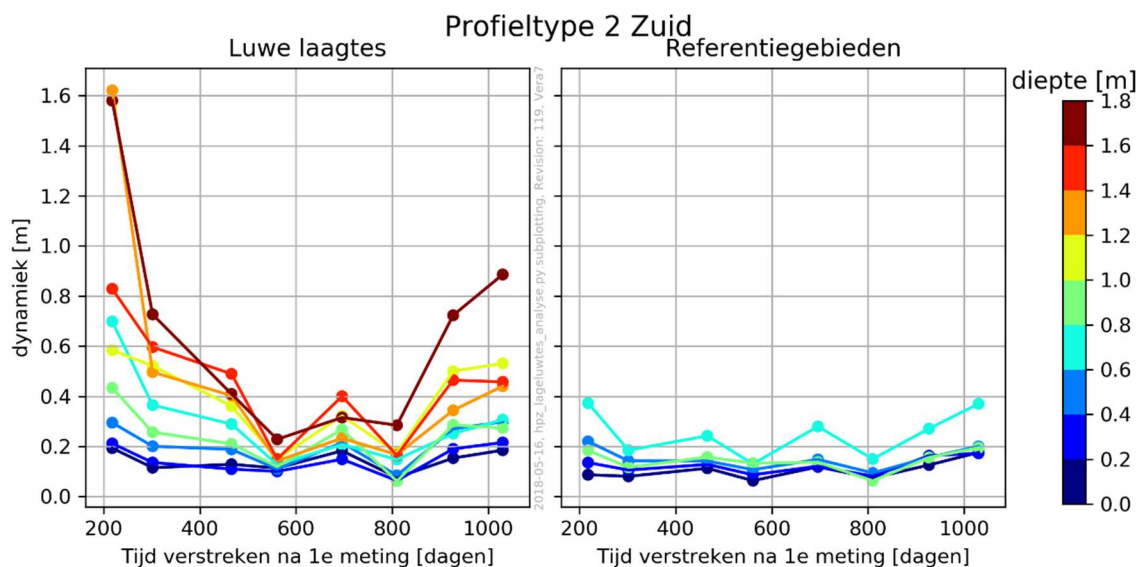
Afbeelding 6.2 Definitie lokale dynamiek in een luwe laagte



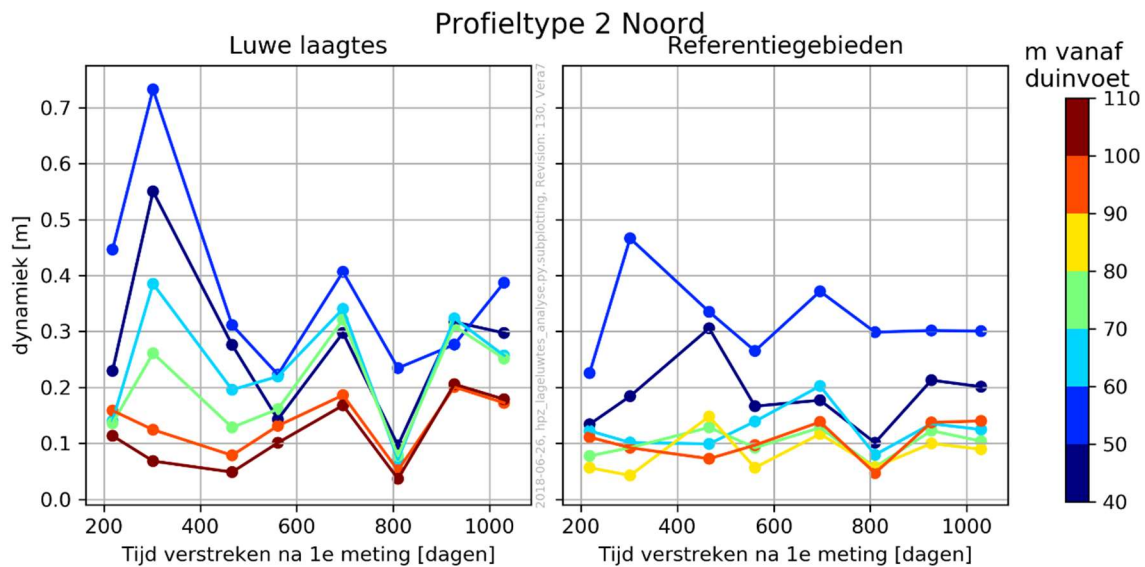
Analyse dynamiek en hoogteverandering luwe laagtes voor P2Z en P2N

Luwe laagtes zorgen voor meer dynamiek, zowel bij de onderzochte luwe laagtes bij profieltype 2 Zuid als profieltype 2 Noord. Dit komt doordat ze het lokale windpatroon beïnvloeden, wat leidt tot aanzanding aan de zeewaartse zijde waar de windsnelheid plotseling afneemt, en erosie aan de landzijde door turbulentie en versnelling van de wind. Als ze dieper zijn aangelegd is dit effect groter. De invloed van de initiële diepte is het duidelijkst zichtbaar bij P2Z. Om dynamiek te stimuleren kunnen luwe laagtes het beste diep worden aangelegd, zie afbeelding 6.3. Er is ook meer dynamiek als ze dichterbij de duinvoet liggen, omdat daar de aanvoer van zand het grootst is. Dit effect is het sterkste verband bij P2N, zie afbeelding 6.4. Dit komt doordat alle andere verbanden zwakker zijn dan gezien bij P2Z. Dit kan worden verklaard door het feit dat er in P2N minder zand beschikbaar is dan in P2Z. Er wordt een zwak verband gezien tussen dynamiek en het initiële oppervlak van de luwe laagtes. Dit verband komt echter door de link tussen diepte en oppervlak van de luwe laagtes, zie bijlage I.

Afbeelding 6.3 Relatie in de tijd tussen dynamiek en initiële kuildiepte (kleur van de lijnen) voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid (links) en referentiegebieden (rechts). Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek



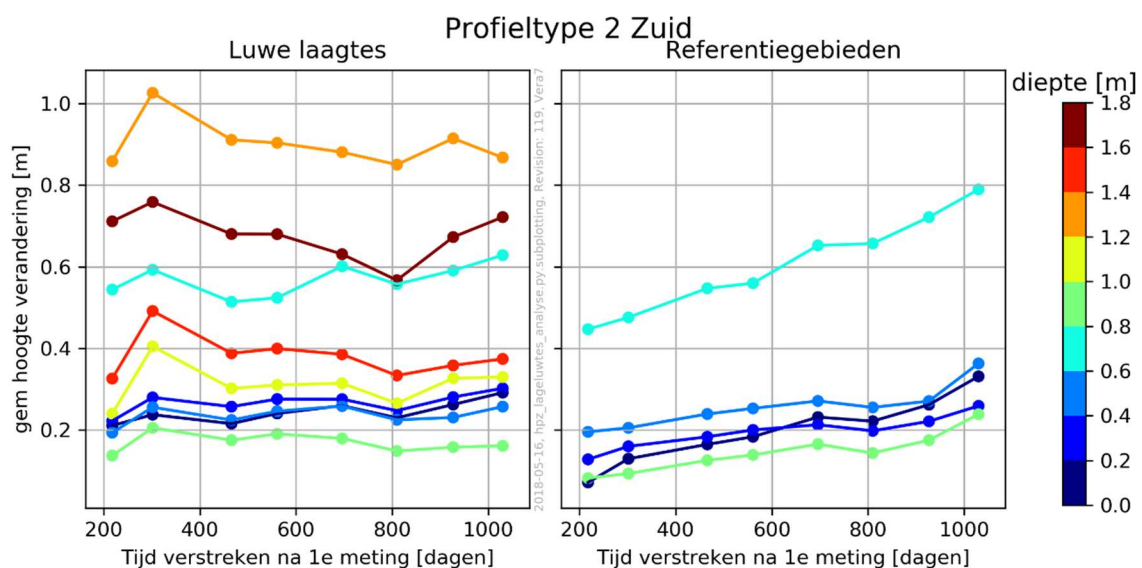
Afbeelding 6.4 Relatie in de tijd tussen dynamiek en de afstand tussen de gebieden en de duinvoet voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord (links) en referentiegebieden (rechts). Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is de afstand tussen de luwe laagte en dijk gegeven, zie paragraaf 3.2 voor hoe deze bepaald zijn



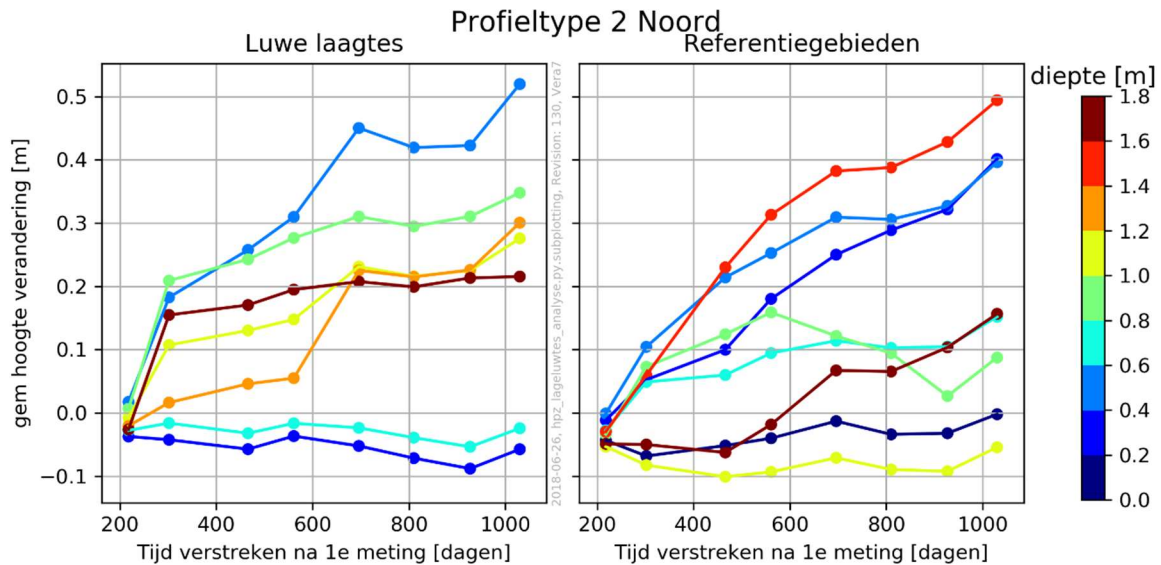
De dynamiek is het grootst tussen de eerste paar LiDAR metingen. Hierna blijft de dynamiek aanwezig en varieert deze rond een bepaald niveau. Dit niveau is hoger voor initieel diepere luwe laagtes en voor laagtes die dichterbij de duinvoet liggen. De variatie is groter bij profieltype 2 Noord dan bij type 2 Zuid. Het verschil tussen de luwe laagtes en referentiegebieden is ook minder bij type 2 Noord dan bij type 2 Zuid.

De luwe laagtes in P2Z zorgen voor wat meer gemiddelde aanzanding dan in de referentiegebieden (afbeelding 6.5). Dit zou kunnen komen doordat in sommige luwe laagtes in P2Z wilgenschermen geplaatst zijn. Dit is gedaan bij de initieel diepere laagtes. In P2N is de aanzanding uiteindelijk ongeveer gelijk aan de aanzanding in de referentiegebieden (zie afbeelding 6.6).

Afbeelding 6.5 Gemiddelde hoogteverandering tegen de initiële diepte op verschillende tijdstippen voor luwe laagtes in profieltype 2 Noord (links) en referentiegebieden (rechts). X-as: tijd sinds eerste meting, in dagen. Y-as: gemiddelde hoogteverandering sinds LiDAR meting 1 (m). Lijnkleur: initiële diepte (m)



Afbeelding 6.6 Gemiddelde hoogteverandering tegen de initiële diepte op verschillende tijdstippen voor luwe laagtes in profieltype 2 Noord (links) en referentiegebieden (rechts). X-as: tijd sinds eerste meting, in dagen. Y-as: gemiddelde hoogteverandering sinds LiDAR meting 1 (m). Lijnkleur: initiële diepte (m)



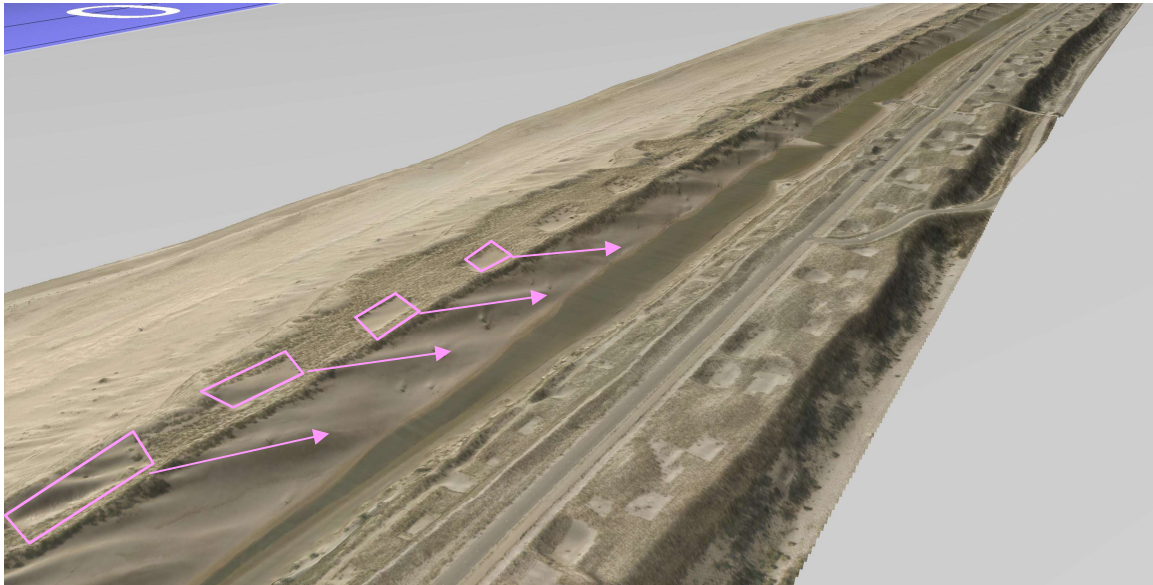
Als de gebieden initieel dieper zijn (afbeelding 6.5) en als ze dichterbij de duinvoet liggen is de gemiddelde hoogteverandering groter bij profieltype 2 Zuid, zie ook bijlage I. De invloed van de locatie is het grootst. Bij profieltype 2 Noord wordt alleen invloed van de locatie gezien.

De gemiddelde hoogteverandering tussen de 1e en de 2e LiDAR meting is erg groot bij profieltype 2 Zuid, hierna wordt er nauwelijks meer een toename in gemiddelde hoogteverandering gezien, (onder andere afbeelding 6.5). Bij profieltype 2 Noord is dit tussen de 2e en 3e LiDAR meting (onder andere afbeelding 6.6). Deze verandering is het grootst voor de luwe laagtes en minder voor de referentiegebieden. De aanzanding gaat langer door bij de referentiegebieden. Uiteindelijk is de aanzanding ongeveer even groot.

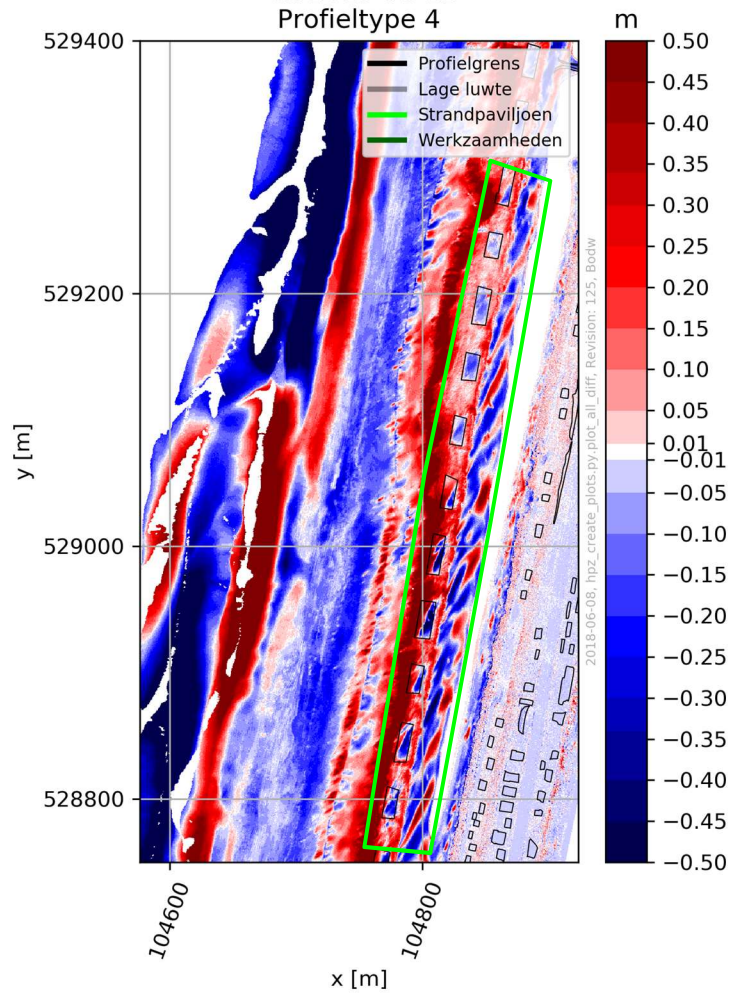
Dynamiek rondom luwe laagtes

Uit analyse van de luchtfoto's blijkt dat luwe laagtes lokaal het doorstuifpatroon beïnvloeden waardoor lokale dynamiek en differentiatie in hoogte-ontwikkeling wordt gestimuleerd. Dit is zichtbaar in afbeelding 6.7 waarin bij elke luwe laagte een lob met zand wordt geobserveerd op het binnentalud van het lage duin. Dit patroon is ook duidelijk herkenbaar in het verschilkaartje. De oriëntatie van de zandlob komt vrij goed overeen met de dominante zuidwestelijke windrichting. Door deze zandlobben is het initieel recht aangelegde binnentalud van de duinvallei inmiddels sterk glooiend geworden.

Afbeelding 6.7 Boven: Luwe laagtes en zandlobben laag duin duinvallei (P4); onder: Verschilkaart luwe laagtes duinvallei



Vershil tussen 2017-04-19
en 2017-08-11
Profieltype 4



Conclusies

Uit het bovenstaande kan het volgende worden geconcludeerd:

1 lokale gemiddelde hoogteverandering:

- luwe laagtes vangen in het begin meer zand in dan een 'normaal' aangelegd duin (gerepresenteerd door de referentiegebieden);
- afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer gemiddelde hoogteverandering. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan zal het normaal aangelegde duin inlopen met de hoogteverandering;
- dicht bij de duinvoet is er meer gemiddelde hoogteverandering in de luwe laagtes dan verder van de duinvoet af;

2 lokale dynamiek:

- afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer dynamiek. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan is de link tussen de initiële diepte en dynamiek minder;
- dicht bij de duinvoet treedt meer dynamiek op in de luwe laagtes dan verder van de duinvoet af;
- luwe laagtes beïnvloeden het doorstuifpatroon lokaal wat leidt tot de ontwikkeling van hoogtevariatie rondom de luwe laagtes;

3 aanlegdiepte: hoogtevariatie in het duin draagt op zichzelf bij aan de lokale dynamiek. Luwe laagtes stimuleren extra lokale dynamiek als ze een grotere hoogtevariatie hebben dan de reeds aanwezige hoogtevariatie in het normaal aangelegde duin. In profieltype 2 Zuid was dit ongeveer 0,8 meter en in profieltype 2 Noord was dit groter, rond 1 m.

Aanbevelingen

Het wordt aanbevolen om de getoonde analyse ook te doen voor alle luwe laagtes op de Hondsbossche Duinen, in plaats van de luwe laagtes in 1 profieltype op 2 locaties. Nu zijn ongeveer 77 luwe laagtes geanalyseerd. In het hele gebied zijn ongeveer 430 luwe laagtes geïdentificeerd. Zoals blijkt uit de analyse hierboven kunnen luwe laagtes zich afhankelijk van de locatie en hoeveelheid zandaanvoer anders gedragen.

In een aantal luwe laagtes zijn op enig moment stuifschermen aangebracht of is alsnog helm ingeplant. Het wordt aanbevolen om deze gebieden uit de analyse te filteren en apart te beschouwen.

6.3 Wilgenschermen

Wilgenschermen zijn voor het merendeel op de zeewaartse zijde van het duin en boven op het duin geplaatst. De wilgenschermen zorgen over het gehele profiel voor een snelle hoogteverandering ten opzichte van het omliggende duingebied in het profiel. Op de langere termijn vangt de wilgenschermen meer zand in dan hun omgeving als ze zijn geplaatst op plekken met minder hoogteverandering. Bij veel hoogteverandering in een gebied vangt de wilgenschermen minder of ongeveer evenveel zand in als het omliggende gebied. De schermen werken dus vooral sturend bij weinig zandaanbod. Na invulling van een scherm waait het zand weer door. Om stuifhinder te voorkomen, wordt er dan geregeld een nieuw scherm voor het volle scherm geplaatst, zie bijvoorbeeld afbeelding 6.8.

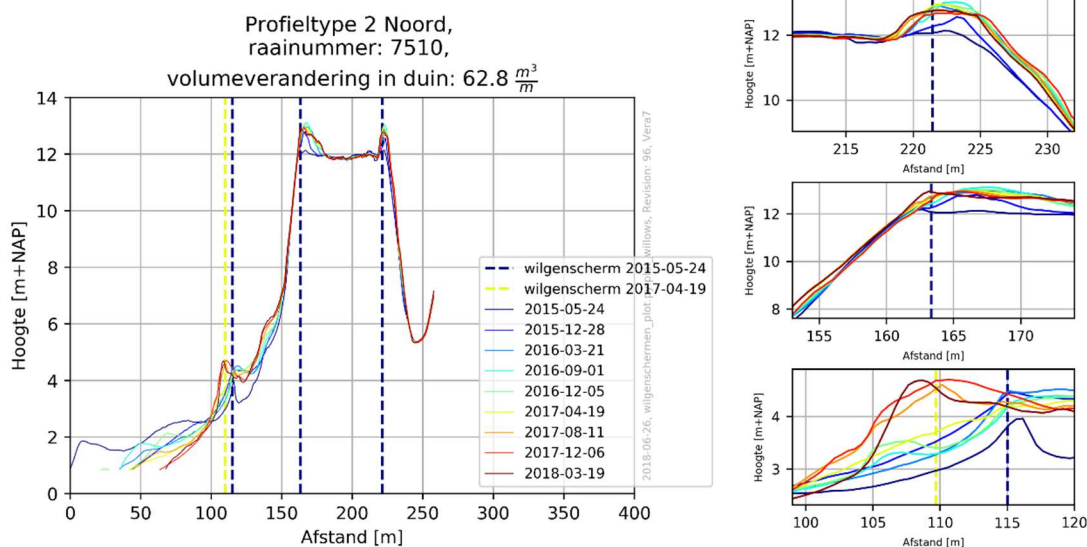
Afbeelding 6.8 Wilgenschermen op het strand, voor de duinvoet



6.3.1 Profielontwikkeling door wilgenschermen

Het aanplanten van wilgenschermen zorgt voor een snelle toename in hoogte, zie afbeelding 6.9. Na het plaatsen van het wilgenscherm (gele/donkerblauwe gestippelde verticale lijnen), wordt veel aanzanding gezien. Vergelijk bijvoorbeeld de gele lijn (ten tijde van plaatsing) met de oranje, rode en donkerrode lijnen (na plaatsing). Deze hoogtetoe name is het grootst aan de zeewaartse zijde van het duin.

Abbeelding 6.9 Hoogteontwikkeling rond wilgenschermen. Wilgenschermen zijn aangeduid met gestippelde verticale lijnen in de kleur van de meting waarin de wilgenschermen voor het eerst te zien zijn. Links: ontwikkeling gehele dwarsprofiel. Rechts: uitsneden rond wilgenscherm



6.3.2 Effectiviteit

Om de effectiviteit van de wilgenschermen te beoordelen wordt de gemiddelde hoogteverandering rond de schermen beschouwd en vergeleken met de gemiddelde hoogteverandering in het gebied waarin de schermen staan, zie tabel 6.1 en tabel 6.2. tabel 6.1 geeft de gemiddelde hoogteverandering voor een gebied 0,5 m rond de wilgenschermen per kustdwars vlak waar ze in staan. In tabel 6.2 is dit vergeleken met de gemiddelde hoogteverandering in het kustdwarse vlak waarin de schermen staan door middel van een ratio tussen beide. Deze vlaknummers zijn gebaseerd op de verdeling van profieltype 4 in de kustdwarse richting, gegeven in afbeelding 6.10. In tabel 6.2 wordt één negatieve waarde gezien. Deze wordt veroorzaakt door een gemiddelde erosie bovenop de kruin van profieltype 4.

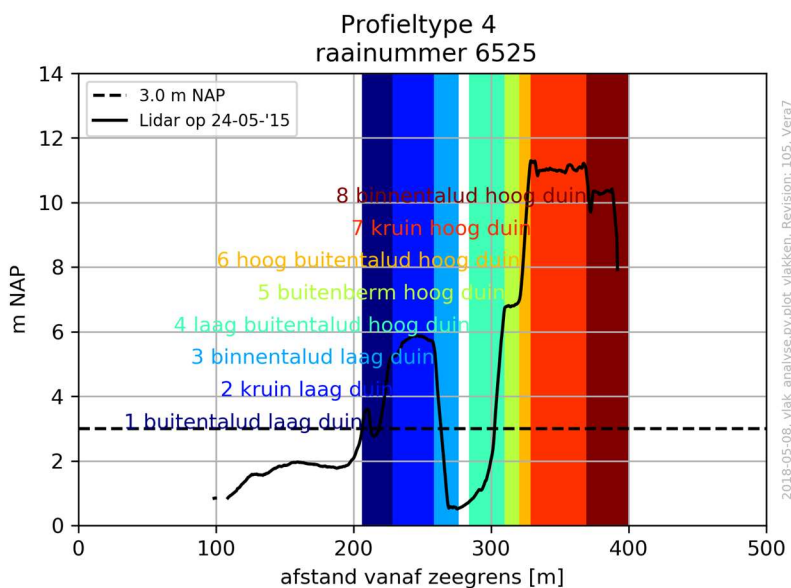
Tabel 6.1 Tabel met gemiddelde hoogteverandering in gebied 0.5m rond per kustdwarse vlak waar ze in staan. Deze vlaknummers zijn gebaseerd op de verdeling van profieltype 4 in de kustdwarse richting, zie afbeelding 6.10. G.w. staat voor geen wilgenschermen

	Gemiddelde hoogteverandering rond wilgenschermen [m]				
kustdwars vlak nummer	2 Zuid	3 Zuid	4	3 Noord	2 Noord
1	-	-	0,39	-	-
2	-	-	g.w.	-	-
3	-	-	1,42	-	-
4	1,02	1,35	0,57	0,86	1,26
5	-	1,55	g.w.	1,18	-
6	g.w.	g.w.	g.w.	0,7	g.w.
7	0,93	0,81	0,06	0,4	0,42
8	g.w.	g.w.	g.w.	g.w.	0,19

Tabel 6.2 Tabel met ratio tussen gemiddelde hoogteverandering in gebied 0.5m rond wilgenschermen en gemiddelde hoogteverandering in het kustdwarse vlak waarin ze staan. Deze vlaknummers zijn gebaseerd op de verdeling van profieltype 4 in de kustdwarse richting, zie Afbeelding 6.10. G.w. staat voor geen wilgenschermen

kustdwars vlak nummer	Ratio per profieltype [hoogteverandering rond wilgenschermen/hoogteverandering in vlak]				
	2 Zuid	3 Zuid	4	3 Noord	2 Noord
1	-	-	0,55	-	-
2	-	-	g.w.	-	-
3	-	-	0,74	-	-
4	0,95	0,93	2,9	0,73	1,07
5	-	1,05	g.w.	1,53	-
6	g.w.	g.w.	g.w.	1,61	g.w.
7	2,92	2,11	-1,9	2,37	4,16
8	g.w.	g.w.	g.w.	g.w.	30,7

Afbeelding 6.10 Nummers van vlakdefinities in kustdwarse richting.



De wilgenschermen werken vooral sturend bij weinig zandaanbod. Op het meest zeewaartse talud en de lage kruin wordt een grote gemiddelde hoogteverandering gezien rond de wilgenschermen, zie Tabel 6.1. Op de kruin, als aanwezig, is de verandering groter dan op het talud. In landwaartse richting neemt de gemiddelde hoogteverandering rond de wilgenschermen vervolgens af. Dit is in overeenstemming met de gemiddelde hoogteverandering in deze delen van het duin in het algemeen.

Relatief ten opzichte van het omliggende gebied is de hoogteverandering op het zeewaartse talud en de lage kruin juist klein, zie tabel 6.2. In landwaartse richting neemt de ratio toe, de wilgenschermen vangen dus relatief veel zand. Als de gemiddelde hoogteverandering in een gebied gelinkt wordt aan het zandaanbod, dan kan worden geconcludeerd dat de wilgenschermen vooral sturend werken bij weinig zandaanbod.

De verwachting is, wanneer de wilgenschermen niet zouden zijn geplaatst, een groter volume meer landwaarts in het profiel terecht zou zijn gekomen. De wilgenschermen op het strand bevorderen daarmee het laag invangen en vasthouden van zand. Dit zou betekenen dat wilgenschermen een sturende rol hebben

in waar het sediment terecht komt in kustdwarse richting. Laag in het profiel is een plek waar mariene processen frequenter een rol spelen -voor verlies van sediment kunnen zorgen- dan wanneer het zand bovenop het duin zou worden ingevangen. Voordeel van het invangen aan de zeewaartse zijde is dat er minder risico is op verstuiwing en hinder richting land.

Dat wilgenschermen ook in kustlangse richting, en niet alleen kustdwarse richting, een sturende rol kunnen hebben in sedimentatie locatie blijkt uit paragraaf III.2. De aanwezigheid van meer wilgenschermen wordt hier aangevoerd als een mogelijke verklaring voor het feit dat er meer aanzanding wordt gezien in het noorden van profieltype 2 Zuid. Dit zou betekenen dat het plaatsen van wilgenschermen stuurt in kustlangse richting waar het sediment eindigt.

6.3.3 Conclusies

Uit bovenstaande wordt het volgende geconcludeerd over de wilgenschermen op de HD:

- plaatsing van wilgenschermen leidt tot snelle aanzanding tot de hoogte van het scherm (bij voldoende aanvoer van zand). Dit is anders dan bij helmgras, waarbij er een bovengrens bestaat aan de groeisnelheid (max ~1 m/jaar);
- wilgenschermen werken vooral sturend bij weinig zandaanbod en houden dan duidelijk meer zand vast dan het omliggende gebied;
- wilgenschermen op het strand bevorderen het laag invangen en vasthouden van zand.

6.4 Vegetatie

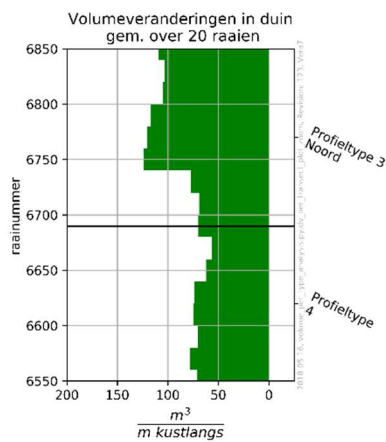
Vegetatie heeft op meerdere locaties een belangrijke rol in het invangen van zand en kan gebruikt worden om daarin te sturen.

6.4.1 Effect wel/geen vegetatie

Op de overgang van P4 naar P3N ligt een gebied waar het accumulatievolume lager is dan er direct omheen, gemiddeld over de gehele monitoringsperiode. Dat leidt tot twee 'sprongen' in het kustlangse accumulatievolume, zie toelichting bij afbeelding 4.5. De zuidelijke sprong wordt veroorzaakt doordat een volume van 30 m³/m voor het natte gedeelte van de duinvallei wordt opgeteld bij de accumulatie volgens de LiDAR metingen tot en met raainummer 6452. Dit wordt niet geleidelijk afgebouwd, waardoor een kunstmatige sprong in het accumulatievolume ontstaat.

Daarnaast treedt een sprong op in het volume bij de overgang naar profieltype 3, die wel realistisch en daadwerkelijk gemeten is. Deze sprong is gerelateerd aan de vegetatie in dit gebied en wordt hieronder toegelicht en in detail getoond in afbeelding 6.11.

Afbeelding 6.11 Totale volume verandering duin Hondsbossche Duinen met sprong zuiden van Profielttype 4 Noord

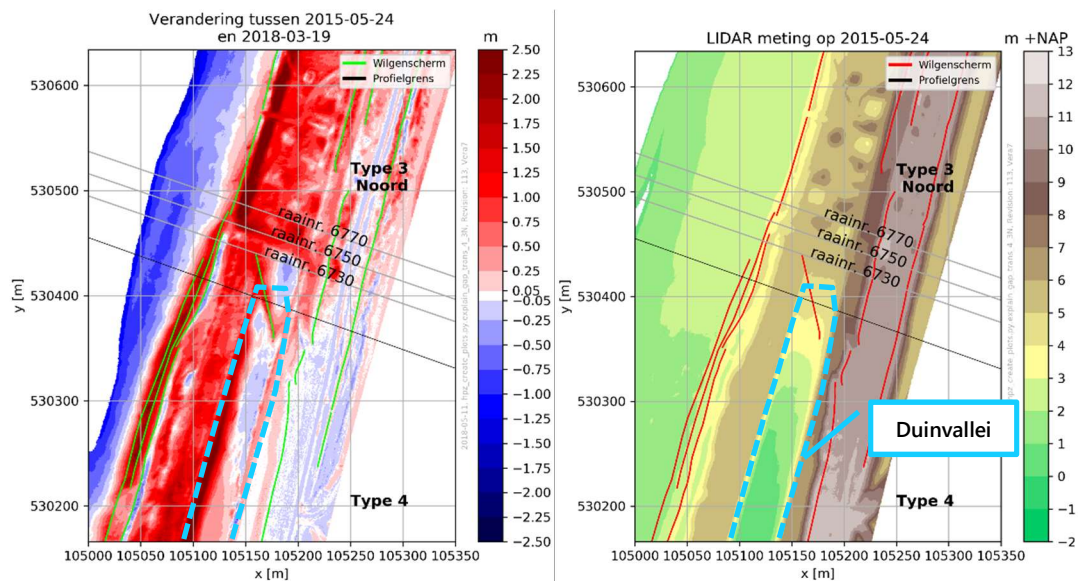


Uit de verschilkaart blijkt dat er erosie optreedt aan de landwaartse zijde van de wilgenschermen zuidelijk van raainummer 6750 en aanzanding bij de wilgenschermen ten noorden hiervan (afbeelding 6.12). Ook is erosie te zien in het noordelijke deel van de duinvallei. Deze erosie treedt op tot net zuidelijk van raainummer 6750. De kustlangse locatie waar deze twee fenomenen niet meer gezien worden is ongeveer gelijk, waardoor de sprong in het accumulatie volume ontstaat.

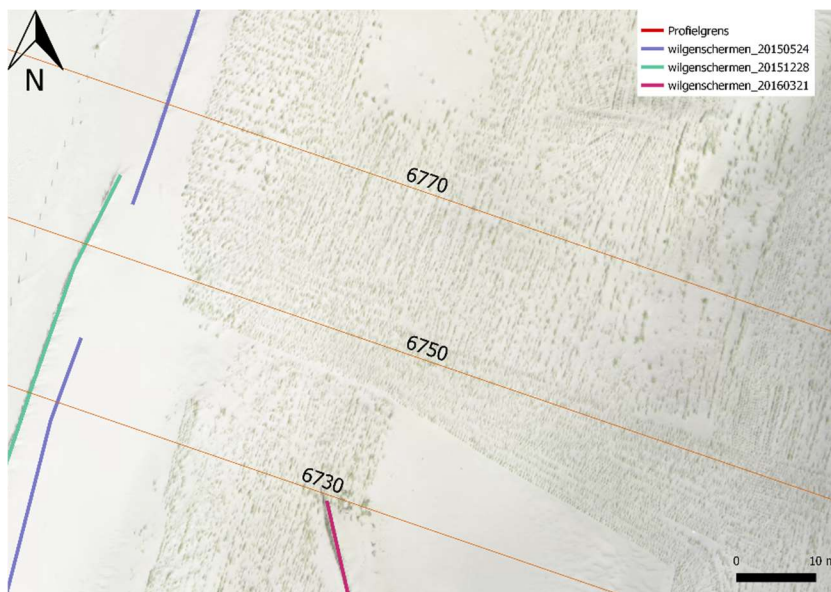
Het erosieve gebied in de duinvallei valt min of meer samen met het onbegroeide gedeelte, vergelijk afbeelding 6.12 en afbeelding 6.13. De erosie treedt waarschijnlijk op doordat de vegetatie hier ontbreekt. In het gebied met sedimentatie in de verschilkaart zijn de overgangen van beplante naar onbeplante delen duidelijk te herkennen.

Het uitstuiven van zand is deels tegengegaan door het plaatsen van een wilgenscherm. Het scherm is voor het eerst te zien in de luchtfoto van 21-03-2016, de 3^e LiDAR meting. Rond het wilgenscherm is zand ingevangen, maar wat verder er vandaan komt nog steeds netto erosie voor, gezien over de hele monitoringsperiode.

Afbeelding 6.12 De linker afbeelding geeft de eerste LiDAR meting voor het gebied rond de overgang van profieltype 4 naar profieltype 3 Noord. De rechter afbeelding geeft de volumeverandering tussen de eerste en laatste LiDAR meting voor dit zelfde gebied. In beide afbeeldingen staan 3 raainummers aangegeven en de wilgenschermen

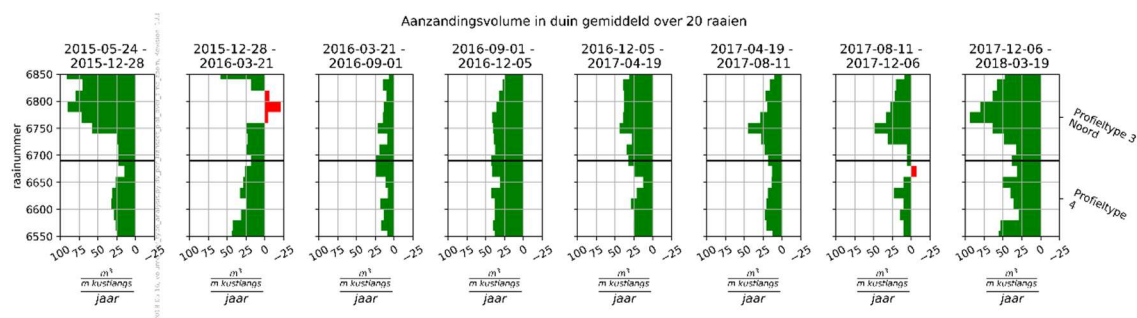


Afbeelding 6.13 Deze afbeelding geeft de luchtfoto van 01-09-2016 rondom de 3 raainummers uit afbeelding iii.14. Ook de wilgenschermen zijn aangegeven. Deze luchtfoto is gekozen vanwege het contrast waardoor de vegetatie duidelijk te onderscheiden is



Uit afbeelding 6.13 is op te maken dat de afstand tussen de wilgenschermen en de vegetatie groter is ter hoogte van raai 6730 dan ter hoogte van raai 6750 en 6770. Mogelijk speelt deze afstand een rol in het feit dat er erosie optreedt achter de schermen bij raai 6730 en sedimentatie bij 6750 en 6770.

Afbeelding 6.14 Volume verandering duin per periode tussen 2 LiDAR metingen voor Hondsbossche Duinen met sprong zuiden van Profieltipe 4 Noord



De sprong in accumulatievolume is het grootste in de 1e 2 perioden in afbeelding 6.14. Deze afbeelding laat de duinaccumulatie zien per periode tussen 2 LiDAR metingen. Door het plaatsen van het wilgenscherm in het noorden van de duinvallei wordt de sprong in periode 3 en 4 nauwelijks waargenomen. Hierna wordt de sprong wel weer gezien, maar minder in grootte. Dit geeft aan dat effectiviteit van het wilgenscherm in de duinvallei minder wordt en de vegetatie daardoor een belangrijkere rol gaat spelen.

De vegetatie op het lage duin in P3N is later ingeplant in een relatief ongunstige periode voor helmgras (zie paragraaf 2.4). Het feit dat er toch veel aanzanding optreedt in periode 1, direct na aanplant, suggereert dat ook minder vitale helm geschikt is om zand in te vangen. Door de aanvoer van zand en het meegroeien van de helm, neemt de vitaliteit snel toe.

In paragraaf 4.5.1 werd al beschreven dat het ontbreken van vegetatie tussen de wilgenschermen en het buitentalud van het lage duin in P4 lokaal leidt tot minder aanzanding/erosie, waardoor er minder zand

wordt vastgehouden op het buitentalud, ten opzichte van de andere profielen waar de vegetatie dichter tegen de schermen ligt.

6.4.2 Effect inplantpatroon

Uit paragraaf 6.4.2 blijkt dat luwe laagtes lokaal het doorstuifpatroon beïnvloeden waardoor lokale dynamiek en differentiatie in hoogte-ontwikkeling wordt gestimuleerd. De luwe laagtes zijn onbeplant en zorgen daardoor voor een variabele doorstuiving verder het duin in. Een variatie in het inplantpatroon leidt dus ook tot variatie in de morfologische ontwikkeling van het duin.

6.4.3 Effect aangroeisnelheid

Het lage duin en buitentalud zijn maximaal met ongeveer 2-3 m in hoogte toegenomen, zie de beschrijving van de ontwikkeling van het dwarsprofiel in bijlage II. Dit is mogelijk een resultaat dat wordt beïnvloed door de maximale groeisnelheid van helmgras. Die is maximaal ongeveer 1 m per jaar. De theoretische aangroeisnelheid van het duin is wat betreft hoogte dus gelimiteerd tot 1 m per jaar, en dat is terug te zien in de metingen.

6.4.4 Conclusies

Uit bovenstaande wordt geconcludeerd dat:

- vegetatie (of een andere maatregel) essentieel is voor het invangen van zand;
- de afwezigheid van vegetatie lokaal leidt tot doorstuiven van zand, wat in naastgelegen gebieden weer kan aanzanden;
- ook minder vitale helm (na groeiseizoen geplant) vangt zand in;
- de bovengrens van de hoogtetoename van het duin wordt mede bepaald door de groeisnelheid van helmgras.

6.5 Samenvatting

Uit bovenstaande blijkt dat verschillende maatregelen als wilgenschermen, luwe laagtes en vegetatie kunnen worden toegepast om:

- te sturen in locatie van aanzanding;
- hinder te voorkomen;
- differentiatie in de morfologische ontwikkeling te stimuleren.

Luwe laagtes

- 1 lokale gemiddelde hoogteverandering:
 - luwe laagtes vangen in het begin meer zand in dan een 'normaal' aangelegd duin (gerepresenteerd door de referentiegebieden);
 - afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer gemiddelde hoogteverandering. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan zal het normaal aangelegde duin inlopen met de hoogteverandering;
 - dicht bij de duinvoet is er meer gemiddelde hoogteverandering in de luwe laagtes;
- 2 lokale dynamiek:
 - afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer dynamiek. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan is de link tussen de initiële diepte en dynamiek minder;
 - dicht bij de duinvoet treedt meer dynamiek op in de luwe laagtes;
 - luwe laagtes beïnvloeden het doorstuifpatroon lokaal wat leidt tot de ontwikkeling van hoogtevariatie rondom de luwe laagtes.

- 3 aanlegdiepte: hoogtevariatie in het duin draagt op zichzelf bij aan de lokale dynamiek. Luwe laagtes stimuleren extra lokale dynamiek als ze een grotere hoogtevariatie hebben dan de reeds aanwezige hoogtevariatie in het normaal aangelegde duin. In profieltype 2 Zuid was dit ongeveer 0,8 meter en in profieltype 2 Noord was dit groter, rond 1 m.

Wilgenschermen

- Plaatsing van wilgenschermen leidt tot snelle aanzanding tot de hoogte van het scherm (bij voldoende aanvoer van zand). Dit is anders dan bij helmgras, waarbij er een bovengrens bestaat aan de groeisnelheid (max ~1 m/jaar).
- Wilgenschermen werken vooral sturend bij weinig zandaanbod en houden dan duidelijk meer zand vast dan het omliggende gebied.
- Wilgenschermen op het strand bevorderen het laag invangen en vasthouden van zand.
- De bovengrens van de hoogtetoeename van het duin wordt mede bepaald door de groeisnelheid van helmgras.

Vegetatie

- Vegetatie (of een andere maatregel) is essentieel voor het invangen van zand.
- De afwezigheid van vegetatie lokaal leidt tot doorstuiven van zand, wat in naastgelegen gebieden weer kan aanzanden.
- Ook minder vitale helm (na groeiseizoen geplant) vangt zand in.
- De luwe laagtes zijn onbeplant en zorgen daardoor voor een variabele doorstuiving verder het duin in. Een variatie in het inplantpatroon leidt dus ook tot variatie in de morfologische ontwikkeling van het duin.

DISCUSSIE

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de bevindingen van dit project voor de Hondsbossche Duinen en hoe deze zich verhouden tot beschikbare literatuur. Alle bevindingen zijn gebaseerd op de beschikbare data voor de HD en zijn daarom deels specifiek geldig voor dit gebied. De vertaalbaarheid naar andere gebieden wordt ook kort besproken.

7.1 Rol korreldiameter

Een belangrijke component in eolisch zandtransport is de korreldiameter (al aangegeven in Bagnold, 1954). Echter, de korreldiameter is bij de HD nauwelijks gemeten. Bekend is dat bij aanleg de korreldiameter in de noordelijke profieltypes bijna 100 micrometer groter was dan in de zuidelijke profielen (figuur 2.3).

Uit recente metingen van de korreldiameter¹ blijkt dat gemiddeld gezien het zand op het strand en het intergetijdengebied grover is geworden, terwijl het zand in de duinen juist wat fijner is geworden. Dit is typisch voor het eolische transport proces waarbij de fijnere fractie het makkelijkst wordt getransporteerd. Deze metingen laten daarnaast zien dat in het noorden (P3N) zeer grof zand voorkomt. Dit kan een deel van het verschil in aanzanding verklaren van de zuidelijke ten opzichte van de noordelijke profielen. Vanwege de beperkte informatie over de korreldiameter is dit niet goed te kwantificeren.

7.2 Aanbod- of wind-gelimiteerd systeem

In deze studie is gefocust op de interactie tussen het (droge) strand en de duinen. Dit lijkt logisch, het eolisch transport wordt bepaald door de sediment beschikbaarheid in de richting van de wind en de sedimenttransportsnelheid (de Vries et al., 2012). Op basis van de metingen blijkt er ook een sterk verband te zijn tussen de duinvoet oriëntatie, en daarmee de transportcapaciteit en de aanzanding. In het gebied van de HD lijken er weinig aanbod beperkende processen op te treden in onze meetperiode: als er wind is, is er het grootste deel van de tijd voldoende zand beschikbaar om te transporteren. De geobserveerde duinaangroevolumes liggen dichtbij de berekende theoretische transportcapaciteit. Deze is echter nog altijd hoger dan de werkelijk geobserveerde aangroei, wat erop duidt dat het aanbod op bepaalde momenten tot op zekere hoogte wel gelimiteerd kan zijn.

In literatuur wordt voor aanzanding van het duin steeds meer belang gehecht aan de mate van opwoeling van het sediment door hydrodynamische processen. Als het strand niet af en toe onder water komt te staan zal het fijne, makkelijk transporteerbare zand snel de duinen inwaaien waarna een toplaag van bijvoorbeeld schelpen overblijft, de sedimentconcentratie in de lucht neemt af. Dit is bijvoorbeeld waargenomen bij de Zandmotor. Als dit het geval is dan wordt het eolisch transport aanbod gelimiteerd. Dit aanbod wordt bepaald door de geometrie van het droge deel van het intergetijdengebied en het strand, de karakteristieken van het oppervlakte sediment en bodemvochtgehalte (Davidson-Arnott et al., 2005). Ook in de promotie van Yvonne Smit (Universiteit Utrecht) wordt onderzocht wat het effect van bodemvochtgehalte

¹ Lars Fortuijn (afstudeerder HHNK).

is op eolisch transport op het strand. Dit is dus ook een factor van belang die niet is meegenomen in dit onderzoek.

7.3 Herkomst van het zand

Over de bron van het zand dat het duin inwaait zijn verschillende theorieën in de literatuur. De eerste theorie gaat ervan uit dat het strand de voornaamste bron van het zand is, terwijl de tweede theorie minstens net zoveel belang hecht aan het intergetijdengebied als bron van zand. Uit de analyse van de metingen op de HD blijkt dat slechts de helft van het zand wat het duin inwaait netto van het strand kan komen. Het overige volume komt daarom waarschijnlijk uit het intergetijdengebied, eventueel via het strand.

Dit sluit aan bij metingen op de Zandmotor waaruit blijkt dat er erosie optreedt van het intergetijdengebied, terwijl het volume van het strand gelijk blijft (Hoonhout en De Vries, 2017a). Het zand lijkt vanuit het intergetijdengebied het droge strand op te waaien. Van daaruit verspreidt het zich verder wanneer het voldoende hard waait. Het relatieve belang van het intergetijdengebied ten opzichte van het strand als bron kan mogelijk worden verklaard vanuit de armouring die optreedt door grove korrels en schelpen op het droge strand die zwaarder weegt dan het hoge vochtgehalte in het intergetijdengebied.

Op de Zandmotor is ook geconstateerd dat gemeten eolische depositievolumes slechts gedeeltelijk kunnen worden verklaard vanuit het brongebied op het droge strand. Ongeveer 50 % van het volume moet ergens anders vandaan komen, vermoedelijk van het laaggelegen strand dat regelmatig overstroomt (Hoonhout en De Vries, 2017b).

Bij deze overzichten van zowel intergetijdengebied als strand als duin betreft het een netto hoeveelheid: er is tevens sprake van mariene processen (aangroei en erosie). Om deze reden zou het gehele systeem beschouwd moeten worden, waarbij de volledige volumebalans kan worden beschouwd.

Uit gemeten waterstanden blijkt dat de waterstand regelmatig boven gemiddeld hoogwater niveau (0,84 m+NAP) uitkomt, maar dat deze gedurende de monitoringsperiode onder de duinvoet (3 m+NAP) is gebleven. Tijdens de veldbezoeken is waargenomen dat er zeer weinig schelpen aanwezig zijn aan het oppervlak van het strand. Dit zou kunnen betekenen dat de zee het strand regelmatig omwoelt. Dit zou ervoor kunnen zorgen dat het strand in zijn geheel deels brongebied blijft voor eolisch transport. Het strand wordt echter wel smaller en dus steiler over de tijd. Het omwoelen bij stormen zal dus een minder groot oppervlak van het strand beslaan in de toekomst.

Uit een volume analyse op basis van Jarkusraaien bij de HD kan geen volledige volumebalans worden opgesteld. Hiervoor moet het studiegebied groter zijn om ook inzicht in het langtransport te krijgen. Uit de volume analyse is gebleken dat bij de HD in de ondiepe vooroever, het intergetijdengebied en het strand volumeverlies is opgetreden in de meetperiode. Het volumeverlies in het dwarsprofiel over de HD, is voor de ondiepe vooroever, het intergetijdengebied en het strand groter dan het aanzandingsvolume van het duin. Hieruit concluderen we dat deze gebieden ook volume verliezen richting noorden en zuiden door middel van langtransport. In het gebied 2 km ten zuiden en 3 km ten noorden van de HD, vindt netto aanzanding plaats in alle zones. De hoeveelheid compenseert echter niet voor de verliezen in de zones van de ondiepe vooroever, intergetijdengebied en strand langs de HD.

7.4 Achtergrond van verwachte waardes in ontwerpfase

De verwachte volumes die het duin in zouden stuiven zijn vooral gebaseerd op het werk van De Vries et al. (2012) en Van der Wal (2004). Zij voorspellen op basis van Jarkusraaien dat gemiddeld 30 m³/m/jaar het duin inwaait in de eerste jaren na de suppletie. Van der Wal (2004) keek specifiek naar het gedrag van gesuppleerde kusten. Zij ziet een duidelijke afname van aangroei van de duinen na de eerste jaren na een suppletie. Over het algemeen wordt dit toegeschreven aan het uitwaaien van de fijne fractie die in de eerste jaren nog aanwezig is in het gesuppleerd zand. De afname van het aangroei volume is nog niet waargenomen bij de Hondsbossche Duinen in de 3 jaar die zijn gemeten (tabel 4.3). Wel is de aangroei

duidelijk het grootst in jaar 1 met gemiddeld 44 m³/m/jaar. Daarna schommelt de aanzanding rond 30 m³/m/jaar.

De verdeling van de verwachte volumes over het dwarsprofiel is gebaseerd op ervaring op verschillende locaties langs de Hollandse Kust zoals de Tweede Maasvlakte, Vlugtenburg, de Zandmotor en informatie van experts als Bas Arens, Bert van der Valk en Sierd de Vries.

De experts hadden duidelijk gemaakt dat de actieve zone -de zone waar zand wordt ingevangen- hooguit 100 m landwaarts is vanaf de duinvoet. Voor de verdeling van het zand is gezien dat juist het zeewaartse lage deel zeer actief is. Zo groeide bij Vlugtenburg bij de duinvoet een meters hoge duinenrij aan.

7.5 Hypotheses verwachte ontwikkelingen

Voor de HD wordt verwacht dat vooral de nieuwe eerste duinregel verder zal groeien en zich daar meer lage duinen zullen ontwikkelen. Deze kunnen soms bij stormen weer deels wegspoelen. Hoger op het duin wordt vooral aan de voorzijde doorgaande aanzanding verwacht. Door de kustlangse kleinschalige variatie die hier reeds in zit, zal deze ontwikkeling er natuurlijk uitzien. Momenteel wordt verwacht dat op het landwaartse deel van de kruin geen grote hoeveelheden zand zullen worden afgezet. Dit zal daarom niet heel veel meer variabel worden dan het nu is. De aanzandingsvolumes per jaar worden verwacht af te nemen naar ongeveer 10 m³/m/jaar. Mogelijk dat deze volumes ook bepaald worden door een beperking in aanvoer wanneer, later in de tijd, bijvoorbeeld strandbreedte en intergetijdengebied sterk gereduceerd zijn. Indien vervolgens opnieuw gesuppleerd wordt, zou opnieuw aanzanding met 30m³/m/jaar kunnen optreden.

7.6 Vertaalbaarheid naar andere gebieden

Het blijkt dat de observaties en metingen voor de Hondsbossche Duinen redelijk goed aansluiten bij de verwachtingen en bij bestaande kennis en literatuur. De meeste conclusies zijn daarom bruikbaar voor andere gebieden met vergelijkbare karakteristieken. Belangrijk daarbij zijn:

- kustoriëntatie;
- breedte strand en intergetijdengebied;
- korreldiameter.

Kustoriëntatie is daarbij interessant, omdat uit onderzoek is gebleken dat ook in duinen waar de netto windrichting aflagend is, aangroei van duinen optreedt (Gong, 2017). Dit is onderzocht voor Ameland, waarbij bleek dat de duinen hier ook aangroeien, zij het minder snel dan bijvoorbeeld de kust bij Rijnland, waar de netto wind aanlandig is.

Een model zonder intergetijdengebied en aanbod-beperkingen zou, in het geval van Ameland dan altijd een negatieve volumeverandering van de duinen betekenen. De aangroei van duinen op Ameland wijst erop dat er als het ware een vorm van synchronisatie vereist is tussen aanlandige wind en aanbod van sediment. Wanneer dit voldoende lang en vaak optreedt zal het duin toch aangroeien.

Het belang van beschikbaarheid en transporteerbaarheid van zand en synchronisatie met de windrichting wijst erop dat het direct gebruiken van een 'netto' wind op een locatie voor de voorspelling van duinaangroei niet correct is en dat dergelijke voorspellingen met expert judgement dienen te worden bekeken.

De conclusies uit dit rapport worden algemeen gesteld en dienen altijd te worden heroverwogen voor lokale toepassing in andere gebieden. Waar relevant wordt dit aangegeven per conclusie. Door de variatie binnen het HD gebied kan dergelijke informatie vaak al worden bepaald. Een voorbeeld zijn de luwe laagtes die zich afhankelijk van hun diepte en positie op het duin anders gedragen. Daardoor zijn meer algemene conclusies op te stellen.

8

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1 Inleiding

De ontwikkeling van de hoogteligging van het projectgebied van de HD is geanalyseerd. Hierbij is specifiek het stuk nieuw aangelegd strand en duin zeewaarts van de oude dijk van de HPZ in ogenschouw genomen over de 6 km van het onderzoeksgebied.

In dit hoofdstuk worden eerste de conclusies over de processen van het geanalyseerde systeem beschreven (paragraaf 8.2) vervolgens zijn deze samengevat als antwoord op de onderzoeksvragen uit paragraaf 1.4 (zie paragraaf 8.3). Tot slot worden aanbevelingen gedaan (zie paragraaf 8.4).

8.2 Conclusies processen

Het totale volume dat beschikbaar is voor duinaangroei wordt vooral bepaald door factoren die het aanbod bepalen en dus niet door eigenschappen van het duin zelf. De verdeling van het aanzandingsvolume over het dwarsprofiel wordt juist bepaald door de geometrie en lokale maatregelen als wilgenschermen.

8.2.1 Totaal volumes en trends

Het duin zandt aan, het strand erodeert (als gevolg van netto erosie door mariene en eolische processen). Het valt op dat de strandbreedte sneller afneemt dan dat de duinvoet zich in zeewaartse richting verplaatst. De positie van de duinvoet blijft redelijk constant na de 1^e 2 metingen, terwijl de strandbreedte geleidelijk blijft afnemen. De afname van de strandbreedte wordt met name bepaald door de landwaartse verschuiving van de waterlijn. Het strandprofiel wordt daardoor langzaam gemiddeld steiler.

Het totale volume zand dat het duin inwaait (530.000 m³ over gehele onderzoeksperiode ofwel 33 m³/m/jaar, exclusief de duinvallei) komt voor 40-45 % van het strand zelf (paragraaf 4.3.1 en 5.4.3). De overige 55-60 % moet dus van de vooroever en het intergetijdengebied en van buiten het onderzoeksgebied (langsrichting) komen. Een dergelijke verhouding is in overeenstemming met observaties op de Zandmotor, waar ook slechts ongeveer 50 % van de eolische depositie kan worden verklaard vanuit de volume afname op het strand (Hoonhout en De Vries, 2017a en 2017b).

De volumebalans voor het gehele studiegebied op basis van Jarkusraaien is niet sluitend en laat zien dat er netto een volumeafname van ongeveer 1,1 Mm³ optreedt uit het gebied tussen de -14 m+NAP dieptecontour en de oude zeedijk van de HPZ. Dit verlies treedt op als gevolg van langstransport naar gebieden ten noorden en ten zuiden van het studiegebied. Het totale aangroeivolume in de duinen is ongeveer 1/3 van de verliezen onder water en op het strand.

Er is een duidelijke afnemende trend te zien in de duinaangroei van zuid naar noord. In het zuiden (P3Z en P4) komen aangroei volumes van 120-150 m³/m/jaar voor, terwijl dat in het noorden (P2N en P1) 10-50 m³/m/jaar is. Er lijkt bovendien een seizoenstrend zichtbaar in zowel het windklimaat als de duinaangroei snelheid. In de zomer is het windklimaat relatief mild en is ook de snelheid van duinaangroei

lager. Dit wijst op een verband tussen de windsnelheid en duinaangroei. De wind is langs het gehele duingebied min of meer gelijk en is op zichzelf geen verklaring voor de eerder genoemde noord-zuid verschillen.

Uit de analyses komt naar voren dat over de meetperiode van deze studie met name kustoriëntatie, en mogelijk de korreldiameter van invloed zijn op (de verschillen in) het aanzandingsvolume in het duingebied. Dit zijn factoren die bepalend zijn voor het aanbod van zand voor duinaangroei. Op basis van de potentiële transportcapaciteit voor zand de duinen in, kan worden gesteld dat de kustoriëntatie ongeveer 1/3-deel van het waargenomen verschil in duinaangroei tussen noord en zuid kan verklaren. De strandbreedte is ook bepalend voor het aanbod - als het strand breder is, is de oppiklengte groter, waardoor meer sediment wordt opgepikt om richting het duin te transporteren. In de meetperiode is deze variabele nog niet de meest bepalende voor de aanzanding. Ook bij de smallere stranden lijkt de strandbreedte bij de HD nog niet beperkend voor het sedimentaanbod. Mogelijk zal dit in de toekomst veranderen als er zich meer een evenwichtsprofiel heeft ontwikkeld.

Factoren die de invangcapaciteit kunnen beïnvloeden, zoals het type dwarsprofiel, lijken minder van invloed op de geobserveerde kustlangse variatie van de duinaangroei. Over het algemeen zijn de taluds aan de zeewaartse duin vrij flauw, waardoor er weinig lokale afbuiging is van de wind en het zand overal goed de duinen inwaait. De precieze vorm van het profiel speelt dan minder een rol. Mogelijk speelt het moment van helmaanplant wel een rol in de invangcapaciteit van de duinen in het noordelijke deel van de HD.

8.2.2 Kustdwarse verdeling van het aanzandingsvolume

De lokale verdeling van het aanzandingsvolume wordt mede bepaald door de lokale maatregelen en geometrie. De kustdwarse verdeling is als volgt:

- 1 het grootste deel van het zand wordt op de zeewaartse helling van het (voor)duin opgevangen (bijlage II). 70 % komt op zeewaartse zijde 1^e duinregel/buitentalud. Veelal onder NAP +6 m;
- 2 25-30 % stuift wat verder door en belandt op de kruin van het hoge duin. Aanzanding op de kruin vindt voornamelijk plaats op de eerste 10-30 m vanaf de zeewaartse zijde van de kruin;
- 3 er waait nauwelijks zand richting en over de bestaande HPZ (0-5 %);

Binnen de zones met aanzanding wordt deze ook beïnvloed door lokale maatregelen:

- 4 laagtes vangen zand in: Over gehele onderzoeksgebied (paragraaf 6.2) en bij zuidelijk deel duinvallei (nog droog) is grote sedimentatie, vermoedelijk werkt het hier als grote luwe laagte die zand invangt (paragraaf III.3);
- 5 luwe laagtes beïnvloeden het doorstuifpatroon lokaal wat leidt tot de ontwikkeling van hoogtevariatie rondom de luwe laagtes;
- 6 variatie in vegetatie (beplant/onbeplant) leidt tot variatie in doorstuiven, wat bijvoorbeeld optreedt in luwe laagtes en op het buitentalud van het lage duin voor de duinvallei (P4).

8.2.3 Maatregelen

Maatregelen als wilgenschermen, luwe laagtes en vegetatie beïnvloeden niet de totale aangroei van het duin, maar kunnen worden toegepast om:

- te sturen in locatie van aanzanding;
- hinder te voorkomen;
- differentiatie in de lokale morfologische ontwikkeling te stimuleren.

Luwe laagtes

- **lokale gemiddelde hoogteverandering:**
 - luwe laagtes vangen in het begin meer zand in dan een 'normaal' aangelegd duin (gerepresenteerd door de referentiegebieden);

- afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer gemiddelde hoogteverandering. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan zal het normaal aangelegde duin inlopen met de hoogteverandering;
- dicht bij de duinvoet is er meer gemiddelde hoogteverandering in de luwe laagtes dan verder van de duinvoet.
- **lokale dynamiek:**
 - afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer dynamiek. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan is de link tussen de initiële diepte en dynamiek minder;
 - dicht bij de duinvoet treedt meer dynamiek op in de luwe laagtes dan verder van de duinvoet;
 - luwe laagtes beïnvloeden het doorstuifpatroon lokaal wat leidt tot de ontwikkeling van hoogtevariatie rondom de luwe laagtes.
- **aanlegdiepte:** hoogtevariatie in het duin draagt op zichzelf bij aan de lokale dynamiek. Luwe laagtes stimuleren extra lokale dynamiek als ze een grotere hoogtevariatie hebben dan de reeds aanwezige hoogtevariatie in het normaal aangelegde duin. In profieltype 2 Zuid was dit ongeveer 0,8 meter en in profieltype 2 Noord was dit groter, rond 1 m.

Wilgenschermen

- Plaatsing van wilgenschermen leidt tot snelle aanzanding tot de hoogte van het scherm (bij voldoende aanvoer van zand). Dit is anders dan bij helmgras, waarbij er een bovengrens bestaat aan de groeisnelheid (max ~1 m/jaar bij voldoende aanbod van zand).
- Wilgenschermen werken vooral sturend bij weinig zandaanbod en houden dan duidelijk meer zand vast dan het omliggende gebied.
- Wilgenschermen op het strand bevorderen het laag invangen en vasthouden van zand.

Vegetatie

- Vegetatie (of een andere maatregel) is essentieel voor het invangen van zand.
- De afwezigheid van vegetatie lokaal leidt tot doorstuiven van zand, wat in naastgelegen gebieden weer kan aanzanden.
- Ook minder vitale helm (na groeiseizoen geplant) vangt zand in.
- De luwe laagtes zijn onbeplant en zorgen daardoor voor een variabele doorstuiving verder het duin in. Een variatie in het inplantpatroon leidt dus ook tot variatie in de morfologische ontwikkeling van het duin.
- De bovengrens van de hoogtetoeename van het duin wordt mede bepaald door de groeisnelheid van helmgras van ongeveer 1 m/jaar.

Papierpulp

- Om het vers opgespoten zand vast te houden is er papierpulp toegepast. Bevinding: zand stoof minder ver door dan tijdens ontwerpfasen gedacht. Dit wordt mogelijk verklaard door de toepassing van papierpulp. Er zijn geen specifieke metingen gedaan om dit te staven.

8.3 Conclusies onderzoeksvragen

In deze paragraaf worden de conclusies samengevat voor de onderzoeksvragen zoals genoemd in hoofdstuk 1.

(I) Hoe groot is het totale zandvolume dat accumuleert in het duingebied als gevolg van eolisch transport?

Over de onderzoeksperiode van ongeveer 3 jaar wordt 530.000 m³ zand het duin ingeblazen, dit is gemiddeld 33 m³/m/jaar. Er is sprake van een kustlangse variatie. Deze lijkt vooral bepaald te zijn door variatie in het aanbod en niet zozeer door variatie in de geometrie van het duin. Het aanbod varieert vooral door oriëntatie van de dwarsprofielen ten opzichte van de dominante windrichting en daarmee de transportcapaciteit van de wind.

(II) Wat is het effect van vormgeving van het duin op verstuiwing en depositie (voor zover hier generieke conclusies aan te verbinden zijn)?

De geometrie van het duin heeft effect op waar -in de dwarsrichting - het zand terecht komt. De observaties tonen dat 70 % van het eolisch transport wat richting duinen waait, aan de zeewaartse zijde van het duin terecht komt. 25-30 % komt boven op de kruin van het duin terecht, bijna volledig binnen 10-30 m vanaf de zeewaartse zijde. Nagenoeg niets waait verder door over het duin. De metingen laten zien dat in de eerste twee periodes relatief het meeste zand doorstuift richting en over de kruin en de HPZ dijk ten opzichte van de periode daarna. De verwachting is dat de hoeveelheid zand die doorstuift richting de kruin verder zal afnemen.

(III) Wat is het effect van maatregelen in het duin op verstuiwing en depositie (voor zover hier generieke conclusies aan te verbinden zijn)?

Maatregelen hebben ook effect op waar het zand in de dwarsrichting terecht komt en kunnen lokaal de dynamiek bevorderen. Wilgenschermen en vegetatie en luwe laagtes vangen zand in. Tevens kunnen luwe laagtes zorgen voor verhoging van de lokale dynamiek. Afwezigheid van vegetatie zorgt voor doorstuiven van zand wat dan elders dynamiek of hinder oplevert.

8.4 Aanbevelingen

De volgende zes aanbevelingen worden hieronder toegelicht:

- 1 Mogelijkheden voor optimalisatie ontwerp;
- 2 Rol aanzanding in kustveiligheid;
- 3 Metingen continueren;
- 4 Koppeling ontwikkeling onder water en boven water;
- 5 Modelexercities;
- 6 Interactie met vegetatie.

1. Mogelijkheden optimalisatie ontwerp

Analyse in hoeverre de huidige bevindingen bij een volgend ontwerp tot optimalisatie kunnen leiden. Welke maatregelen juist wel of juist niet nemen in vervolg en in welke situaties? Dit wordt gedaan in onderdeel B3 van dit project.

2. Rol aanzanding in kustveiligheid

Kan de gemeten aanzanding door eolische processen een rol spelen in kustveiligheid? Of is het slechts een verplaatsing van volumes. Zou de verplaatsing van volume zand naar de voet van het duin juist het duin veiliger maken? Welke rol speelt dit bij zeespiegelstijging? Zouden de aanlegvolumes of methode kunnen veranderen met de huidige kennis? Deze vragen worden onderzocht in onderdeel B3 van dit project.

3. Metingen continueren

Het wordt aangeraden door te gaan met metingen. Significante conclusies trekken uit een dataset met 9 meetpunten in de tijd is lastig. Daarnaast is uit literatuur (e.g. Van der Wal 2004) en praktijk bekend dat de aanzanding in de eerste jaren na suppletie het hoogst is. Indien de monitoring wordt doorgezet, wordt gezien of de ontwikkelingen in de tijd overeenkomen met de verwachtingen. Over 5 jaar zal een vollediger beeld kunnen worden gegeven van de ontwikkeling.

Tevens is het toevoegen in de analyse van de inhoudelijke informatie van de tussenliggende meting van Shore Monitoring in het eerste jaar nuttig. Dit zou een extra datapunt betekenen in een periode waarin veel gebeurt. Het lastige is dat deze dataset niet het gehele onderzoeksgebied bevat zoals in de analyses gebruikt. Daarom zou een aparte analyse moeten worden gedaan op kleinere gebieden per profieltype.

4. Koppeling ontwikkeling onder water en boven water

Om een totaalbeeld te krijgen van de processen is het van belang de gehele sedimentbalans te kunnen bekijken. Hiertoe dient de ontwikkeling onder water met de ontwikkeling boven water geïntegreerd te

worden. Hiermee wordt ook inzicht verkregen in de wederzijdse invloed van mariene en eolische processen op lokale aanzanding en erosie.

5. Modelexercities

De dataset kan gebruikt worden voor verschillende modelexercities. Zo kan in detail bekeken worden wat lokale windpatronen voor effect hebben op bijvoorbeeld de ontwikkelingen in de luwe laagtes en of dit overeenkomt met de gemeten data. Verder kan de dataset gebruikt worden voor de modellering van eolisch transport en de vegetatieontwikkeling.

6. Interactie met vegetatie

Hoe bevorderen vegetatie en aanzanding elkaar. Op welke wijze kan hier in een volgend ontwerp mee rekening worden gehouden? Naar deze vragen wordt gekeken in themalijn A van dit project.

8.5 Toepassing

De conclusies van het onderzoek kunnen voor toekomstige projecten worden toegepast. De geobserveerde duinaangroei van 33 m³/m/jaar komt in gemiddelde zin goed overeen met de verwachtingen tijdens de ontwerpfase voor de eerste jaren na aanleg. Daarmee wordt bewezen dat de bestaande literatuur en theorie over duinaangroei toegepast kan worden in vergelijkbare projecten. De literatuurwaarden kunnen daarom met meer zekerheid worden gehanteerd in de ontwerpfase.

In de verwachtingen werd rekening gehouden met meer overstuiving over het duin (richting harde HPZ-constructie), tot 40 % in profieltype 2. Dit blijkt niet het geval en het percentage dat over duin stuift - en daarmee geen veiligheidswaarde meer heeft en mogelijk tot hinder leidt - blijkt verwaarloosbaar.

Hoewel de gemiddelde volumes goed overeenkomen met de literatuur, is er ook behoorlijk veel variatie binnen het gebied. De strandbreedte, kustoriëntatie en mogelijk ook de korreldiameter zijn daarin bepalend. De variatie die optreedt binnen het gebied van de HD kan als bandbreedte worden gehanteerd in toekomstige projecten, eventueel aangepast aan de lokale omstandigheden.

Geometrie en maatregelen sturen waar het zand wordt ingevangen in een dwarsprofiel. Tevens zorgen lokale maatregelen voor lokale dynamiek, waarmee de ecologische ontwikkeling beïnvloed kan worden. Geometrie en maatregelen kunnen dusdanig worden toegepast om zand, naar wens juist laag of hoog op het profiel in te vangen, of juist nabij strand, of meer in landwaartse richting.

Luwe laagtes zijn het meest effectief wanneer ze in een meer natuurlijk patroon zijn aangelegd, meer op een natuurlijke stuifkuil lijkend. De aanlegvorm blijft redelijk herkenbaar na drie jaren, dus voor een natuurlijk beeld is het ook aan te bevelen deze in een meer natuurlijk patroon aan te leggen.

Gezien het feit dat de aangroei van het duin voornamelijk aan de zeezijde en relatief laag in het profiel optreedt, lijkt het handig om een smal en hoog duin als uitgangspunt bij het ontwerp te gebruiken. Het aanleggen van een minder robuust duin kan omdat deze toch op termijn groeit. Het is dan verstandig om te beginnen met een smal duin (dat breder wordt) in plaats van een laag (en breder) duin dat omhoog moet. Dit laatste gebeurt immers niet over de volledige breedte van het duin, maar beperkt zich tot het buitenste deel van de zeereep. Bij het ontwerp zou mogelijk met deze ontwikkeling rekening kunnen worden gehouden en dus kunnen worden bezuinigd op de omvang van het initiële duin. Deze en andere optimalisatiemogelijkheden worden onderzocht in onderdeel B3 van dit project.

Het aanbod van zand wordt mede bepaald door de aanwezigheid van fijne fracties in het intergetijdengebied en op het strand. Door opwoeling en overspoeling kan nieuw fijn zand worden aangevoerd en naar het oppervlak worden verplaatst. Hiermee kan rekening worden gehouden door het strand laag/flauw aan te leggen zodat een groter gebied regelmatig overspoelt.

REFERENTIES

- 1 Bagnold, R. A., 1954. The physics of blown sand and desert dunes, 2nd Edition. Methuen, Lonon.
- 2 Davidson-Arnott, R. G. D., MacQuarrie, K., Aagaard, T., 2005. The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach. *Geomorphology* 68 (1-2), 115–129.
- 3 Decisio, 2011, Ruimte voor recreatie op het strand; onderzoek naar een recreatiebasiskustlijn - Bijlagenrapport, 104 pp.
- 4 De Vries, S., 2013. Physics of blown sand and coastal dunes, PhD Thesis TU Delft.
- 5 De Vries, S., Stive, M. J. F., van Rijn, L. & Ranasinghe, R. W. M. R. J. B. 2012. A new conceptual model for aeolian transport rates on beaches. *Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering 2012 (ICCE 2012)*. Lynett, P. & McKee Smith, J. (eds.). Reston: Coastal Engineering Research Council, p. 1-7 7 p. (Coastal Engineering Proceedings; vol. 33).
- 6 Dong Z., Liu X., Wang H. Wang X. 2003. Aeolian sand transport: a wind tunnel model. *Sedimentary Geology* 161: 71-83.
- 7 Gong, Y., 2017. Coastal dune behaviour and the role of sediment supply in the aeolian system, MSc Thesis TU Delft.
- 8 Hage, P.M., Ruessink, B.G. and J.J.A. Donker, 2018. Determining sand strip characteristics using Argus video monitoring. *Aeolian Research*, 33, 1-11.
- 9 Hoonhout, B., 2017. Aeolian sediment availability and transport. 168 pp DOI: 10.4233/uuid:e84894d6-87d2-4006-a8c2-d9fbfacabddc. Verkregen van repository TU Delft: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ae84894d6-87d2-4006-a8c2-d9fbfacabddc>
- 10 Hoonhout, B, De Vries, S., 2017a. Field measurements on spatial variations in aeolian sediment availability at the Sand Motor mega nourishment, *Aeolian research* 24, 93-104.
- 11 Hoonhout, B, De Vries, S., 2017b. Aeolian sediment supply at a mega nourishment, *Coastal Engineering* 123, 11-20.
- 12 J.J.A. Donker, Ruessink, B.G. and De Winter, W., 2018. Modelling the effect of coastal foredune topography on annual Aeolian sand input from the beach, EGU conference 2018.
- 13 Leenders, J.K., 2006. Wind erosion control with scattered vegetation in the Sahelian zone of Burkina Faso, PhD thesis WUR university, 170 p.
- 14 Ecoshape, 2016. Inventarisatie maatregelen ontwerp HPZ. Ecoshape. 51p.
- 15 O'Brien M.P., Rindlaub, B.D. 1936: The transportation of sand by wind. *Civil Engineering* 6: 325-327.
- 16 Rauwoens, P. G. M., Hoonhout, B. & de Vries, S. 2018. Simulating dune dynamics at the coast: Morphological feedback in a supply limited Aeolian transport model. In : *Geophysical Research Abstracts* (online). 20, 1 p., EGU2018-18453.
- 17 van Maanen, R. 2018. De samenhang van het intergetijdengebied op de duinaangroei van de Hondsbossche Duinen. Stagerapport, CIE4040-09, 47 pp.
- 18 Van der Wal, D., 2004, Beach-Dune interactions in Nourishment areas along the Dutch coast, *Journal of Coastal Research*, vol 20, pp 317-325.
- 19 VSE, 2013, Vraagspecificatie eisen, Beschrijving van producteisen. Registratienummer 13.0001492, Versie C, 25 april 2013, 34 pp.
- 20 Pak, T.S. (2018). Marine and aeolian sediment transport at the Hondsbossche Dunes. MSc thesis, Delft University of Technology.

Bijlage(n)

BIJLAGE: LUWE LAAGTES

De invloed van de luwe laagtes wordt geanalyseerd in deze bijlage. Eerst wordt de methode besproken waarmee dit gedaan wordt. Vervolgens zullen de resultaten gegeven worden, hierbij worden ook enkele discussiepunten genoemd. Tot slot volgt een conclusie en aanbeveling.

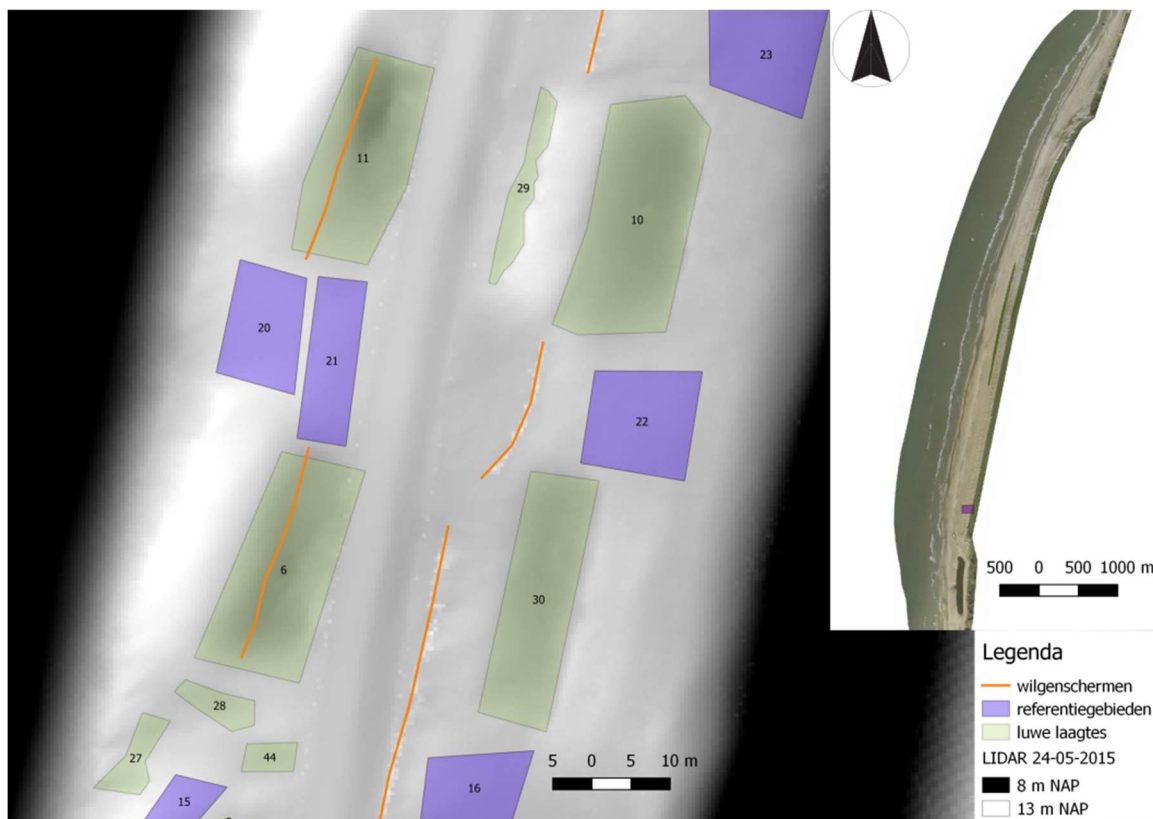
I.1 Methode

De morfologische veranderingen in de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid en Noord worden geanalyseerd op 2 vlakken: dynamiek en gemiddelde hoogteverandering. Het verband tussen deze 2 variabelen en initiële diepte, oppervlakte en locatie wordt beschouwd. Dit wordt gedaan voor zowel de luwe laagtes als voor een set met controlegebieden, een referentieset. Deze set wordt gebruikt om te kijken of de gevonden relaties echt door de luwe laagtes komen. De analyse bevat 4 stappen, deze worden hieronder weergegeven. Voor de analyse worden de LIDAR metingen en de luchtfoto's gebruikt, deze laatste vooral om de luwe laagtes te lokaliseren.

1 Luwe laagtes lokaliseren

Op basis van de luchtfoto's en LIDAR metingen worden de luwe laagtes handmatig gelokaliseerd en wordt tevens een set van gebieden gecreëerd die geen luwe laagte bevatten, de controlegebiedenset, voor profieltype 2 Zuid en Noord, met behulp van polygonen in GIS. Uiteindelijk zal dit 1 sets van meerdere luwe laagtes geven. Ook zal er een referentieset worden verkregen. Een gedeelte van de luwe laagtes en referentie gebieden in profieltype 2 Zuid is ter illustratie weergegeven in afbeelding I.1. De luwtes zijn over de eerste LIDAR meting heen weergegeven en ook de wilgenschermen zijn aangegeven.

Afbeelding I.1 De afbeelding geeft een deel van profieltype 2 Zuid weer met daarin luwe laagtes in groen en referentiegebieden in paars. Rechts boven is de locatie van dit stukje ten opzichte van de hele Hondsbossche Duinen weergegeven. De eerste LiDAR meting is weergegeven onder de polygonen. In de afbeelding zijn ook de wilgenschermen aangegeven in het oranje



2 Hoogte data verwerven

De hoogte van de luwe laagtes en controle gebieden in alle LiDAR metingen wordt bepaald met behulp van de polygonensets uit stap 1 en de LiDAR data die is geïnterpoleerd op raaien.

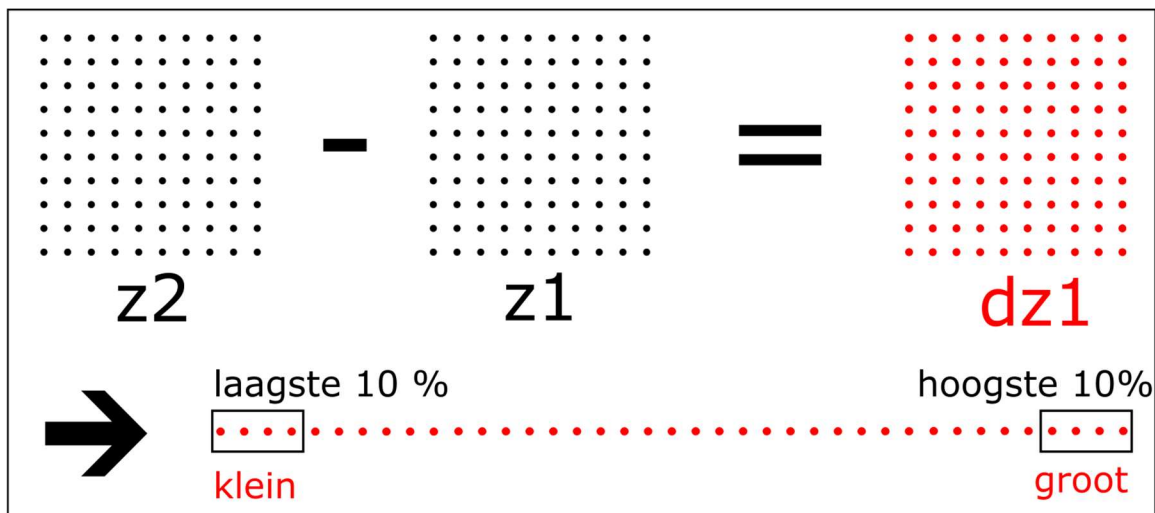
3 Berekenen variabelen

Voor iedere individuele luwe laagte worden 5 variabelen berekend op basis van de bepaalde hoogtes. De variabelen zijn, dynamiek, gemiddelde hoogtetoeename, initiële diepte, oppervlak en locatie. De variabelen zullen stuk voor stuk toegelicht worden hieronder.

a) Dynamiek.

De dynamiek van een gebied wordt gedefinieerd als het verschil tussen het gemiddelde van de kleinste en grootste 10 procent van de veranderingen tussen 2 metingen. De veranderingen in de tijd worden verkregen door opeenvolgende datasets van elkaar af te trekken, zie afbeelding I.2. Dit geeft 8 matrices met verschillen, er zijn 9 metingen beschikbaar. Per matrix wordt deze platgeslagen en gesorteerd, ook weergegeven in afbeelding 3.5. Van deze lange gesorteerde rij wordt het gemiddelde genomen van de laagste 10 procent en van de hoogste 10 procent. Het verschil tussen deze gemiddelde waarden wordt gedefinieerd als de dynamiek. Er volgen dus uiteindelijk 8 waarden voor de dynamiek per luwe laagte of controlegebied. Het gebruik van andere percentielen heeft weinig invloed op het uiteindelijke resultaat.

Afbeelding 1.2 In deze afbeelding is uitgelegd welke stappen doorlopen worden om de dynamiek te bepalen. Allereerst worden 2 opeenvolgende hoogtemetingen van elkaar afgetrokken, meting 1 wordt in dit voorbeeld van meting 2 afgetrokken. Vervolgens ontstaat er een, even grote, matrix met de verschillen tussen de metingen. De matrix bevat dus de veranderingen in 1 luwe laagte of controlegebied. Deze wordt platgeslagen en gesorteerd. Hier wordt de hoogste en laagste tien procent van gemiddeld. Het verschil tussen deze gemiddelden vormt de dynamiek van de luwe laagte of controlegebied



b) Gemiddelde hoogteverandering

De gemiddelde hoogteverandering, ten opzichte van het begin, wordt bepaald door de gemiddelde hoogte in het gebied tijdens de eerste meting af te trekken van de gemiddelde hoogte tijdens de andere metingen. Er is gekozen voor een gemiddelde hoogteverandering in plaats van volumeverandering om de invloed van het oppervlak van de luwe laagtes te beperken, hoe groter het oppervlak hoe groter de volumeveranderingen.

c) Initiële diepte

De initiële diepte wordt bepaald door het verschil tussen het gemiddelde van de 5 procent laagst gelegen punten in een gebied en die van de hoogste 5 procent in de eerste LIDAR meting. Deze manier is dus te vergelijken met het bepalen van de dynamiek. Allereerst wordt de hoogtematrix van meting 1 omgezet in een rij en gesorteerd. Vervolgens wordt het gemiddelde van de 5 procent laagste en hoogste punten bepaald. Het verschil tussen deze 2 gemiddeldes is de initiële diepte van de luwe laagte.

d) Initiële oppervlak

Het initiële oppervlak wordt bepaald door het oppervlak van iedere afzonderlijke polygoon te berekenen in GIS. Het oppervlak is dus constant voor alle perioden per luwe laagte of referentiegebied.

e) Locatie

De locatie van de luwe laagte wordt gemeten in afstand tussen de laagte en de initiële duinvoet (NAP +3 m). Deze afstand wordt bepaald door de kortste afstand tussen de gemiddelde coördinaten van de luwe laagte en de duinvoet.

4 Variabelen tegen elkaar uitzetten

Nu alle variabelen bepaald zijn is het tijd om ze tegen elkaar uit te zetten zodat eventuele verbanden te observeren zijn. Dit zal gebeuren voor profieltype 2 Zuid en Noord. De variabelen diepte, grootte en locatie zullen in eerste instantie weergegeven worden met behulp van kleuren. Tevens zullen deze variabelen over intervallen gemiddeld worden om de afbeeldingen duidelijker te maken. De tijd zal hierbij op de horizontale as staan en de variabele dynamiek en gemiddelde hoogteverandering op de

verticale as. Naast deze plots zal ook het onderlinge verband tussen initiële diepte, initiële oppervlak en locatie bepaald worden door deze tegen elkaar uit te zetten. Samenvattend worden de volgende combinaties gemaakt:

- a) dynamiek tegen initiële diepte;
- b) dynamiek tegen initiële oppervlak;
- c) dynamiek tegen locatie;
- d) gemiddelde hoogteverandering tegen initiële diepte;
- e) gemiddelde hoogteverandering tegen initiële grootte;
- f) gemiddelde hoogteverandering tegen locatie;
- g) initiële diepte tegen initiële grootte;
- h) initiële diepte tegen locatie;
- i) initiële grootte tegen locatie.

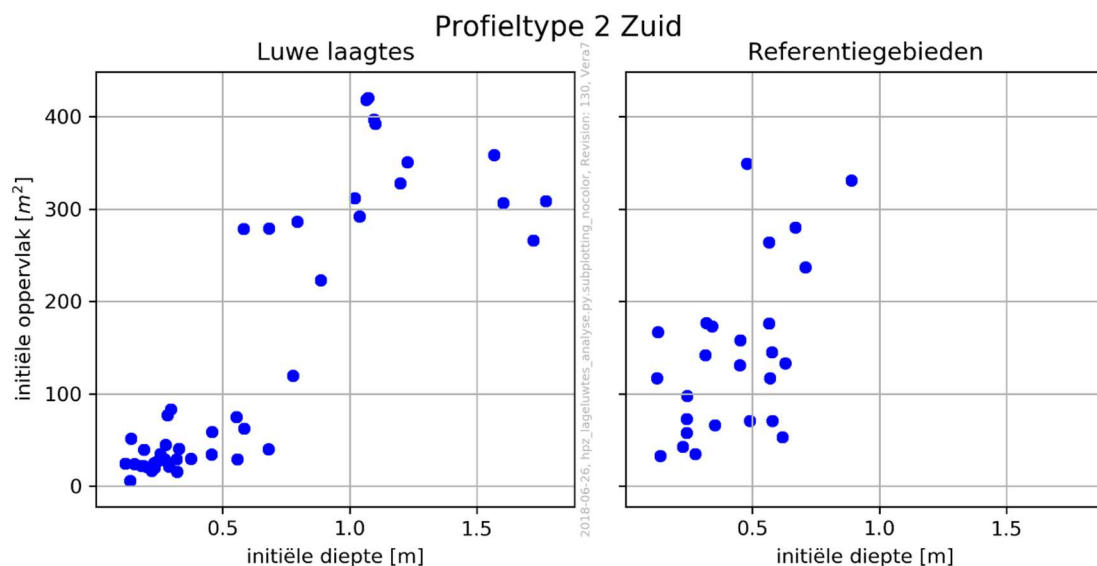
I.2 Resultaten

De onderlinge relatie tussen initiële diepte, initiële oppervlak en locatie zal eerst worden getoond in deze paragraaf. Dit zal worden gedaan voor Profieltype 2 Zuid en profieltype 2 Noord. Hierna zal de relatie tussen deze variabelen en de dynamiek gegeven worden, gevolgd door de gemiddelde hoogteverandering. Merk op dat er ongeveer 46 luwe laagtes geïdentificeerd zijn in profieltype 2 Zuid, 31 in profieltype 2 Noord en in beide gebieden 26 referentiegebieden. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat een interval door geen of enkel één luwe laagte/referentiegebied gerepresenteerd wordt.

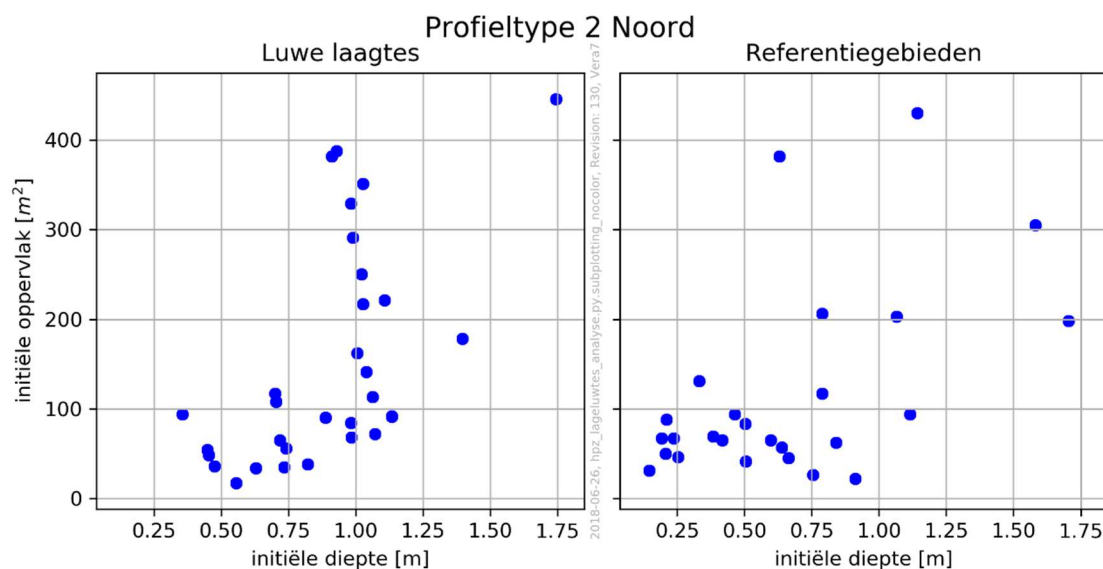
Onderlinge relatie initiële diepte, initiële oppervlak en locatie

Voor de luwe laagtes geldt dat hoe dieper deze initieel zijn, hoe groter de waarschijnlijkheid is dat ze groot aangelegd zijn, zie afbeelding I.3 en Afbeelding I.4. Voor de referentiegebieden is dit verband minder sterk, aangezien dit willekeurig gekozen gebieden zijn. Ook voor deze willekeurig gekozen gebieden kan een grotere hoogtevariatie gezien worden als ze groter zijn.

Afbeelding I.3 In deze afbeelding is de initiële diepte uitgezet tegen het initiële oppervlak van de gebieden. In de linker afbeelding is dit gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid. De rechter afbeelding toont dit voor de controlegebieden.

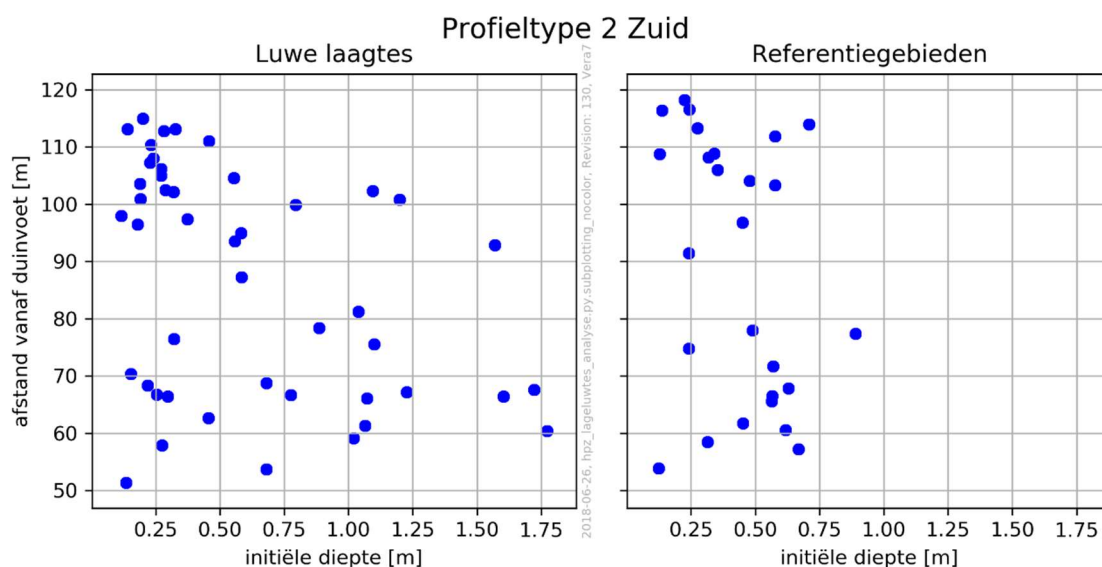


Afbeelding I.4 In deze afbeelding is de initiële diepte uitgezet tegen het initiële oppervlak van de gebieden. In de linker afbeelding is dit gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord. De rechter afbeelding toont dit voor de controlegebieden

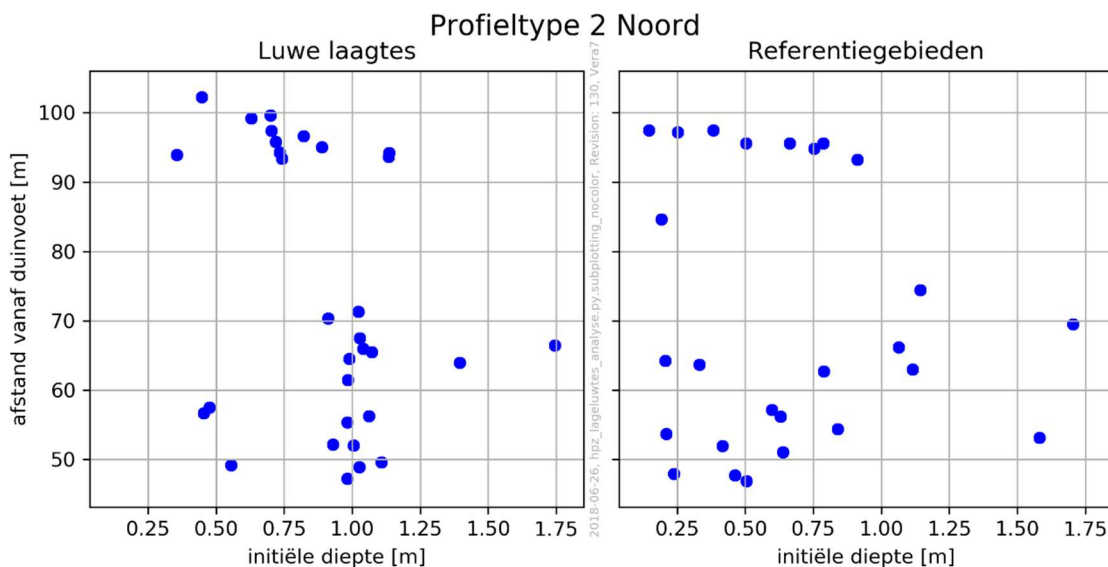


Voor de luwe laagtes geldt dat de afstand tot de duinvoet en initiële kuildepte een zwak verband hebben (afbeelding i.5 en Afbeelding I.6). Het dichtst bij de dijk komen alleen ondiepere gebieden voor, als gekeken wordt naar de luwe laagtes in profieltype 2 Noord en Zuid en de referentiegebieden van profieltype 2 Noord. Dit verband is niet te zien bij de referentiegebieden van profieltype 2 Zuid. Het verband is dus sterker voor de luwten dan voor de referentiegebieden.

Afbeelding I.5 In deze afbeelding is de initiële diepte van de luwe laagtes uitgezet tegen de afstand tussen de duinvoet (NAP +3 m) en gebied, deze parameter wordt locatie genoemd. In de linker afbeelding is dit gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid, rechts voor de referentiegebieden

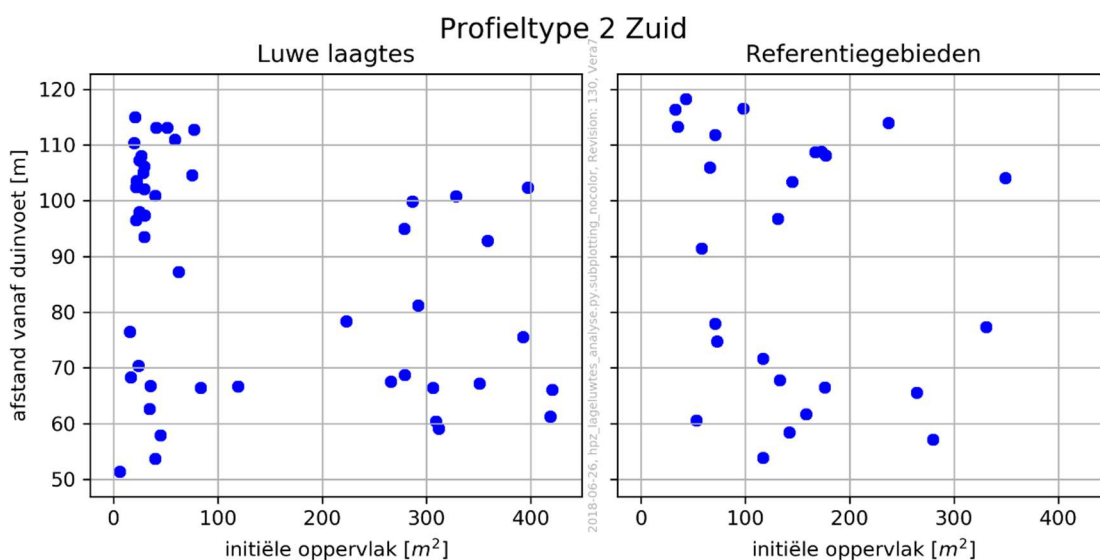


Afbeelding 1.6 In deze afbeelding is de initiële diepte van de luwe laagte uitgezet tegen de afstand tussen de duinvoet (NAP +3 m) en gebied, deze parameter wordt locatie genoemd. In de linker afbeelding is dit gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord, rechts voor de referentiegebieden

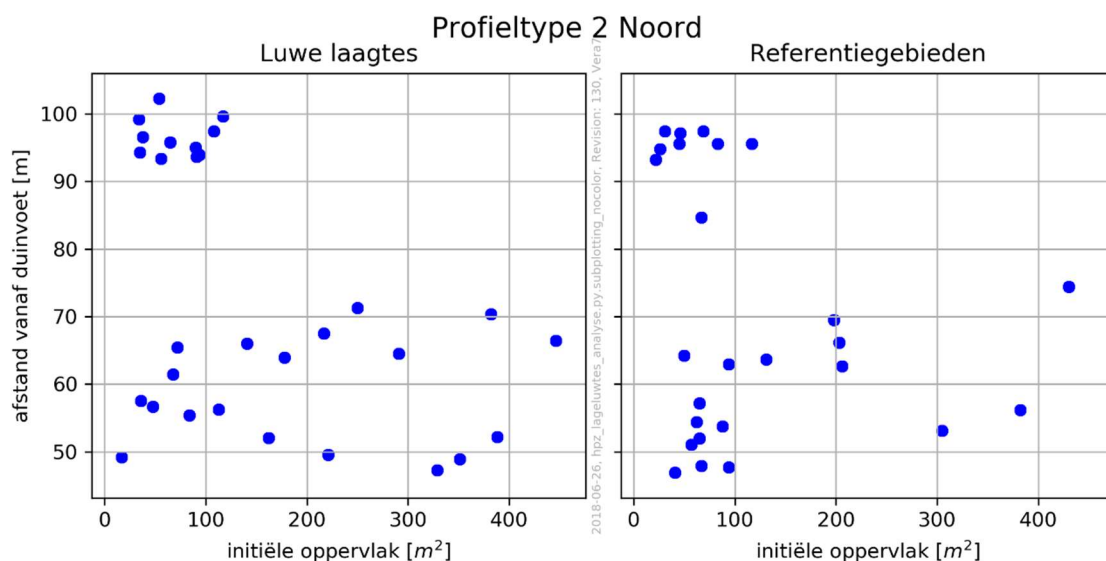


De grotere luwe laagtes worden vooral dicht bij de duinvoet gezien. In profieltype 2 Zuid worden ze vooral tussen 60 m en 100 m van de duinvoet gezien, zie Afbeelding 1.7, de kleinere zijn overal te vinden. Dit is het enige verband dat te zien is in de afbeelding, bij de controlegebieden is er geen verband. Ook bij profieltype 2 Noord zijn de grotere gebieden alleen dicht bij de duinvoet te zien, zie Afbeelding 1.8. Echter, dit geldt voor zowel de luwe laagtes als de referentiegebieden, in tegenstelling tot profieltype 2 Noord waar dit alleen geldt voor de luwe laagtes.

Afbeelding 1.7 In deze afbeelding is het initiële oppervlak uitgezet tegen de afstand tussen de duinvoet en de gebieden. In de linker afbeelding is dit gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid, rechts voor de referentiegebieden



Afbeelding I.8 In deze afbeelding is het initiële oppervlak uitgezet tegen de afstand tussen de duinvoet en de gebieden. In de linker afbeelding is dit gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord, rechts voor de referentiegebieden



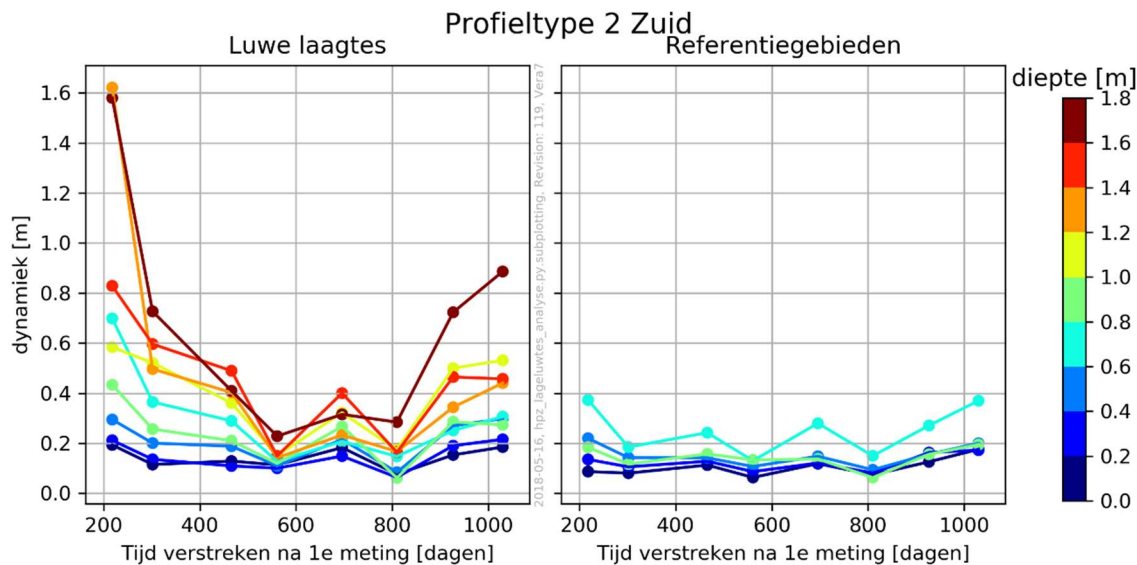
Dynamiek

De dynamiek in de luwe laagtes en referentiegebieden in profieltypen 2 Zuid en 2 Noord is uitgezet tegen initiële diepte in afbeelding i.9 en Afbeelding I.10, tegen initiële grootte in afbeelding i.11 en Afbeelding I.12 en tegen de afstand tussen luwe laagtes en duinvoet in afbeelding i.13 en Afbeelding I.14. Het valt op dat de dynamiek groter is in profieltype 2 Zuid dan in profieltype 2 Noord bij vergelijking van de y-assen in de figuren.

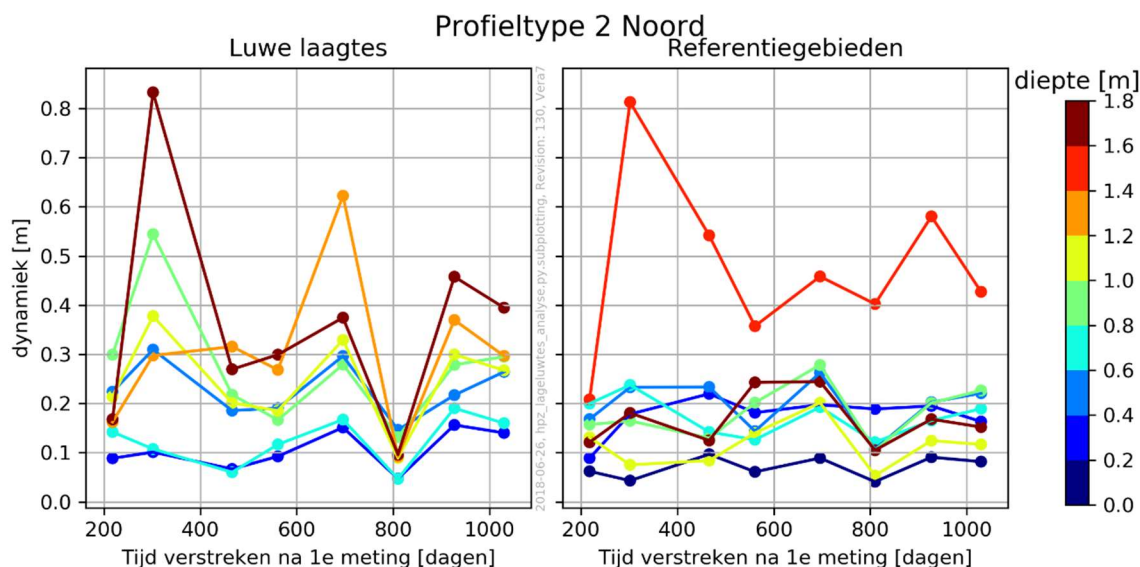
Bij profieltype 2 Zuid is de dynamiek groter bij de luwe laagtes dan bij de referentiegebieden. Dit verschil is het kleinste bij de afstand tussen duinvoet en luwe laagtes. Bij profieltype 2 Noord wordt dit ook gezien, maar in mindere mate. Ook is te zien bij profieltype 2 Zuid dat de dynamiek afneemt in de tijd tot de vierde periode en daarna sporadisch weer hoger is. Voor profieltype 2 Noord wordt juist eerst een toename gezien tussen eerste en tweede periode. Hierna wordt ongeveer hetzelfde gedrag gezien maar minder duidelijk, er zijn meer uitzonderingen. Voor de luwe laagtes is de afname groter dan voor de referentiegebieden.

Hoe groter de initiële diepte hoe groter de dynamiek (afbeelding i.9, Afbeelding I.10). Dit geldt voornamelijk voor profieltype 2 Zuid maar ook in zekere mate voor profieltype 2 Noord. Het valt op dat de blauwe en blauwgroene lijnen aan beide zijden van afbeelding i.9 ongeveer in dezelfde orde grootte liggen, zo tussen 0,1 en 0,4 m. Dit betekent dat een bepaalde initiële diepte bij de controlegebieden dezelfde orde grootte dynamiek geeft als gezien bij de luwe laagtes voor deze initiële diepte. Het betekent ook dat aanleggen van luwe laagtes ondieper dan ongeveer 0,8 meter weinig zin heeft. Deze hoogtevariaties komen ook voor bij de referentiegebieden, daar waar niet speciaal luwe laagtes aangelegd zijn. Opvallend is dat de initieel diepere luwe laagtes een stuk meer dynamiek afname vertonen dan de ondiepere bij profieltype 2 Zuid en dat de trends bij profieltype 2 Noord veel minder sterk zijn.

Afbeelding I.9 De linker afbeelding toont de relatie in de tijd tussen dynamiek en initiële diepte voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is de initiële kuildiepte gegeven. De afbeelding aan de rechter kant laat hetzelfde zien maar dan voor de controlegebieden in profieltype 2 Zuid

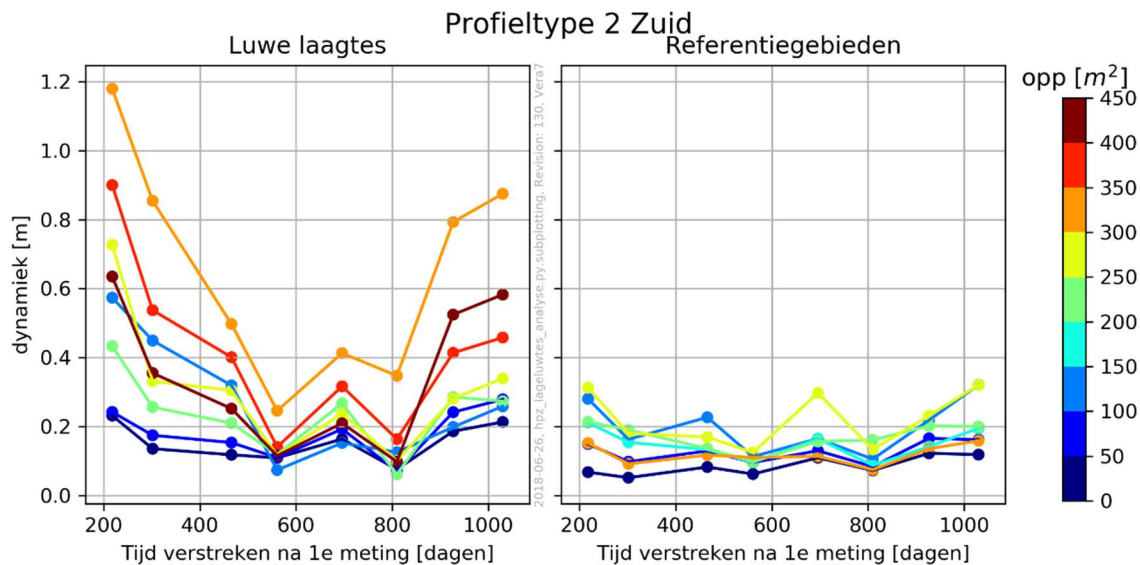


Afbeelding I.10 De linker afbeelding toont de relatie in de tijd tussen dynamiek en initiële diepte voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is de initiële kuildiepte gegeven. De afbeelding aan de rechter kant laat hetzelfde zien maar dan voor de controlegebieden in profieltype 2 Noord

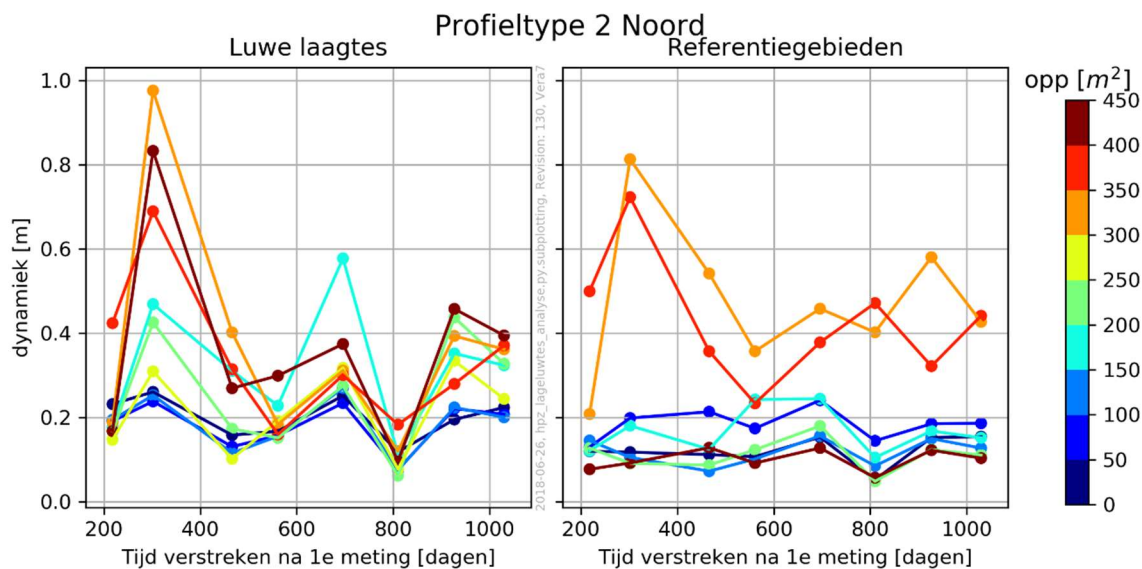


Het is waarschijnlijk dat een grotere kuil meer dynamiek geeft, zie Afbeelding I.11 en Afbeelding I.12. Uit Afbeelding I.11 volgt dat het waarschijnlijk is dat een grotere kuil meer dynamiek geeft in profieltype 2 Zuid. Dit verband is minder sterk dan gezien is tussen de dynamiek en de initiële diepte. Bij de referentiegebieden wordt geen verband gezien. Dat voor zowel initiële diepte als voor initiële oppervlakte een verband met dynamiek wordt gezien kan worden verklaard door het verband tussen de initiële diepte en initiële oppervlak van de luwe laagtes, zie Afbeelding I.3. In profieltype 2 Noord wordt ook gezien dat een grotere kuil meer dynamiek geeft dan in een kleinere, zie Afbeelding I.12. Echter wordt dit verband ook gezien bij de referentiegebieden en is het verband minder duidelijk dan bij profieltype 2 Zuid.

Afbeelding I.11 De relatie in de tijd tussen dynamiek en het initiële oppervlak voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid is te zien in de linker afbeelding. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is het oppervlak van het gebied gegeven. Hetzelfde is gedaan voor de referentiegebieden in profieltype 2 Zuid in de afbeelding aan de rechter kant

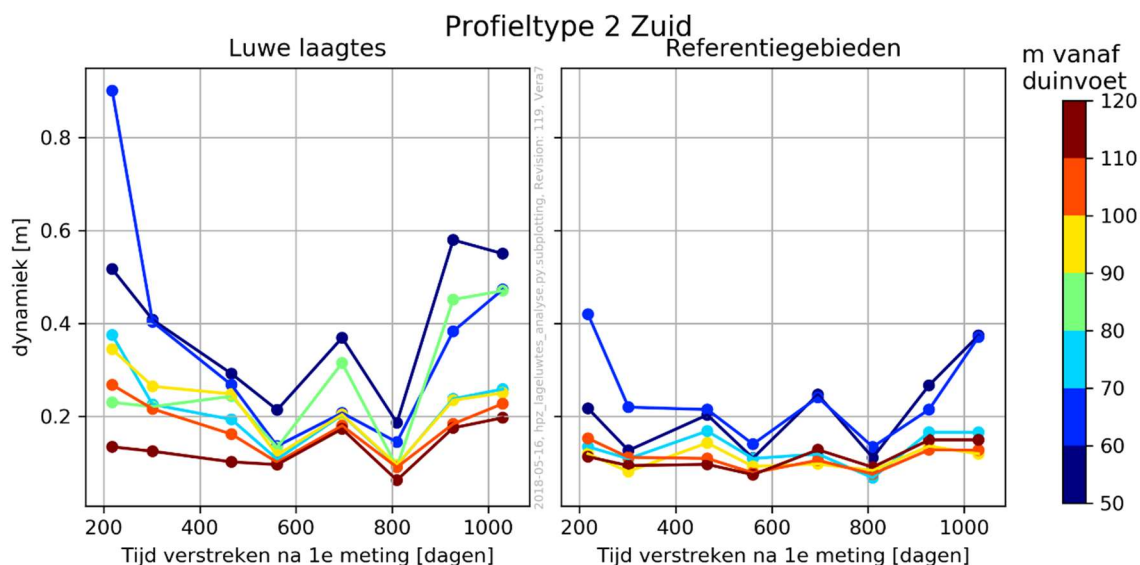


Afbeelding I.12 De relatie in de tijd tussen dynamiek en het initiële oppervlak voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord is te zien in de linker afbeelding. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is het oppervlak van het gebied gegeven. Hetzelfde is gedaan voor de referentiegebieden in profieltype 2 Noord in de afbeelding aan de rechter kant

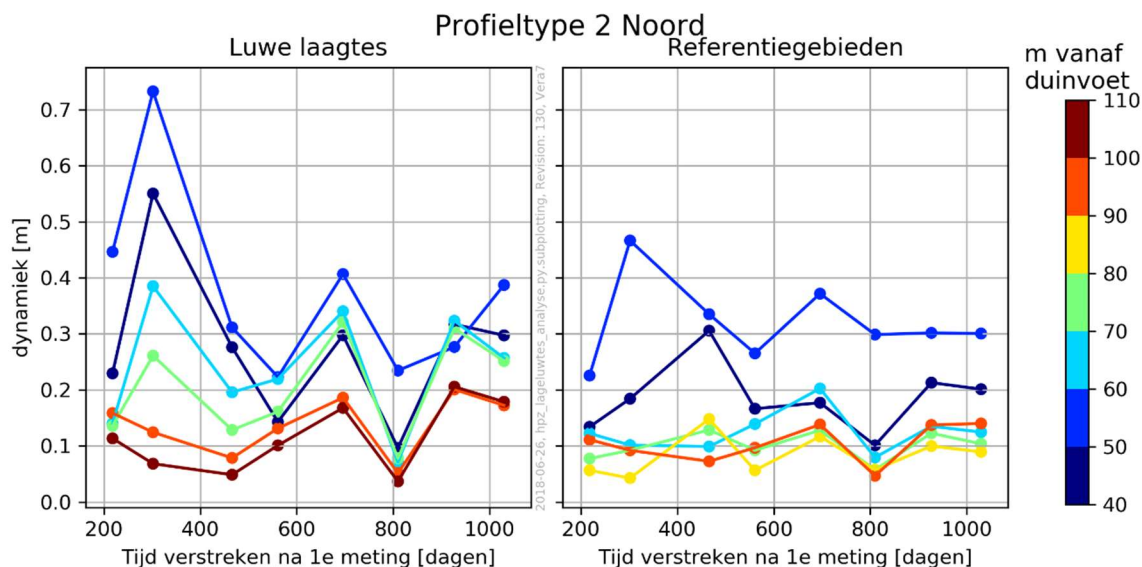


Er is zowel voor de referentiegebieden als voor de luwe laagtes een verband te zien tussen de dynamiek en de afstand tot de duinvoet, zie Afbeelding I.13 en Afbeelding I.14. Hoe dichterbij zee, hoe meer dynamiek er is. Het verband is sterker bij de referentiegebieden bij profieltype 2 Zuid, hier liggen de verschillende intervallen meer op volgorde van de afstand tot de duinvoet. Bij profieltype 2 Noord is dit juist andersom.

Afbeelding I.13 De linker afbeelding toont de relatie in de tijd tussen dynamiek en de afstand tussen de gebieden en de duinvoet zien voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is de afstand tussen de luwe laagte en dijk gegeven, zie paragraaf 3.2 voor hoe deze bepaald zijn. De afbeelding aan de rechter kant laat hetzelfde zien maar dan voor de controlegebieden in profieltype 2 Zuid.



Afbeelding I.14 De linker afbeelding toont de relatie in de tijd tussen dynamiek en de afstand tussen de gebieden en de duinvoet zien voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de dynamiek en in kleur is de afstand tussen de luwe laagte en dijk gegeven, zie paragraaf 3.2 voor hoe deze bepaald zijn. De afbeelding aan de rechter kant laat hetzelfde zien maar dan voor de controlegebieden in profieltype 2 Noord.



Gemiddelde hoogteverandering

De gemiddelde hoogteverandering in de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid en 2 Noord is uitgezet tegen initiële diepte in afbeelding I.15 en Afbeelding I.16, tegen initiële oppervlak in afbeelding I.17 en Afbeelding I.18 en tegen de afstand vanaf de duinvoet in Afbeelding I.19 en Afbeelding I.20. De hoogteverandering is bepaald ten opzichte van de eerste meting. Deze verandering kan gezien worden als een volumeverandering waarbij geprobeerd is de afhankelijkheid van het kuiloppervlak zoveel mogelijk te

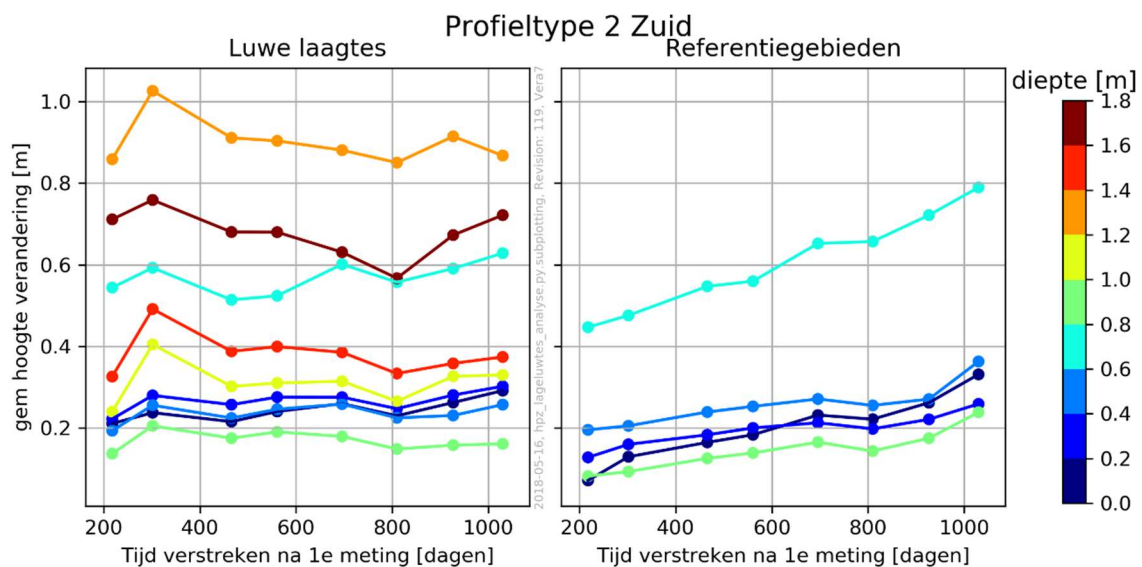
eliminieren. De gemiddelde hoogteverandering is groter bij profieltype 2 Zuid dan bij type 2 Noord, behalve bij de locatie tegen de gemiddelde hoogteverandering.

Het valt op dat in profieltype 2 Zuid het verschil tussen meting 1 en 2 aanzienlijk is, de gemiddelde hoogteverandering begint hoog, echter blijft de lijn daarna min of meer horizontaal in bijna alle gevallen. Dit betekent dat er na de tweede meting niet zulke grote gemiddelde hoogteveranderingen meer zijn. Dit is in lijn met wat gezien wordt in de ontwikkeling van het dwarsprofiel in profieltype 2 Zuid (paragraaf 4.5). Ook is het verschil in gemiddelde hoogteverandering tussen de luwe laagtes en referentiegebieden aanwezig maar niet aanzienlijk.

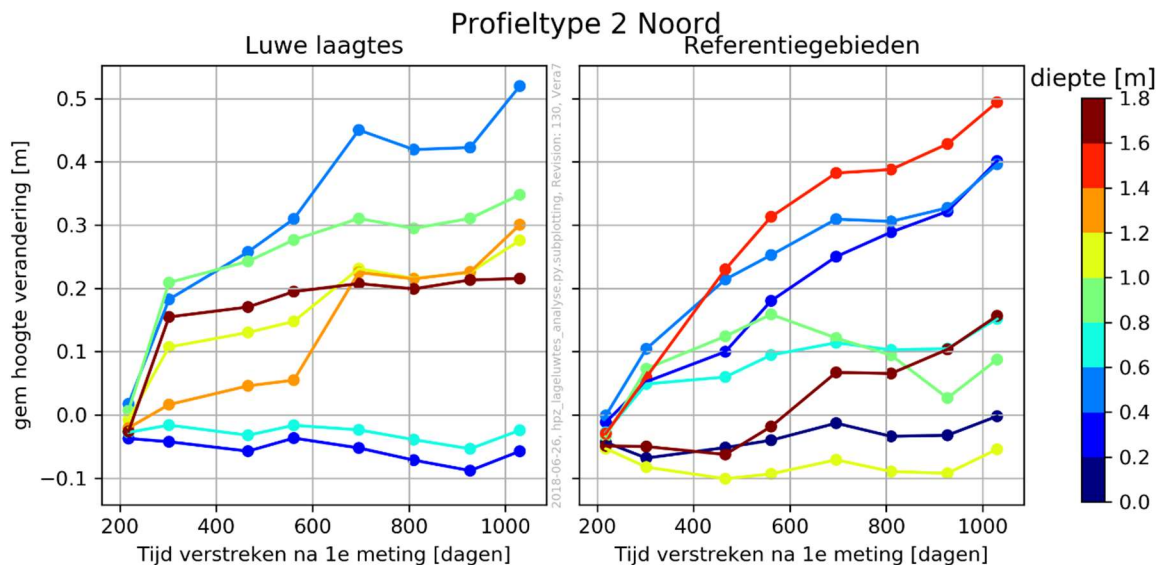
Bij profieltype 2 Noord wordt juist een groot verschil tussen meting 2 en 3 gezien. Hierna neemt de steilheid meestal af voor de luwe laagtes. De referentiegebieden laten dit gedrag minder zien, de aanzanding gaat daar langer door, behalve bij de relatie met locatie in Afbeelding I.20. In de luwe laagtes en de referentiegebieden gaat de aanzanding even hard door als gekeken wordt naar de relatie met de locatie, in het begin is deze wel groter bij de luwe laagtes. Het langer aanzanden van de referentiegebieden zou kunnen komen doordat de referentiegebieden vaker dichtbij de duinvoet liggen.

Er wordt een zwak verband gezien tussen diepere luwe laagtes en referentiegebieden en meer gemiddelde hoogtetoeename in profieltype 2 Zuid (Afbeelding I.15) en niet bij profieltype 2 Noord (Afbeelding I.16). Het verband bij profieltype 2 Zuid is echter niet zonder uitzonderingen; Bij de luwe laagtes, linker afbeelding, wordt bijvoorbeeld gezien dat de initiële diepte tussen 0.6 en 0.8 m meer gemiddelde hoogteverandering heeft dan het interval tussen 1.4 en 1.6 m. Dit zou kunnen liggen aan de beperkte set luwe laagtes. Bij de referentiegebieden wordt het verband ook gezien, ook met enige uitzondering. Bij de luwe laagtes zou dit verband kunnen komen door wilgenschermen die geplaatst zijn in de diepere laagtes.

Afbeelding I.15 In de afbeelding is de gemiddelde hoogteverandering tegen de initiële diepte uitgezet op verschillende tijdstipmomenten. Dit is links gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid en rechts voor de referentiegebieden. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de gemiddelde hoogteverandering sinds LiDAR meting 1 en in kleur is de initiële diepte gegeven.

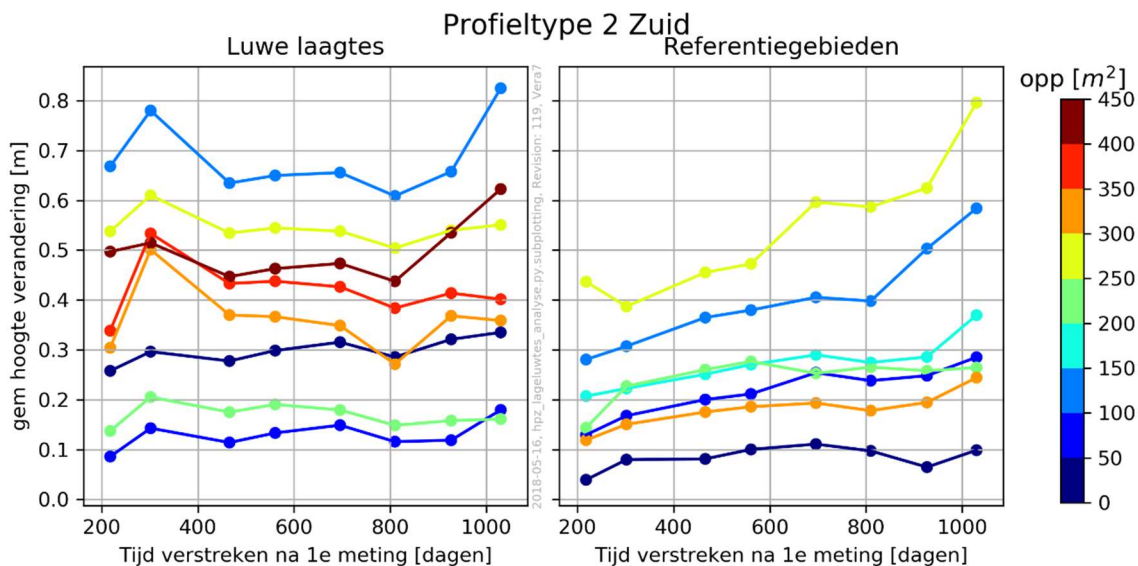


Afbeelding I.16 In de afbeelding is de gemiddelde hoogteverandering tegen de initiële diepte uitgezet op verschillende tijdsmomenten. Dit is links gedaan voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord en rechts voor de referentiegebieden. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de gemiddelde hoogteverandering sinds LiDAR meting 1 en in kleur is de initiële diepte gegeven.

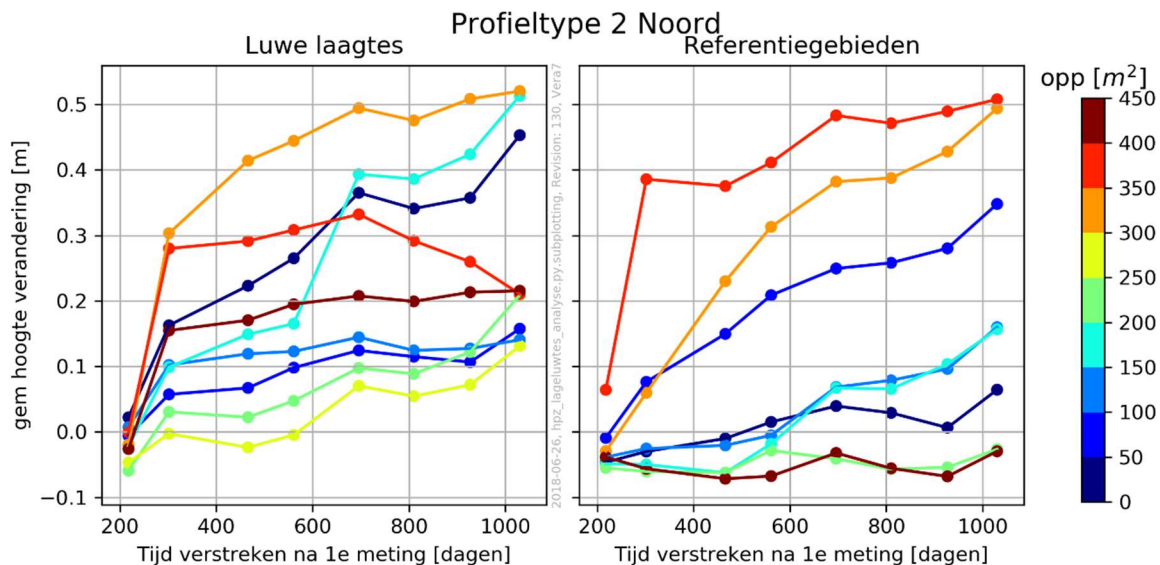


In profieltype 2 Zuid (Afbeelding I.17) en profieltype 2 Noord (Afbeelding I.18) zijn geen verbanden te zien tussen de oppervlakte en gemiddelde hoogteveranderingen, zowel voor de luwe laagtes als de referentiegebieden.

Afbeelding I.17 De gemiddelde hoogteverandering is tegen het initiële oppervlak uitgezet, in de tijd. Voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid in de linker afbeelding en voor de controlegebieden in de rechter. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de gemiddelde hoogteverandering sinds LiDAR meting 1 en in kleur is het oppervlak van de kuil getoond.

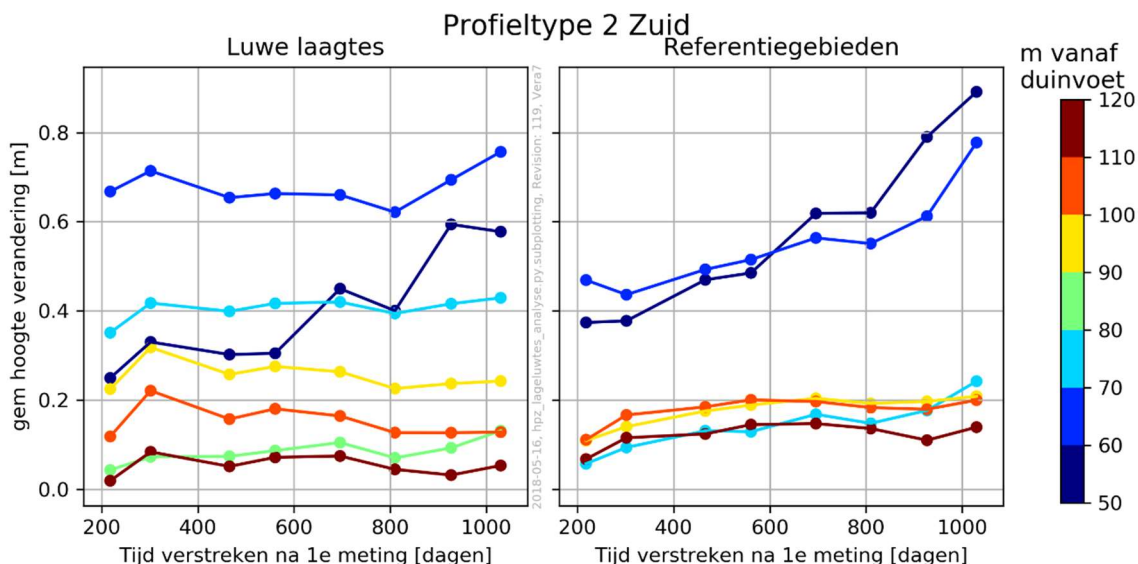


Afbeelding I.18 De gemiddelde hoogteverandering is tegen het initiële oppervlak uitgezet, in de tijd. Voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord in de linker afbeelding en voor de controlegebieden in de rechter. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de gemiddelde hoogteverandering sinds LiDAR meting 1 en in kleur is het oppervlak van de kuil getoond.

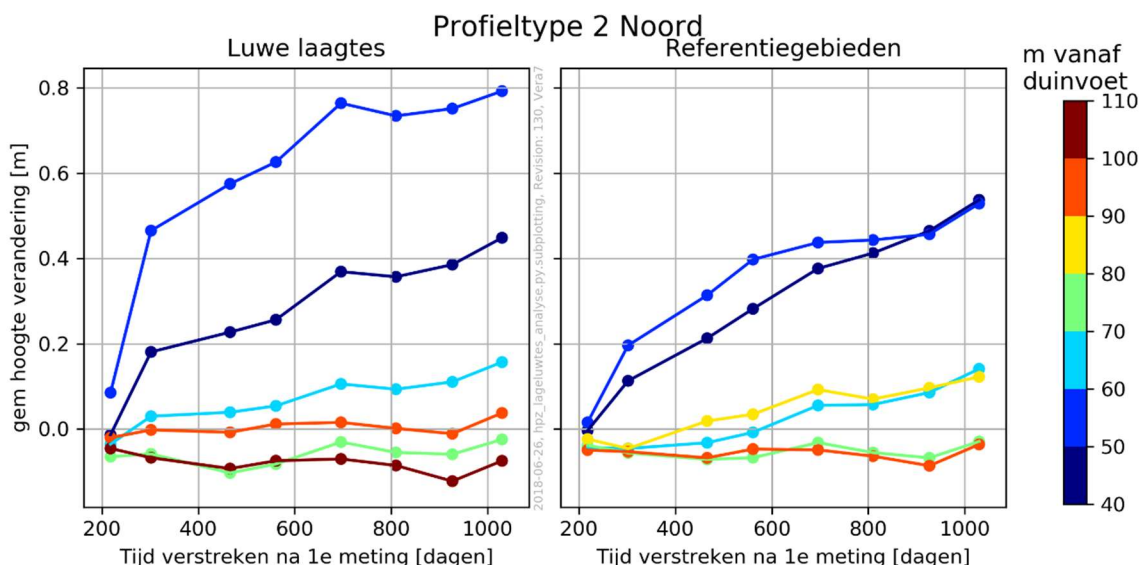


Hoe dichter bij zee hoe meer gemiddelde hoogtetoename voor de luwe laagtes en referentiegebieden in profieltype 2 Zuid (Afbeelding I.19) en profieltype 2 Noord (Afbeelding I.20). De uiteindelijke hoogteverandering (op meting negen) is nagenoeg hetzelfde voor de referentiegebieden en de luwe laagtes.

Afbeelding I.19 De gemiddelde hoogteverandering is uitgezet tegen de afstand tussen de duinvoet en het geschouwde gebiedje. Dit is gedaan in de tijd. Voor de luwe laagtes in profieltype 2 Zuid is dit links weergegeven. Voor de referentiegebieden aan de rechterkant. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de gemiddelde hoogteverandering sinds LIDAR meting 1 en in kleur is de afstand tussen het beschouwde gebied en duinvoet getoond.



Abbeelding I.20 De gemiddelde hoogteverandering is uitgezet tegen de afstand tussen de duinvoet en het geschouwde gebiedje. Dit is gedaan in de tijd. Voor de luwe laagtes in profieltype 2 Noord is dit links weergegeven. Voor de referentiegebieden aan de rechterkant. Op de x-as staat de tijd die verstreken is sinds de eerste meting, in dagen. Op de y-as staat de gemiddelde hoogteverandering sinds LIDAR meting 1 en in kleur is de afstand tussen het beschouwde gebied en duinvoet getoond.



I.3 Samenvatting, conclusie en aanbeveling

In deze paragraaf wordt eerst een samenvatting gegeven van de resultaten uit paragraaf I.2. Hierna worden conclusies getrokken op basis van de samenvatting. Uiteindelijk zal een aanbeveling worden gegeven.

Samenvatting

Het is te zien dat luwe laagtes zorgen voor meer dynamiek, zowel bij profieltype 2 Zuid als profieltype 2 Noord. Als ze initieel dieper zijn en als ze dichterbij de duinvoet liggen is dit effect groter. De invloed van de initiële diepte is het duidelijkst zichtbaar bij profieltype 2 Zuid. Het is hier ook te zien dat bij de referentiegebieden ook dieptes van 0,8 m gevonden worden. Het aanleggen van luwe laagtes voegt waarde toe wanneer deze dieper aangelegd worden. Bij profieltype 2 Noord heeft de locatie de sterkste relatie met de dynamiek. Dit komt doordat alle andere verbanden zwakker zijn dan gezien bij profieltype 2 Zuid. Dit kan worden verklaard doordat er in profieltype 2 Noord minder zand beschikbaar is voor profieltype 2 Zuid. Er wordt een zwak verband gezien met het initiële oppervlak van de luwe laagtes. Dit verband komt echter door de link tussen diepte en oppervlak van de luwe laagtes.

De dynamiek is het grootst tussen de eerste paar LiDAR metingen. Hierna blijft de dynamiek aanwezig en varieert deze rond een bepaald niveau. Dit niveau is hoger voor initieel diepere luwe laagtes en voor laagtes die dichterbij de duinvoet liggen. De variatie is groter bij profieltype 2 Noord dan bij type 2 Zuid. Het verschil tussen de luwe laagtes en referentiegebieden ook minder bij type 2 Noord dan bij type 2 Zuid.

Het is te zien dat luwe laagtes in profieltype 2 Zuid zorgen voor een klein beetje meer gemiddelde aanzanding. In profieltype 2 Noord wordt ongeveer evenveel uiteindelijke aanzanding gezien. Dit zou kunnen komen doordat in sommige luwe laagtes in type 2 Noord wilgenschermen geplaatst zijn. Dit is gedaan bij de initieel diepere laagtes. Als de gebieden initieel dieper zijn en als ze dichterbij de duinvoet liggen is de gemiddelde hoogte verandering groter bij profieltype 2 Zuid. De invloed van de locatie is het grootste. Bij profieltype 2 Noord wordt alleen invloed van de locatie gezien.

De gemiddelde hoogteverandering is tussen de eerste en de tweede LiDAR meting erg groot bij profieltype 2 Zuid, hierna wordt er nauwelijks meer een toename in gemiddelde hoogteverandering gezien. Bij

profieltype 2 Noord is dit tussen de tweede en derde LiDAR meting. Deze verandering is het grootst voor de luwe laagtes en minder voor de referentiegebieden. De aanzanding gaat langer door bij de referentiegebieden. Uiteindelijk is de aanzanding ongeveer even groot.

Conclusie

Uit het bovenstaande kan het volgende worden geconcludeerd:

- Luwe laagtes vangen in het begin meer zand in dan een "normaal" aangelegd duin (gerepresenteerd door de referentiegebieden).
- Afhankelijk van de zandbeschikbaarheid zorgen diepere luwe laagtes voor meer dynamiek en meer gemiddelde hoogteverandering. Wordt de zandbeschikbaarheid minder dan is de link tussen de initiële diepte en dynamiek minder en zal het normaal aangelegde duin inlopen met de hoogteverandering.
- Dichter bij de duinvoet wordt meer dynamiek en gemiddelde hoogteverandering gezien
- Luwe laagtes zijn van toegevoegde waarde als ze een grotere hoogtevariatie hebben dan het "normaal" aangelegd duin. In profieltype 2 Zuid was dit ongeveer 0.8 meter en in profieltype 2 Noord was dit groter.

Aanbevelingen

Het wordt aanbevolen om de getoonde analyse ook te doen voor alle luwe laagtes op de Hondsbossche Duinen, in plaats van de luwe laagtes in 1 profieltype op 2 locaties. Nu zijn er ongeveer 77 luwe laagtes geanalyseerd. In het hele gebied zijn ongeveer 430 luwe laagtes geïdentificeerd. Zoals blijkt uit de analyse hierboven kunnen luwe laagtes zich afhankelijk van de locatie en hoeveel zandaanvoer anders gedragen.

In een aantal luwe laagtes zijn op enig moment stuifschermen aangebracht of is alsnog helm ingeplant. Het wordt aanbevolen om deze gebieden uit de analyse te filteren en apart te beschouwen.



BIJLAGE: ONTWIKKELING DWARSPROFIEL PER PROFIELTYPE

In deze bijlage wordt per profieltype ingegaan op het gemeten hoogteverschil, de ontwikkeling van een typisch dwarsprofiel en de vergelijking met de voorspelde ontwikkeling (ref. 1) voorprofieltype 2 Zuid, 3 Zuid, 4, 3 Noord en 2 Noord. Conclusies staan in het hoofddocument (paragraaf 4.5.1.)

II.1 Profieltype 2 Zuid

Profielontwikkeling

De hoogtekaart van profieltype 2 Zuid laat zien dat de vorm van het profiel geleidelijk wat verloopt van zuid naar noord (afbeelding ii.1). In het zuiden ligt de kruin van het hoge duin wat hoger dan in het noorden. Ook is het zo dat het buitentalud van het hoge duin wat steiler is in het zuiden dan in het noorden, nabij de overgang naar profieltype 3.

De verschilkaart laat een aantal zaken zien:

- het eerste deel van de onderhoudssuppletie. Dit heeft alleen een kleine invloed op het strand en heeft nog geen effect op de accumulatie in het duin;
- erosie over het gehele hoge strand;
- een band van sterke accumulatie op het buitentalud en de kruin van het hoge duin. Deze band is smaller in het zuiden en breder in het noorden. Dit verloop wordt onder andere veroorzaakt door het steilere buitentalud van het hoge duin en door de aanwezigheid van meer wilgenschermen in het zuiden dan in het noorden (zie paragraaf 4.4);
- Meer erosieve vlekken bovenop het hoge duin zijn ter plaatse van luwe laagtes.

Het verschil in ontwikkeling in het zuiden en het noorden van profieltype 2 Zuid dat blijkt uit de verschilkaart, is terug te zien in de ontwikkeling van de dwarsprofielen.

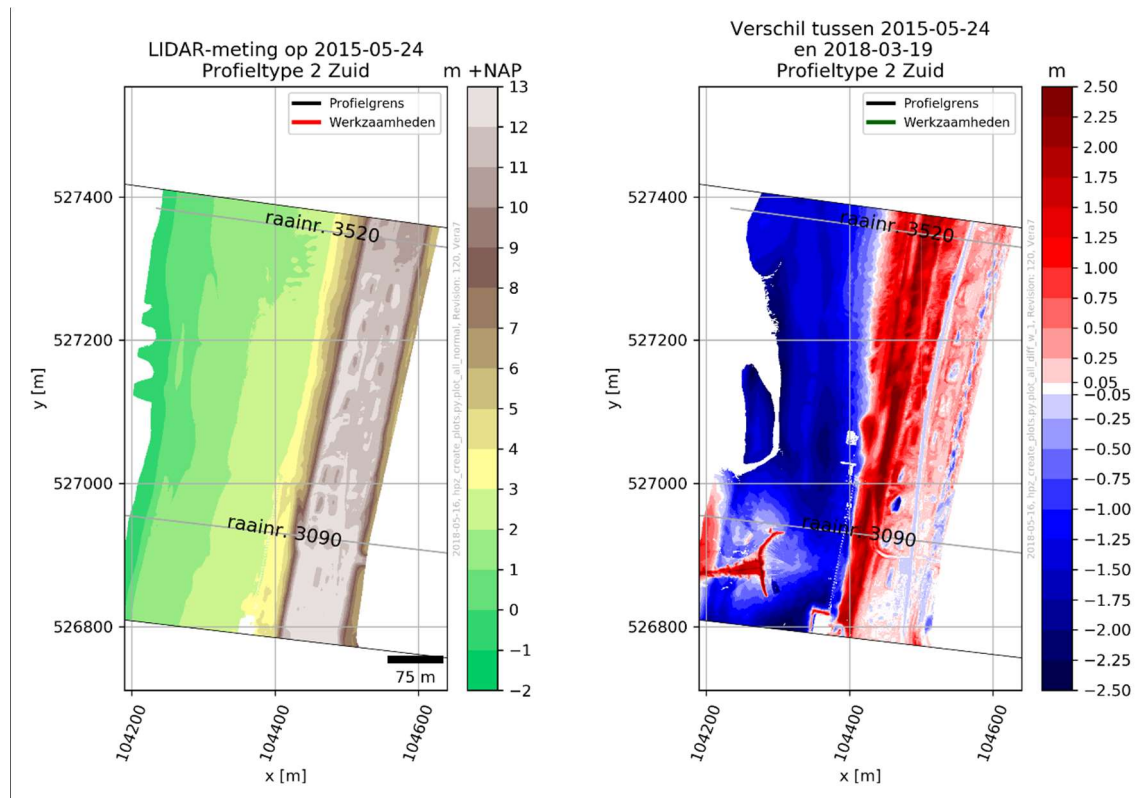
Het volgende is te zien op raai 3090 in het zuidelijk deel (afbeelding ii.2):

- maximale hoogtetoename tot circa 1 m op het buitentalud en <1 m op de kruin van het hoge duin;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op de zeewaartse zijde van de kruin van het hoge duin;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op het buitentalud van het hoge duin;
- vrij sterke afname van de strandbreedte, positie van de duinvoet (NAP +3 m) is redelijk constant.

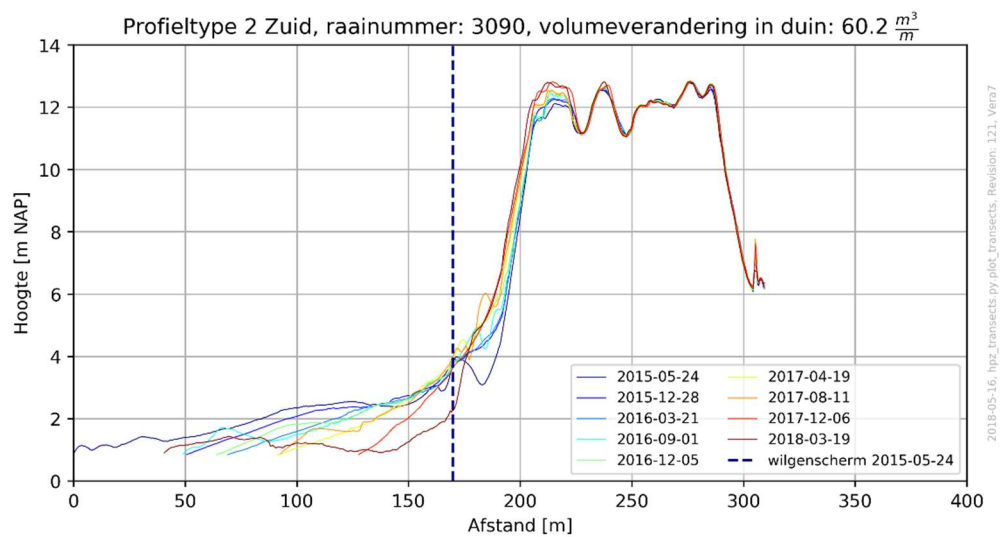
Het volgende is te zien op raai 3520 in het noordelijk deel (afbeelding ii.3):

- maximale hoogtetoename tot circa 2 m op het buitentalud en 1 m op de kruin van het hoge duin;
- met name in de eerste periode accumulatie op de zeewaartse zijde van de kruin van het hoge duin, daarna slechts kleine veranderingen op de kruin;
- accumulatie op het buitentalud van het hoge duin, met name onder de NAP +8 m. Hierbij wordt de (kleine) berm op het buitentalud die reeds aanwezig was bij aanleg, verder uitgebouwd en verhoogd;
- vrij sterke afname van de strandbreedte, positie van de duinvoet verplaatst zeewaarts in de tijd.

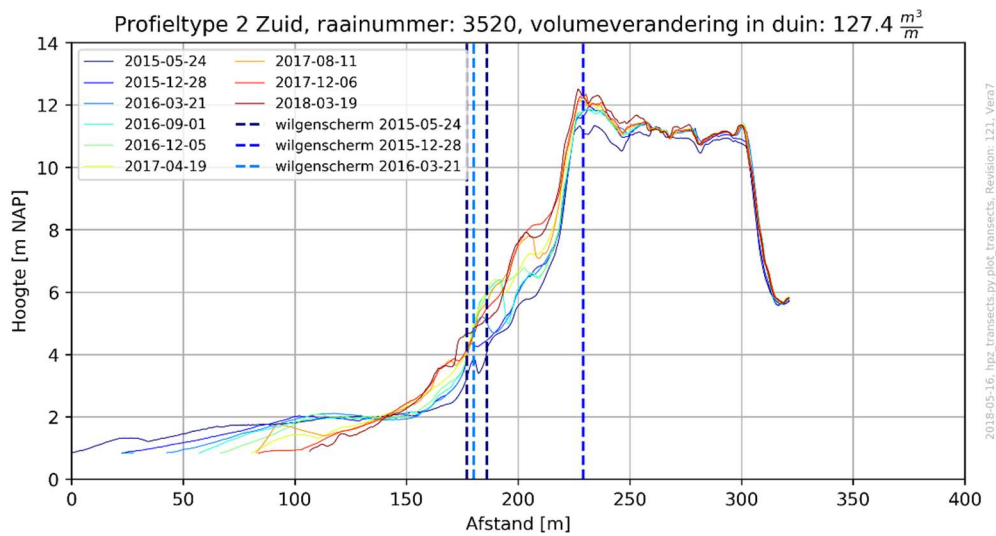
Afbeelding II.1 Overzicht profieltype 2 Zuid; links: hoogtekaart eerste meting op 24 mei 2015; rechts: verschilkaart laatste meting (19 maart 2018) minus eerste meting



Afbeelding II.2 Profielontwikkeling profieltype 2 Zuid, raai 3090



Afbeelding II.3 Profielontwikkeling profieltype 2 Zuid, raai 3520

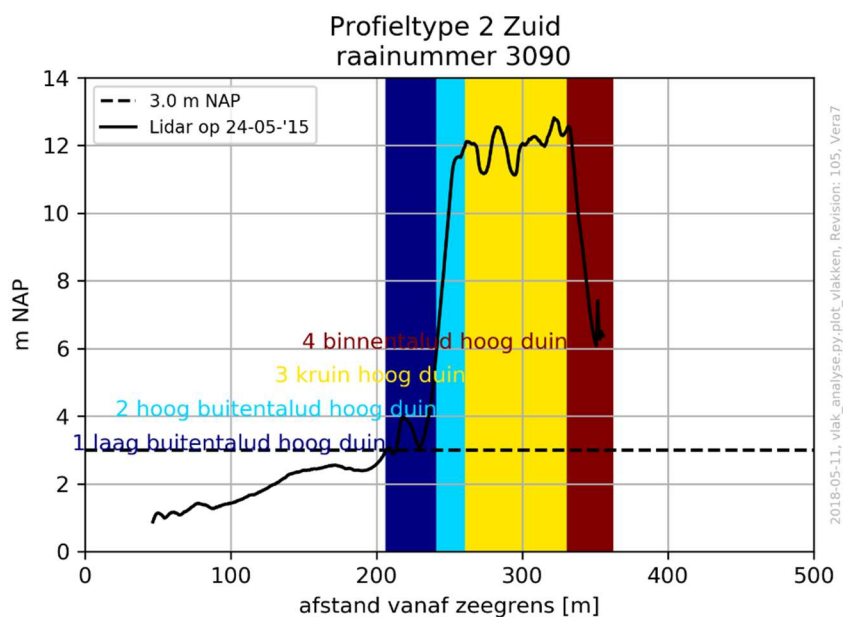


Kustdwarse verdeling accumulatie

In het dwarsprofiel zijn zones gedefinieerd conform de definities uit paragraaf 2.2.3, waarmee bepaald is hoe de accumulatie zich verdeelt over het dwarsprofiel (afbeelding ii.4). Dit is vervolgens gemiddeld voor alle dwarsprofielen in een profieltype.

Voor profieltype 2 Zuid blijkt dat het grootste deel van het instuivende zand terecht komt op het buitentalud (circa 70 %) en op de kruin van het hoge duin (circa 26 %). Van al het zand komt ongeveer 30 % hoog op het buitentalud terecht (>NAP +6 m).

Het totale, gemiddelde accumulatievolume in profieltype 2 Zuid komt vrijwel exact overeen met de voorspelde waarden na 3 jaar ($90 \frac{m^3}{m}$). Er was daarnaast voorspeld dat ongeveer 40 % van de accumulatie zou plaatsvinden op het binnentalud van het hoge duin. Dit blijkt maar 1 % te zijn. Het zand stuift minder ver door dan aangenomen in het ontwerp.



Tabel 9.1 Totale accumulatie en kustdwarse verdeling profieltype 2 Zuid

Gemeten					
locatie	Laag buitentalud hoog duin	Hoog buitentalud hoog duin	Kruin hoog duin	Binnentalud hoog duin	Totaal in duin
m ³ /m	38.1	26.6	23.3	1.3	89.3
procentueel	42.7	29.8	26.1	1.4	100.0
Voorspeld					
locatie	buitentalud en kruin		binnentalud	totaal in duin	
m ³ /m	54		36	90	
procentueel	60		40	100	

II.2 Profieltype 2 Noord

Profielontwikkeling

De hoogtekaart van profieltype 2 Noord laat zien dat de globale vorm van het profiel redelijk constant is van zuid naar noord (afbeelding ii.5). Wel is er een aantal strandopgangen aanwezig waardoor het profiel lokaal wordt beïnvloed.

De verschilkaart laat een aantal zaken zien:

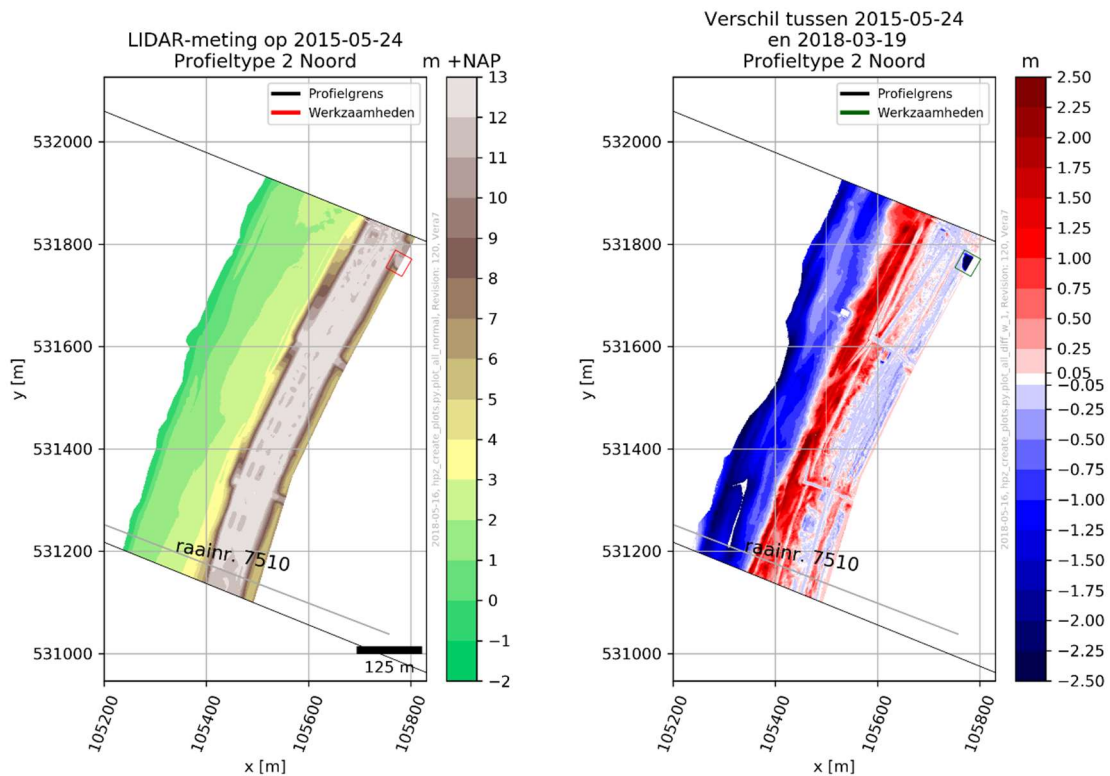
- erosie over het gehele hoge strand;
- een band van sterke accumulatie op het buitentalud en de kruin van het hoge duin;
- op de landwaartse zijde van de kruin van het hoge duin vindt in het middengebied lichte erosie plaats in de orde van 0.25-0.5 m, terwijl in het zuidelijk en noordelijk deel meer accumulatie optreedt. Mogelijk is dit een gevolg van de aanwezigheid van de strandopgangen waardoor er minder zand doorstuift. Ook zetting kan hierin een rol spelen.

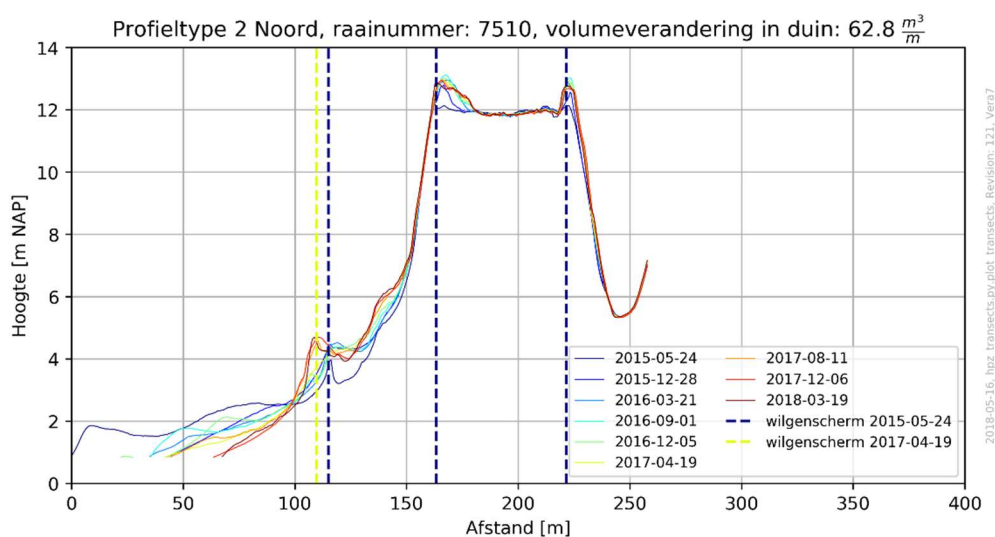
Het volgende is te zien op raai 7510 (afbeelding ii.6):

- maximale hoogtetoename tot circa 1 m op het buitentalud richting de duinvoet en <1 m op de kruin van het hoge duin;
- met name in de eerste periode accumulatie op de zeewaartse zijde van de kruin van het hoge duin, daarna slechts kleine veranderingen op de kruin;
- accumulatie op het buitentalud van het hoge duin, met name onder de NAP +6 m. De accumulatie in de laatste 3 metingen neemt af ten opzichte van de initiële accumulatie;
- vrij sterke afname van de strandbreedte, positie van de duinvoet verplaatst zeewaarts in de tijd.

De profielontwikkeling in profieltype 2 Noord is anders dan in 2 Zuid in de zin dat er in het noorden nauwelijks accumulatie optreedt hoger op het buitentalud van het hoge duin (>NAP +6 m).

Afbeelding II.5 Overzicht profieltype 2 Noord; links: hoogtekaart eerste meting op 24 mei 2015; rechts: verschilkaart laatste meting (19 maart 2018) minus eerste meting





Kustdwarse verdeling accumulatie

Voor profieltype 2 Noord komt een nog groter deel van het instuivende zand terecht op het buitentalud dan voor Zuid (circa 85%). Slechts 15 % van het totaal belandt hoog op het buitentalud (> NAP +6 m). 14 % van de accumulatie vindt plaats op de kruin van het hoge duin. De accumulatie in het profieltype 2 Noord vindt daarmee duidelijk lager in het dwarsprofiel plaats dan in profieltype 2 Zuid.

Het totale, gemiddelde accumulatievolume in profieltype 2 Noord is lager dan de voorspelling na 3 jaar, 52 tegen $90 \frac{m^3}{m}$. Ook in profieltype 2 Noord stuift het zand nauwelijks door tot het binnentalud van het hoge duin.

Tabel 9.2 Totale accumulatie en kustdwarse verdeling profieltype 2 Noord

Gemeten					
Locatie	Laag buitentalud hoog duin	Hoog buitentalud hoog duin	Kruin hoog duin	Binnentalud hoog duin	Totaal in duin
m^3/m	36.6	8.0	7.1	0.1	51.7
procentueel	70.6	15.4	13.7	0.2	100.0
Voorspeld					
locatie	buitentalud en kruin			binnentalud	totaal in duin
m^3/m	54			36	90
procentueel	60			40	100

II.3 Profieltype 3 Zuid

Profielontwikkeling

De hoogtekaart van profieltype 3 Zuid laat zien dat de vorm van het profiel geleidelijk wat verloopt van zuid naar noord (afbeelding ii.7). In het zuidelijk deel is het lage duin wat breder dan in het noordelijk deel.

De verschilkaart laat een aantal zaken zien:

- met name in het zuidelijk deel is er overwegend erosie op het hoge strand. In het noordelijk deel is ook accumulatie te zien, waardoor het volume op het strand netto ongeveer gelijk zal blijven;
- een band van sterke accumulatie van 2-3 m op het buitentalud en de kruin van het hoge duin;
- lichte accumulatie tot 0,75 m aan de landwaartse zijde van de kruin van het hoge duin.

Het volgende is te zien op raai 3750 in het zuidelijk deel (afbeelding ii.8):

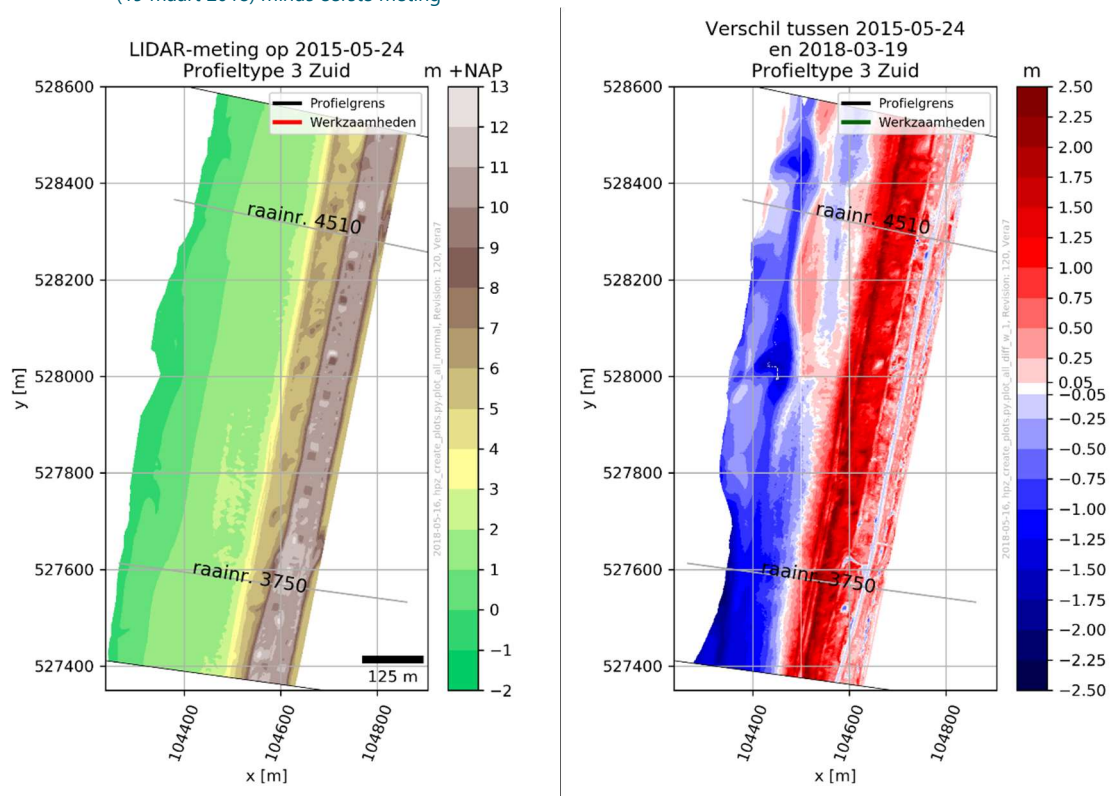
- maximale hoogtetoeename tot circa 2-3 m op de kruin van het lage duin en <1 m op de kruin van het hoge duin;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op de kruin van het lage duin en het buitentalud van het hoge duin;
- accumulatie op de kruin van het hoge duin vooral tussen de eerste 2 metingen. Daarna weinig hoogtevariatie;
- de zeewaartse zijde van het hoge strand schuift richting het duin, positie van de duinvoet verplaatst zeewaarts in de tijd.

Het volgende is te zien op raai 4510 in het noordelijk deel (afbeelding ii.9):

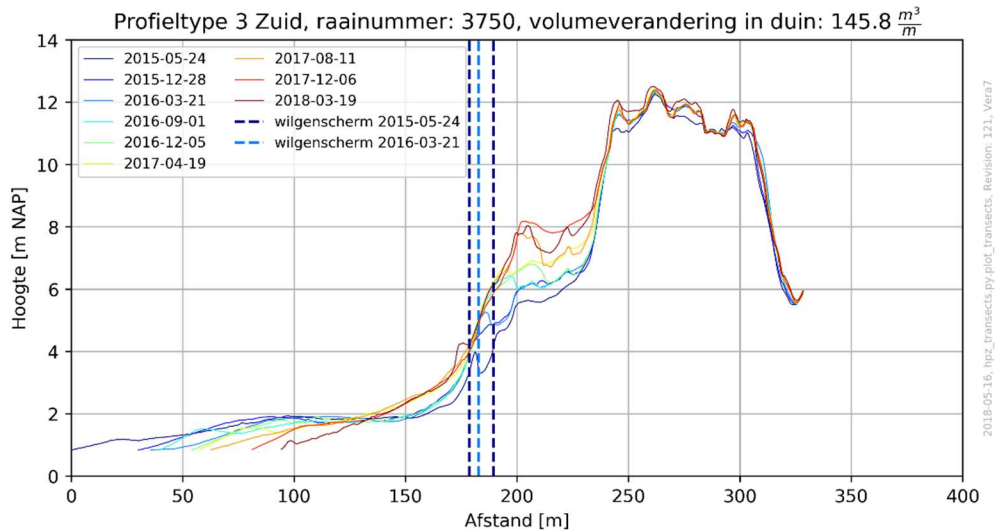
- maximale hoogtetoeename circa 2 m op de kruin van het lage duin en <1 m op de kruin van het hoge duin;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op de kruin van het lage duin en het buitentalud van het hoge duin;
- accumulatie op de kruin van het hoge duin vooral tussen de eerste 2 metingen. Daarna weinig hoogtevariatie;
- de zeewaartse zijde van het hoge strand is redelijk constant in de tijd, de positie van de duinvoet verplaatst zeewaarts in de tijd.

De breedte van het lage duin heeft weinig invloed op de ontwikkeling van het dwarsprofiel in de tijd en op het totale accumulatievolume in het dwarsprofiel.

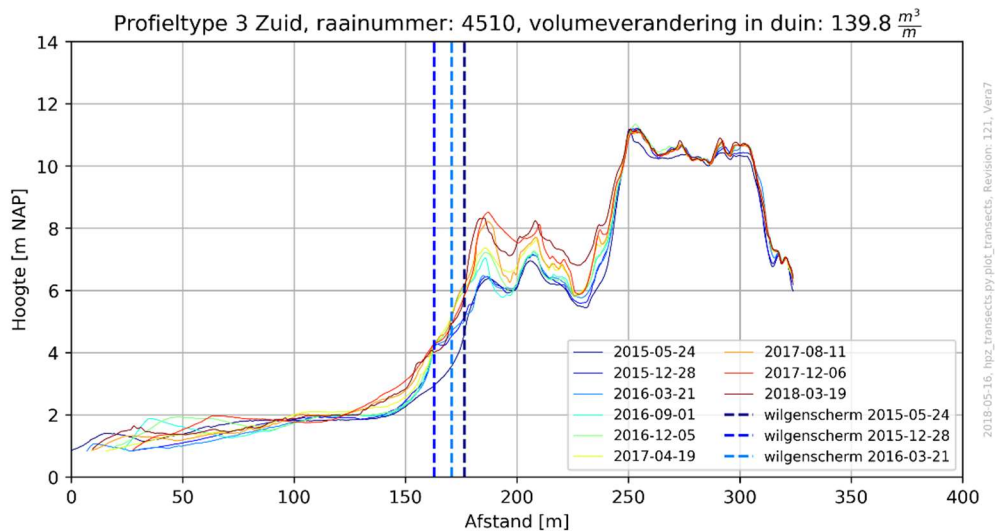
Afbeelding II.7 Overzicht profieltype 3 Zuid; links: hoogtekaart eerste meting op 24 mei 2015; rechts: verschilkaart laatste meting (19 maart 2018) minus eerste meting



Afbeelding II.8 Profielontwikkeling profieltype 3 Zuid, raai 3750



Afbeelding II.9 Profielontwikkeling profieltype 3 Zuid, raai 4510



Kustdwarse verdeling accumulatie

Ongeveer 70 % van het zand accumuleert op het buitentalud en de kruin van het lage duin. 25 % belandt op het buitentalud en de kruin van het hoge duin en ongeveer 4% op het binnentalud van het hoge duin.

Het totale, gemiddelde accumulatievolume is fors hoger dan de voorspelling na 3 jaar, 141 tegen $90 \frac{m^3}{m}$. Ongeveer 30 % van het zand stuift verder door dan het lage duin, terwijl 55 % was voorspeld. Wel stuift er vergeleken met profieltype 2 relatief veel door (5 %) naar het binnentalud van het hoge duin. Mogelijk vormt het lage duin een 'springplank' waardoor het zand wat makkelijker doorstuift.

Tabel 9.3 Totale accumulatie en kustdwarse verdeling profieltype 3 Zuid

Gemeten						
Locatie	buitentalud laag duin	Kruin laag duin	Buitentalud hoog duin	Kruin hoog duin	Binnentalud hoog duin	Totaal in duin
m ³ /m	36.5	64.0	13.9	21.5	5.4	141.3
procentueel	25.8	45.3	9.9	15.2	3.8	100.0
Voorspeld						
locatie	Kruin laag duin		Buitentalud hoog duin	Kruin hoog duin	Binnentalud hoog duin	Totaal in duin
m ³ /m	40.5		18	27	4.5	90
procentueel	45.0		20.0	30.0	5.0	100.0

II.4 Profieltype 3 Noord

De hoogtekaart van profieltype 3 Noord laat zien dat de vorm van het profiel geleidelijk wat verloopt van zuid naar noord (afbeelding ii.10). In het zuidelijk deel is het lage duin breder dan in het noordelijk deel.

De verschilkaart laat een aantal zaken zien:

- overwegend erosie op het hoge strand;
- een band van sterke accumulatie van 2-3 m op het buitentalud en de kruin van het hoge duin;
- lichte accumulatie tot 0,75 m aan de landwaartse zijde van de kruin van het hoge duin.

Het volgende is te zien op raai 6890 in het zuidelijk deel (afbeelding ii.11):

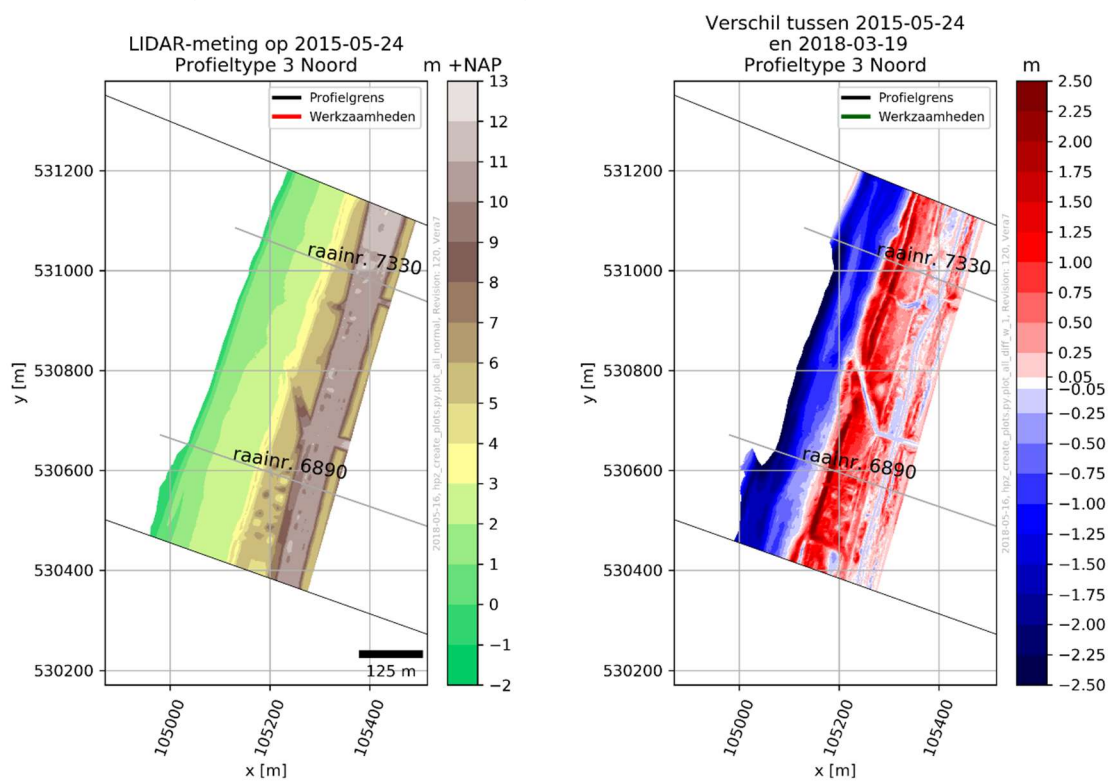
- maximale hoogtetoeename tot circa 2 m op de kruin en buitentalud van het lage duin en <1 m op de kruin van het hoge duin;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op de kruin en buitentalud van het lage duin net boven de NAP +6 m;
- weinig accumulatie op de kruin en het buitentalud van het hoge duin;
- de zeewaartse zijde van het hoge strand schuift richting het duin, positie van de duinvoet blijft redelijk constant in de tijd.

Het volgende is te zien op raai 7330 in het noordelijk deel (afbeelding ii.12):

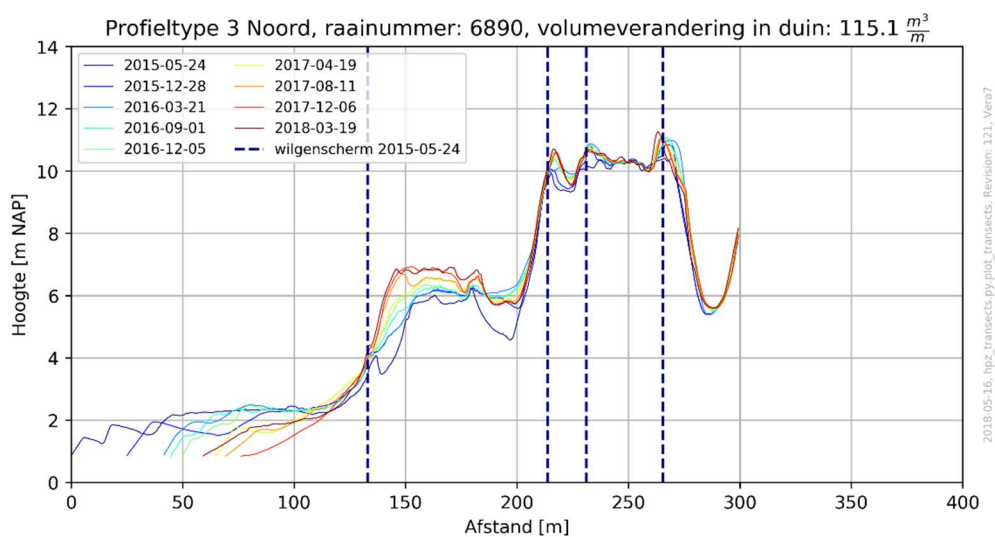
- maximale hoogtetoeename circa 1-2 m op de kruin van het lage duin en <1 m op de kruin van het hoge duin;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op de kruin en het buitentalud van het lage duin, met name <NAP +6m;
- weinig accumulatie op de kruin en het buitentalud van het hoge duin;
- de zeewaartse zijde van het hoge strand schuift richting het duin, positie van de duinvoet verschuift zeewaarts in de tijd.

Het verschil tussen het zuidelijk en het noordelijk deel van dit gebied zit voornamelijk in de breedte van het lage duin. Voor profieltype 3 in het zuiden is geobserveerd dat de invloed hiervan op het accumulatievolume in het dwarsprofiel beperkt is. Het verschil in accumulatie tussen het zuidelijk en noordelijk deel van profieltype 3 Noord moet daarom door andere factoren verklaard worden.

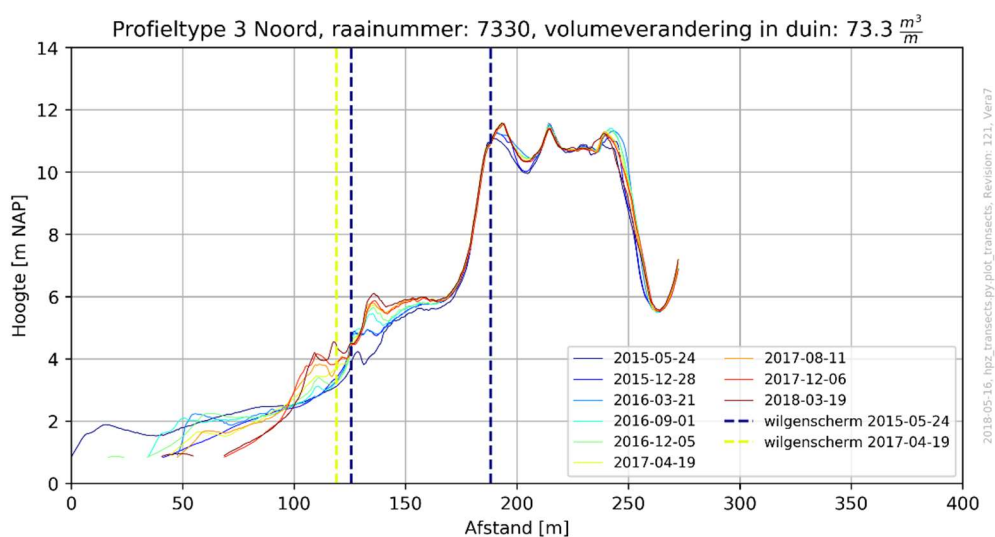
Afbeelding II.10 Overzicht profieltype 3 Noord; links: hoogtekaart eerste meting op 24 mei 2015; rechts: verschilkaart laatste meting (19 maart 2018) minus eerste meting



Afbeelding II.11 Profielontwikkeling profieltype 3 Noord, raai 6890



Afbeelding II.12 Profielontwikkeling profieltype 3 Noord, raai 7330



Kustdwarse verdeling accumulatie

De verdeling van de accumulatie komt redelijk overeen met profieltype 3 Zuid. Het percentage van de accumulatie op het lage duin is iets hoger, 73 % tegen 70 %. Net als in profieltype 2 vindt de accumulatie dus in het zuiden wat hoger in het dwarsprofiel plaats dan in het noorden.

Het totale, gemiddelde accumulatievolume is vrijwel exact gelijk aan de voorspelling, $90 \frac{m^3}{m}$. Ook in profieltype 3 Noord stuift er vergeleken met profieltype 2 relatief veel door (7,5 %) naar het binnentalud van het hoge duin.

Tabel 9.4 Totale accumulatie en kustdwarse verdeling profieltype 3 Noord

Gemeten						
Locatie	Buitentalud laag duin	Kruin laag duin	Buitentalud hoog duin	Kruin hoog duin	Binnentalud hoog duin	Totaal in duin
m^3/m	35.6	29.9	8.3	8.9	6.8	89.5
procentueel	39.8	33.5	9.3	9.9	7.5	100.0
Voorspeld						
Locatie	Kruin laag duin		Buitentalud hoog duin	Kruin hoog duin	Binnentalud hoog duin	Totaal in duin
m^3/m	40.5		18	27	4.5	90
procentueel	45.0		20.0	30.0	5.0	100.0

II.5 Profieltype 4

De hoogtekaart van profieltype 4 laat zien dat de vorm van het profiel redelijk constant is in kustlangse richting, hoewel het lage duin een licht golvend karakter heeft, waardoor de breedte varieert (afbeelding ii.13). Ook de breedte van de duinvallei varieert licht - de duinvallei is breder in het midden en wordt richting de uiteinden smaller.

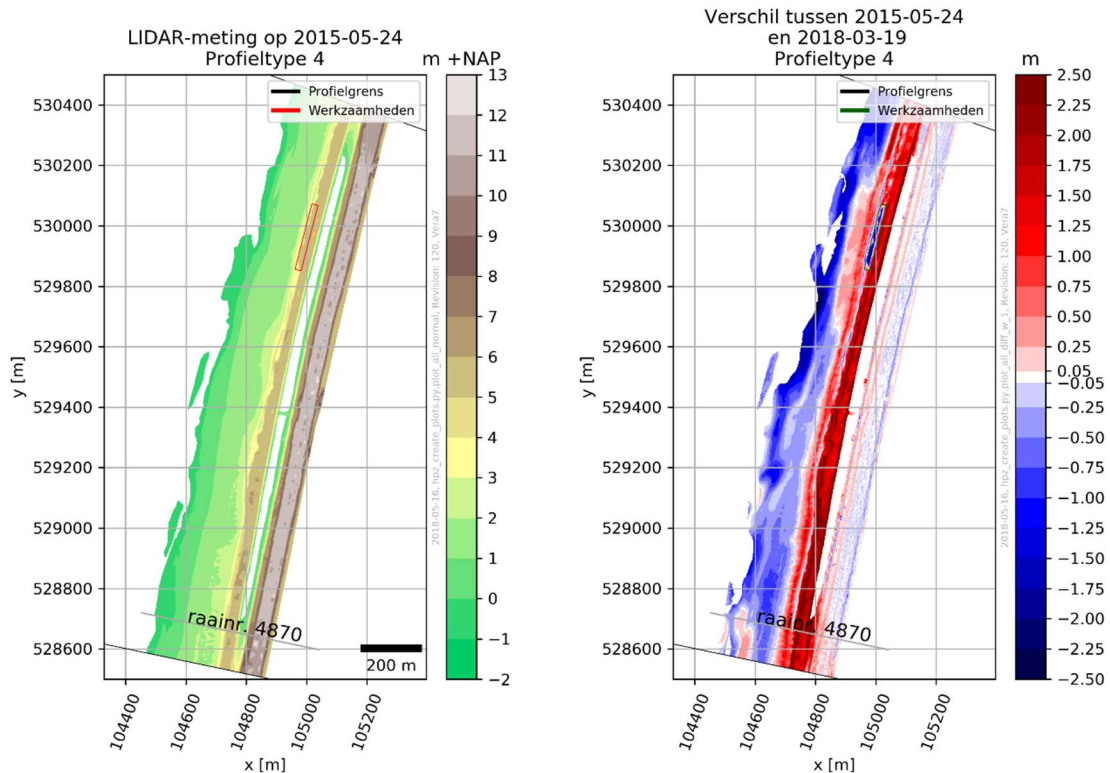
De verschilkaart laat een aantal zaken zien:

- overwegend erosie op het hoge strand, met name in het zuiden. In het noorden is ook een gebied met accumulatie;
- een band van sterke accumulatie van 2-3 m op het buitentalud en de kruin van het lage duin. Deze bandt loopt door tot het binnentalud van het lage duin tot het wateroppervlak. Daar zijn geen LiDAR metingen beschikbaar;
- er vindt veel accumulatie plaats aan het zuidelijke uiteinde van de duinvallei, waar deze droog ligt;
- weinig hoogteveranderingen op de kruin van het hoge duin. Deze ligt landwaarts van de duinvallei, die het doorstuiven van zand volledig blokkeert.

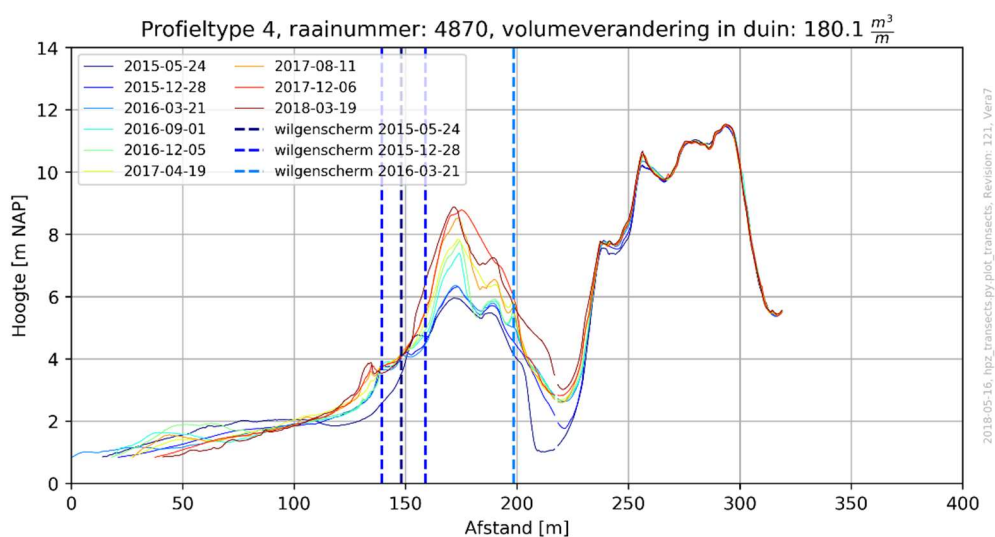
De ontwikkeling van het dwarsprofiel laat voor alle raaien een vergelijkbare trend zien. Daarom wordt alleen raai 4870 beschouwd hieronder. Deze raai snijdt het zuidelijk deel van de duinvallei. Dit deel ligt relatief hoog, zodat het niet onder water staat. Het volgende is te zien (afbeelding ii.14):

- maximale hoogtetoename ca. 2-3 m op de kruin en buitentalud van het lage duin, 2-4 m in het droge gedeelte van de duinvallei en vrijwel geen veranderingen verder landwaarts;
- het totale accumulatievolume is zeer groot met 180 m³/m. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat in het zuidelijke, droge deel van de duinvallei zowel zand wordt aangevoerd in kustdwarse als kustlangse richting. Dit zand accumuleert hier gemakkelijk omdat dit gebied fors lager ligt dan de omgeving en de windsnelheden lokaal sterk afnemen;
- geleidelijke accumulatie in de tijd op de kruin, het buitentalud en het binnentalud van het lage duin;
- de accumulatie loopt door tot in de duinvallei waardoor deze langzaam opvult;
- geen accumulatie op de kruin en het buitentalud van het hoge duin;
- de zeewaartse zijde van het hoge strand schuift richting het duin, positie van de duinvoet schuift zeewaarts.

Afbeelding II.13 Overzicht profieltype 4; links: hoogtekaart eerste meting op 24 mei 2015; rechts: verschilkaart laatste meting (19maart 2018) minus eerste meting



Afbeelding II.14 Profielontwikkeling profieltype 4, raai 4870



Kustdwarse verdeling accumulatie

Ongeveer 74 % van alle accumulatie vindt plaats op het buitentalud, de kruin en het binnentalud van het lage duin. 23 % vindt plaats in het natte gedeelte van de duinvalei. Er is vrijwel geen doorstuiving voorbij het natte gedeelte van de duinvalei.

In totaal vindt er meer accumulatie plaats dan voorspeld in de eerste 3 jaar, 130 om $90 \frac{m^3}{m}$. De verdeling van de accumulatie komt redelijk overeen tussen metingen en voorspellingen.

Tabel 9.5 Totale accumulatie en kustdwarse verdeling profieltype 4

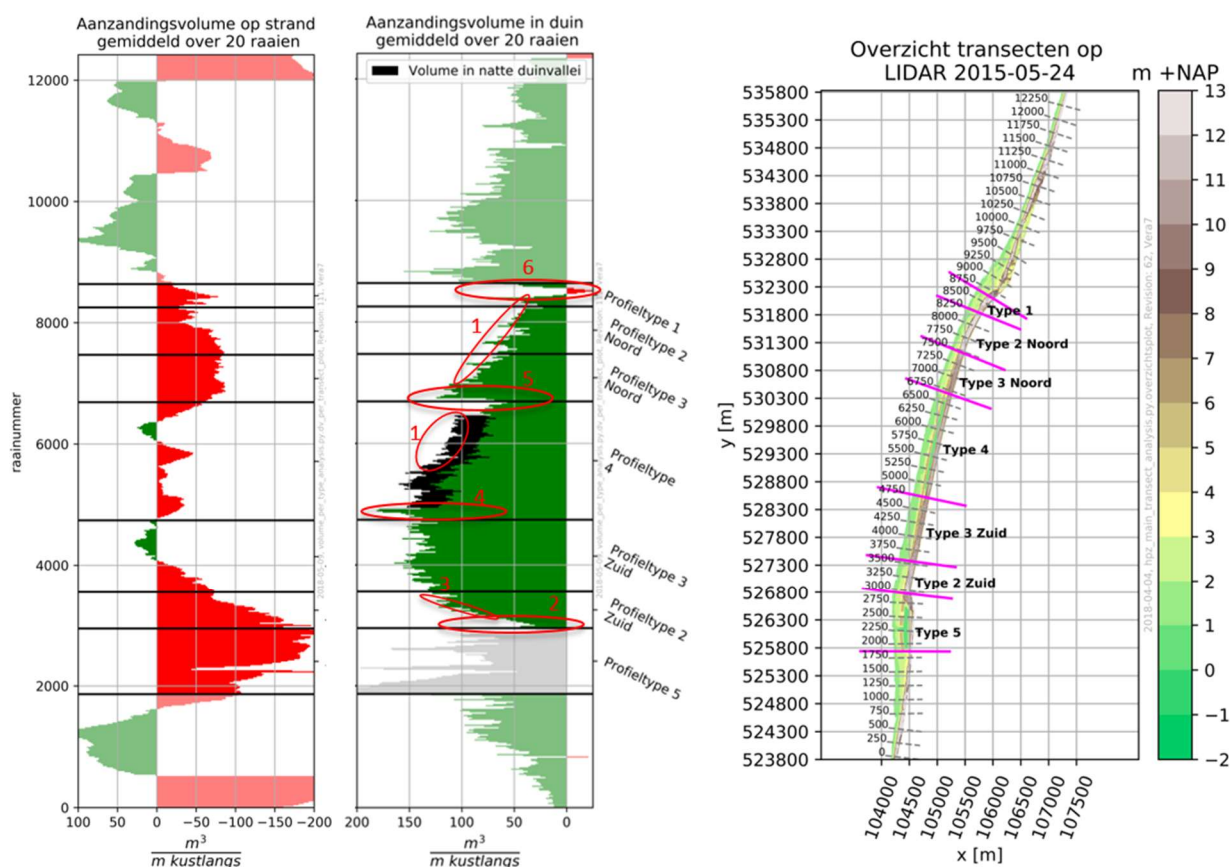
Gemeten										
locatie	buitentalud laag duin	kruin laag duin	binnentalud laag duin	natte duinvalei	laag buitentalud hoog duin	buitenberm hoog duin	hoog buitentalud hoog duin	kruin hoog duin	binnentalud hoog duin	totaal in duin
m^3/m	10.9	49.6	26.5	30	4.2	0.6	1.7	-1.2	-1.6	120.7
procentueel	9.0	41.1	22.0	24.9	3.5	0.5	1.4	-1.0	-1.4	100.0
Voorspeld										
locatie	eerste duinregel			natte duinvalei	buitentalud en kruin hoog duin				binnentalud hoog duin	totaal in duin
m^3/m	63			19	4.2				4.1	90.3
procentueel	69.8			21.0	4.7				4.5	100.0



BIJLAGE: VERKLARING KUSTLANGS TRENDS EN UITSCHIETERS

In paragraaf 4.4 is een aantal trends en uitschieters onderscheiden in de kustlangs accumulatie in het duin. Deze trends en uitschieters worden hieronder nog eens genoemd, getoond in afbeelding iii.1 en verklaard in de hieronder volgende paragrafen. Door deze trends en uitschieters te analyseren, wordt inzicht verkregen in een aantal verklarende factoren voor het accumulatiegedrag zoals dat wordt geobserveerd in de metingen.

Afbeelding III.1 Totale accumulatie op het strand (linker afbeelding) en in het duin (middelste afbeelding). Heldere kleuren: raaien binnen projectgebied. Rode genummerde cirkels: opvallende zaken in de duinaccumulatie; Rechts: Raaien en nummering (eerste LIDAR meting)



De trends en uitschieters die te zien zijn in afbeelding 4.5 zijn:

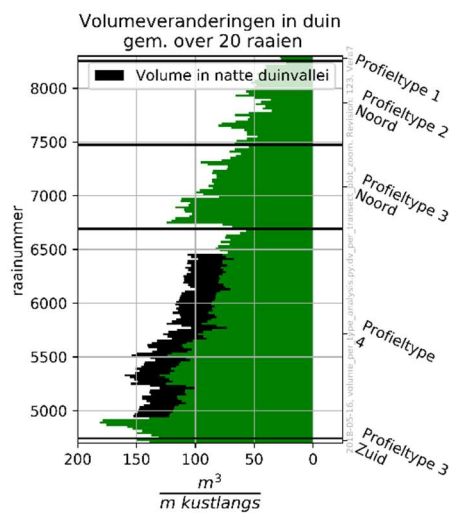
- 1 afnemende trend in de accumulatie in noordelijke richting over de noordelijke helft van profieltype 4, profieltype 3 Noord en 2 Noord;
- 2 toenemende trend in de accumulatie richting het noorden in profieltype 2 Zuid;
- 3 een piek in de accumulatie in het zuidelijk deel van profieltype 4;

- 4 een sprong in het aanzandingsvolume bij de overgang van profieltype 4 naar profieltype 3 Noord;
- 5 alleen in profieltype 1 treedt erosie op.

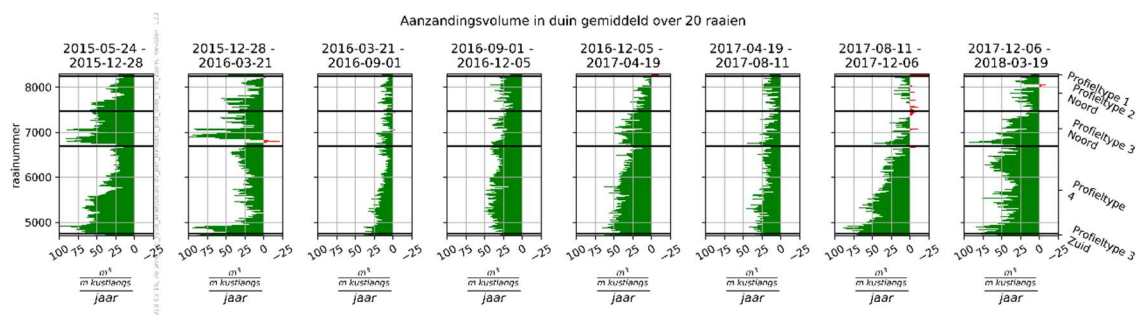
III.1 Accumulatie afname richting noorden profieltype 4, 3 Noord en 2 Noord

Een afnemende trend in accumulatie in noordelijke richting wordt gezien in de noordelijke helft van profieltype 4, 3 Noord en 2 Noord. Het gedetailleerde gedrag wordt getoond voor de hele monitoringsperiode in Afbeelding III.2 en per periode tussen 2 LiDAR metingen in afbeelding iii.3.

Afbeelding III.2 Totale volume verandering duin Hondsbossche Duinen met afnemende trend in noordelijke richting.



Afbeelding III.3 Volume verandering duin per periode tussen 2 LiDAR metingen voor Hondsbossche Duinen met afnemende trend in noordelijke richting.



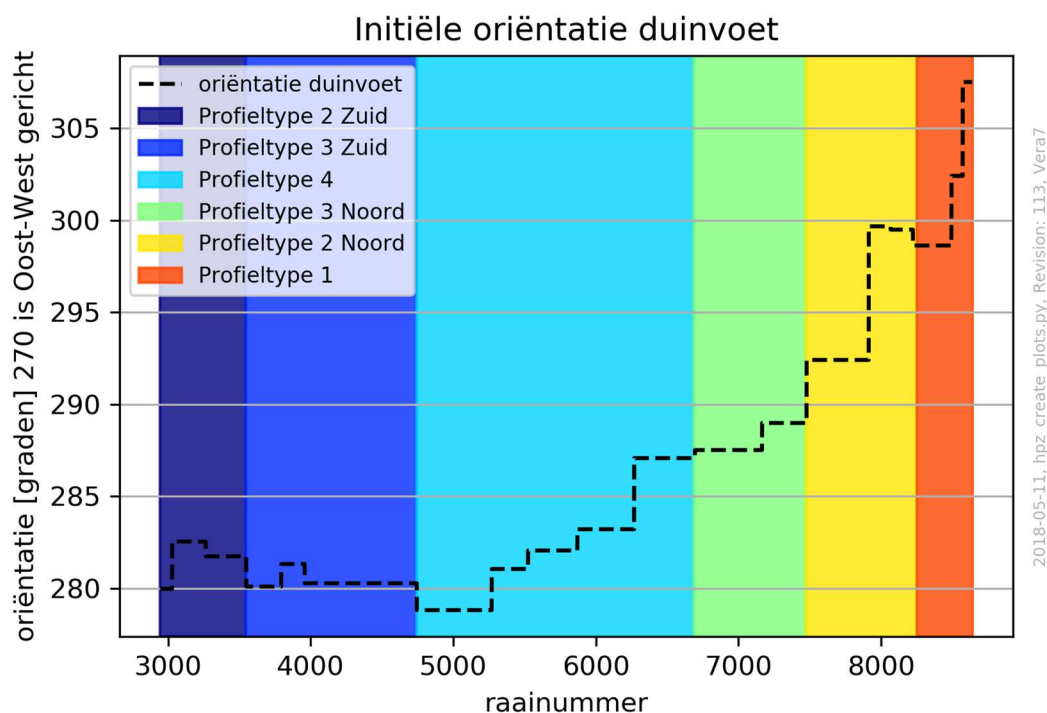
Een mogelijke verklaring voor de afname van de accumulatie in noordelijke richting in de noordelijke helft van profieltype 4, 3 Noord en 2 Noord, is de oriëntatie van de Hondsbossche Duinen ten opzichte van de dominante windrichting. Deze dominante windrichting is ongeveer Zuid-West, 220 graden, zie paragraaf

Afbeelding III.4 laat de oriëntatie zien dwars op het duin ter hoogte van de duinvoet (NAP +3 m) ten opzichte van het noorden. De oriëntatie blijft ongeveer constant rond 280 graden (West) tot net voor raainummer 6000, halverwege profieltype 4. Hierna verandert de oriëntatie geleidelijk naar een meer noordelijke richting (290-300 graden, WNW) doordat het duingebied met een lichte kromming is aangelegd. De oriëntatie verloopt vanaf halverwege profieltype 4 tot en met profieltype 2 Noord sterker dan in profieltype 2 Zuid en 3 Zuid. Juist vanaf dit punt begint het accumulatievolume af te nemen, in noordelijke richting.

Het belang van de oriëntatie van het duin ten opzichte van de windrichting volgt ook uit de kustlans variatie van de accumulatie in het duin per periode. De afnemende trend in de accumulatie treedt niet op in alle periodes (afbeelding iii.3). Waar de trend wel optreedt, verschilt de grootte per periode. Dit suggereert dat de variabelen die variëren per periode belangrijk zijn voor dit gedrag, zoals de dominante windrichting en -kracht.

Andersom geldt dat de variabelen die constant blijven over de gehele monitoringsperiode niet belangrijk zijn voor dit gedrag, zoals de korrelgrootte. De korrelgrootte ligt vast vanaf de aanleg en is, mede gezien de korte periode, representatief voor de gehele monitoringsperiode.

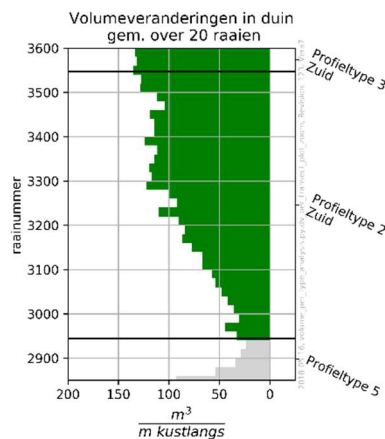
Afbeelding III.4 De oriëntatie (graden ten opzichte van Noord) van de duinvoet per raainummer in het gebied van de Hondsbossche duinen, 270 graden is Oost-West georiënteerde raai. Kleuren: profieltypen.



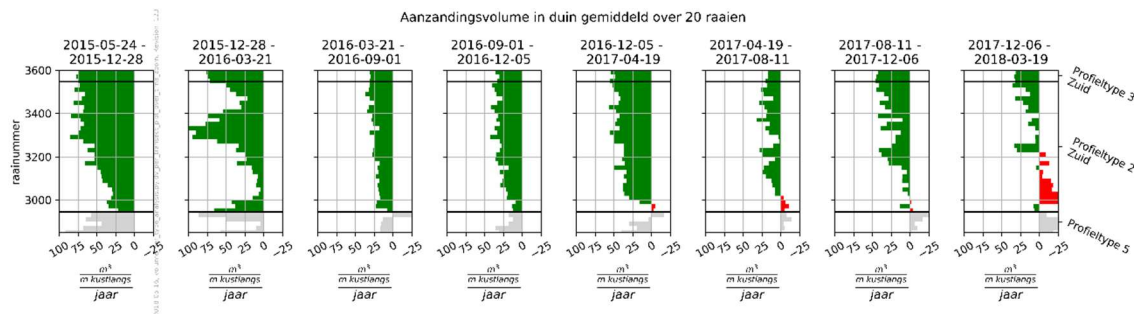
III.2 Toename accumulatie richting noorden in profieltype 2 Zuid

Er wordt een toename in totale accumulatie volume gezien in noordelijke richting in profieltype 2 Zuid, zie afbeelding iii.5. Deze toename wordt niet altijd even sterk gezien als de periode tussen 2 LiDAR metingen apart beschouwd worden, zie Afbeelding III.6. De trend is echter wel altijd te observeren, het zij soms zeer zwak.

Afbeelding III.5 Totale volume verandering duin Hondsbossche Duinen met toenemende trend in noordelijke richting in Profieltype 2 Zuid



Afbeelding III.6 Volume verandering duin per periode tussen 2 LiDAR metingen voor Hondsbossche Duinen met toenemende trend in noordelijke richting in Profieltype 2 Zuid

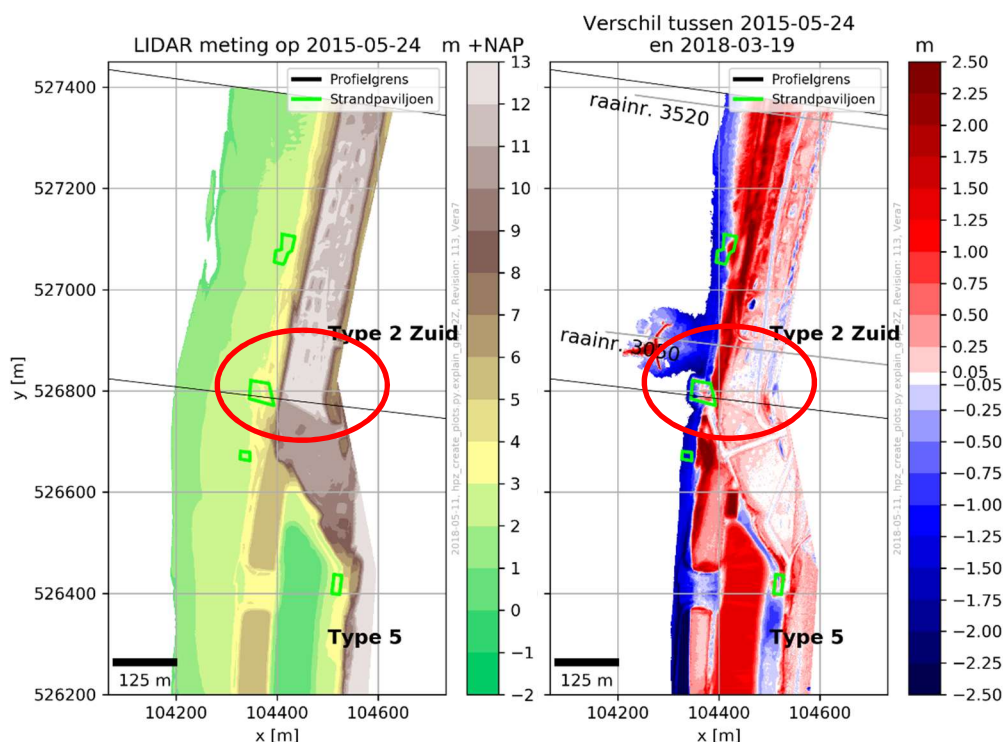


Deze trend is te verklaren door 4 factoren; scherpe hoogte overgang in het zuiden van profieltype 2 Zuid, strandpaviljoen jaar rond aanwezig in het zuiden, zuiden steiler buitentalud dan het noorden en in het zuiden zijn minder wilgenschermen aanwezig. De 4 factoren worden hieronder toegelicht.

Hoogteovergang en Strandpaviljoen

In het zuiden van profieltype 2 wordt lokaal minder accumulatie gezien in het duin ten westen van het strandpaviljoen, zie Afbeelding III.7. Dit is deels te verklaren door de plotselinge overgang in hoogte op de kruin van het duin van ongeveer NAP +10 m naar NAP +12 m, ten westen van het paviljoen. De overgang zal zand afvangen dat richting het noorden onderweg was, gezien het feit dat de gemiddelde windrichting een noordwaartse component heeft. Echter, deze overgang vangt niet genoeg zand in om het verschil in aanzanding in zijn geheel te verklaren.

Afbeelding III.7 Links: hoogteligging bij aanleg in profieltype 2 Zuid en profieltype 5. Rechts: hoogte veranderingen tussen de eerste en laatste LIDAR meting. Twee raainummers met dwarsdoorsnede in afbeelding iii.8 en afbeelding iii.9



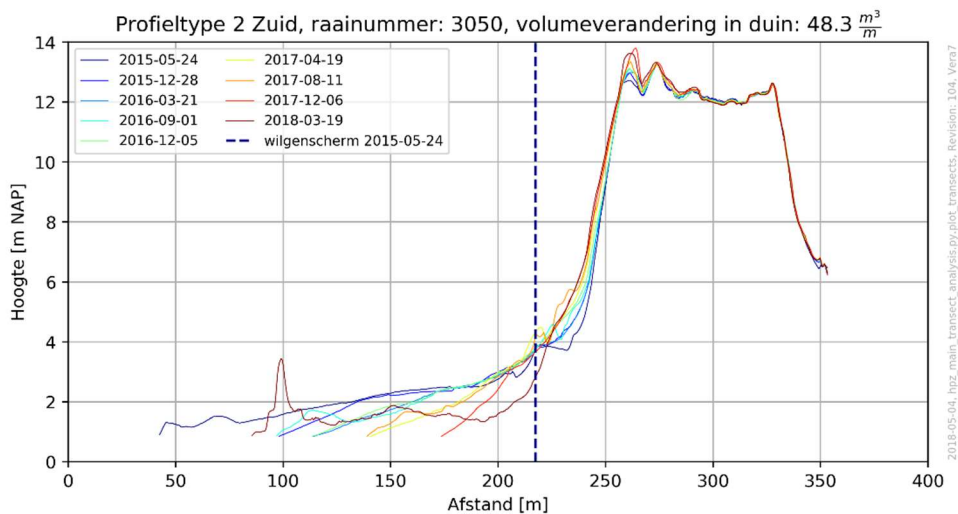
De aanwezigheid van het strandpaviljoen heeft ook invloed op het gebied met minder accumulatie in het duin in het zuiden van profieltype 2 Zuid. Dit blijkt uit 3 feiten. De eerste indicatie is de lijn die het gebied met minder aanzanding scheidt van dat met meer aanzanding, zie afbeelding iii.7. Deze lijn loopt vanaf het paviljoen naar het noord oosten. Het tweede feit is dat de hoogteovergang niet genoeg zand invangt om het gebied met mindere aanzanding volledig te verklaren. De derde indicatie volgt uit de duinaccumulatie per periode tussen 2 LiDAR metingen, gegeven in afbeelding iii.6. De raaien met weinig aanzanding over de gehele monitoringsperiode vertonen soms erosie in afzonderlijke periode. Ook is te zien dat per periode het gebied met weinig aanzanding of erosie in de kustlangse richting op een andere locatie ligt. Dit kan verklaard worden doordat de representatieve windrichting bepaalt waar de luwte achter het strandpaviljoen ligt. Als alleen de hoogte overgang belangrijk was dan zou de locatie niet variëren, de overgang verplaatst niet. De grootte van het gebied zou in dit geval wel veranderen met de representatieve windrichting.

Wilgenschermen en helling buitentalud

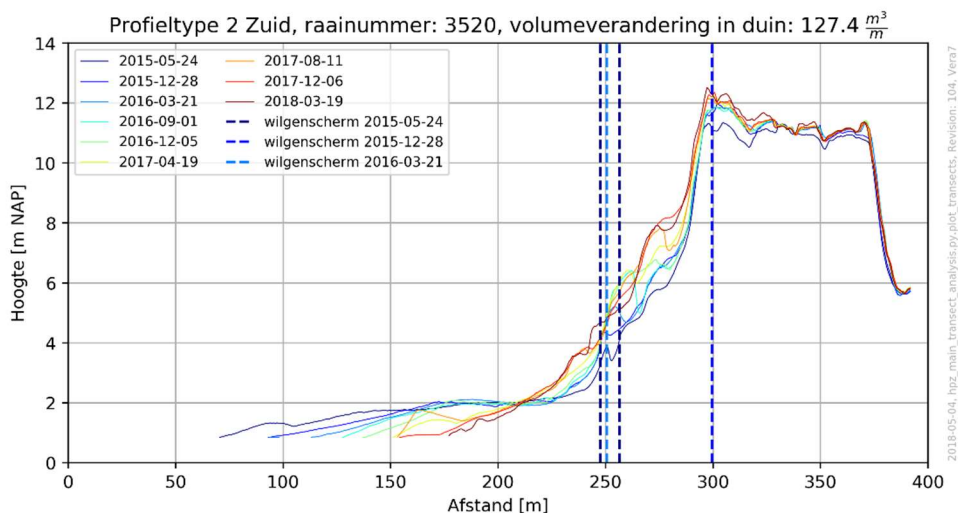
De toename van het accumulatievolume richting het noorden in profieltype 2 Zuid kan worden verklaard door het verschil in hoeveelheid aanwezige wilgenschermen en de helling van het buitentalud. afbeelding iii.8 en afbeelding iii.9 laten dwarsdoorsneden zien voor respectievelijk 1 raai in het zuiden en 1 in het noorden van profieltype 2 Zuid (aangegeven in afbeelding iii.7). Het blijkt dat er meer wilgenschermen aanwezig zijn in het dwarsprofiel in het noorden, 4 in plaats van 1. Tevens is te zien dat de initiële, gemiddelde helling van het buitentalud flauwer is in het noorden en dat de strandbreedte kleiner is in het zuiden.

Het belang van de wilgenschermen, de helling van het duin en de strandbreedte is ook te zien als de duinaccumulatie per periode beschouwd wordt, gegeven in afbeelding iii.6. De toename in accumulatievolume richting het noorden van profieltype 2 Zuid is groter in deze afbeelding voor de eerste 2 tijdsperiodes. Het is ook opvallend dat de toename richting het noorden in iedere periode in meer of mindere mate gezien wordt. Dit duidt aan dat de windrichting en andere variabelen die verschillen per periode minder van belang zijn.

Afbeelding III.8 Dwarsdoorsnede van raainummer 3050 op verschillende meetmomenten, volumeverandering in het duin 48,3 m³/m, wilgenschermen (blauwe stippellijn)



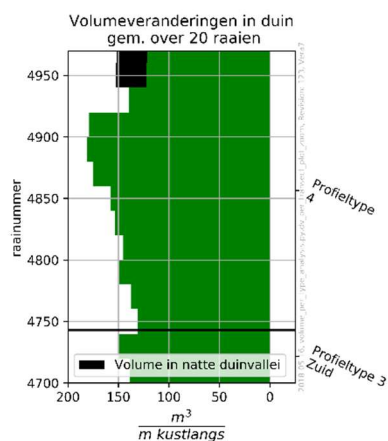
Afbeelding III.9 Dwarsdoorsnede van raainummer 3520 op verschillende meetmomenten, volumeverandering in het duin 127,4 m³/m, wilgenschermen (blauwe stippellijn)



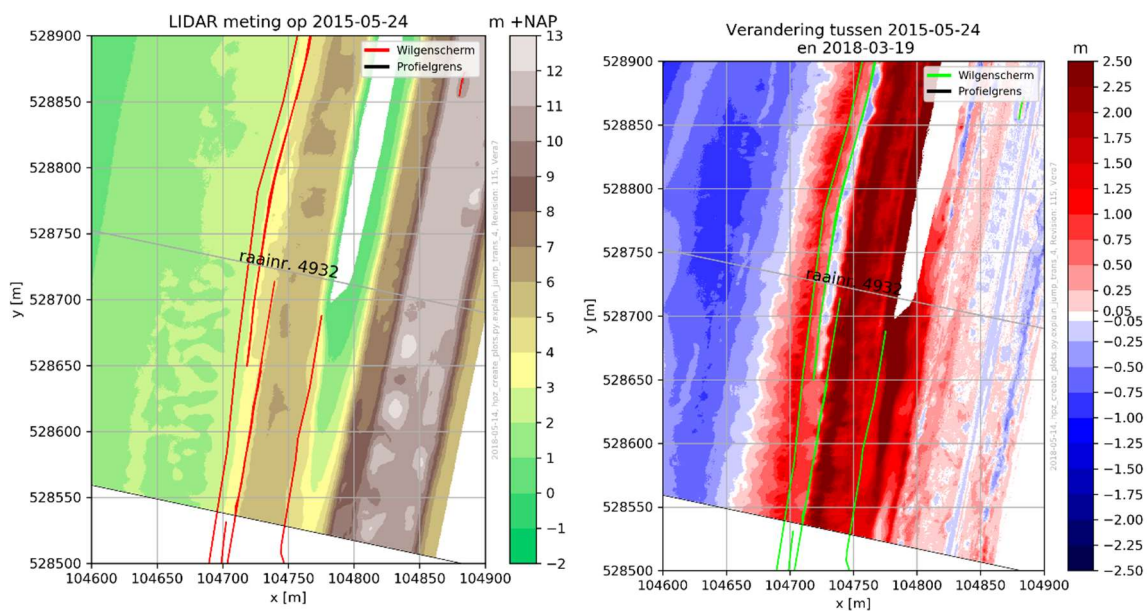
III.3 Piek zuiden van profieltype 4

In het zuidelijk deel van profieltype 4 treedt de hoogste piek in de accumulatie in het duin op (afbeelding iii.10). Deze piek ligt net zuidelijk van raai 4932, de zuidelijkste raai die snijdt met de duinvalei. afbeelding iii.11 toont de totale hoogteverandering en de hoogtekaart rond dit raainummer. Het blijkt dat er veel zand ingevangen wordt in het zuidelijkste puntje van de duinvalei. Dit lijkt onafhankelijk van het wilgenscherm dat daar geplaatst is rond 21-03-2016 (derde LiDAR meting) en wordt grotendeels verklaard door de lage ligging van dit gebied ten opzichte van het omliggende gebied. Daardoor vangt het zowel zand in bij transport in kustdwarse richting als bij transport in kustlangse richting.

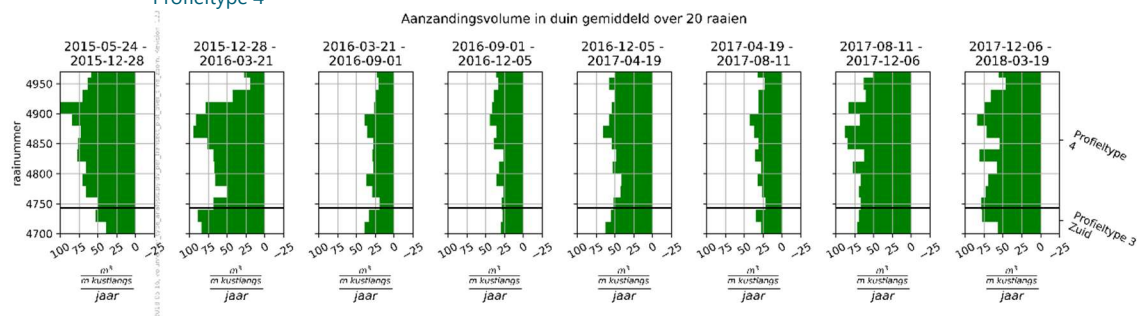
Afbeelding III.10 Totale volume verandering duin Hondsbossche Duinen met piek zuiden Profieltype 4



Afbeelding III.11 Links: eerste LiDAR meting voor gebied met piek zuiden profieltype 4. Rechts: volumeverandering tussen de eerste en laatste LiDAR meting. Beide: raai-nummer 4932 en wilgenschermen aangegeven



Afbeelding III.12 Volume verandering duin per periode tussen 2 LiDAR metingen voor Hondsbossche Duinen met piek zuiden Profieltype 4

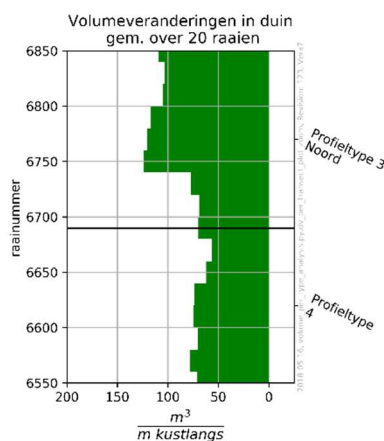


De piek in het zuiden van profieltype 4 is vooral duidelijk te zien in de eerste 2 perioden en de laatste periode, zie afbeelding iii.12.

III.4 Sprong in accumulatievolume overgang profieltype 4 en 3 Noord

In het noorden van profieltype 4 en zuiden van profieltype 3 Noord wordt een gebied gezien met minder aanzanding dan daaromheen, gezien voor de gehele monitoringsperiode (afbeelding 4.5). De zuidelijke sprong wordt veroorzaakt doordat een volume van 30 m³/m voor het natte gedeelte van de duinvallei wordt opgeteld bij de accumulatie volgens de LiDAR metingen tot en met raainummer 6452. Dit wordt niet geleidelijk afgebouwd, waardoor een kunstmatige sprong in het accumulatievolume ontstaat. Daarnaast treedt een sprong op in het volume bij de overgang naar profieltype 3, die wel realistisch en daadwerkelijk gemeten is. De sprong zal besproken worden in deze paragraaf en wordt getoond in afbeelding iii.13.

Afbeelding III.13 Totale volume verandering duin Hondsbossche Duinen met sprong zuiden van Profieltype 4 Noord

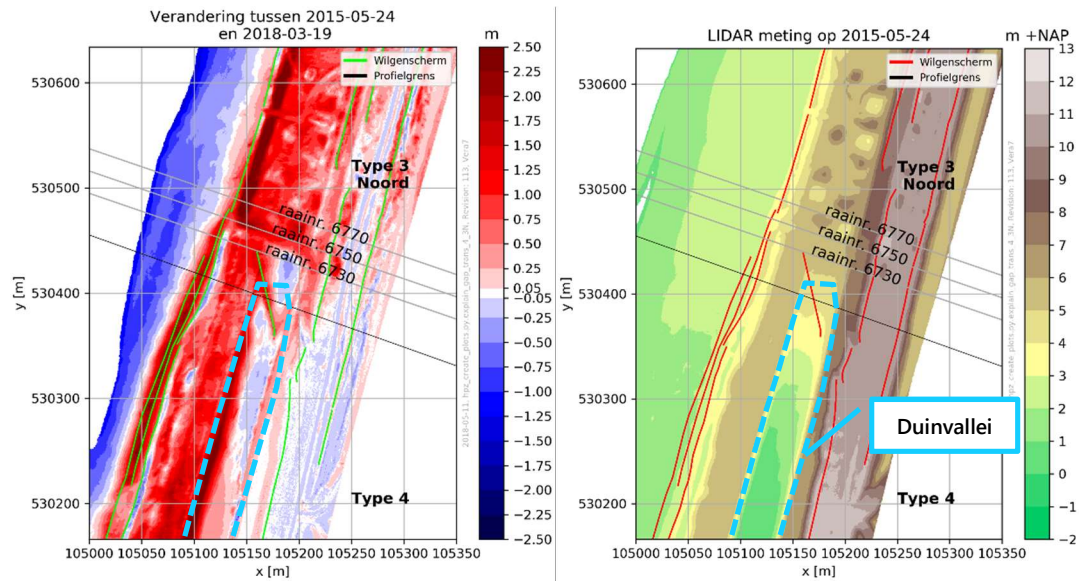


Uit de verschilkaart blijkt dat er erosie optreedt aan de landwaartse zijde van de wilgenschermen zuidelijk van raainummer 6750 en aanzanding bij de wilgenschermen ten noorden hiervan (afbeelding iii.14). Ook is erosie te zien in het noordelijke deel van de duinvallei. Deze erosie treedt op tot net zuidelijk van raainummer 6750. De kustlangse locatie waar deze 2 fenomenen niet meer gezien worden is ongeveer gelijk, waardoor de sprong in het accumulatie volume ontstaat.

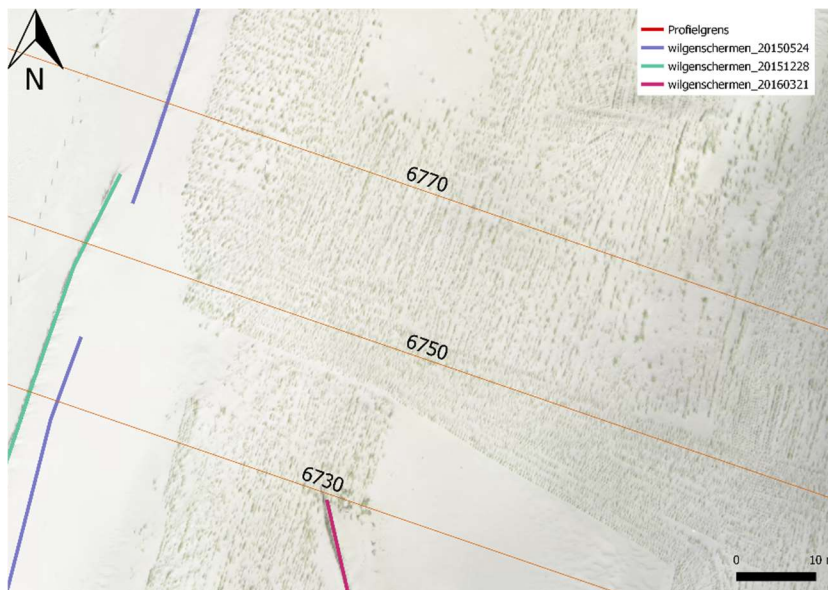
Het erosieve gebied in de duinvallei valt min of meer samen met het onbegroeide gedeelte, vergelijk afbeelding iii.14 en afbeelding iii.15. De erosie treedt waarschijnlijk op doordat de vegetatie hier ontbreekt. In het gebied met sedimentatie in de verschilkaart zijn de overgangen van beplante naar onbeplante delen duidelijk te herkennen.

Het uitstuiven van zand is deels tegengegaan door het plaatsen van een wilgenscherm. Het scherm is voor het eerst te zien in de luchtfoto van 21-03-2016, de 3^e LiDAR meting. Rond het wilgenscherm is zand ingevangen, maar wat verder er vandaan komt nog steeds netto erosie voor, gezien over de hele monitoringsperiode.

Afbeelding III.14 De linker afbeelding geeft de eerste LiDAR meting voor het gebied rond de overgang van profieltype 4 naar profieltype 3 Noord. De rechter afbeelding geeft de volumeverandering tussen de eerste en laatste LiDAR meting voor dit zelfde gebied. In beide afbeeldingen staan 3 raainummers aangegeven en de wilgenschermen

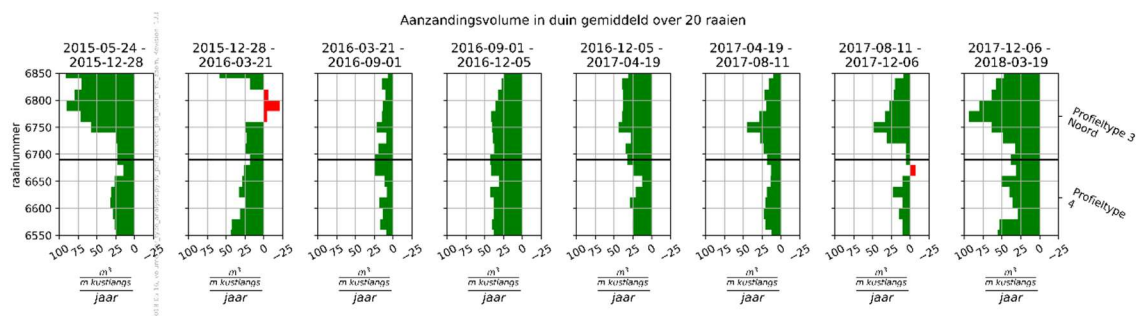


Afbeelding III.15 Deze afbeelding geeft de luchtfoto van 01-09-2016 rondom de 3 raainummers uit afbeelding iii.14. Ook de wilgenschermen zijn aangegeven. Deze luchtfoto is gekozen vanwege het contrast waardoor de vegetatie duidelijk te onderscheiden is



Uit afbeelding iii.15 is op te maken dat de afstand tussen de wilgenschermen en de vegetatie groter is ter hoogte van raai 6730 dan ter hoogte van raai 6750 en 6770. Mogelijk speelt deze afstand een rol in het feit dat er erosie optreedt achter de schermen bij raai 6730 en sedimentatie bij 6750 en 6770.

Afbeelding III.16 Volume verandering duin per periode tussen 2 LiDAR metingen voor Hondsbossche Duinen met sprong zuiden van Profieltype 4 Noord

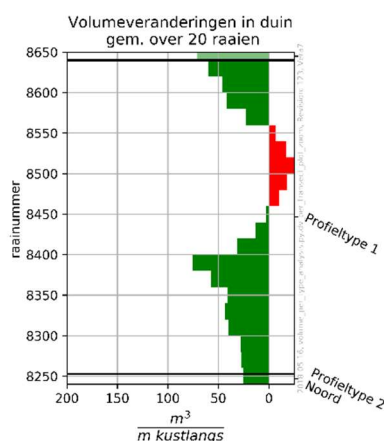


De sprong in accumulatievolume is het grootste in de eerste 2 perioden in afbeelding iii.16. Deze afbeelding laat de duinaccumulatie zien per periode tussen 2 LiDAR metingen. Door het plaatsen van het wilgenscherm in het noorden van de duinvallei wordt de sprong in periode 3 en 4 nauwelijks waargenomen. Hierna wordt de sprong wel weer gezien, maar minder in grootte. Dit geeft aan dat effectiviteit van het wilgenscherm in de duinvallei minder wordt en de vegetatie is daardoor een belangrijkere rol gaat spelen.

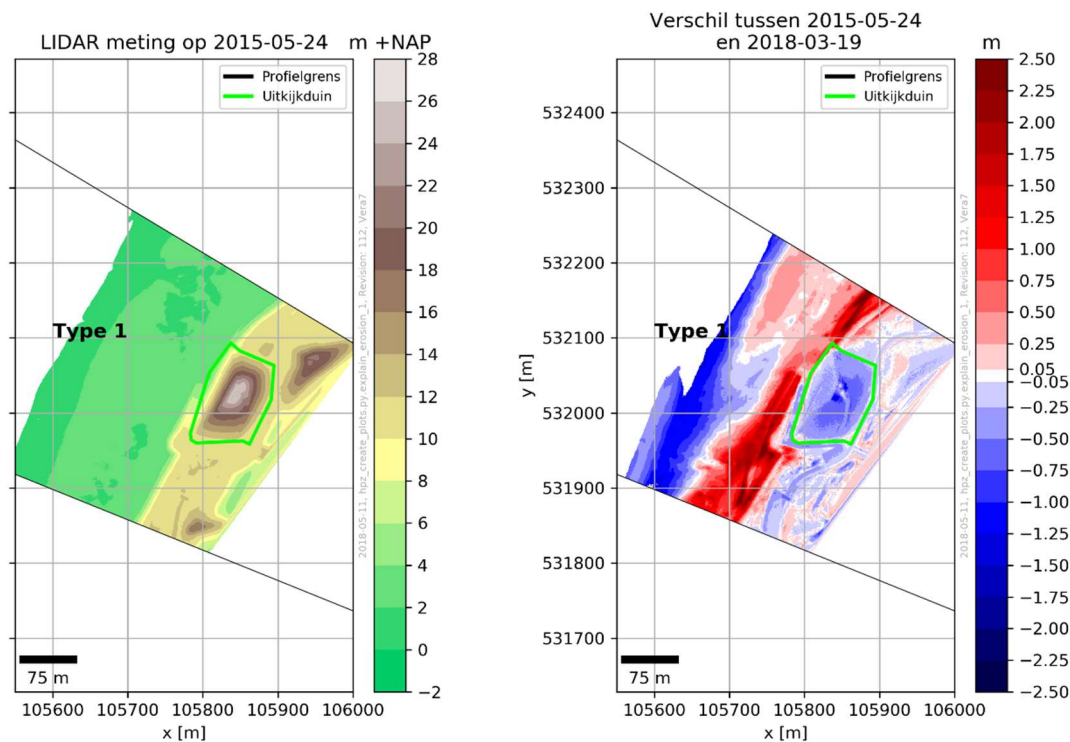
III.5 In profieltype 1 is erosie zichtbaar.

- Alleen in profieltype 1 treedt netto over de hele monitoringsperiode erosie op in het dungebied van de Hondsbossche Duinen, dit wordt getoond in afbeelding iii.17. Deze erosie wordt veroorzaakt door het uitkijkduin. In afbeelding iii.18 is te zien dat in het gebied van de uitkijkduin meer erosie plaatst vindt dan in de rest van het duin. De totale erosie over het uitkijkduin is ongeveer 3850 m³. Afbeelding III.19 laat de duinaccumulatie tussen alle LiDAR metingen zien. Hieruit is op te maken dat er vooral erosie op de uitkijkduin gezien wordt tussen de eerste 4 LiDAR metingen. Hierna lijkt het uitkijkduin te stabiliseren of kan het omliggende duin de erosie compenseren. De erosie op het uitkijkduin zou kunnen komen door doordat de uitkijkduin erg hoog is of doordat het helm slecht aanslaat, blijkt uit veldbezoeken.

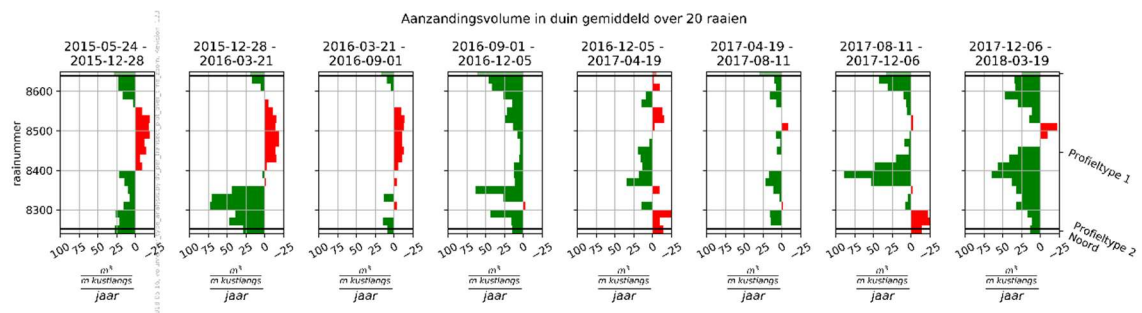
Afbeelding III.17 Totale volume verandering duin Hondsbossche Duinen profieltype 1



Afbeelding III.18 Links: 'as-build' LiDAR meting van profieltype 1. Rechts: hoogte veranderingen in profieltype 1 tussen de eerste en laatste LiDAR meting



Afbeelding III.19 Volume verandering duin per periode tussen 2 LiDAR metingen voor Hondsbossche Duinen profieltype 1



IV

BIJLAGE: KOHONENANALYSE

Link met resultaten van Kohonenanalyse.

Totale monitoringperiode

http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T1T9_v5_incl_orientatie_duinvoet_korreldiameter/
http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T1T9_v4

Per meetperiode

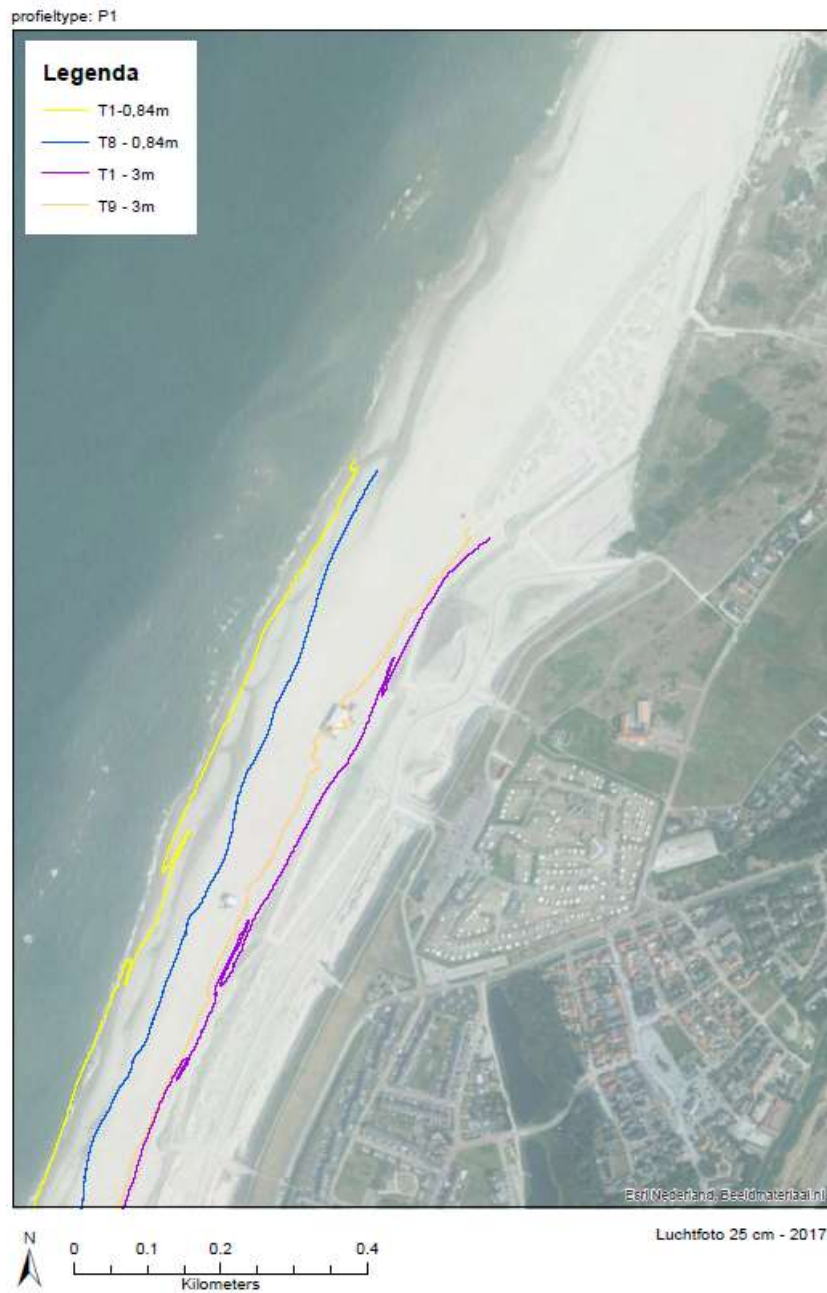
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T1T2/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T2T3/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T3T4/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T4T5/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T5T6/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T6T7/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T7T8/>
<http://demo.hkv.nl/hurkmans/som-duinen-T8T9/>

Korte uitleg:

- Links staan de resultaten van de platgestreken matrix en rechts de bijbehorende geografische locaties van de knopen.
- De variabele 'U-matrix' maakt inzichtelijk wat de afstand tussen elke gridcel is (hoge waarde [kleur richting rood] zijn de cellen tussen de clusters, lage waarden [kleur zwart] zijn de gridcellen in de clusters). Een 'goede afgelegen' cluster/ is dus omgeven door cellen met hoge waarden (blauw/geel/rode kleur).
- Maak een box om te filteren (met je muiswiel wordt de box groter of kleiner). De betreffende locaties bij de HD lichten op.
- Alle andere variabelen zijn de onderliggende beschikbare parameters.



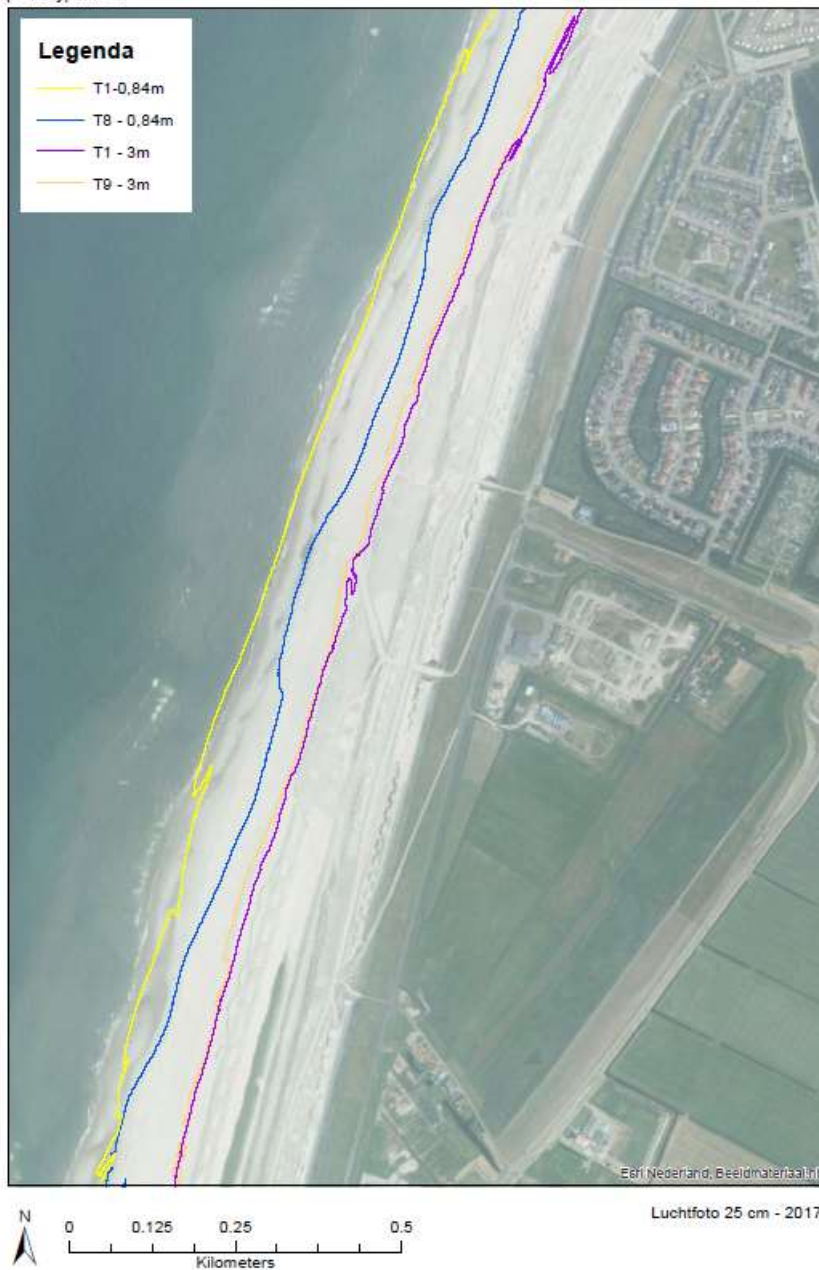
BIJLAGE: STRANDBEGRENZINGEN OVER DE TIJD



profieltype: P2Z



profieltype: P3N



profieltype: P3Z



profieltype: P4



VI

BIJLAGE: EFFECT STRIJKLENGTE OP HOOGTEVERANDERING EN VOLUMEVERANDERING

De strijklengte is bepaald met een GIS analyse voor iedere windrichting in segmenten van 20 graden. De lengte die de wind over het strand kan waaien bij deze windrichting is bepaald. Deze lijn is doorgetrokken in het duin. De gemiddelde hoogteverandering in het duin is gekoppeld aan de strijklengte over het strand. In deze analyse is geen rekening gehouden met profieltypes.

Het definiëren van de aanzanding in het duin afhankelijk van de strijklengte is lastig. Omdat bij een meer kustlangse windrichting de strijklengte enorm lang kan worden en daarmee ook de 'strijklengte' in het duingebied kan het meer landinwaarts gelegen inactieve deel van het duin (dat nauwelijks zand invangt) ook een groter gedeelte opnemen, een gemiddelde hoogteverandering geeft dan niet het volledige beeld. Want ondanks dat er misschien veel volumeverandering is, is de gemiddelde hoogteverandering klein. De afbeelding van de strijklengte van de dominante windrichting 220 graden over de gehele meetperiode laat dan ook geen verband zien tussen de strandbreedte en het gemiddelde hoogteverschil.

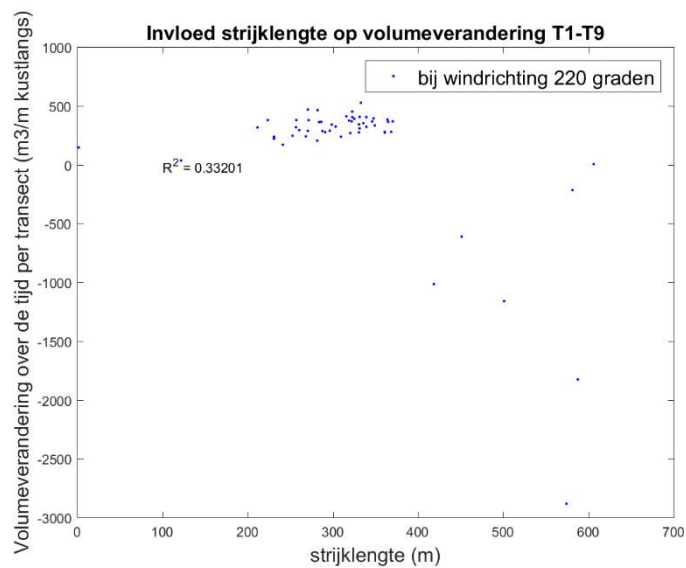
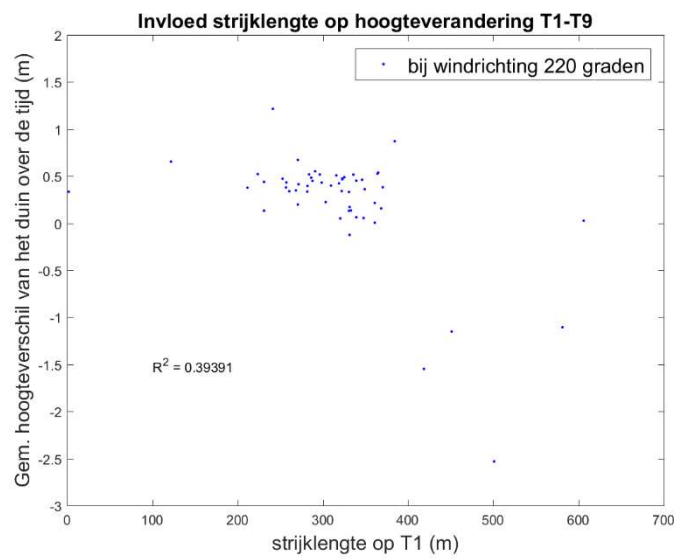
Een andere beperkende factor is dat de strandbreedte vermindert over de totale meetperiode. Als strandbreedte de waarde van meetmoment T1 nemen zegt weinig over de strijklengte. Daarom is ook een analyse gedaan over de verschillende meetmomenten. Hier kwam echter ook geen verband uit tussen strijklengte en volume dan wel hoogteverandering

De analyse is bij aanvang van project gedaan op basis van gegevens zonder correctie van de data voor aanwezige bebouwing, werkzaamheden en ontbrekende data in de duinvallei. Dit betekent dat de volumebepaling lokaal kan afwijken ten opzichte van de rest van het rapport. Aangezien de resultaten van de bevindingen dusdanig eenduidig zijn dat er een slechte correlatie bestaat is gekozen om de analyse niet nogmaals te doen, waarbij deze correcties zijn uitgevoerd.

Afbeelding 9.20 Voorbeeld voor het bepalen van de strijklengte bij een windrichting 240 graden. De lichtblauwe lijn geeft de strijklengte over het strand weer tot aan de donkerblauwe lijn. Het stuk vanaf de donkerblauwe lijn tot aan de dijk geeft het stuk duin aan waarover de gemiddelde volumeverandering bepaald wordt

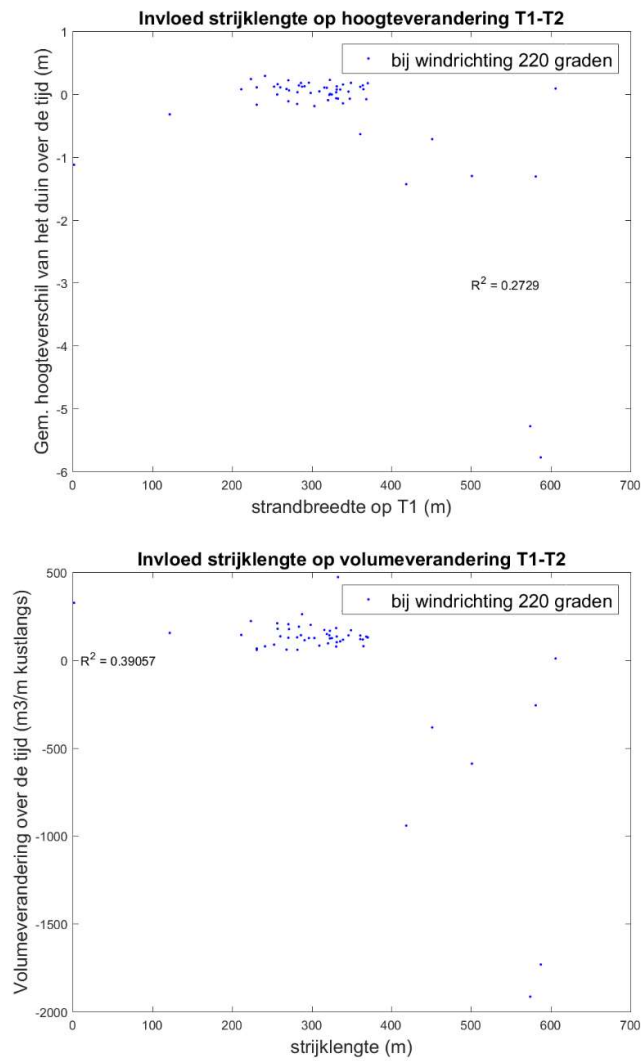


Strijklengte uitgezet tegen hoogte en volumeverandering voor gehele monitoringperiode.

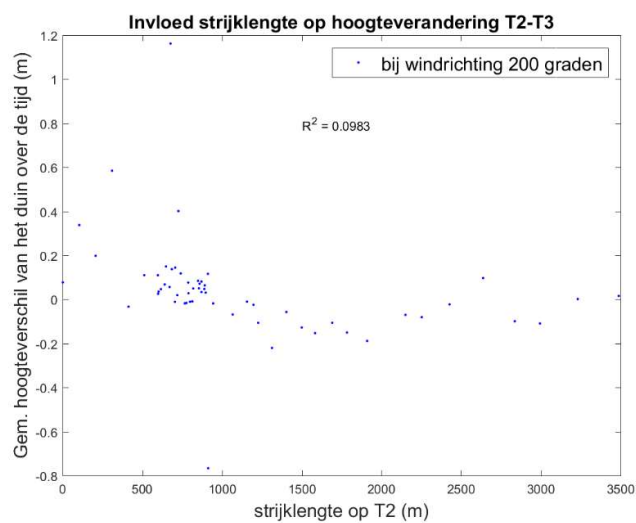


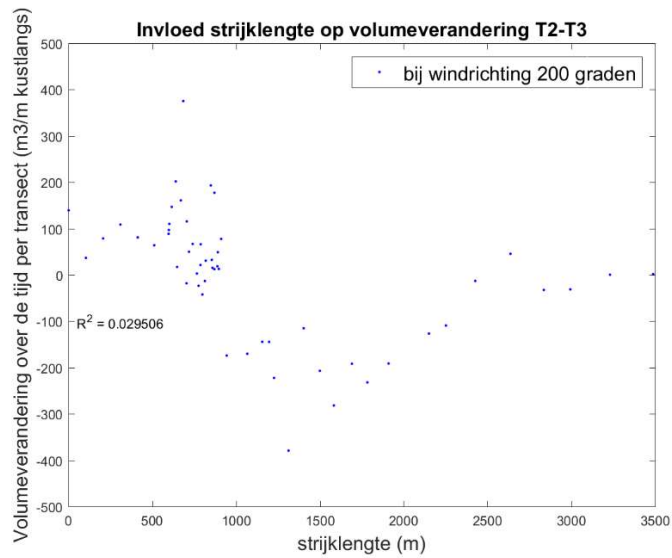
Strijklengte uitgezet tegen hoogte en volumeverandering per meetperiode.

In de meetperiode T1 tot T2 was de dominante windrichting 220 graden.

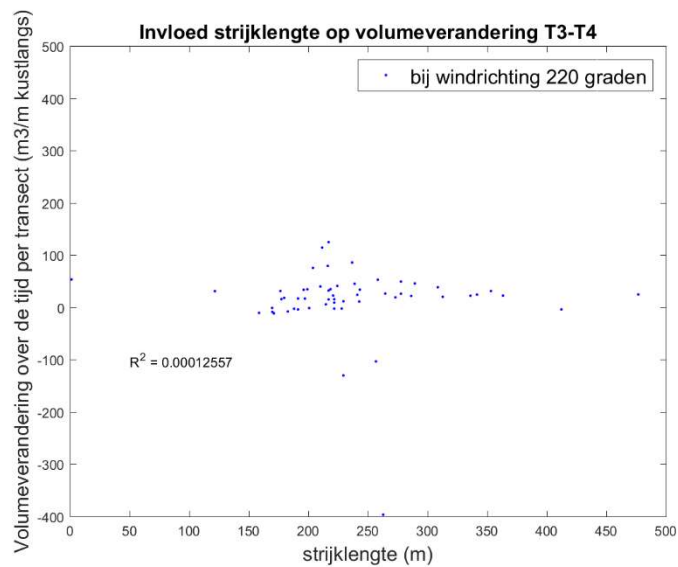
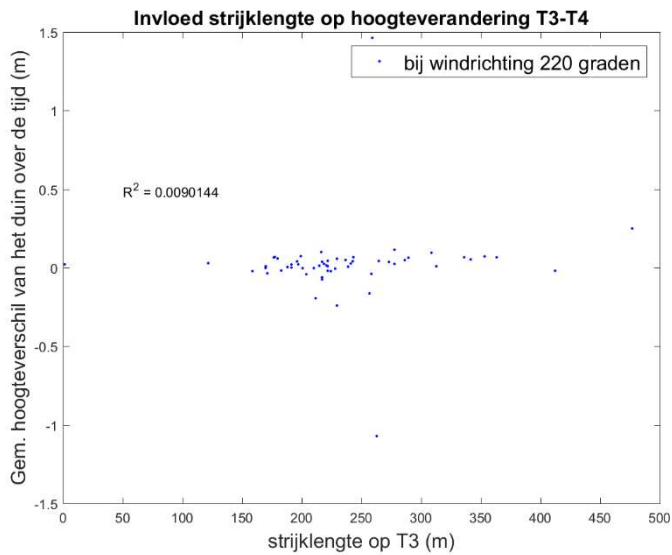


In de meetperiode T2 tot T3 was de dominante windrichting 200 graden.



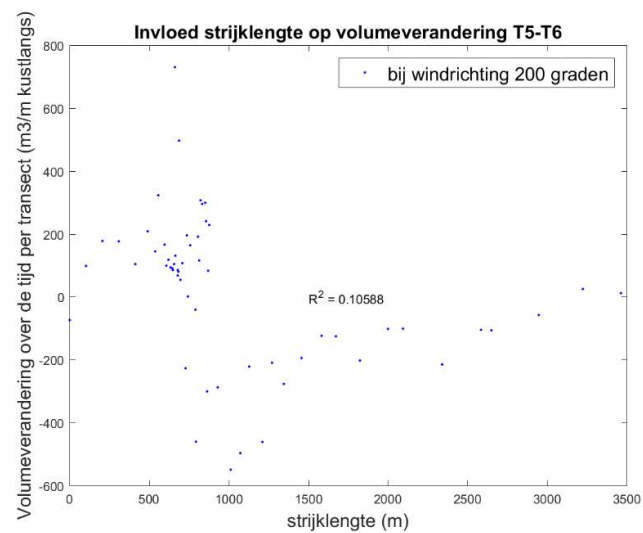
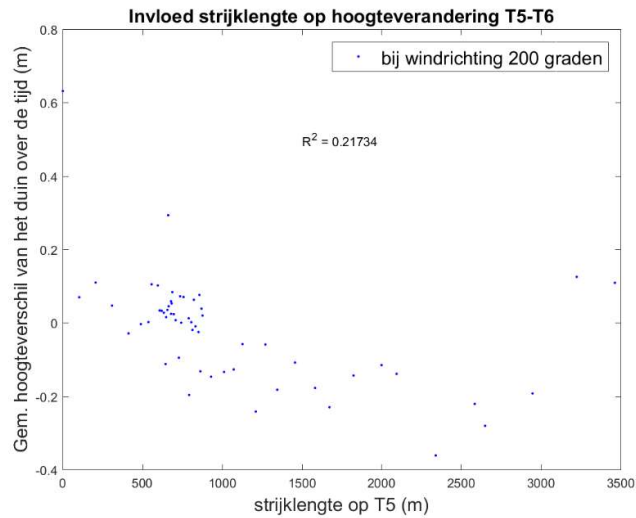


In de meetperiode T3 tot T4 was de dominante windrichting 220 graden.

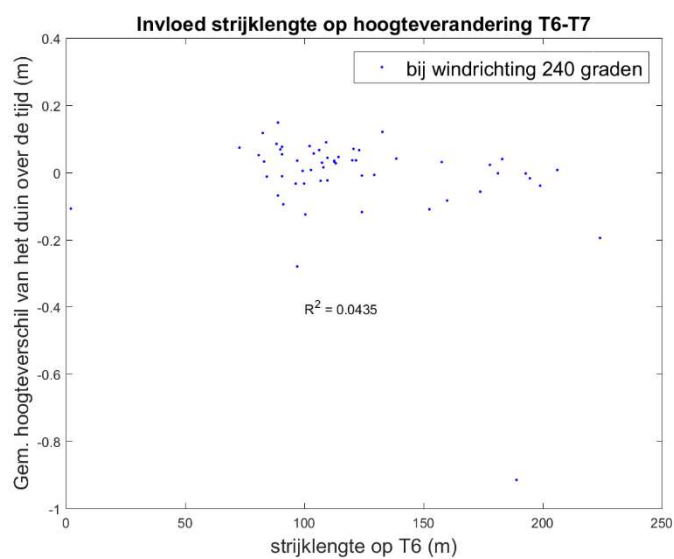


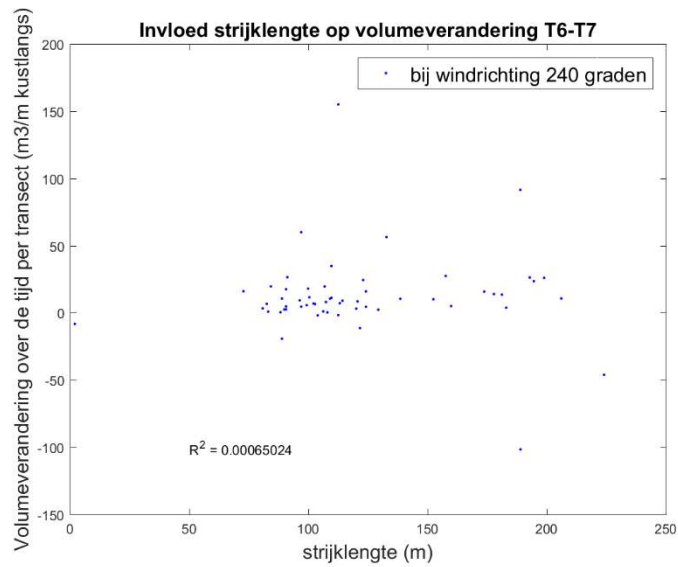
In de meetperiode T4 tot T5 is geen analyse op gedaan, de dominante windrichting komt uit het oosten. .

In de meetperiode T5 tot T6 was de dominante windrichting 200 graden.

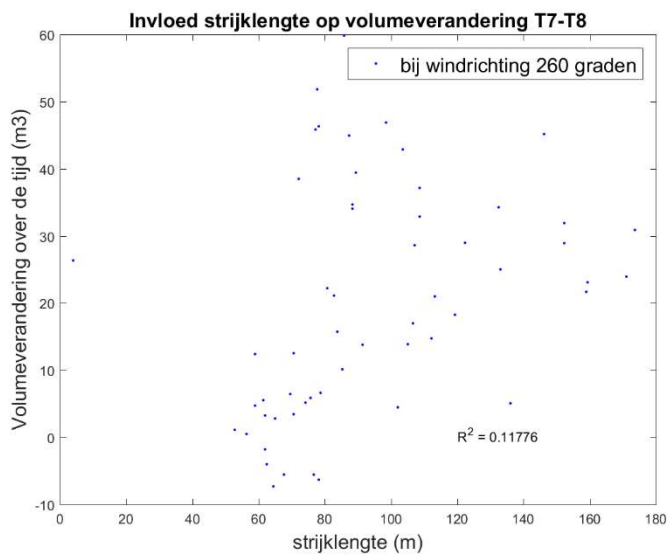
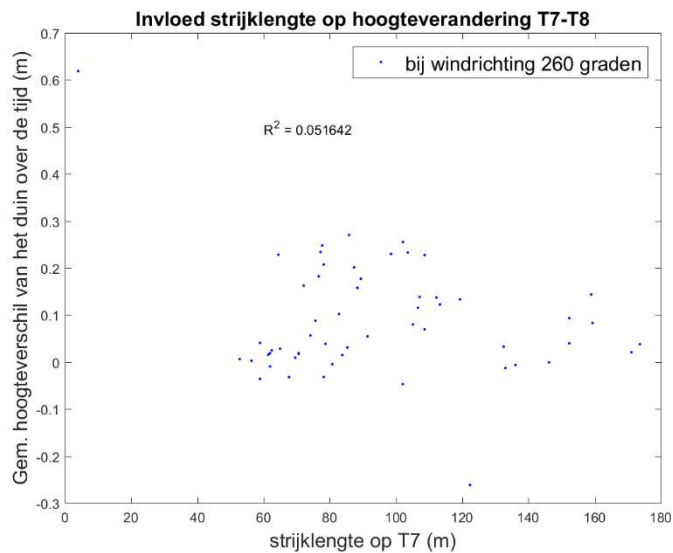


In de meetperiode T6 tot T7 was de dominante windrichting 240 graden.





In de meetperiode T7 tot T8 was de dominante windrichting 260 graden.



In de meetperiode T8 tot T9 is geen analyse op gedaan, de dominante windrichting komt uit het oosten. .

VII

BIJLAGE: HELLING VOORDUIN TEGEN AANZANDING

In deze bijlage zijn de figuren opgenomen van de helling van het voorduin uitgezet tegen de volumeverandering van het duin. (zie ook paragraaf 5.4.4).

De helling van het (lage) buitentalud van het duin verandert over de tijd. Bovendien is het vanwege dips in het buitentalud veranderlijk over welke hoogte de helling van het buitentalud het beste bepaald kan worden. De locatie van het buitentalud is per profieltype bepaald en ingeschat in GIS op basis van expert judgement. De helling van het voorduin is bepaald door per transect de afstand te bepalen tussen de hoogten in onderstaande tabel en het hoogteverschil te delen over de lengte.

Profieltype	(stabele) Buitentalud locatie
1	3 - 4 m
2N	4 - 6 m
3N	3 - 4 m
4	3 - 4 m
3Z	3 - 4m
2Z	3 - 6 m
5	3 - 4m

De analyse is uitgevoerd over het projectgebied over de gehele monitoringperiode en per meetperiode.

Geen van de meetperiodes toont enig verband tussen de helling van het buitentalud en de volumeverandering.

