



KWR 2024.073 | September 2024

Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien

Literatuurstudie

Colofon

Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien, Literatuurstudie

KWR 2024.073 | September 2024

Opdrachtnummer

404339/009

Projectmanager

Dr. Edu Dorland

Opdrachtgever

DPWE

Auteurs

Dr. ir. Gijsbert Cirkel & drs. Camiel Aggenbach

Kwaliteitsborger

Prof. dr. ir. Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

DPWE Begeleidingsgroep Bronnen.
Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

Klimaatverandering, zeespiegelstijging, duinhydrologie,
zoetwaterlens, grondwateraanvulling, natte duinvalleien

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie

Dr. ir. Gijsbert Cirkel
T 06-20614497
E Gijsbert.cirkel@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

September 2024 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

Aanleiding en doel

Klimaatverandering zelf, maar ook indirecte effecten ervan zoals zeespiegelstijging, kunnen grote effecten hebben op de waterbalans van het duin, de zoetwaterbel en ecosystemen zoals natte duinvalleien. Hoe het veranderende klimaat doorwerkt op het duin is nog niet precies bekend en kennis is gefragmenteerd over verschillende studies. In voorliggend rapport is een overzicht opgesteld van de stand van de kennis ten aanzien van effecten van klimaatverandering, en in het bijzonder zeespiegelstijging, op de waterbalans en zoetwaterbel van duinsystemen. Dit betreft zowel de impact op de dikte en vorm van de zoetwaterbel, als de hydrologische gevolgen voor natte duinvalleivegetaties.

Werkwijze

Als eerste stap zijn literatuur en data ten aanzien van trends in observaties in neerslag en verdamping in de kuststrook geanalyseerd. Deze trends zijn vergeleken met de landelijke KNMI '14 en '23 scenario's. Vervolgens is aan de hand van literatuur uitgewerkt hoe veranderingen in neerslag en referentieverdamping doorwerken op de actuele grondwateraanvulling, waarbij specifiek is gekeken naar vegetatie- en bodemterugkoppelingen. Een vergelijkbare aanpak is gehanteerd voor zeespiegelstijging, waarbij eerst literatuur ten aanzien van observaties en trends is geanalyseerd en vervolgens een vergelijking is gemaakt met KNMI-scenario's en zichtwaarden uit het Kennisprogramma Zeespiegelstijging van het Deltaprogramma. Als tweede stap zijn de mogelijke gevolgen van klimaatverandering en zeespiegelstijging uitgewerkt voor de duinhydrologie (specifiek de zoetwaterlens) en voor het functioneren van vochtige duinvalleien. Voor de analyse van de effecten op de zoetwaterlens is gebruik gemaakt van bestaande literatuur, aangevuld met verkennende analytische berekeningen. Voor de effecten op vochtige duinvalleien is de analyse enkel gebaseerd op bestaande literatuur.

Resultaten & conclusies

Uit de analyse komt een vernattende trend naar voren voor het duin. Deze vernatting hangt samen met een toename van de neerslag, mogelijk afname van verdamping en een stijgende zeespiegel. Gevolg van de vernatting is dat de omvang van de zoetwaterlens, ondanks de zeespiegelstijging, niet sterk zal krimpen zolang de kustlijn op z'n plek blijft. Dit laatste blijkt door zandsuppletie vooralsnog goed mogelijk. De freatische standen in het duin zullen echter wel stijgen door de stijgende zeespiegel. Als uitstroming aan maaiveld gaat plaatsvinden kan dit gevolgen hebben voor de vorm van de zoetwaterlens en mogelijk zelfs resulteren in upconing van zout water. Hoewel de globale trend in het duinlandschap hydrologisch vernattend is, blijkt de uitwerking op belangrijke landschapsonderdelen zeer verschillend: lage delen vernatten, terwijl grondwateronafhankelijke profielen sterker beïnvloed gaan worden door droogtestress van de vegetatie. Dit laatste kan op termijn mogelijk zelfs leiden tot versterkte verstuiving.

De vernattende trend door zeespiegelstijging en toenemende grondwateraanvulling is waarschijnlijk positief voor vochtige duinvalleivegetaties door o.a. betere buffering tegen verzuring. Onduidelijk is echter hoe de freatische grondwaterstandsdynamiek in de valleien zich zal ontwikkelen door de toenemende kwelfluxen, maar eveneens toenemende verdamping in voorjaar en zomer in de valleien. De doorwerking van verandering in de grondwaterstandsdynamiek op de vegetatie is ook nog niet goed bekend. Of vochtige duinvalleivegetaties zich daadwerkelijk kunnen uitbreiden wordt mede bepaald door de mate waarin successie wordt teruggezet, nutriëntenarme condities ontstaan/ gerealiseerd worden en of er voldoende dispersie van soorten kan plaatsvinden naar nieuwe geschikte standplaatsen.

Nader onderzoek is gewenst naar de doorwerking van geobserveerde trends en klimaatscenario's op daadwerkelijke grondwateraanvulling met medeneming van terugkoppelingen door bodemvorming en vegetatie. Voor de zoetwaterlens is het effect van drainage en oppervlakkige afstroming van belang. In Nederlandse modelstudies is dit aspect nog slechts beperkt onderzocht. Specifiek voor de natte duinvalleien is meer empirisch en modelmatig inzicht nodig in de waterstands- en kweldynamiek (incl. eventuele faseverschuivingen) en hoe dit doorwerkt op de organische stofdynamiek en successie. Ten slotte is meer inzicht nodig in de ontwikkeling van de verstuivingsgevoeligheid van droge duinvegetaties.

Inhoud

Colofon	2
Samenvatting	3
Inhoud	5
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Doel	6
1.3 Leeswijzer	6
2 Klimaatverandering en zeespiegelstijging	7
2.1 Neerslag, verdamping en grondwateraanvulling	7
2.1.1 Trends in observaties	7
2.1.2 Resultaten klimaatmodellen en klimaatscenario's (KNMI'14 & '23)	10
2.1.3 Verandering neerslagoverschot en grondwateraanvulling	14
2.1.4 Deelconclusies neerslag, verdamping en grondwateraanvulling	18
2.2 Zeespiegelstijging	18
2.2.1 Trends in metingen	18
2.2.2 Zeespiegelprojecties	19
2.2.3 Deelconclusies zeespiegelstijging	21
3 Gevolgen voor de kustduinen	22
3.1 Omvang zoetwaterbel	22
3.1.1 Verkennende berekeningen	23
3.1.2 Zandsuppletie en verdere verstuiving	26
3.1.3 Hydrologische terugkoppelingen bij zeespiegelstijging	27
3.1.4 Deelconclusies effecten op zoetwaterlens, suppletie en verstuiving	28
3.2 Gevolgen voor vochtige duinvalleien	28
3.2.1 Vochtige duinvalleien een dynamisch systeem	28
3.2.2 Mogelijke effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op vochtige duinvalleien	31
3.2.3 Deelconclusies effecten op vochtige duinvalleien	33
4 Conclusies & aanbevelingen	34
4.1 Conclusies	34
4.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	35
5 Referenties	36

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Directe effecten van klimaatverandering, maar ook indirecte effecten zoals zeespiegelstijging, kunnen grote effecten hebben op de zoetwaterbel en waterbalans van duinsystemen. Wat die effecten precies kunnen zijn en wat de omvang van de waterstandsdynamiek zal zijn, is echter nog niet precies bekend. Zo is de literatuur bijvoorbeeld niet eenduidig over de effecten van zeespiegelstijging. Hoewel meerdere studies wijzen op een overall stijging van freatische standen, is het effect op duinvalleien en duinmeertjes minder eenduidig. Zowel een verhoging, een verlaging als geen effect op waterstanden in duinvalleien en duinmeertjes wordt voorspeld (Noest, 1991, 1994; Kamps, 2008; Smith & Medeiros, 2019). Een toename van de zeespiegelstijging zal op een langere termijn de vorm en dikte van de zoetwaterbel gaan beïnvloeden. Over hoe dat kan gaan doorwerken voor de duinwaterwingebieden is op dit moment weinig zicht. Het effect is namelijk mede afhankelijk van het gevoerde kust en duinbeheer. Stijgt het niveau van de duinen bijvoorbeeld mee met de stijgende zeespiegel, en blijft de kustlijn op z'n plaats of juist niet? En hoe zit het dan met de ontwatering in het duin en aan de landzijde? Beter inzicht in bovenstaande geschetste processen is zowel van belang voor de drinkwaterproductie, als voor de natuurdoelstellingen.

Rijkswaterstaat voert momenteel onderzoek uit naar algemenere hydrologische gevolgen van zeespiegelstijging (op nationaal niveau). Specifiek voor het duingebied, voert Deltares modelberekeningen uit naar de respons van de zoetwaterbel op zeespiegelstijging, waarbij rekening wordt gehouden met drainage en extra oppervlakkige afstroming. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het zoet-zout model van Dunea voor Septemberjendel en Berkheide. In deze literatuurstudie richten we ons opeen op de kustduinen gerichte invulling van kennisvragen rond dit thema door het op een rij zetten van i) bestaande literatuur over de belangrijkste processen die een rol spelen bij klimaatverandering en ii) methodes voor het simuleren van ecohydrologische effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op de zoetwaterbel en vochtige duinvalleien. Het gaat hierbij om het samenbrengen van bestaande actuele kennis op het gebied van klimaatverandering en zeespiegelstijging in de duingebieden.

1.2 Doel

Het doel van voorliggend rapport is het bieden van een overzicht van de stand van de kennis ten aanzien van effecten van klimaatverandering, en in het bijzonder zeespiegelstijging, op de waterbalans en zoetwaterbel van duinsystemen. Hierbij wordt aandacht besteed aan zowel de gevolgen voor de dikte en vorm van de zoetwaterbel, als de hydrologische gevolgen voor natte duinvalleivegetaties.

1.3 Leeswijzer

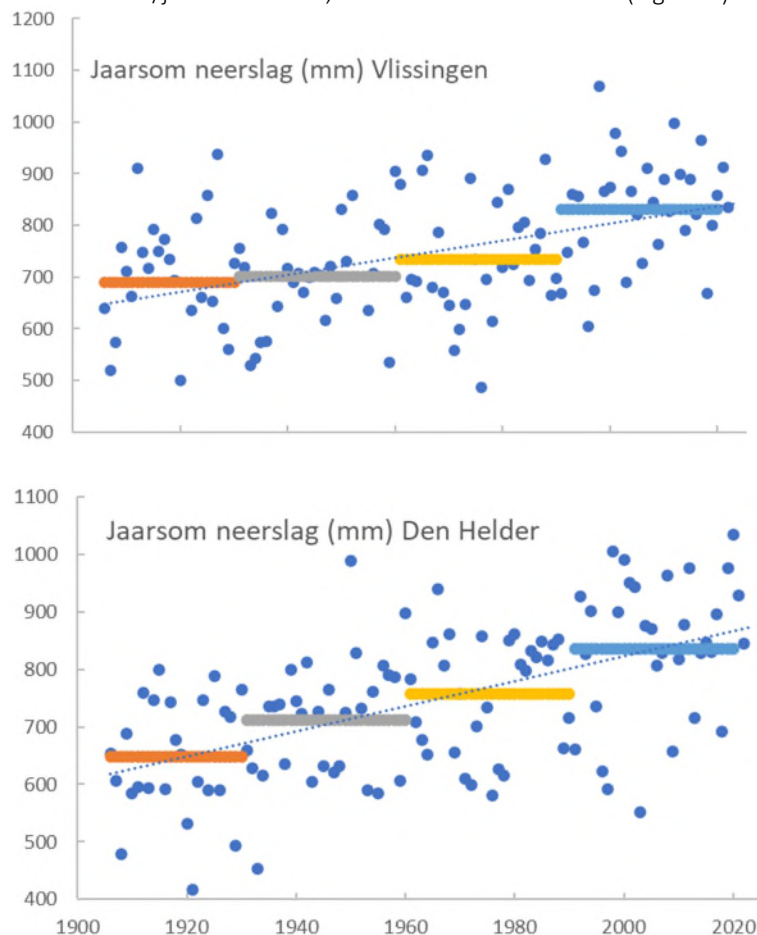
In hoofdstuk twee zijn gemeten meteorologische trends in de kustduinen uitgewerkt en vergeleken met resultaten van klimaatmodellen en de KNMI'14 en '23 klimaatscenario's. Ook voor zeespiegelstijging zijn allereerst de trends in metingen op een rij gezet en is vervolgens een uitwerking gegeven van KNMI en Deltascenario's voor zeespiegelstijging. In hoofdstuk drie is vervolgens op basis van beschikbare literatuur een uitwerking gegeven van de gevolgen van klimaatverandering en zeespiegelstijging voor de Nederlandse kustduinen, specifiek gericht op ontwikkeling van de zoetwaterbel en de gevolgen voor vochtige duinvalleien. Aan het eind van elk onderdeel zijn de belangrijkste conclusies opgesomd. Ten slotte zijn in hoofdstuk 4 de conclusies en een aantal aanbevelingen gebundeld.

2 Klimaatverandering en zeespiegelstijging

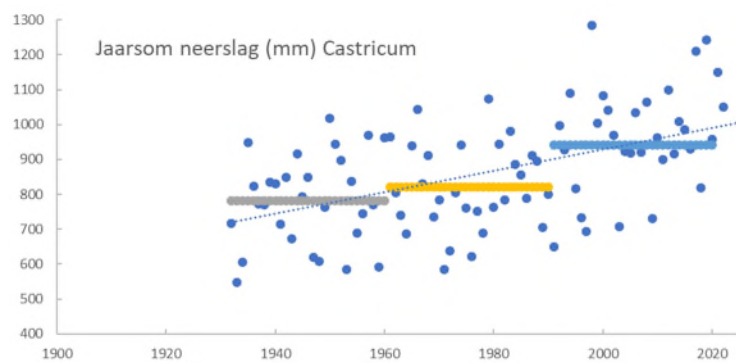
2.1 Neerslag, verdamping en grondwateraanvulling

2.1.1 Trends in observaties

Neerslag is behoorlijk variabel in ruimte en tijd, maar neemt gemiddeld over heel Nederland duidelijk toe. Buishand et al. (2012) hebben trends in de neerslag onderzocht over de periode 1910-2009. Uit deze studie blijkt dat de gemiddelde jaarneerslag over de onderzochte periode met 25% is toegenomen. Een recentere studie (Sluijter et al, 2018) bevestigt dit beeld en rapporteert een toename van 15-30%, met vooral een toename in de kuststrook. Bij Den Helder en Vlissingen is de klimaatnormaal (gemiddelde over de afgelopen 30 jaar) gestegen van respectievelijk 712 en 702 mm/jr in de periode 1931-1960 naar respectievelijk 836 en 831 mm/jr in de periode 1991-2020. Dit betreft dus een toename met meer dan 100 mm (Figuur 1). Een vergelijkbaar beeld is zichtbaar in de data van het door PWN beheerde neerslagstation Castricum waar de normaal steeg van 781 mm/jr in de periode 1931-1960 naar 941 mm/jr in 1991-2020, een toename van 161 mm (Figuur 2).



Figuur 1 Ontwikkeling neerslag jaarsommen tussen 1906 en 2022 (horizontale lijnen: klimaatnormalen 1930, 1960, 1990 en 2020) voor meteorostations Vlissingen en Den Helder (De Kooy) (data KNMI)



Figuur 2 Ontwikkeling neerslag jaarsommen tussen 1932 en 2022 (horizontale lijnen: klimaatnormalen: 1960, 1990 en 2020) voor neerslagstation Castricum (data PWN)

De neerslagtoename in Nederland is niet homogeen verdeeld over het jaar, maar is vooral in de winterperiode toegenomen (Tabel 1), hoewel ook de zomerneerslag beperkt is toegenomen. Dit is ook het geval in de kuststrook, zoals o.a. blijkt zowel uit de analyse van Lenderink et al. (2009) voor 6 stations in de kuststrook, Borst & Fonck (2020) en de analoog aan Buishand et al. (2012) berekende verschillen in toename tussen zomer en winter voor het door PWN beheerde meteostation Castricum (Tabel 1). Lenderink et al. (2009) vonden voor hun analyse een significante relatie tussen neerslag en zee temperatuur.

Tabel 1 Met regressie bepaalde toename van de neerslag in Nederland over de periode 1910-2009 en 1951-2009 voor jaarsommen en sommen voor het zomer en winterhalfjaar (Buishand et al, 2012), aangevuld met de met regressie bepaalde toename van de neerslag op meetstation Castricum over dezelfde periode 1951-2009 (data PWN). Omdat het om afzonderlijke regressies gaat tellen de winter en zomersommen niet helemaal precies op tot de jaarsom.

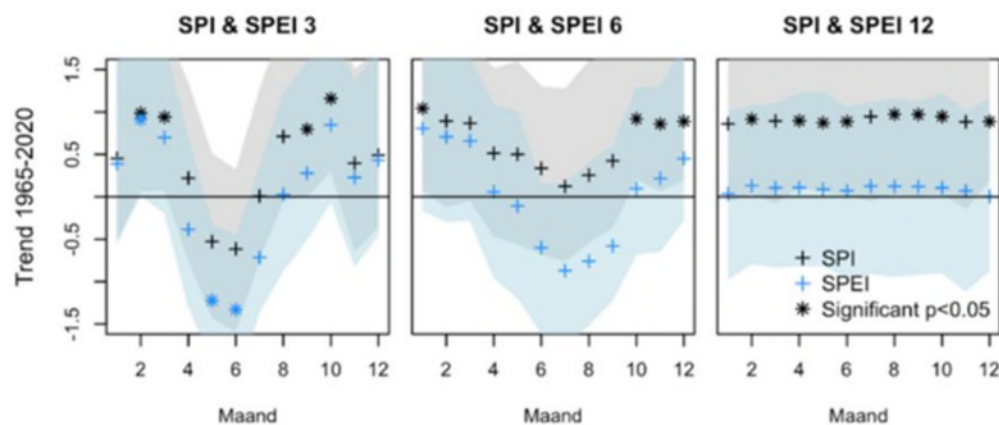
	Nederland				Castricum	
	1910-2009		1951-2009		1951-2009	
	Absoluut (mm)	Relatief (%)	Absoluut (mm)	Relatief (%)	Absoluut (mm)	Relatief (%)
Jaar	172	25	118	16	154	18
Winter (okt-mrt)	108	35	88	26	117	28.5
Zomer (apr-sep)	61	16	33	8	18	5

De temperatuur is de afgelopen eeuw sterk opgelopen. Het is in het voorjaar en de zomer in Nederland nu respectievelijk $1,9 \pm 0,9$ °C en $2,9 \pm 0,8$ °C warmer dan in het begin van de vorige eeuw [CBS et al., 2024]. Daarnaast neemt ook de inkomende zonnestraling vanaf midden jaren 1980 toe door afname van luchtvervuiling. Hier bovenop is een trend zichtbaar in meer zonnestraling in lente en zomer, wat mogelijk wordt veroorzaakt door minder wolkenvorming bij zuidenwind (Van Oldenburg et al., 2009). Zowel de oplopende temperatuur als de toename in inkomende zonnestraling resulteren in een hogere referentieverdamping. Gemiddeld over Nederland compenseert de toename in (zomer)neerslag de toename in referentieverdamping. Hierdoor is landelijk gezien geen trend in het potentieel neerslagtekort waarneembaar.

Door Philip et al. (2020) is o.a. naar aanleiding van de 2018-droogte onderzoek gedaan naar regionale verschillen in neerslag, temperatuur, (Makkink) referentieverdamping en bodemvocht. Uit deze studie komen duidelijke regionale verschillen naar voren tussen metingen op meteostations in de kustregio en het binnenland. In de kustregio is de zomerneerslag (apr-sep) met tot 25% per graad 'Global Mean Surface Temperature' (GMST) stijging toegenomen. In de kustregio is er volgens de auteurs een duidelijke trend naar meer neerslag in de zomer, terwijl de trend in zomerneerslag in het binnenland verwaarloosbaar of zelfs significant negatief is. Deze bevinding wijkt af van de oudere studie van Buishand et al (2012) in Tabel 1. Dit verschil kan mogelijk verklaard worden door een versnelling van de neerslagtoename in de laatste 10 jaar in het duin (Figuur 2). Uit de studie van Phillip et al. (2020) blijkt verder voor zowel de kust als het binnenland een positieve trend in zomertemperatuur (2.5 graad per graad GMST) en inkomende straling, resulterend in een positieve trend in (Makkink) referentieverdamping van 10 tot 25%

per graad GMST toename. Verschillen in temperatuurtrend tussen de kust en het binnenland zijn klein, maar de trend in inkomende straling is bij de binnenlandse meetstations groter dan aan de kust ($7 \pm 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ hoger dan aan de kust). Ook de referentieverdamping lijkt aan de kust 10-15% minder toe te nemen dan in het binnenland.

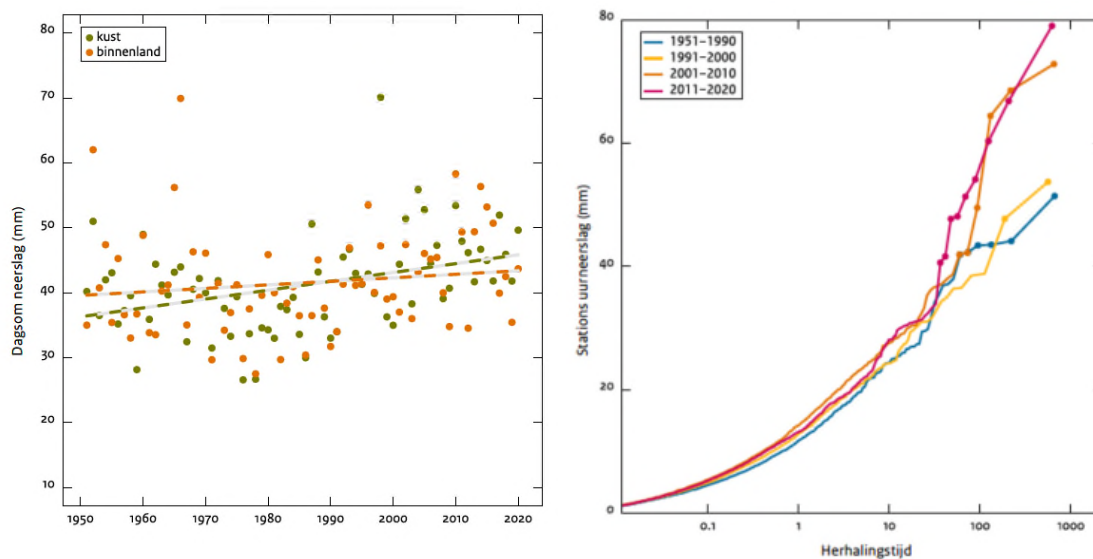
Door Daniels et al. (2021) is gebruik gemaakt van twee internationaal veel gebruikte droogte-indicatoren (Standardised Precipitation Index (SPI) en Standardised Precipitation-Evaporation Index (SPEI)) om ontwikkelingen in droogte te kwantificeren. Deze indicatoren reflecteren de gestandaardiseerde afwijking van wat normaal gegeven de klimatologie verwacht mag worden en geven hiermee informatie over zowel natte als droge condities. Daarbij kan de SPI en SPEI worden geaggregeerd over verschillende tijdvakken. SPI-3 in maart geeft bijvoorbeeld informatie over de meteorologische droogte in de maanden januari, februari en maart terwijl SPI-12 informatie geeft over de meteorologische droogte van de voorgaande 12 maanden. Een (meteorologische) droogte wordt gedefinieerd als een waarde van de SPI/SPEI beneden de -1 komt, en is voorbij als de SPI/SPEI weer positief wordt. Waarden tussen -1 (enigszins droog) en $+1$ (enigszins nat) kunnen als normaal worden beschouwd. In Figuur 3 zijn de door Daniels et al., 2021 berekende trends in SPI en SPEI voor 3 maanden, een half jaar en een jaar gegeven voor de 13 KNMI-referentiestations. Uit SPI-12 blijkt dat er een duidelijke positieve trend is in de jaarneerslag, uit SPEI-12 blijkt dat deze neerslagtoename wordt gecompenseerd door de toegenomen referentieverdamping. Uit de SPI-3 en SPI-6 blijkt vervolgens dat deze neerslagtoename vooral optreedt in het najaar en de winter. Een significante negatieve trend is zichtbaar in de SPEI-3 van September en juni. Sinds 1965 is de meteorologische droogte landelijk dus in het voorjaar significant toegenomen. Vervolgens zijn door Daniels et al (2021) ruimtelijke verschillen in trends inzichtelijk gemaakt op basis van gerasterde neerslag en (Makkink) referentieverdampfingsdata voor de periode maart-juni. Hieruit volgt een (deels significante) positieve trend in de neerslag in de kustgebieden en een (deels significante) negatieve trend in Oost en Zuidoost Nederland. De referentieverdamping heeft in heel Nederland een positieve trend. In het noordwesten is deze (voorjaars)trend echter significant lager dan in het zuidoosten.



Figuur 3 Trend in SPI (zwart) en SPEI (blauw) voor tijdvakken van 3, 6 en 12 maanden gebaseerd op data van 13 langlopende KNMI-referentiestations (bron: Daniels et al. 2021)

Opwarming resulteert in een toename van de absolute hoeveelheid vocht in de atmosfeer. Deze vochttoename is de belangrijkste reden dat neerslagextremen toenemen (KNMI, 2021). Omdat toeval een grote rol speelt in waar zware neerslag optreedt kan een trend alleen worden verkregen door data van meerdere stations te combineren. Door het KNMI is een trendanalyse uitgevoerd voor stations in een 50 km brede kuststrook en voor stations in het binnenland (KNMI, 2021). Uit deze trendanalyse blijkt dat dagelijkse neerslagextremen met een herhalingsstijd van eens per 5 jaar met ca. 20% zijn toegenomen in de kustzone en aanzienlijk minder in het binnenland (10%) (Figuur 4). Waarom de stijging langs de kust afwijkt, is op dit moment nog niet goed te verklaren met de beschikbare gegevens en modellen. Neerslagextremen met een korter tijdsbestek zijn daarnaast ook toegenomen. Zo laat de klimaatatlas van Sluiter (2011) zien dat de trend hiervan binnen de kustgebieden varieert. Neerslagbuien van >10

mm zijn tussen 1951-80 en 1981-2010 aan de Zuid-Hollandse kust sterker toegenomen dan aan de overige kustgebieden.



Figuur 4 Links: Dagsommen neerslag met een herhalingstijd van eens per 5 jaar inclusief trends voor de kustzone en het binnenland. Rechts: Herhalingstijden stations-urneerslag voor vier perioden (alle stations samen). De herhalingstijd is benaderd op basis van frequentie van voorkomen en kan afwijken van de officiële neerslagstatistieken (figuren overgenomen uit: KNMI, 2021)

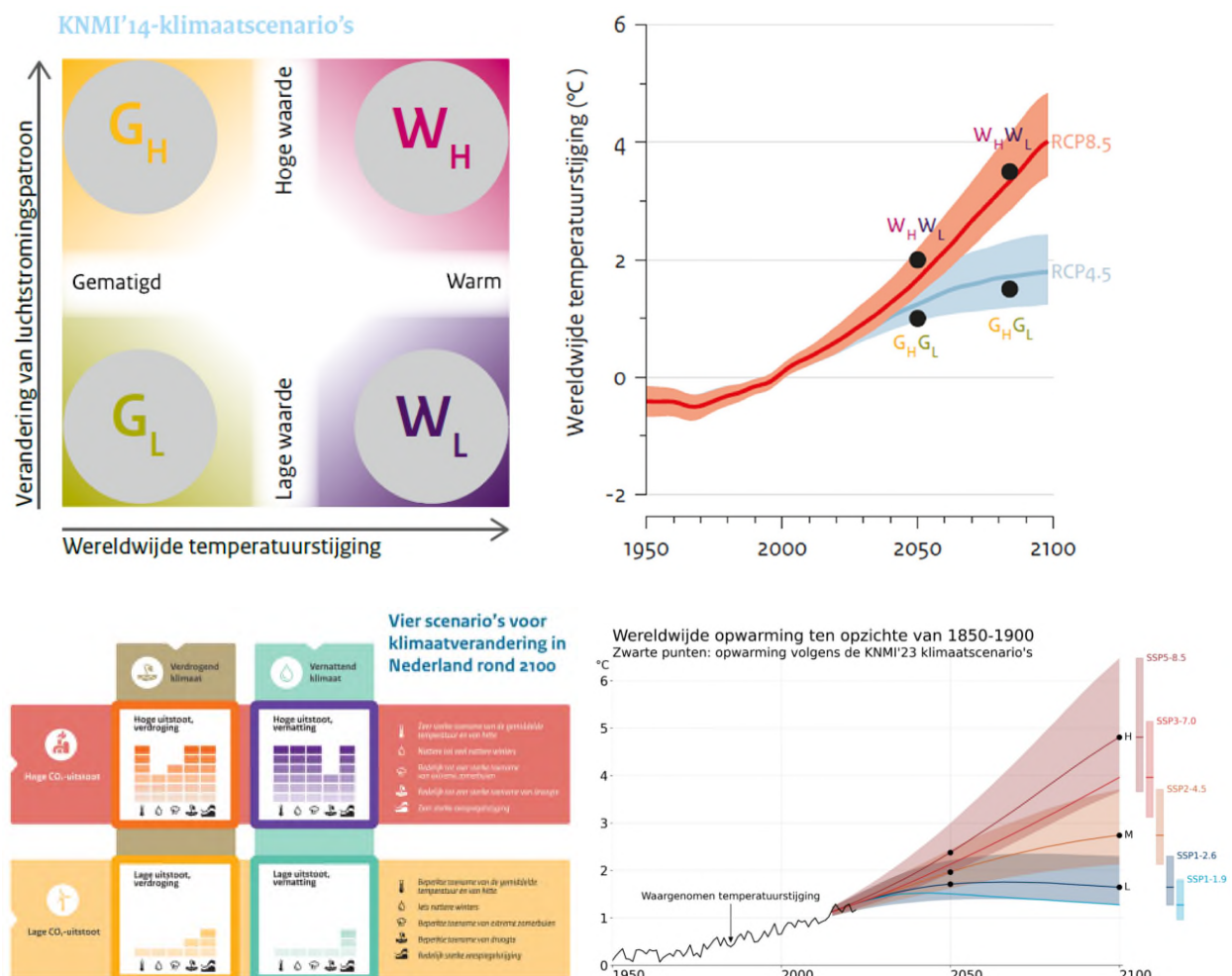
2.1.2 Resultaten klimaatmodellen en klimaatscenario's (KNMI'14 & '23)

Door Phillip et al. (2020) is met 16 niet-stationaire runs van het ISIMIP ensemble¹ getracht de geobserveerde temporele en regionale verschillen in temperatuur, neerslag, verdamping en bodemvocht toe te wijzen aan klimaatverandering. De gebruikte modellen zijn echter onvoldoende in staat om kusteffecten in de neerslag voldoende betrouwbaar te modelleren. Hierbij wordt onder meer verwezen naar Van Haren et al. (2012), die aangeven dat de modellen de zomerneerslag in kustgebieden onderschatten door vertekeningen in de Sea Surface Temperature (SST)-trends in de randvoorwaarden van het model. De analyse van Phillip et al. (2020) is daarom beperkt tot het binnenland. Hieruit komt naar voren dat de modellen net als de observaties geen duidelijke trend in de neerslag in het groeiseizoen (apr-sep) laten zien. Wel blijkt uit de modellen een trend in hogere zomertemperatuur. Deze is echter 50% lager dan de geobserveerde trend. Gezien de lagere trend in temperatuur in de modellen ligt het voor de hand dat er ook een vertekening is in de trend in de (berekende) Makkink referentieverdamping. Deze is inderdaad positief in de modellen, maar aanzienlijk lager dan de 'geobserveerde' trend.

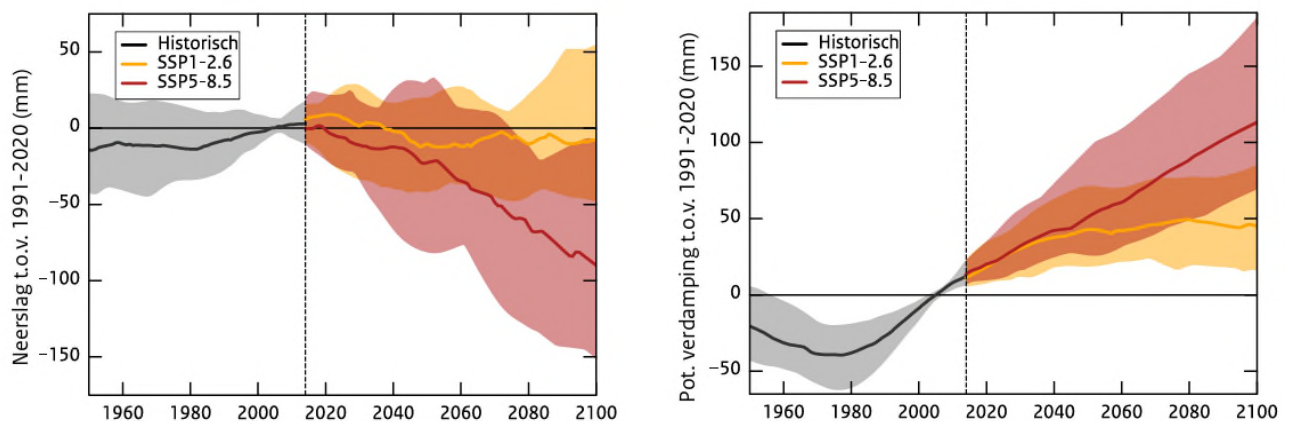
Doordat de klimaatmodellen vooralsnog onvoldoende goed in staat zijn om trends in meteorologische variabelen te reproduceren in de kustzone, is het nog niet mogelijk om kustspecifieke regionale klimaatprojecties te maken voor de effecten van klimaatverandering. Voor studies zal dus gebruik moeten worden gemaakt van landelijke scenario's. Tot recent waren dit de KNMI'14 scenario's. Inmiddels zijn in oktober 2023 de door het KNMI bijgestelde klimaatscenario's gepresenteerd. Uiteraard kunnen lokale tijdreeksen worden getransformeerd of (zoals bij de '23 scenario's) gebruik worden gemaakt van voor bias gecorrigeerde modeldata waardoor bestaande ruimtelijke variatie ook in de scenario's tot uiting komen (Van den Brink & de Valk, 2023). Afwijkingen in de lokale trend komen hier echter niet mee tot in uitdrukking. De nieuwe KNMI'23 scenario's hebben een min of meer vergelijkbare structuur als de KNMI'14 scenario's: een as voor verschillende mondiale opwarmingsniveaus voor specifieke tijdsintervallen en een as met verschillen in droogte. In de KNMI '23 scenario's is een expliciete koppeling gemaakt met sociaaleconomische (SSP/RCP) scenario's. Het gaat hierbij om een scenario wat consistent is met een

¹ Global Circulation Models (GCM's)/ Regional Circulation Models (RCM's) gekoppeld aan Hydro/impact models

2-graden Parijs-scenario (SSP1-2.6) en een hoog scenario (SSP5-8.5). Een derde opwarmingsniveau is gekoppeld aan het tussengelegen scenario (SSP2-4.5). Dit scenario is toegevoegd om o.a. de vergelijking te kunnen maken met de KNMI'14 scenario's. De scenario's liggen namelijk wat verder uit elkaar dan de KNMI'14 scenario's lagen (Figuur 5).



Figuur 5 KNMI'14 scenario's (linksboven) en de ligging van deze (oude) scenario's ten opzichte van de SSP/RCP scenario's (rechtsboven) en KNMI'23 scenario' (linksonder) en ligging van de nieuwe scenario's ten opzichte van de SSP/RCP scenario's (bron: KNMI, 2015; Van Dorland, 2020; Dorland et al., 2023). Deze scenario's gelden voor Nederland als geheel en zijn niet kustspecifiek.



Figuur 6 Projecties voor verandering in neerslag (mm) en Makkink referentieverdamping (mm) in het groeiseizoen (apr-sep) op basis van CMIP6 modelsimulaties voor scenario's SSP1-2.6 en SSP5-8.5 in het stroomgebied van Rijn en Maas (incl. Nederland) (KNMI, 2021)

De nieuwe generatie klimaatmodellen (CMIP6) laat voor lage emissiescenario's (o.a. SSP1-2.6) geen significante verandering van de zomerneerslag zien in het stroomgebied van Maas en Rijn. Bij hoge emissiescenario's neemt de zomerneerslag af (Figuur 6, links). De Makkink referentieverdamping in de stroomgebieden neemt zowel bij hoge als bij lage emissiescenario's toe (Figuur 6, rechts). Deze toename wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door hogere temperaturen en versterkt door een geprojecteerde afname van de bewolking, en daarmee samenhangende toename van zonnestraling. Neerslag en verdamping zijn in hoge mate afhankelijk van grootschalige luchtstromingen. Klimaatmodellen geven geen eenduidig antwoord of, en hoe, de circulatie in de toekomst zal veranderen. Zo vertraagt de golfstroom en warmt de Noord-Atlantische oceaan minder snel op dan omliggende gebieden. Hierdoor ontstaat vaker een hogedrukgebied boven de Britse eilanden. Tegelijkertijd resulteert de sterke opwarming in het middellandse zeegebied daar tot lagedrukgebieden. Beide veranderingen kunnen resulteren in vaker oostelijke aanvoer van lucht in de zomer (KNMI, 2021). Deze onzekerheid is in de KNMI'14 scenario's (Tabel 2) ondervangen door scenario's op te stellen met veel en weinig verandering in circulatie. In de nieuwe KNMI'23 scenario's (Tabel 3) is een iets andere structuur aangehouden.

Verdere opwarming zal betekenen dat de winters natter en de zomers droger worden (KNMI, 2021). Voor de mate waarin geven de meest recente klimaatmodellen echter verschillende uitkomsten. Om die te laten zien zijn per uitstootscenario een 'natte' en een 'droge' variant aangehouden. In de eerste variant vernatten de winters sterk en verdrogen de zomers licht en in de tweede variant vernatten de winters licht en verdrogen de zomers sterk.

Tabel 2 KNMI'14 scenario's voor neerslag (P) en Makkink verdamping (ET_{ref}) voor zichtjaren 2050 en 2085 en voor Nederland als geheel.

			Scenario's 2050				Scenario's 2085			
			normaal 1981-2010	G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L
Wereldwijde temperatuurstijging t.o.v. 1981-2010			+1°C	+1 °C	+2°C	+2 °C	+1.5 °C	+1.5 °C	+3.5 °C	+3.5 °C
Verandering luchtstroming			Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog	Laag	Hoog
Jaar	P	851	+4%	+2.5%	+5.5%	+5%	+5%	+12%	+13%	+30%
	ET _{ref}	559	+3%	+5%	+4%	+7%	+2.5%	+5.5%	+6%	+10%
Winter	P	211	+3%	+8%	+8%	+17%	+4.5%	+12%	+13%	+30%
Lente	P	173	+4.5%	+2.3%	+11%	+9%	+8%	+7.5%	+15%	+12%
Zomer	P	224	+1.2%	-8%	+1.4%	-13%	+1%	-8%	-5%	-23%
	ET _{ref}	266	+4%	+7%	+4%	+11%	+3.5%	+8.5%	+9%	+15%
Herfst	P	245	+7%	+8%	+3%	+7.5%	+7.5%	+9%	+6.5%	+12%

Tabel 3 KNMI'23 scenario's voor neerslag (P) en Makkink verdamping (ET_{ref}) voor zichtjaren 2050 en 2100 en voor Nederland als geheel. Voor de vergelijkbaarheid is tevens het M scenario (SSP2-4.5) opgenomen wat in lijn is met het oude G scenario. Met "d" en "n" zijn de droge en natte varianten weergegeven.

			2050						2100					
			Ld	Ln	Md	Mn	Hd	Hn	Ld	Ln	Md	Mn	Hd	Hn
Wereldwijde temperatuurstijging t.o.v. 1991-2020			0.8 °C		1.1 °C		1.5 °C		0.8 °C		1.9 °C		4 °C	
Uitstootscenario			SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
Jaar	P	851	0%	+3%	-1%	+2%	-2%	+3%	0%	+3%	-1%	+5%	-3%	+8%
	ET_{ref}	603	+7%	+6%	+7%	+5%	+9%	+6%	+7%	+6%	+10%	+7%	+17%	+11%
Winter	P	218	+4%	+5%	+4%	+5%	+4%	+7%	+4%	+5%	+5%	+10%	+14%	+24%
	ET_{ref}	32	+6%	+7%	+6%	+5%	+7%	+6%	+6%	+7%	+6%	+7%	+11%	+9%
Lente	P	153	+1%	+3%	+1%	+3%	0%	+4%	+1%	+3%	+4%	+7%	+4%	+10%
	ET_{ref}	190	+6%	+5%	+5%	+4%	+6%	+4%	+6%	+5%	+7%	+4%	+10%	+6%
Zomer	P	235	-8%	-2%	-9%	-2%	-13%	-5%	-8%	-2%	-15%	-3%	-29%	-12%
	ET_{ref}	286	+8%	+6%	+8%	+6%	+11%	+7%	+8%	+6%	+12%	+8%	+22%	+14%
Herfst	P	245	+4%	+5%	+2%	+4%	+1%	+4%	+4%	+5%	+3%	+7%	+1%	+13%
	ET_{ref}	95	+7%	+7%	+6%	+6%	+10%	+6%	+7%	+7%	+9%	+7%	+20%	+13%

Als de oude landelijke KNMI'14 scenario's (Tabel 2) worden vergeleken met de trends in de neerslag aan de kust, dan blijkt de toen geprojecteerde toename in de jaarlijkse neerslag in de scenario's aan de lage kant waren. Als de trend in de geobserveerde jaarlijkse neerslagsommen in Castricum wordt doorgetrokken naar zichtjaar 2050 (normaal 2036-2065) dan neemt de neerslagsom toe met bijna 20% ten opzichte van de 1981-2010 normaal. Voor zichtjaar 2085 (normaal 2071-2100) is de toename dan bijna 32%, wat redelijk aansluit bij het W_H scenario. In de G_H en W_H scenario's wordt een daling voorzien in de zomerneerslag.

Ook in de nieuwe landelijke KNMI-2023 scenario's (Tabel 3) wordt slechts een beperkte toename van de jaarlijkse neerslag geprojecteerd, ook in de 'natte' scenario's. In het Md en Hd scenario is zelfs een afname van de jaarlijkse neerslag van -1 tot -3% voorzien. Uitgaande van de referentieperiode 1991-2020 laat de geëxtrapoleerde Castricum data een toename van de jaarlijkse neerslag met ruim 13% in 2050 en ruim 29% in 2100. In alle KNMI'23 scenario's is een daling in de zomerneerslag voorzien. In de Castricum-data is van een dergelijke negatieve trend geen sprake, de trend in zomerneerslag is, in lijn met Philip et al. (2020), licht positief.

Hoewel het uiteraard de vraag is of de metingen bij Castricum tot 2100 geëxtrapoleerd kunnen worden, is duidelijk dat de trend in de neerslag in het duin vooralsnog aanzienlijk positiever is dan in de KNMI-scenario's afgeleid voor heel Nederland. Het is echter mogelijk om lokale tijdreeksen te transformeren of gebruik te maken van voor bias gecorrigeerde modeldata waardoor in ieder geval bestaande ruimtelijke variatie ook in de scenario's tot uiting komt (Van den Brink & de Valk, 2023).

2.1.3 Verandering neerslagoverschot en grondwateraanvulling

Verandering van het neerslagoverschot

Uit paragraaf 2.1.1 en 2.1.2 blijkt dat de neerslag in de kuststrook toeneemt en dat deze toename vooral wordt veroorzaakt door een toename van de winterneerslag. Daarbij nemen in de kuststrook ook de zware (zomer) buien toe. Neerslag in de zomer valt steeds meer in hevige buien. Echter ook de referentieverdamping neemt toe. Uit de studie van Phillip et al. (2020) blijkt een trend van 10-15% toename in referentieverdamping per graad GMST voor de kuststations, iets lager dan bij de binnenlandse meetstations. Deze toename is zowel langs de kust als in het binnenland groter dan de trends in de klimaatmodellen en de in de KNMI'14 scenario's aangehouden trend van 3-5% toename in referentieverdamping per graad GMST. Als we bovenstaande toepassen op de data van Castricum ontstaat een beeld van het gemiddelde potentiële neerslagoverschot ($O = P - ET_{ref}$) in 2050 en 2085. Vooral voor 2050 wijkt het '14 W_H scenario af van de geobserveerde trends, en neemt de grondwateraanvulling in het scenario slechts heel beperkt toe. In 2085 liggen het '14 W_H scenario en de trend meer in lijn (Tabel 4).

In Tabel 5 is de trend in observaties vergeleken met het KNMI'23 Hn scenario voor de zichtjaren 2050 en 2100 en met de meest recente wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van de referentieperiode 1991-2020. Er is in dit voorbeeld gekozen voor het Hn scenario, omdat in dit scenario de jaarlijkse neerslag meer in lijn ligt met de observaties dan bij het Hd scenario. Consequentie van deze keuze is echter wel dat de verandering van de referentieverdamping lager is (11% vs. 17% in Hd). Binnen dit scenario ligt de trend juist in 2050 meer in lijn met het scenario.

Zowel de trends in de observaties als de scenario's zijn met flinke onzekerheid omgeven. Op basis van de geanalyseerde data en scenario's kan echter geconcludeerd kan worden dat het potentiële jaarlijkse neerslagoverschot in de kuststrook vrijwel gelijk zal blijven of toe zal nemen richting 2100.

Tabel 4 Indicatie van het potentiële jaarlijkse neerslagoverschot voor 2050 en 2085 aan de hand van trends in observaties (Castricum data, Phillip et al., 2020 voor ET_{ref} en wereldwijde temperatuurstijging volgens KNMI-'14) en het oude KNMI'14 W_H scenario. ET_{ref} is berekend volgens: $2/5 ET_{ref}$ Vlissingen + $3/5 ET_{ref}$ De Kooy. De procentuele afwijking van de geëxtrapoleerde observaties met het landelijke KNMI scenario is weergegeven met een Δ .

Castricum	normaal 1981-2010	2050 (+2°C)			2085 (+3.5°C)		
		trend obs.	KNMI '14 W_H	Δ (%)	trend obs.	KNMI '14 W_H	Δ (%)
Neerslag (P) (mm)	904	1083	953	-12.0	1190	1175	-1.3
Referentieverdamping (ET_{ref}) (mm)	605	726	647	-10.9	817	787	-3.7
Potentieel neerslagoverschot(O) (mm)	299	357	306	-14.4	374	388	3.7

Tabel 5 Indicatie van het potentiële jaarlijkse neerslagoverschot voor 2050 en 2100 aan de hand van trends in observaties (Castricum data, Phillip et al., 2020 voor ET_{ref} en wereldwijde temperatuurstijging volgens KNMI-'23) en het nieuwe KNMI'23 Hn scenario. ET_{ref} is berekend volgens: $2/5 ET_{ref}$ Vlissingen + $3/5 ET_{ref}$ De Kooy. De procentuele afwijking van de geëxtrapoleerde observaties met het landelijke KNMI scenario is weergegeven met een Δ .

Castricum	normaal 1991-2020	2050 (+1.5°C)			2100 (+4°C)		
		trend obs.	KNMI '23 Hn	Δ (%)	trend obs.	KNMI '23 Hn	Δ (%)
Neerslag (P) (mm)	954	1083	983	-9.2	1235	1030	-16.6
Referentieverdamping (ET_{ref}) (mm)	626	720	664	-7.8	876	695	-20.7
Potentieel neerslagoverschot (O) (mm)	328	363	319	-12.1	358	336	-6.1

Vegetatieterugkoppelingen en actuele grondwateraanvulling

In bovenstaande alinea is een indicatie gegeven voor de verandering in het potentiële jaarlijkse neerslagoverschot. Het daadwerkelijke neerslagoverschot ofwel de actuele grondwateraanvulling (R) wordt echter bepaald door de actuele verdamping (ET_a) volgens $R = P - ET_a$. Deze actuele grondwateraanvulling is afhankelijk van het type vegetatie, de conditie van de vegetatie, het percentage kaal zand, en de hoeveelheid water die beschikbaar is in de bodem (Bartholomeus et al., 2010; Witte et al., 2008). Tijdens periodes met vochttekorten in de wortelzone reduceren planten de transpiratie door huidmondjes te sluiten en het laten afsterven van bovengrondse en ondergrondse plantendelen. Dat treedt vooral op in vegetaties op droge standplaatsen waarbij de wortels in een droge periode niet (meer) reiken tot de capillaire zoom. Op bodems met een hoge grondwaterstand, zoals natte duinvalleien, kan de verdamping in droogteperiodes hoog blijven, en zal deze door de hogere temperatuur en straling zelfs sterk kunnen toenemen tot de waarde van de potentiële verdamping. In duingraslanden neemt vooral de biomassa van grassen sterk af bij extreme droogte terwijl dieper wortelende kruidsoorten zich nog handhaven (Aggenbach et al. 2020). Deze biomassa afname wordt veroorzaakt door zowel droogte- als hittestress. Op droge standplaatsen is de bedekkingsgraad van korte vegetaties veelal laag, en het aandeel kaal zand hoog (Bartholomeus et al., 2012). Kaal zand verliest slechts 200 – 300 mm/jr door verdamping, zoals is gebleken uit de Castricum lysimeters (200 mm/jr, Peña, (2003)) en modelberekeningen voor diverse duinplots (259 mm/jr, Voorman et al (2017)). Door de verdampingsreductie die met het afsterven van bovengrondse biomassa gepaard gaat zal de daadwerkelijke grondwateraanvulling hoger liggen dan het potentiële neerslagoverschot.

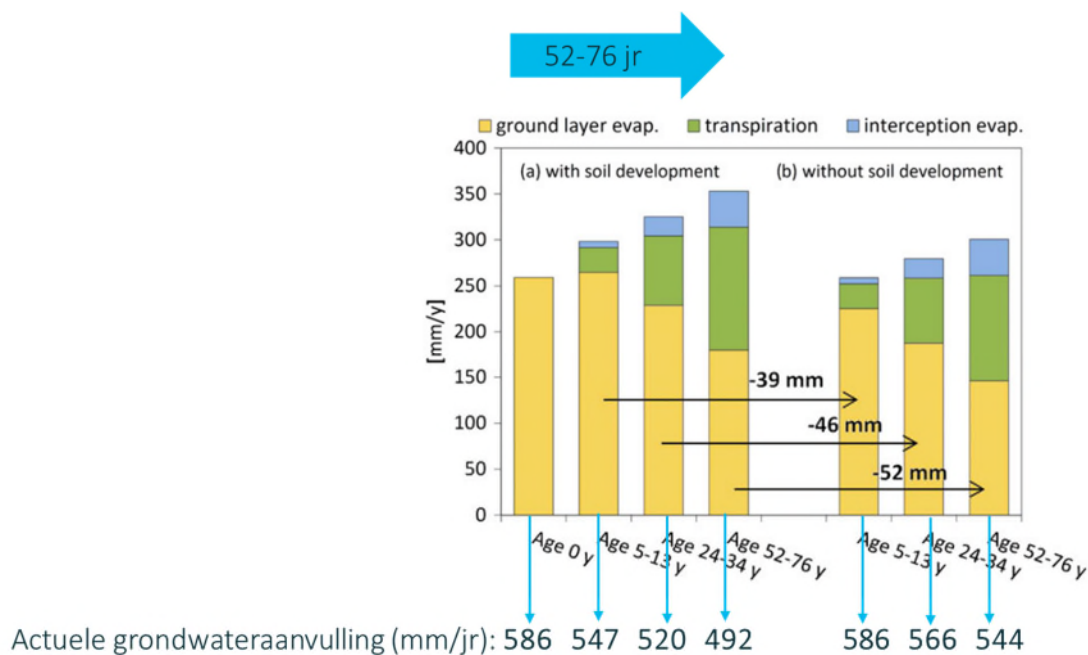
In grondwateronafhankelijke profielen kan meteorologische droogte en de doorwerking op bodemvochtdroogte, door sluiting van huidmondjes en afsterving van (delen van) vaatplanten dus resulteren in grotere grondwateraanvulling. Daarmee kan meteorologische droogte zorgen voor hogere freatische grondwaterstanden op gebiedsniveau. In grondwaterafhankelijke profielen zal, zoals al aangegeven, minder snel transpiratiereductie optreden. Daarnaast ligt de daadwerkelijke aanvulling, in situaties zonder oppervlakkige afstroming, dicht bij het potentiële neerslagoverschot.

Vooralsnog lijkt afsterving door droogte in de Nederlandse kustduinen vooral een tijdelijk effect. Bij de recente extreme droogten van 2018, 2019 en 2020 behielden veel droge duingraslanden nog een hoge mosbedekking. De grasbedekking bleek zich weer vrij snel te herstellen in een opvolgend 'normaal' of nat jaar (Aggenbach et al. 2020). Vermoedelijk speelt de nog steeds hoge stikstofdepositie een rol in snel herstel van grassen in nattere jaren. Oppervlakken binnen 'exclosures' in de Amsterdamse Waterleiding Duinen, die damherten uitsluiten en ook geen beweiding toestaan, vergassen bijvoorbeeld in de afgelopen nattere jaren snel (mondelinge mededeling M. van Til). Een blijvend hoge N-depositie zou dan in de nattere jaren van het nieuwe klimaat de toename van grondwateraanvulling kunnen beperken door versneld herstel van grassen.

Voor struwelen en bossen is de doorwerking op transpiratie waarschijnlijk anders. Mogelijk wortelen diverse struik- en boomsoorten dusdanig diep dat ze in bodems met een diepe grondwaterstand water kunnen onttrekken uit de capillaire zone die meters diep onder maaiveld zit (Fan et al., 2017; Brinkmann et al., 2019). Zo kan Duindoorn, een belangrijke soort van 'droge' struwelen, metersdiep wortelen. Uit observaties blijkt dat, in tegenstelling tot ondiep wortelende grassen en kruiden, veel struiken en bomen tijdens de extreme droogteperiodes geen sterke droogtestress-verschijnselen vertoonden. De transpiratiereductie van duinstruwelen en -bossen zal daarom waarschijnlijk geringer zijn dan die van droge duingraslanden.

Bovengenoemde terugkoppelingen zijn door Witte et al. (2008) en later Bartholomeus et al. (2012) voor duingraslanden uitgewerkt met een aantal empirische relaties en het bodemvochtmodel SWAP, rekening houdend met verschillen in inclinatie en oriëntatie. Voor een vlakke grondwateronafhankelijke korte duinvegetatie resulteerde dit in een daadwerkelijke aanvulling van 371 mm/jr bij een potentieel neerslagoverschot van 221 mm/jr voor de toenmalige situatie. De daadwerkelijke aanvulling (R) ligt hiermee een factor 1.7 hoger dan het potentiële neerslagoverschot (O). Later onderzoek door Voortman et al. (2014) laat zien dat (korst)mosvegetaties nog minder verdampen dan kaal zand. Daarnaast zijn door Voortman et al. (2017) successiereksen onderzocht waarbij ook de bodemontwikkeling is meegenomen (Figuur 7). Uit dit onderzoek komt het verdampingsreducerende effect van de

moslaag nadrukkelijk naar voren. Ca. 22% van dit bespaarde water komt ten goede aan verdamping door planten. De overige 78% komt ten goede aan grondwateraanvulling. Hierdoor faciliteren de mossen successie naar een meer door vaatplanten gedomineerde vegetatie. In combinatie met bodemvorming resulteerde dit in het onderzoek van Voortman et al. (2017) in een 94 mm/jr grotere verdamping na 52-76 jaar successie. Al met al is de door Voortman et al. (2017) berekende grondwateraanvulling onder duingraslanden aanzienlijk en varieert afhankelijk van het successiestadium tussen 492 en 586 mm/jr. In tegenstelling tot Witte et al. (2008) kwam in Voortman et al. (2017) geen groot verschil in verdamping tussen noord en zuidhellingen naar voren. Dit komt omdat factoren elkaar deels opheffen zo vangen zuidhellingen meer straling, maar ook wat meer neerslag en hebben zuidhellingen een lagere waterretentie en vegetatiebedekking. Noordhellingen vangen minder straling, maar hebben een hogere waterretentie en hogere bedekking met vaatplanten.



Figuur 7 Effect van successie en bodemvorming op actuele verdamping en grondwateraanvulling (aangepast naar Voortman et al. (2017))

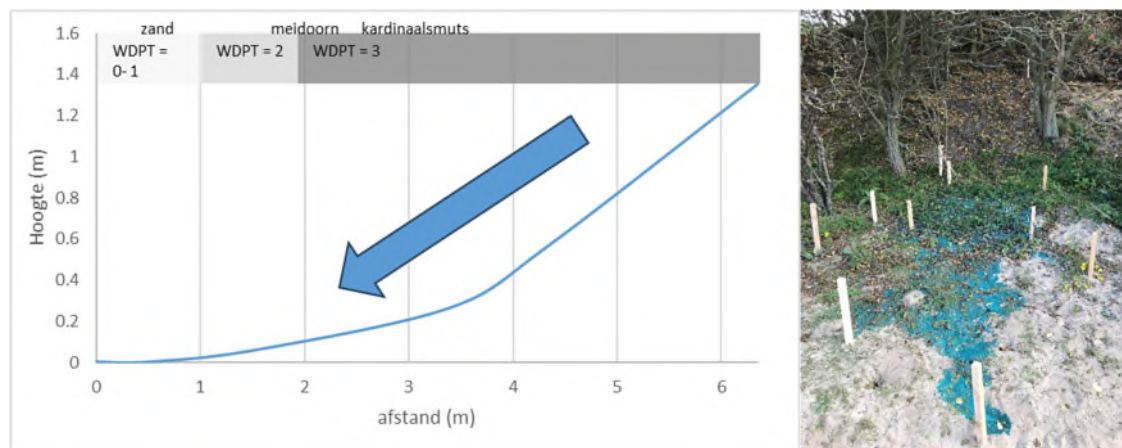
Verandering in grondwateraanvulling

Vaatplanten zijn gevoeliger voor droogte dan mossen en korstmossen. Meer zomerdroogte door klimaatverandering kan daarom resulteren in een afname van vaatplanten en een toename van mossen en korstmossen en daardoor in een hogere grondwateraanvulling. Dit kan het effect van een afname van het potentiële neerslagoverschot (als gevolg van klimaatverandering) mogelijk (deels) mitigeren. De effecten van klimaatverandering op de vegetatiestructuur van duingraslanden kunnen echter ook anders uitpakken. Op basis van eerste analyse van data van een Europese gradiëntstudie in duingraslanden is gekeken naar de invloed van vochttekort en stikstofdepositie op de vegetatiestructuur van duingraslanden (Aggenbach et al. 2024). In het huidige klimaat van de kust van de Aquitaine in ZW-Frankrijk, waar de zomers veel droger zijn dan die in Nederland, domineren korstmossen de moslaag en hebben 'gewone' mossen vaak een in verhouding lage bedekking. Wanneer het Nederlandse klimaat ook zulke droge zomers gaat krijgen, kan dit dus resulteren in een afname van de mosbedekking. De vraag is echter of korstmossen dan ook een hoge bedekking gaan krijgen, omdat in Nederland de stikstofdepositie hoger is dan in de Aquitaine. Een hoge stikstofdepositie kan mogelijk een hoge bedekking van korstmossen belemmeren. In dat geval zal er geen sprake meer zijn van een vegetatielaag van mossen en korstmossen, resulterend in duingraslanden met veel kale bodem. Veranderingen in vegetatiestructuur kunnen daarom afhankelijk zijn van de mate waarin het klimaat gaat veranderen en de ontwikkeling van de stikstofdepositie.

In de eerder beschreven studie van Witte et al., (2008) zijn scenarioberekeningen uitgevoerd voor een aantal klimaatprojecties. Hierbij is gewerkt met de inmiddels sterk achterhaalde KNMI '06 scenario's, waarbij is aangenomen dat de trends tussen kust en binnenland gelijk zijn. Uit de trends in observaties en recentere scenario's komt een veel sterkere toename van de neerslag naar voren en neemt ook de zomerneerslag in het duin (beperkt) toe (zie paragraaf 2.1). Daarnaast is ook de kennis van de terugkoppelingen verbeterd door het werk van Voortman et al. (2017). Een herhaling van de berekeningen met de nieuwe KNMI '23 scenario's is dan ook zeer gewenst. Hierbij kan dan tevens gebruik worden gemaakt van de empirische data uit een breder klimaatbereik zoals verkregen uit de gradiëntstudie (Aggenbach et al. 2024).

Zware buien en hydrofobie en verstuing

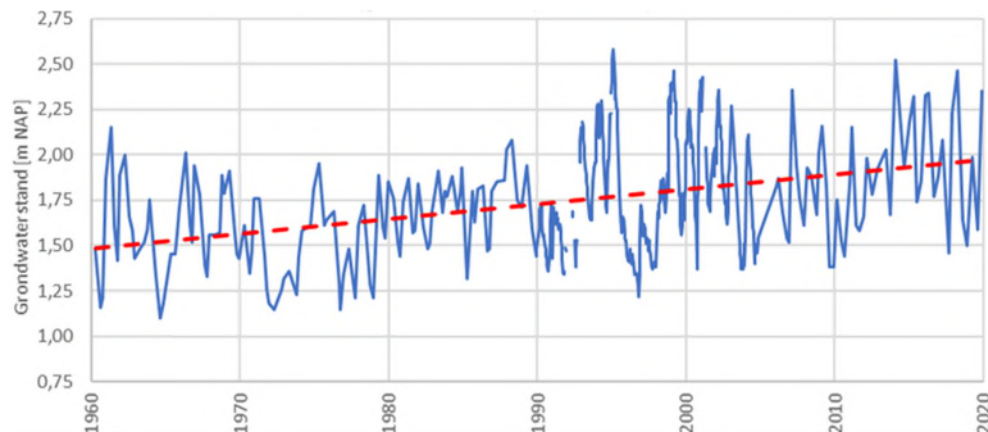
De toename van de neerslag in de zomer gaat gepaard met een toename in zwaardere buien. Tegelijkertijd neemt ook de temperatuur en de potentiële verdamping toe in de zomer. Gevolg van dit laatste is een sterker uitdrogende toplaag en versterkte hydrofobie op begroeide vlakken. Bij zware buien zal regenwater dan, zeker in geaccidenteerd terrein, oppervlakkig afstromen naar laagtes en daar preferent via zogenaamde 'vingers' infiltreren. Hierdoor wordt een flink deel van de wortelzone gepasseerd en komt regenwater maar deels ten goede aan de lokale planten (Jungerius en Van der Meulen, 1988; Camaraat fide Aggenbach et al. 2018). Uit Cirkel & Hornstra (2019) blijkt dat het hydrofobe oppervlak kan oplopen tot meer dan 50% van het bodemoppervlak. Dit versterkt vervolgens weer de reductie in verdamping, en vergroot mogelijk zo de grondwateraanvulling. In Figuur 8 is een voorbeeld van hydrofobie in het dungebied Septemberjendel opgenomen. Hiernaast gaat opbouw van organisch materiaal gepaard met een toename van de waterafstotendheid van duinbodems (Mao, 2016). Deze hydrofobie is een gevolg van coatings met uit plantenmateriaal (bladeren wortels) afkomstige organische verbindingen (lipides en biopolymeren). Jong verstoven duinzand is niet of nauwelijks waterafstotend terwijl begroeide bodems hierdoor al snel sterk waterafstotend kunnen zijn. Deze terugkoppeling is niet meegenomen in de eerdergenoemde onderzoeken naar bodem- en vegetatieterugkoppelingen op de actuele verdamping.



Figuur 8 Waterafstotendheid langs een met Septemberdoorn en kardinaalsmuts begroeide helling in Septemberjendel (Cirkel & Hornstra, 2019). Bij een WDPT (Water Drop Penetration Test) klasse 3 duurt het 600-3600 sec voordat een waterdruppel infiltreert. Bij klasse 0-1 is dit <5-50 seconden. Gesimuleerde zware regenval (50 mm/4h) stroomde vrijwel geheel van deze helling af en infiltreerde preferent in de zandige bodem onderaan de helling (brilliant blue als kleurtracer).

Een ander, voor de drinkwaterwinning negatiever, aspect van deze terugkoppeling is het effect van preferente infiltratiepatronen op verwijdering van micro-organismen in de onverzadigde zone. Deze neemt namelijk af bij toename van preferente stroming. Voor een uitgebreide analyse hiervan wordt verwezen naar Cirkel & Hornstra (2019). Het verschijnsel van versterkte oppervlakkige afstroming tijdens zware regenbuien na perioden van droogte is al in 1939 door Jac P. Thijsse beschreven (Thijssse, 1939), waarbij hij ook wijst op het effect van deze afstroming op erosie en het opvullen van smalle valleien met zand. Watererosie van duinen is ook een belangrijke initiator voor secundaire verstuing met stuifkuilen (Jungerius en Van der Meulen (1988). Mogelijk speelt het relatief hoge aantal natte dagen (met meer 10 mm neerslag) aan de Hollandse vastelandskust (Zuid-Holland en zuiden van

Noord-Holland) een rol in de sterke toename van autonome verstuiving met stuifkuilen tussen 2000 en 2014 (Aggenbach et al. 2018). Toename van kaal zand door verstuiving in gebieden met duingrasland zorgt hierbij voor een vergroting van de grondwateraanvulling. Overall is er dus een trend richting grotere aanvulling en daarmee naar vernatting van het duin. Deze trend is ook zichtbaar in langjarige reeksen van de grondwaterstand zoals bij Castricum (Figuur 9).



Figuur 9 Stijgende trend in grondwaterstanden in het middenduin bij Castricum (meetpunt W133) (bron: Borst & Fonck, 2020)

2.1.4 Deelconclusies neerslag, verdamping en grondwateraanvulling

Puntsgewijs kunnen we op basis van de geanalyseerde literatuur het volgende concluderen:

- Op basis van observaties neemt de neerslag in het kustgebied zowel in de winter als in de zomer toe. Als deze trend wordt doorgetrokken naar 2050 en 2100 dan sluit deze, ten aanzien van neerslag, het beste aan bij het KNMI'23 H_N scenario. Ten opzichte van de trend in de observaties is dit (landelijke) scenario echter minder nat.
- De referentieverdamping neemt toe langs de kust, maar minder dan in het binnenland.
- Het potentieel neerslagoverschot blijft minimaal gelijk of neemt toe.
- Zomerneerslag neemt licht toe en vooral in de vorm van zware buien.
- Door vegetatierugkoppelingen (afsterving vaatplanten in de zomer en toename mossen) is de (huidige) actuele grondwateraanvulling van korte duinvegetaties (ca. 550 mm) fors hoger dan het potentiële neerslagoverschot (ruim 300 mm) en neemt mogelijk nog wat meer toe bij klimaatverandering. Bij verdergaande klimaatverandering kan echter het aandeel korstmossen in de moslaag toenemen wat mogelijk een remmend effect heeft op de toename van de grondwateraanvulling.
- De overall trend in het duinlandschap is hydrologisch vernattend, maar de uitwerking op belangrijke landschapsonderdelen is zeer verschillend: lage delen vernatten, terwijl grondwateronafhankelijke profielen sterker beïnvloed gaan worden door droogtestress van de vegetatie.
- Klimaatverandering kan door toename van piekbuien en effecten op de vegetatiestructuur van duingraslanden leiden tot meer verstuiving.

2.2 Zeespiegelstijging

2.2.1 Trends in metingen

De zeespiegel wordt in Nederland sinds 1890 betrouwbaar gemeten op zes hoofdstations (Vlissingen, hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl) (Baart et al., 2015). Sinds 2014 wordt in opdracht van het ministerie van I&W de Zeespiegelmonitor onderhouden door Deltares. Doel hiervan is het vaststellen van de stand en verandering van de zeespiegel. De analysemethodiek is beschreven in Baart et al. (2015) en maakt gebruik van Generalized Linear Models (Watson, 2016) voor het vaststellen van trends in de stijging van de zeespiegel. Sinds de

start van de Zeespiegelmonitor zijn drie rapportages verschenen (Baart et al., 2015; 2019; 2023). In de eerste twee rapportages kon geen significante versnelling van de zeespiegelstijging worden vastgesteld. De langjarige trend was over de periode 1890-2017 constant met een waarde van 1.9 mm/jr resulterend in een totale zeespiegelstijging van 23 cm tot 2017. Ook andere studies vonden geen bewijs voor significante versnelling van de zeespiegelstijging in de Noordzee (Calafat and Chambers 2013, Wahl et al 2013, Ezer et al 2016).

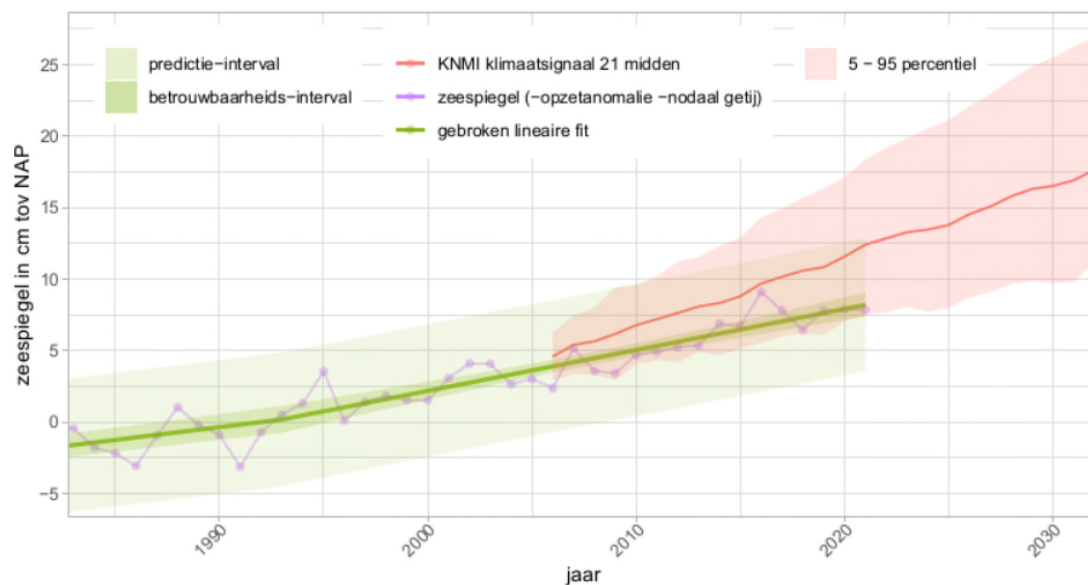
Steffelbouwer et al. (2022) hebben zeespiegelmetingen van 7 Nederlandse en één Duits getijdestation gecorrigeerd voor getijde -effecten en windopzet en vonden na analyse, met een model voor stapsgewijze lineaire regressie ('piecewise linear model'), een significant breekpunt in 1993. Daarmee vonden ze voor het eerst significante versnelling van de zeespiegelstijging. Voor 1993 bedroeg de stijging gemiddeld 1.7 ± 0.3 mm/jr, na het breekpunt 2.7 ± 0.4 mm/jr. De gevonden stijging kan tussen de stations meer dan 1 mm/jr verschillen, zowel voor als na 1993. Ook in de laatste Zeespiegelmonitor (Baart et al., 2023) is, na correctie voor windopzet en getijde met een iets afwijkende methodiek t.o.v. Steffelbouwer et al (2022) en eveneens stapsgewijze lineaire regressie voor 5 stations, een verandering in de stijgsnelheid aangetoond met een trend van 1.8 ± 0.1 mm/jr tot 1993 en een trend van 2.9 ± 0.4 mm/jr na 1993. Een model met een versnellingsterm (kwadratisch i.p.v. lineair) laat een versnelde stijging zien (0.003 ± 0.002 mm/jaar²) maar presteerde niet significant beter dan het lineaire model. Een gebroken kwadratisch model liet een versnelling zien vanaf 1960 maar presteerde minder goed dan het stapsgewijze lineaire regressie model en was eveneens niet significant beter dan het lineaire model.

Uit bovenstaande onderzoeken kan geconcludeerd worden dat de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust niet meer constant kan worden verondersteld. Daarnaast is de stijging na het gevonden knikpunt in 1993 in lijn met de door Frederikse et al. (2020) voor het grotere Noord Atlantische gebied gevonden stijging van 2.7 ± 0.6 mm/jr, en in lijn met de wereldwijd gemiddelde stijging van 3.1 ± 0.4 mm/jr sinds 1993 (Dangendorf et al., 2019).

De achterliggende fysische oorzaken van de gevonden stijgingen op Nederlandse en wereldwijde schaal kunnen echter verschillen omdat gemeten stijgingen ook door andere processen dan klimaatverandering worden veroorzaakt. Bij de Nederlandse kust wordt bijvoorbeeld een aanzienlijk deel van de gemeten relatieve zeespiegelstijging veroorzaakt door bodemdaling als gevolg van autocompactie, tektoniek en vooral glaciële isostatische aanpassing (Steffelbouwer et al., 2022). Steffelbouwer et al. (2022) schatten op basis van Simon et al. (2021) in dat de bodemdalingscomponent de komende eeuwen stabiel is op 0.9 ± 0.7 mm/jr. De absolute zeespiegelstijging gecorrigeerd voor bodemdalingseffecten is dan voor 1993 0.8 ± 0.8 mm/jr en vanaf 1993 1.9 ± 0.8 mm/jr. De snelheid is dus meer dan verdubbeld na 1993.

2.2.2 Zeespiegelprojecties

Al in de zeespiegelmonitor van 2019 is geconstateerd dat de zeespiegelprojecties van het KNMI niet goed aansluiten bij de metingen en trendanalyses. Voor het klimaatsignaal 2021 zijn nieuwe projecties berekend voor drie emissiescenario's op basis van plausibele ontwikkelingen zoals gedefinieerd door het IPCC (KNMI, 2021). Op basis hiervan is uitgegaan van een gemiddelde stijgsnelheid van 4.9 mm/jr in 2020. Dit is 2 mm/jr meer dan de door o.a. Baart et al (2023) gemeten trend. In Figuur 10 vergelijken Baart et al (2023) zeespiegelmetingen met de KNMI SSP2-4.5 projectie uit het klimaatsignaal. Hoewel er overlap is tussen het predictie-interval van het piecewise linear model en de onzekerheid in de projectie, valt op dat de stijging volgens de projectie van het KNMI aanzienlijk hoger is dan de metingen. Het KNMI (KNMI, 2021) verklaart het verschil tussen de projecties en de metingen door de afname van opstuwing door stormen in de afgelopen 30 jaar en minder sterke opwarming van het noordoosten van de Atlantische oceaan in de afgelopen 10-20 jaar. Beide factoren zijn niet meegenomen in de klimaatsignaalprojecties en beiden resulteren in een negatieve bijdrage aan de zeespiegelstijging. De KNMI'23 scenario's sluiten doordat in de modellen voor deze scenario's de windfactor is losgekoppeld, met een stijgsnelheid van 3 mm/jr voor de referentieperiode, beter aan bij de metingen (Tabel 6).



Figuur 10 Vergelijking tussen de trend in de metingen en de KNMI SSP2-4.5 projectie uit het klimaatsignaal (hier klimaatsignaal midden), omgerekend naar een zeespiegelniveau in cm ten opzichte van NAP (Baart et al, 2023)

Tabel 6 Zeespiegelscenario's voor de Nederlandse kust (KNMI, 2023)

	Referentie	2050 (2036-2065)				2100 (2086-2115)			
	(1995-2014)	Ld	Ln	Hd	Hn	Ld	Ln	Hd	Hn
Stijgsnelheid (mm/jr)	3	+3 (1-6)	+3 (1-6)	+5 (4-8)	+5 (4-8)	-1 (-4-4)	-1 (-4-4)	+11 (6-23)	+11 (6-23)
Zeespiegelstijging (cm)	0	+24 (16-34)	+24 (16-34)	+27 (19-38)	+27 (19-38)	+44 (26-73)	+44 (26-73)	+82 (59-124)	+82 (59-124)

In het kennisprogramma zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt de houdbaarheid van de waterveiligheidssituatie bij versnelde zeespiegelstijging onderzocht. Vooruitlopend op de KNMI'23 scenario's zijn hiervoor vier "tijdlijnen met zichtwaarden" ontwikkeld voor de stijging van de zeespiegel tot 2100 en 2200 (Vos, 2021). Deze vier tijdlijnen variëren van lage tot zeer extreme zeespiegelstijging. De tijdlijnen zijn gekoppeld aan RCP's en hebben een betrouwbaarheidsinterval. De gehanteerde bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval is 83% wat overeenkomt met de door het IPCC gehanteerde waarschijnlijke bandbreedte. Voor de 'zeer extreem' zichtlijn is gebruik gemaakt van een scenario aan de bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval waarbij grootschalig instabiliteit van de marine ijskliffen op Antarctica optreedt (Bamber et al., 2019).

Tabel 7 Tijdlijnen met zichtwaarden voor zeespiegelstijging (m) ontleend aan KP ZSS (Vos, 2021). Afronding gebruikte getallen is op 25 cm voor zeespiegelstijging < 1m, 50 cm voor zeespiegelstijging tussen 1 en 3 meter en 100 cm voor zeespiegelstijging > 3m.

			2100	2200	Referentie 2100	Referentie 2200
Laag	RCP2.6	83 %	0.5	1.0	Le Bars et al. 2018/2019	SROCC report fig. 4.2 + corr. onzekerheid Groenland
Gematigd	RCP4.5	83%	0.75	2.0*	Le Bars et al. 2018/2019	Interpolatie SROCC report fig. 4.2
Extreem	RCP8.5	83%	1.0	3.0	Bamber et al., 2019 H-scen, 83% (Ant.) + Le Bars et al., 2017	Bamber et al., 2019 H-scen, 83% (Ant.)+ SROCC
Zeër extreem	RCP8.5 + MICI	>83%	2.0	>5	Bamber et al., 2019 H-scen, 95% (Ant.)+ Le Bars et al., 2018	Bamber et al., 2019 H-scen, 95% (Ant.)+ SROCC

*) beste waarde 1.75 m, echter voorstel RWS: 2.0 m

De in Tabel 7 genoemde waarden voor zeespiegelstijging in 2100 liggen binnen de in de KNMI'23 scenario's gepresenteerde ranges. Het lage scenario bevindt zich aan de onderzijde van de ranges. Het gematigde en extreme scenario zitten juist aan de bovenzijde van de in de KNMI '23 scenario's gehanteerde ranges. Aanvullend is echter ook een zeer extreem scenario ontwikkeld voor het KP ZSS met versnelde afsmelting van Antarctica, resulterend in een forse zeespiegelstijging tot 2100 (scenario: 2.0 m) In het vervolg van dit rapport worden analoog aan het kennisprogramma zeespiegelstijging de tijdlijnen uit Tabel 7 aangehouden.

2.2.3 Deelconclusies zeespiegelstijging

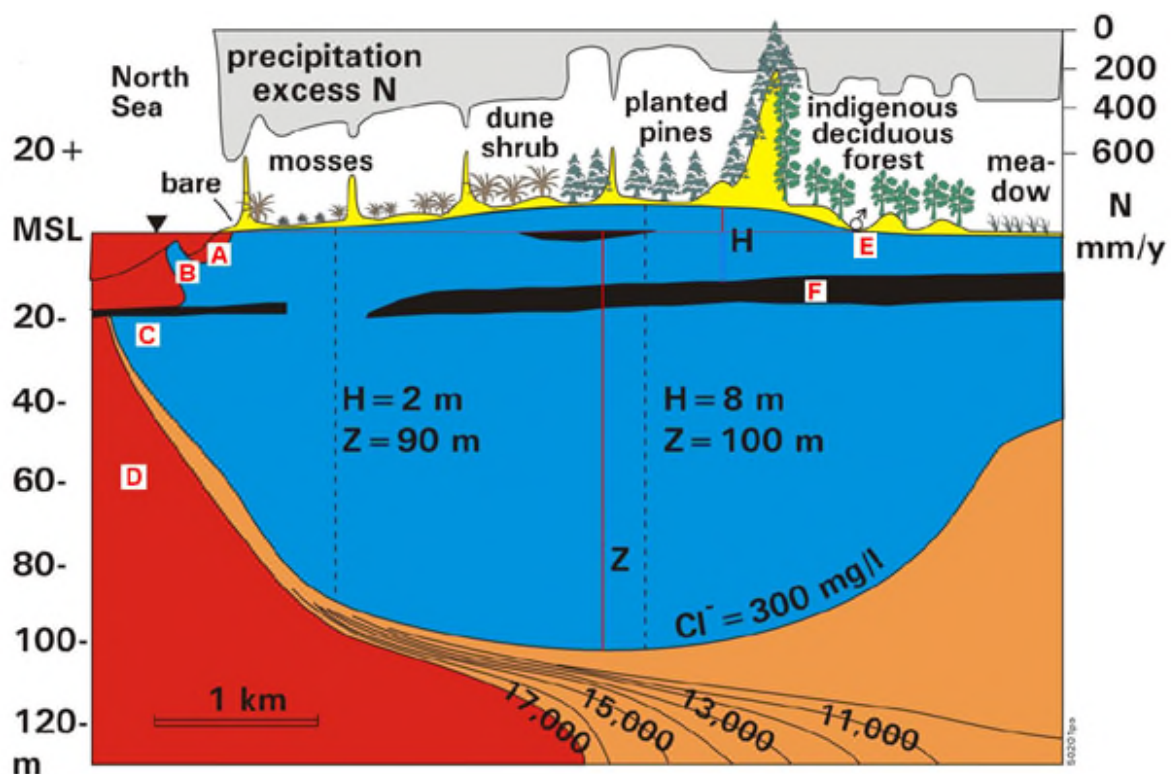
Puntsgewijs kunnen we op basis van de geanalyseerde literatuur het volgende concluderen:

- Recente onderzoeken wijzen op een versnelling van de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust.
- In het kennisprogramma zeespiegelstijging gehanteerde zichtwaarden voor zeespiegelstijging gaan uit van een stijging tot 0.5-1.0 meter in 2100 en bij versnelde afsmelting van ijs op Antarctica 2.0 meter.

3 Gevolgen voor de kustduinen

3.1 Omvang zoetwaterbel

De omvang en verandering van de zich op het zoute grondwater vormende zoetwaterlens wordt bepaald door een groot aantal factoren (Figuur 11). Het gaat onder andere om veranderingen in duinbreedte, grondwateraanvulling, de lokale en regionale drainagebasis, het zoutgehalte van de Noordzee en de hydrogeologische eigenschappen van de ondergrond (Stuyfzand, 1993).



Figuur 11 Conceptueel model van een van het ideale symmetrische geval afwijkende zoetwaterlens (Stuyfzand & Bruggeman, 1994; Stuyfzand et al., 2010). Afwijkingen ontstaan door variaties in grondwateraanvulling, een heterogene anisotrope ondergrond, geen scherpe zoet-zout overgang en heterogeen stromend zout grondwater. A = ondiep Noordzee systeem onder invloed van getij; B = zoetwater exfiltratie bij laagwaterlijn; C = zoetwatertong onder de zee door een slecht doorlatende laag; D = diepe Noordzee systeem aangedreven door dichtheidsverschillen en stroming naar polders achter de duinen; E = uitstroom van zoetwater aan maaiveld via duinrellen of gegraven ontwatering; F = slecht doorlatende laag.

Van een deel van bovenstaande factoren is de orde grootte van de invloed op de zoetwaterlens te schatten met een aantal analytische oplossingen (o.a. Fetter, 1972; Beukeboom, 1976; Oude Essink, 1996; Chesneaux, 2008, 2016). Deze analytische oplossingen zijn van toepassing op een langwerpig homogeen, isotroop watervoerend pakket, met uniforme constante grondwateraanvulling, een scherpe zoet-zout overgang en homogeen stilstaand zout grondwater. Stuyfzand (1993) heeft aanvullend een analytische oplossing voor de verbreiding van zoetwatertong onder een slecht doorlatende laag aan de zeezijde uitgewerkt. Door Stuyfzand (2016, 2017) zijn de vergelijkingen opgenomen en gecombineerd in het spreadsheet model HYDROLENS; voor details wordt verwezen naar de referenties.

3.1.1 Verkennende berekeningen

Door Chesneaux et al. (2021) is recent een eenvoudige analytische oplossing uitgewerkt voor de verandering van het volume zoet grondwater in de lens per eenheidslengte van een langgerekt als gevolg van zeespiegelstijging:

$$V_t = \frac{\pi n_e}{2} \sqrt{\frac{R}{K} \left(1 + \frac{\rho_f}{\Delta \rho}\right)} \cdot L_t^2$$

$$\Delta V = \frac{\pi n_e}{2} \sqrt{\frac{R}{K} \left(1 + \frac{\rho_f}{\Delta \rho}\right)} \cdot \left(\Delta L_{CE} - \frac{\Delta S}{\tan \theta}\right) \cdot \left(\Delta L_{CE} - \frac{\Delta S}{\tan \theta} + 2L_0\right)$$

Waarin V_t = het volume zoetwater per eenheidslengte, ΔV is de volumeverandering per eenheidslengte, n_e de effectieve porositeit, R de grondwateraanvulling, K de doorlatendheid, ρ_f de dichtheid van het zoete grondwater, $\Delta \rho$ het dichtheidsverschil, ΔL_{CE} de verandering van de breedte door kusterosie, ΔS , zeespiegelstijging, θ de helling van de kust, L_t = de halve breedte op tijdstip t en L_0 de oorspronkelijke halve breedte van het duinsysteem.

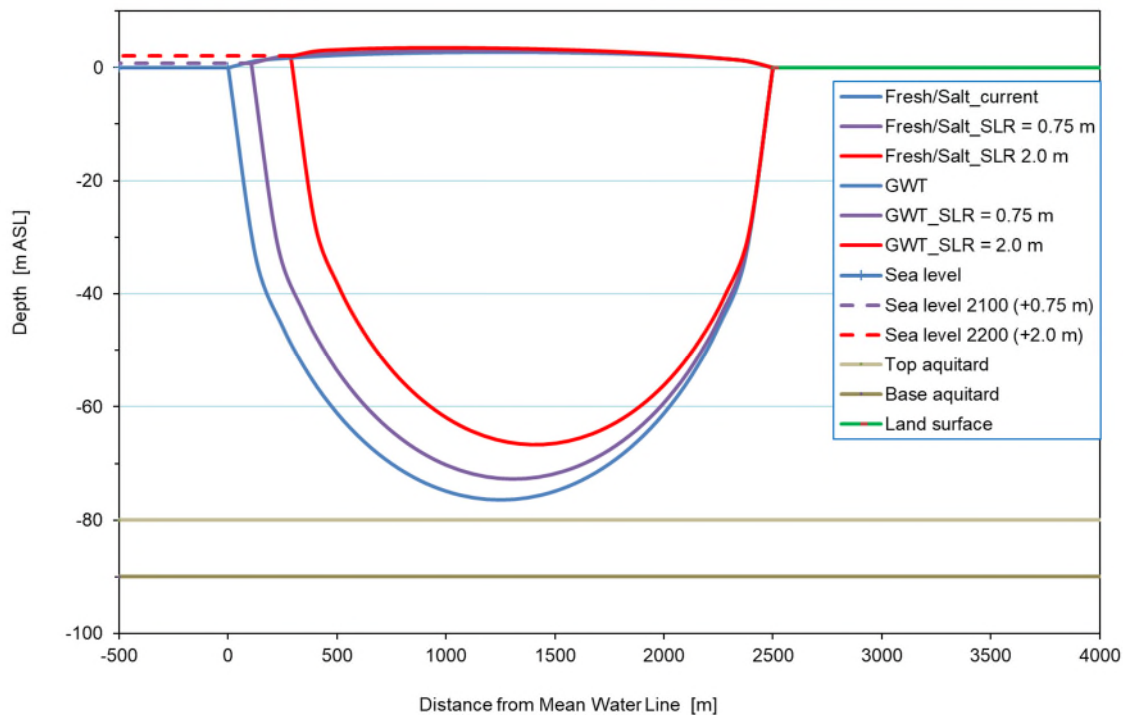
Een zeespiegelstijging van 75 cm (zie Tabel 7) geeft, uitgaande van: een kustprofiel dat op z'n plek blijft door zandsuppletie ($\Delta L_{CE} = 0$), een duinbreedte van 2500 m, een grondwateraanvulling van 299 mm/jr, een doorlatendheid van 6 m/d, een $\Delta \rho$ van 0.021, een porositeit van 0.38 en een kusthelling van 7 m/km (Stuyfzand, 2016), volgens bovenstaande vergelijking een reductie van het volume zoet water in de lens van 16.4%. Echter de grondwateraanvulling lijkt op basis van observaties toe te nemen (Tabel 4, Tabel 5). Bij toepassing van een geschatte potentiële neerslagoverschot voor zichtjaar 2085 van 374 mm/jr² blijft de afname van de zoetwaterlens beperkt tot 6.5%. Dit potentiële neerslagoverschot is waarschijnlijk een onderschatting van de daadwerkelijke grondwateraanvulling in het duin (zie par. 2.1.3). Bij gelijkblijvende kustlijn kan de toenemende grondwateraanvulling waarschijnlijk de afname van het zoetwatervolume dus voor een groot deel compenseren.

Zoals al aangegeven zijn in het spreadsheetmodel HYDROLENS verschillende (stationaire) analytische vergelijkingen gecombineerd. Hiermee is het mogelijk om geavanceerdere verkennende berekeningen te maken voor de situatie met zee aan één zijde en een polderpeil aan de andere zijde. In Figuur 12 is de verandering van de zoetwaterlens bij gematigde zeespiegelstijging voor 2100 en 2200 (zie Tabel 7) weergegeven, uitgaande van bovengenoemde parameterisatie van het duingebied maar bij ten opzichte van de huidige situatie gelijkblijvende grondwateraanvulling van 299 mm/jr. Duidelijk zichtbaar in Figuur 12 is de vervorming en krimp van de zoetwaterlens. En daarnaast een stijging van de maximale opbolling van de grondwaterspiegel in het duin met 28 cm bij 75 cm zeespiegelstijging en 90 cm bij 2 meter zeespiegelstijging. Als in de situatie met een zeespiegelstijging van 75 cm (richtjaar 2100) de grondwateraanvulling ook groter is geworden ($R = 374$ mm/jr), dan ontstaat een aanzienlijk grotere lens (gestreepte lijn in Figuur 13). De grotere aanvulling compenseert hier het effect van zeespiegelstijging. Daarnaast neemt ook de maximale opbolling toe tot 58 cm, in plaats van de 28 cm door de 75 cm zeespiegelstijging alleen. In de “zeer extreem” zichtlijn in Tabel 7 is een zeespiegelstijging van 2 meter opgenomen in 2100. Het gaat hierbij om een high end scenario waarbij de ijskliffen op Antarctica instabiel worden. Een dergelijke zeespiegelstijging uit zich in een aanzienlijk sterker krimpende lens. De rode lijn in Figuur 12, Figuur 14 en Figuur 16 wordt dan al in 2100 realiteit.

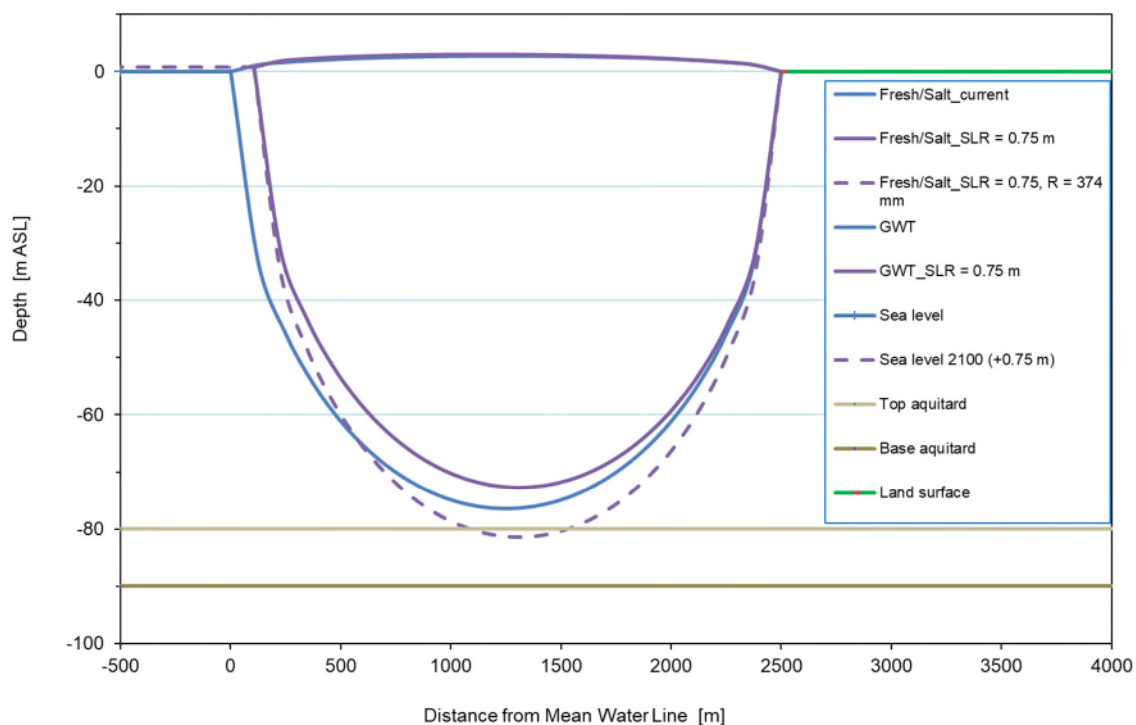
De krimp van de lens in Figuur 12 t/m Figuur 14 wordt voornamelijk veroorzaakt door een, als gevolg van zeespiegelstijging, landwaarts schuivend evenwichtsprofiel (Figuur 15 A) en daarmee verminderde (zoete) grondwateraanvulling. Het beleid van Rijkswaterstaat is er echter op gericht om door middel van zandsuppletie de kustlijn op de huidige positie te houden, en de kust en (eerste) duinenrij door suppletie mee te laten stijgen met de stijgende zeespiegel (Rijkswaterstaat, 2020; Figuur 15 B). Van IJendoorn et al. (2021) laten daarnaast zien dat de duinvoet langs de Nederlandse kust momenteel zelfs sneller stijgt dan de zeespiegelstijging en er zelfs zeewaartse uitbreiding plaatsvindt. Als de berekeningen hiervoor gecorrigeerd worden (kustlijn blijft op z'n plek) ontstaat een ander beeld met een min of meer gelijkblijvende zoetwaterlens, maar een verder stijgende opbolling in het duin van 40 en 118 cm bij respectievelijk 75 en 2 m zeespiegelstijging (Figuur 16).

² Berekeningen zijn uitgevoerd voor de introductie van de KNMI 2023 scenario's en de nieuwe referentieperiode

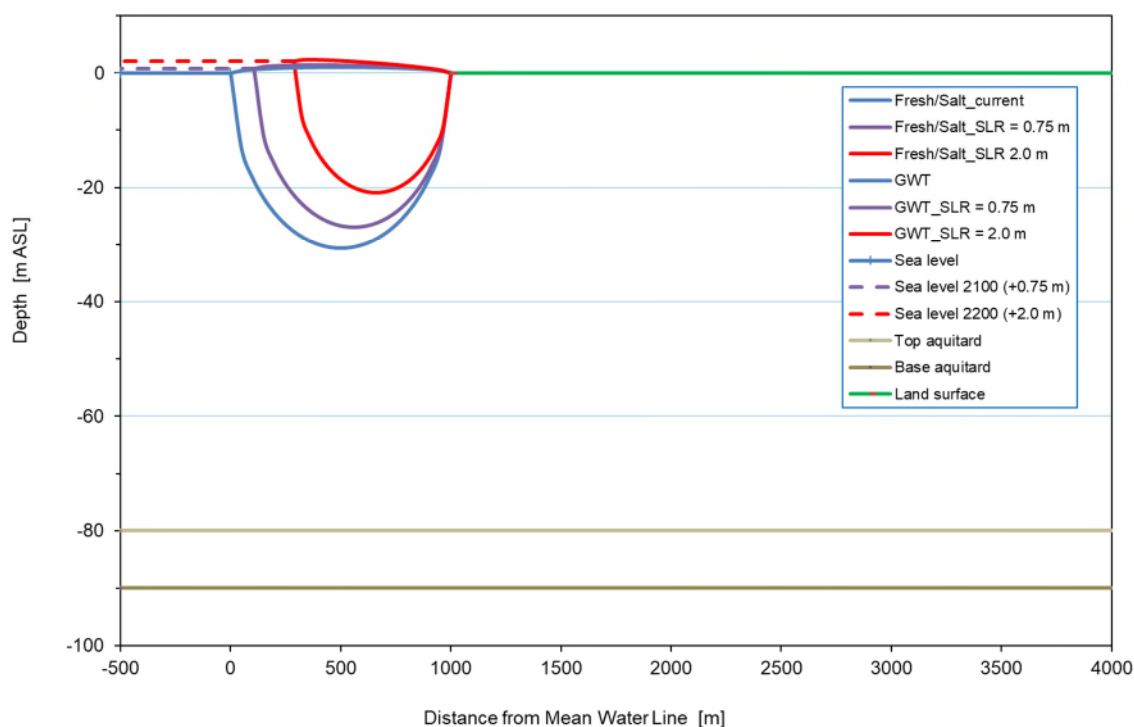
Het gaat in de bovenstaande sectie ten alle tijde om stationaire eindsituaties, in werkelijkheid is zowel de zeespiegelstijging als de aanpassing van de zoetwaterlens als de opbolling in het duin een traag proces wat aanzienlijk langer duurt dan tot 2100. Nadere analyse met een numerieke aanpak waarbij rekening wordt gehouden met het naijlen is dan ook gewenst.



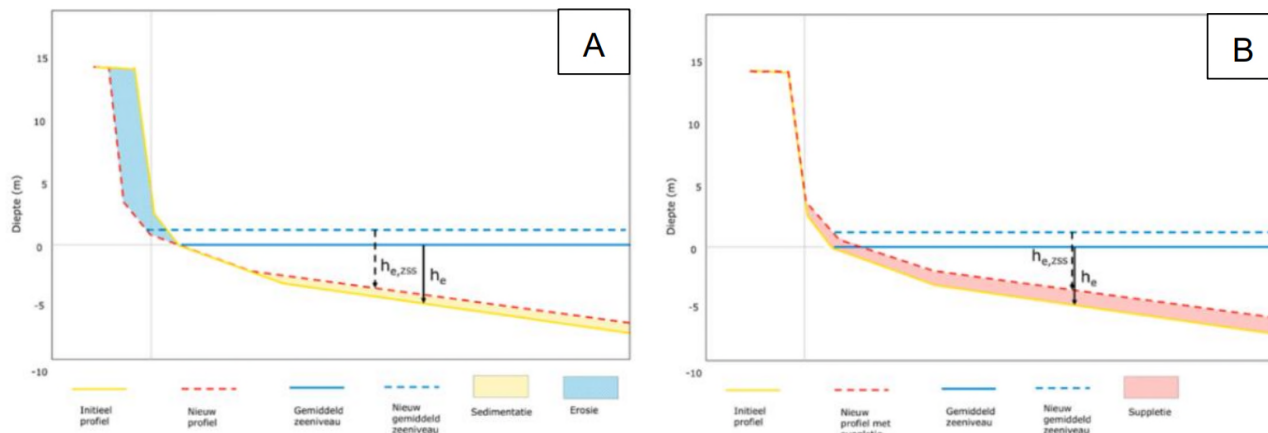
Figuur 12 Met HYDROLENS (Stuyfzand, 2016) uitgerekende ontwikkeling van de zoetwaterlens voor gematigde zeespiegelstijging (zie Tabel 7) en gelijkblijvende grondwateraanvulling bij een duinbreedte van 2500 m.



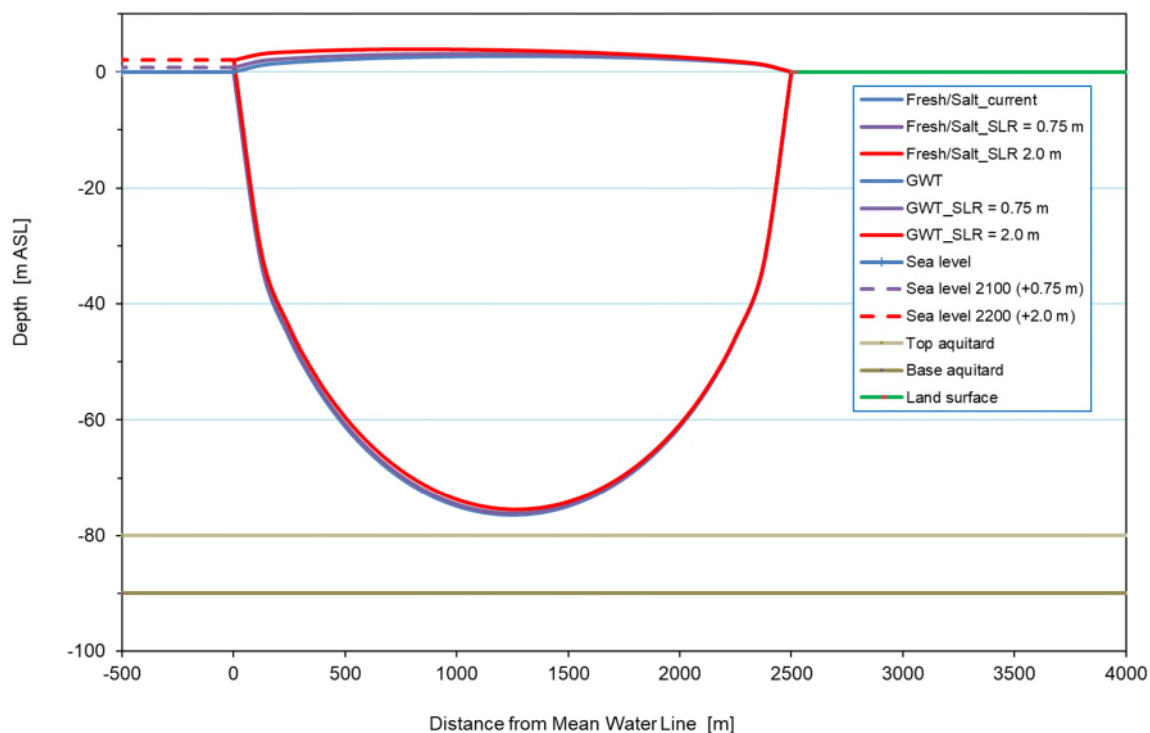
Figuur 13 Met HYDROLENS (Stuyfzand, 2016) uitgerekende invloed van een grotere grondwateraanvulling op de vorm van de zoetwaterlens bij een zeespiegelstijging van 75 cm.



Figuur 14 Met HYDROLENS (Stuyfzand, 2016) uitgerekende ontwikkeling van de zoetwaterlens voor gematigde zeespiegelstijging en gelijkblijvende grondwateraanvulling bij een duinbreedte van 1000 m.



Figuur 15 Schematisatie van de aanpassing van het kustprofiel na zeespiegelstijging volgens Bruun (1962) (A) en het uitblijven van landinwaartse verplaatsing van het evenwichtsprofiel bij evenveel zandsuppletie als de gemiddelde zeespiegelstijging (B) (Rijkswaterstaat, 2020; Taal et al., 2023)



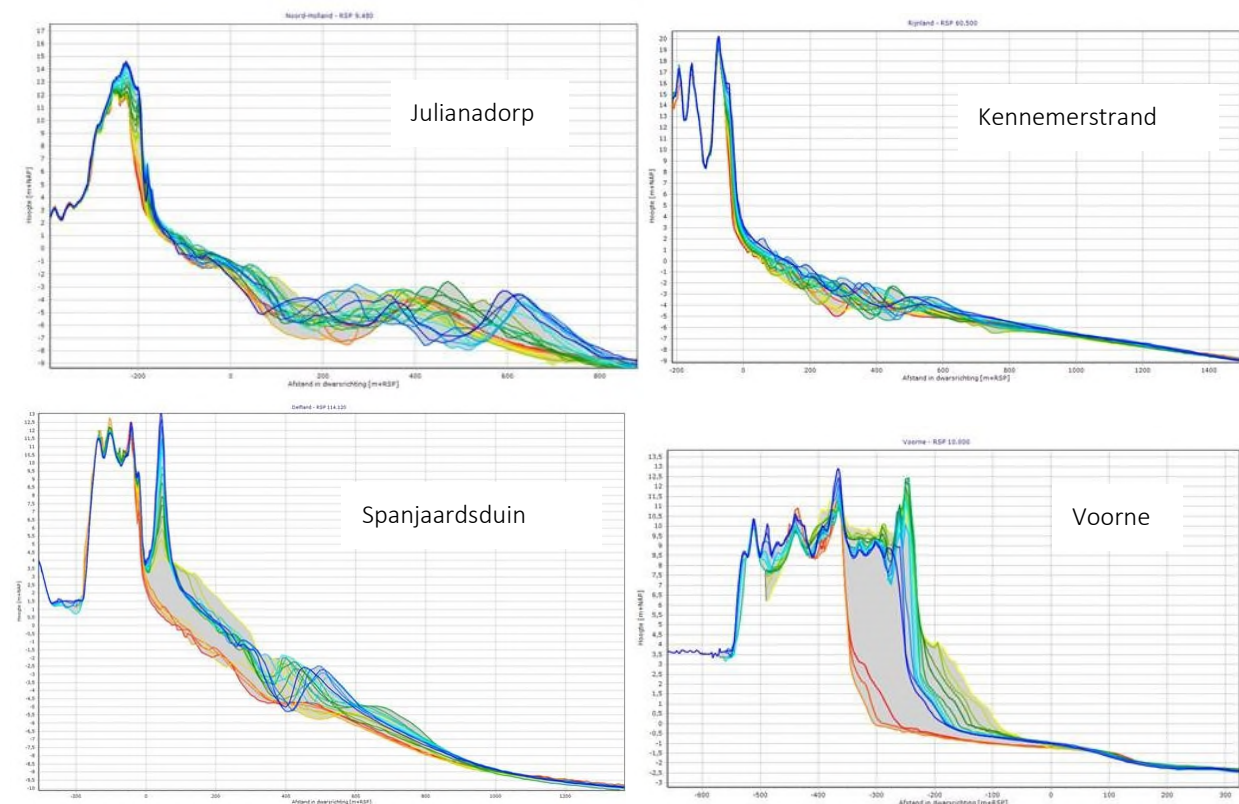
Figuur 16 Met HYDROLENS (Stuyfzand, 2016) uitgerekende ontwikkeling van de zoetwaterlens voor gematigde zeespiegelstijging (zie Tabel 7) en gelijkblijvende grondwateraanvulling bij een duinbreedte van 2500 m en door middel van zandsuppletie op z'n plek blijvende kustlijn (in hoogte meegroeïende oever en duinen)

3.1.2 Zandsuppletie en verdere verstuiving

Zoals al aangegeven is de strategie van Rijkswaterstaat erop gericht om de kustlijn en eerste duinenrij door suppletie mee te laten stijgen met de zeespiegel. De vraag is of dit zand verder het duin in stuift en, zo ja, of dit dan ook tot significante verandering van de maaiveldhoogte leidt. Het is onzeker welke mate van doorstuiving plaats zal vinden met de beoogde mate van meegroeien van de kust en de tijdschalen van de zeespiegelstijgingsscenario's. Toch denkt Rijkswaterstaat dat delen van de kust reeds nu al een indicatie geven voor de mate van doorstuiving (mond. med. Quirijn Lodder RWS). Er zijn meerdere delen van de kust die om verschillende redenen zwaar gesuppleerd of uitgebouwd zijn in de afgelopen 30 jaar. In deze gebieden is zichtbaar dat de kustlijn (orde -10 m NAP tot duintop) omhoog beweegt, maar dat er zonder specifieke verkervingsprojecten³ niet veel zand tot voorbij het eerste duin/de zeereep stuift. Voorbeelden hiervan zijn de kust ten zuiden van Julianadorp, het Kennemerstrand, het Spanjaardsduin en Voorne (Figuur 17).

Uit metingen op de JARKUS-raaien blijkt dat het eerste duin bij Julianadorp fors is gegroeid maar dat er vrijwel geen hoogteverandering achter het duin optreedt. Op het Kennemerstrand is duidelijke aangroei zichtbaar tegen het bestaande duin, maar geen hoogteverandering verder landinwaarts. Ook bij Spanjaardsduin is het eerste duin meters omhoog gekomen maar krijgt het achterliggende duingebied weinig zand. Bij Voorne is de kust in 2009 uitgebouwd met het oog op waterveiligheid. Hier is wel verdere verstuiving op het duinmassief, maar slechts beperkt erachter. Het lijkt er dus op dat maaiveldverhoging van het achterliggende duin nauwelijks plaatsvindt. De huidige suppletie lijkt daarmee vooral tot een verhoging van de kustlijn en het voorste duin te leiden. Dit heeft bij een stijgende zeespiegel, en toenemende grondwateraanvulling, uiteraard gevolgen voor de lage delen van het achterliggende duin. Deze kunnen dan (sterk) vernatten door de opbolling van het grondwater. Afgelopen jaren zijn zowel spontane verkervingen ontstaan als kunstmatige verkervingen uitgevoerd. Daarbij treedt er wel aanzienlijke zandaanvoer op in het voorduin achter de zeewering (Nijenhuis, 2022; Oost et al., 2022). Tot nu toe heeft dat nog niet geleid tot parabolisering van de zeereep, terwijl parabolisering juist kan gaan zorgen voor zandaanvoer landinwaarts door bewegende paraboolduinen.

³ Aanbrengen van kerven (v-vormige openingen in de zeereep boven zeeniveau) waardoor zand vanaf het strand dieper het duin in kan stuiven.



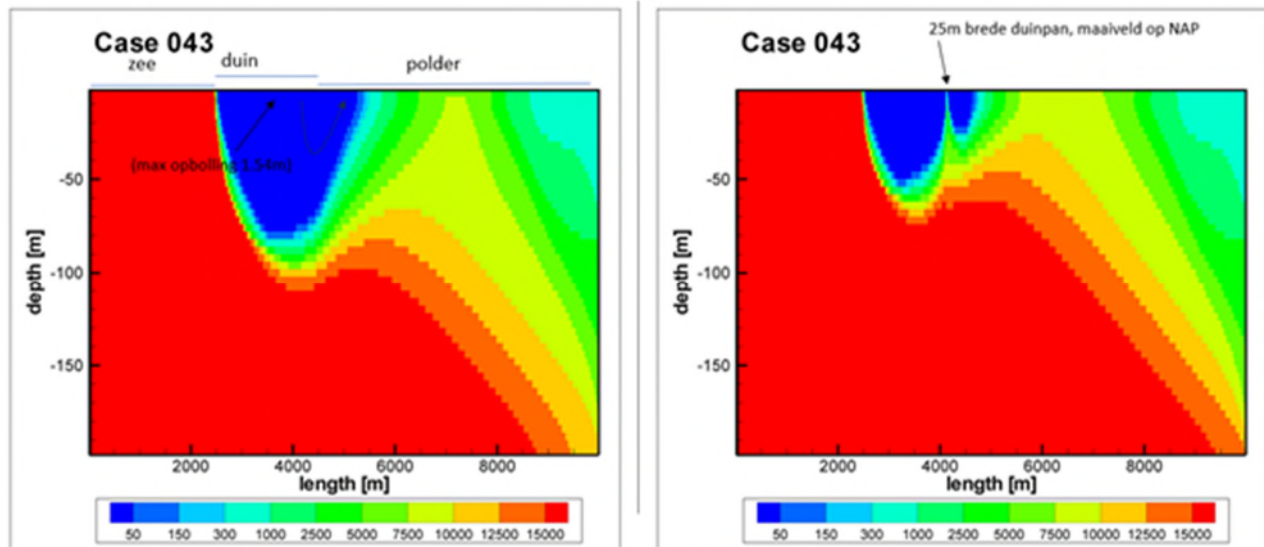
Figuur 17 Gemeten hoogteontwikkeling van het kustprofiel op vier zogenaamde Jarkus-raaien (raaien waar jaarlijks het hoogteprofiel wordt gemeten). Aan de rechterzijde van de figuur bevindt zich de zee kant. De donker oranje lijn is het kustprofiel in 2004, de donker blauwe lijn is het kustprofiel in 2023, andere kleuren zijn tussenliggende jaren (bron: Rijkswaterstaat, 2023).

3.1.3 Hydrologische terugkoppelingen bij zeespiegelstijging

Uit de verkennende berekeningen in par. 3.1.1 komt een stijgende grondwaterstand naar voren. Er zijn echter een aantal terugkoppelingen die deze stijging kunnen remmen (Stuyfzand et al., 2009). Allereerst zal in een vernattend duin de werkelijke verdamping toenemen doordat op meer plekken water aan of op maaiveld staat of de capillaire zoom bereikbaar is voor planten. Deze planten hebben hierdoor minder droogtestress (en hiermee gepaarde verdampingsreductie). Ook kan zich een vegetatie ontwikkelen die een hogere bedekkingsgraad en verdamping heeft. Daarnaast kunnen nu nog geïsoleerd oppervlaktewateren in valleien en laagtes verbonden raken waardoor water via maaiveld kan worden afgevoerd naar de polders of zee. Afvoer naar zee zal in de huidige situatie weinig kunnen optreden omdat de kust een grotendeels (kunstmatig) gesloten zeewering heeft. Daarnaast kunnen bestaande duinbeken, duinrellen en sloten in zowel het duin als de ontgonnen binnenduinen harder gaan stromen door de toenemende hydraulische gradient. Ook zal de uitstroom aan de duinvoet/het strand gaan toenemen.

Het effect van drainage in een duinsysteem op de zoetwaterlens is onderzocht door Masterson & Garabedian (2007) voor een duingebied bij Cape Cod in de Verenigde Staten. Uit deze modelstudie bleek dat de grondwaterstanden in het duin in absolute zin stegen als gevolg van de zeespiegelstijging, maar dat de opbolling van het freatisch niveau ten opzichte van (het stijgende) zeeniveau door extra drainage via duinbeekjes afnam. Als gevolg hiervan nam ook de dikte van de zoetwaterlens af. Upconing van zout water was vooral zichtbaar in de nabijheid van door grondwater gevoede stroompjes. Uit verkennende berekeningen voor een aantal hypothetische duinsituaties van Oude Essink & Waterman (*in prep*) komt een vergelijkbaar resultaat naar voren. Als de grondwaterstand stijgt, als reactie op zeespiegelstijging, zal dit in de nabijheid van stroompjes vooral resulteren in verhoogde grondwaterafvoer naar de oppervlakkig afstromende duinvalleien en ontwatering. Dit resulteert vervolgens in een krimpende lens en upconing van zout grondwater (Figuur 18). Bij een detailmodellering is het dus

van belang om zowel actuele verdamping als lokale drainage en (maaiavelds)afvoer van water in het duin goed mee te nemen. Ook kan bestaande wininfrastructuur (vacuümputten, drains/kanalen) sterker gaan draineren bij gelijkblijvende onttrekkingsniveau's door veranderingen in het stijghoogte patroon van het duinlandschap.



Figuur 18 Verkennende berekening van het effect van een laaggelegen drainerende duinpan (1 modelcel van 25 m op 0 m+NAP) op de vorm van een zoetwaterlens (2D-model) Kleuren geven de chlorideconcentratie in mg/l weer. (Oude Essink & Waterman, in prep).

3.1.4 Deelconclusies effecten op zoetwaterlens, suppletie en verstuiving

Puntsgewijs kunnen we op basis van de geanalyseerde literatuur het volgende concluderen:

- Door suppletie wordt de kustlijn op zijn plek gehouden en stijgt het strand, de zeereep en voorste duinenrij mee met de stijgende zeespiegel.
- Doorstuiven van gesuppleerd zand uit de zeereep verder het duin in lijkt op basis beperkt plaats te vinden zonder kerven en parabolisering op basis van huidige metingen. Toenemende droogte kan wel voor versterkte verstuiwing van het bestaande duin zorgen door afsterving van vaatplanten.
- Effect van zeespiegelstijging op de omvang van de zoetwaterlens is door het vastleggen van de kustlijn en de toenemende potentiële grondwateraanvulling is waarschijnlijk beperkt, zolang geen drainage uit het duin optreedt. Nadere numerieke analyse naar welke processen dominant zijn is gewenst.
- Zeespiegelstijging zorgt waarschijnlijk wel voor hogere freatische grondwaterstanden in het duin.
- Toename van oppervlakkige afstroming en daarmee drainage van (zoet) water uit het duin is een belangrijke factor voor de ontwikkeling van de zoetwaterlens en mogelijk bepalend voor het dunner worden van deze lens bij zeespiegelstijging.

3.2 Gevolgen voor vochtige duinvalleien

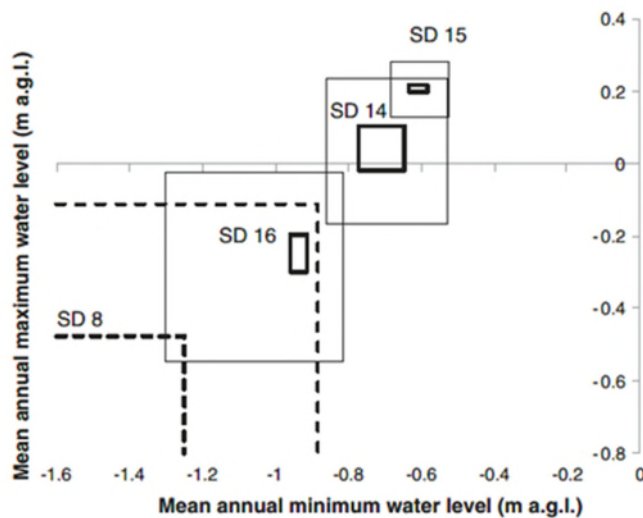
3.2.1 Vochtige duinvalleien een dynamisch systeem

Vochtige duinvalleien (H2190) zijn een aan de Nederlandse kustduinen gebonden habitattype met zeer groot internationaal instandhoudingsbelang. Het habitattype omvat jonge tot oude successiestadia in een diverse range van open water, lage moerasvegetaties, vochtige graslanden en rietlanden voorkomend in (min of meer) natuurlijke laagten in het duin. Vochtige duinvalleien zijn ontstaan door afsnoering van strandvlaktes door duinen, door uitstuiving tot het grondwaterniveau en door (her)inrichting van het duingebied. Bij dit laatste kan het gaan om nieuw gegraven valleien, maar ook om aan infiltratiesystemen gebonden hydrologische condities waar gunstige condities voor de ontwikkeling van het habitattype zijn ontstaan. Kenmerkend voor vochtige duinvalleien is vaak de sterke dynamiek van de grondwaterstand die jaren achtereen ver boven of juist onder het gemiddelde niveau

liggen. Ook binnen jaren zijn fluctuaties groot: vochtige duinvalleien inunderen in de (late) winter, maar de grondwaterstand kan in de zomer ver uitzakken (Grootjans et al., 1998). Door de dikke onverzadigde zones onder de duinen kan de reactie van de grondwaterstand in de valleien flink achterlopen op de grondwateraanvulling (Abesser et al., 2017). Jones et al. (2006) vonden in de Merthyr Mawr Warren duinen in Wales bijvoorbeeld een vertraging van 4 maanden in de respons op de grondwateraanvulling in de winter. Opvallend genoeg vonden ze slechts een vertraging van 1 dag in de respons op zware regenbuien in de zomer. Dit is waarschijnlijk te verklaren uit de geringe infiltratiecapaciteit van hydrofobe droge duinbodems in de zomer en de hiermee samenhangende oppervlakkige afstroming naar laagtes. Dergelijke processen zijn ook in de Nederlandse duinen geobserveerd (par. 2.1.3; Cirkel & Hornstra, 2019).

De sterke waterstandsfluctuaties zijn bepalend voor de vegetatiesuccessie in de duinvalleien. Onder normale condities, zonder maai-beheer verandert de vegetatie van noordwest Europese duinvalleien van pioniersvegetaties met een schaarse vegetatie over een periode van ca. 150 jaar naar een vegetatie gedomineerd door riet, struiken en bomen (kruipwilg en zachte berk) en is deze successie gekoppeld aan de opbouw van organisch materiaal (Sival & Grootjans, 1996). Organische-stofopbouw blijkt het best te kunnen worden verklaard uit een samenspel tussen de bovengrondse biomassa-productie van de vegetatie en hydrologische condities (Rohani et al., 2014). Lammerts et al. (1995) laten zien dat de hydrologische toestand van een duinvallei in hoge mate de opbouwsnelheid van organische stof in een vallei bepaalt en daarmee ook de snelheid van de vegetatiesuccessie. Hierdoor kunnen relatief oude natte duinvalleien (tot ca. 90-150 jr oud) met een constante aanvoer van kalkrijk grondwater toch in een pionierstadium blijven hangen. Adema et al (2002) beschrijven dit als alternatieve stabiele toestanden van een duinvallei en geven een drietal mogelijke verklaringen: sulfidetoxiciteit, zuurstofverlies uit wortels van pionierplanten en verschil in productiviteit van zich vestigende soorten. Een voorbeeld zijn drie zeer natte duinvalleien (>200 d inundatie per jaar) met dominantie van oeverkruid. Rohani et al. (2014) verklaren de blijvende dominantie van oeverkruid in deze valleien aan de hand van de efficiënte omzetting van eigen strooisel en zogenaamde radial oxygen loss (ROL) capability waardoor minder stikstof en fosfaat beschikbaar is voor concurrerende soorten in de langdurig zeer natte anoxische bodem (Grootjans et al., 1998). Hierdoor lukt het soorten met hogere bovengrondse productiviteit die meer nutriënten nodig hebben niet om zich te vestigen. Een geringe verandering in lokale hydrologische condities kan echter resulteren in vestiging van soorten met een hogere productiviteit en versnelde biomassaopbouw en successie. Productieve soorten als riet kunnen ook weer afnemen wanneer de fosfaatbeschikbaarheid afneemt door fosfaatuitloging (Aggenbach & Brakkee 2021). Omdat juist de vroege successiestadia met geringe competitie de hoogste soortenrijkdom hebben en zeldzame soorten huisvesten, is inzicht in de ecohydrologische vereisten van deze vegetaties van groot belang. Zeker in het licht van zeespiegelstijging en klimaatverandering. Door Curelli et al. (2013) zijn de ecohydrologische vereisten van diverse successiestadia verkend lopend vanaf vroege successiestadia met open zand en (lever)mossen tot late zowel droge als natte successiestadia. In Figuur 19 zijn de hydrologische niches t.a.v. grondwaterstand en inundatie van drie typische natte duinvegetaties weergegeven. Hierbij moet opgemerkt worden dat de analyse is gebaseerd op metingen in de Newborough Warren, waar volgens de auteurs van de studie ontkalking, en sea spray geen grote rol speelt. In de Nederlandse kustduinen zijn deze aspecten wel van belang. Uit Curelli et al. (2013) komt naar voren dat duinvalleivegetaties zijn geassocieerd met onderscheidende hydrologische waterstandsregimes, grotendeels in overeenstemming met Lammerts et al. (2001). Uit de analyse komt naar voren dat relatief geringe verschillen in jaarlijks laagste grondwaterstanden (40 cm) het verschil maken tussen natte en droge gemeenschappen. Door Rhymes et al. (2018) is het effect van waterstandsveranderingen op het voorkomen en de bedekking van 4 typische plantensoorten (*Carex arenaria*, *Carex flacca*, *Leontodon autumnalis*, *Prunella vulgaris*) onderzocht in een mesocosm-experiment met een droog en nat grondwaterregime. Uit dit experiment bleek dat 10 cm verschil in grondwaterregime een fors effect had op de verhouding tussen de soorten. In de droge behandeling was de bedekking met *Prunella vulgaris* significant hoger, terwijl bij de natte behandeling juist *Carex flacca* een significant hogere bedekking had. Dit bevestigt het beeld dat relatief geringe veranderingen in (grond)waterregime kunnen resulteren in flinke veranderingen in samenstelling van plantengemeenschappen van natte duinvalleien. Ook uit

permanente-kwadrantenonderzoek in duinvalleien in de Koegelwieck blijkt een sterke relatie tussen de (meerjarige) dynamiek van de (voorjaars)grondwaterstanden en de vegetatiesamenstelling (Dullo, 2014)



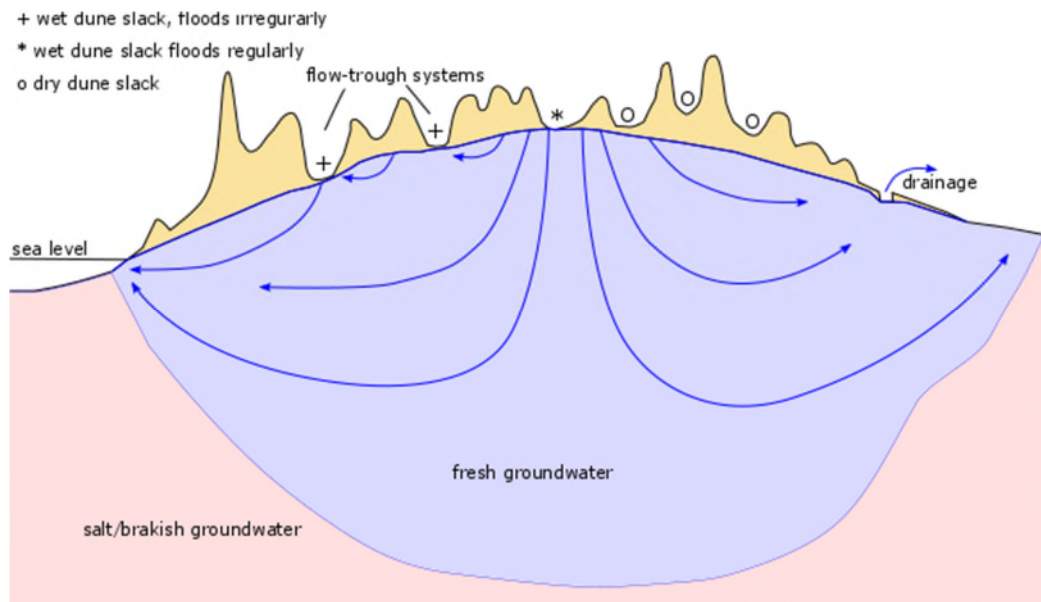
Figuur 19 Hydrologische niches van drie natte duinvallei vegetaties op basis van data uit vier Britse duingebieden (SD15 (*Equiseto variegati-Salicetum repentis*), SD14 (*Junco baltici-Schoenetum nigricantis*), SD16 (*Salicion repentis arenariae*)) en een drogere duinvegetatie (SD8 (*Galio-Koelerion albescentis*)) op basis van vier jaar hydrologische data. Dikke lijnen indiceren de 67 percentiel van voorkomen, dunne lijnen de 90 percentiel (Curelli et al., 2013).

In de Engelse studies lag de focus op waterkwantiteit. Duinvalleivegetaties kennen een grote range in basenrijkdom/zuurgraad van de bodem. Basenrijke duinvalleien komen voor op kalkrijke bodems, maar ook op locaties die periodieke overstromen met brak water en waar aanvoer is van basenrijk grondwater (Grootjans et al., 1995; 1998). Veranderingen in grondwateraanvulling en grondwaterstandsregime kunnen ook gevolgen hebben voor de basenhuishouding van het duin. Door het neerslagoverschot in combinatie met CO₂ productie door wortelrespiratie en atmosferische depositie van zuur, kunnen duinbodems ontkalken. Stuyfzand et al (2019) laten aan de hand van ontkalkingsprojecties zien dat verandering in grondwateraanvulling (als gevolg van klimaatverandering) en vegetatieontwikkeling maar beperkt van invloed zijn op de ontkalkingsnelheid. Wel van invloed is de grondwaterstand. Door een stijgende grondwaterstand komt de bodem in een voor CO₂ 'gesloten' systeem en kan de ontkalking sterk afnemen doordat er in de zone waar kalk oplost geen oplossing van CO₂ uit de gasfase optreedt. Als CO₂ niet wordt aangevuld zal de CO₂ spanning dalen als kalk oplost en zal uiteindelijk verhoudingsgewijs minder kalk oplossen.

Wanneer de bodem is ontkalkt en niet meer onder invloed staat van brak water of weinig toestroming heeft van basenrijk grondwater treedt verzuring op. Basenminnende planten- en mossoorten worden dan vervangen door zuurminnende soorten. Een deel van de Nederlandse duinvalleien zijn zogenaamde doorstroomsystemen met een ontkalkte toplaag. Hier is de zuurbuffering in de valleien afhankelijk van overstroming met basenrijk kwelwater afkomstig van omliggende duinen (Stuyfzand & Moberts, 1987). In doorstroomvalleien is de duur van inundatie sterk bepalend voor de basenaanvoer. Valleien die kort en onregelmatig inunderen kunnen daarom minder basenrijk zijn dan valleien met langdurige of frequentere inundatie. In de Middelduinen is een vernattende en langer inunderende doorstroomvallei basenrijker geworden (Annema et al. 2020). Toename van grondwateraanvulling door klimaatverandering en daardoor stijging van de grondwaterstand kan daardoor voor een betere buffering van een hoge bodem-pH zorgen in doorstroomvalleien.

De calcium-voorraad en zuurgraad kan in dergelijke doorstroom-duinvalleien ook op een tijdschaal van enkele jaren sterk dynamisch zijn. Oplading en verhoging van de pH in natte periodes en uitloging en verzuring in perioden met weinig inundatie kunnen elkaar afwisselen. De periodieke sterke uitloging en verzuring hangt ook samen met periodiek sterke interne zuurvorming. Op oppervlakkig en dieper ontkalkte bodems is het samenspel van organisch stof en de mate waarin basenrijk grondwater wordt aangevoerd bepalend voor de aanvoer van basen en hoe snel

verzuring optreedt (Aggenbach & Brakkee 2021). Bodems met organisch-stofaccumulatie hebben voldoende aanvoer van grondwater nodig om de basenverzadiging van het toenemende kationadsorptiecomplex hoog te houden. Als de aanvoerflux te laag is zal bij humusvorming de basenverzadiging afnemen en de bodem verzuren.



Figuur 20 Hydrologische situering natte duinvalleien

3.2.2 Mogelijke effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op vochtige duinvalleien

Van nature zijn vochtige duinvalleien onderdeel van een dynamisch systeem waarbij door verstuing nieuwe gunstige condities ontstaan voor de jonge successiestadia. Deze natuurlijke dynamiek is echter op veel plekken verdwenen door i) vastlegging van de kust waardoor ook morfodynamische invloed van zee is verdwenen, ii) vastlegging van grootschalige verstuingen en iii) de aanleg van infiltratiesystemen voor de drinkwaterwinning. Tot eind jaren 1990 werd vrijwel alle verstuing vastgelegd, en was het duin sterk vergrast door afname van het aantal konijnen, stoppen van beweiding en door de hoge stikstofdepositie (Grootjans et al., 2002). Toenemende hydrologische dynamiek, zoals verwacht kan worden als gevolg van klimaatverandering, hoeven op zich niet altijd tot problemen te leiden. Een voorbeeld hiervan zijn de natte duinvalleien langs *lake Michigan-Huron*. Deze meren kennen een meerjarige oppervlaktewaterstandsfluctuatie van 0.5-0.6 meter met een periode van ca. 30 jaar. Daarnaast kennen de meerpeilen een cyclus met een amplitude van 0.8-0.9 m en periode van ca. 150 jaar (Baedke & Thompson, 2000). Ofwel: gedurende lange periodes (jaren) zijn waterstanden en daarmee de grondwaterstanden langs de kust tientallen centimeters hoger of lager dan gemiddeld. In decennia met hoge waterstanden overstromen de valleien en sterven productieve soorten af, vervolgens dalen de waterstanden weer en vallen de valleien meerdere jaren droog en kunnen minder competitieve soorten kiemen of uitgroeien en minstens één levenscyclus voltooien en de zaadbank aanvullen. Tegelijkertijd verandert de vegetatie in de hoger gelegen delen van de valleien bij dalende meerpeilen naar een droge duinvegetatie met slechts enkele hygroyten en herstellen naar duinvalleivegetatie als de meerpeilen stijgen (Keddy and Reznicek, 1986; Wilcox, 2004; De Vries-Zimmerman et al., 2021). Deze cyclus heeft van 3000 jr BP tot 150 jr BP gefunctioneerd en is pas verstoord geraakt door menselijke activiteiten in de afgelopen 150 jaar (Wilcox, 2004). Noord-West Europa kent ook een meerjarige cyclus in de vorm van de North Atlantic Oscillation (NAO) met een periode van 6-16 jr. Een sterke NAO resulteert in lage druk bij IJsland en hoge druk bij de Azoren, waardoor er een sterkere westenwind waait dan normaal. Hierdoor ontstaat zachter onbestendiger weer met meer neerslag en bewolking. Bij een zwakke NAO ontstaat overheersen juist drogere weertypen. Dit heeft uiteraard z'n weerslag op grondwaterstanden in de Nederlandse kustduinen. Vooralsnog is niet duidelijk of en zo ja hoe de NAO zal veranderen als gevolg van klimaatverandering. Modellen

blijken nog onvoldoende goed in staat de ligging van de NAO te voorspellen (Woolings & Blackburn, 2012; Klimaathelpdesk.org). Wat wel duidelijk is, is dat Europa opwarmt en het klimaat verandert.

De vraag is hoe de Nederlandse vochtige duinvalleien blijven functioneren binnen het veranderende klimaat. Brits onderzoek naar effecten van klimaatverandering op vochtige duinvalleien in Ainsdale (Clark & Sanitwong Na Ayutthaya, 2010) ging uit van een dalende trend in de voorjaarsgrondwaterstand (>1 m tot 2100) en daardoor een verschuiving van het Engelse types SD 15 en SD 14 in de huidige situatie naar uiteindelijk de droge duinvegetatie SD 8 rond 2080 (zie Figuur 19 voor typologie). Onderzoek naar de ecologische gevolgen van een vernattende trend zijn we in de literatuur echter niet tegengekomen. Zeespiegelstijging resulteert in een hogere drainagebasis aan de zeezijde en daarmee tot hogere grondwaterstanden in het duin. In de studie van Clark & Sanitwong Na Ayutthaya, (2010) resulteerde de toen geprognostiseerde zeespiegelstijging van 0.6 m tot 2100 in een stijging van de kustnabije grondwaterstanden van ca. 20 cm en daarmee in slechts zeer lokale vernatting van duinvalleien. De Nederlandse situatie wijkt echter af van de Britse omdat er hier geen hoog achterland aanwezig is en er tevens een zoetwaterbel op zout/brak water is ontwikkeld onder het duin. In de Nederlandse situatie resulteert een zeespiegelstijging van 75 cm uiteindelijk in een maximaal 40 cm grotere opbolling in het simpele voorbeeld van Figuur 16. De reactie van de zoetwaterbellen in de duingebieden is echter zeer traag en zal naijlen op de zeespiegelstijging.

Daarnaast neemt bij de Nederlandse kustduinen de neerslag in zowel de trendanalyse als de klimaatscenario's toe. Hoewel de referentieverdamping naar verwachting ook toeneemt, resulteert de neerslagtoename in een minimaal gelijkblijvende maar waarschijnlijk zelfs toenemende potentiële grondwateraanvulling (zie paragraaf 2.1.2) onder de duinen. De daadwerkelijke grondwateraanvulling onder de grondwateronafhankelijke delen van het duingebied is daarbij nog groter door vegetatierugkoppelingen gerelateerd aan zomerdroogte en droogtestress waardoor de actuele verdamping lager is dan de referentieverdamping. De trend in grondwateraanvulling in de Nederlandse kustduinen is anders dan in het onderzoek van Clark & Sanitwong Na Ayutthaya (2010) vooralsnog juist vooral vernattend, wat in het (versimpelde) duinsysteem van Figuur 16 kan resulteren in een stijging van de gemiddelde freatische grondwaterstand van meerdere decimeters tot 2100.

Deze vernattende trend is positief voor de ontwikkeling van valleien in de Nederlandse duinen door zowel stijgende grondwaterstanden als toenemende kwelfluxen. De verdamping in de valleien zal echter eveneens toenemen, hoe dit uitwerkt voor de dynamiek van het freatische grondwater in het hele duingebied verdient nader onderzoek. Huidige laaggelegen, en ook goed ontwikkelde valleien kunnen echter ook permanent inunderen, zeker in geval de natuurlijke afwatering is geblokkeerd. Als valleien verbonden raken en oppervlakkig water gaan afvoeren kan bij laag gelegen valleien upconing van het zoet-zoutgrensvlak optreden. Waar het grensvlak ondiep ligt kan dit resulteren in verbrakking van valleien. Ecologisch gezien hoeft dit geen negatieve ontwikkeling te zijn omdat dit type valleien nog maar weinig voorkomt in de duinen van het vaste land.

Door de vernatting kunnen op dit moment droge valleien mogelijk geschikt worden voor vochtige duinvalleivegetaties. Deze ontwikkeling is echter wel afhankelijk van de nutriëntenstatus waarin deze valleien zich bevinden (deels betreft het bijvoorbeeld plekken die in het verleden agrarisch zijn gebruikt), de mate waarin zich hoogproductieve soorten hebben gevestigd en de mogelijkheden voor soorten om zich te verspreiden naar deze nieuwe standplaatsen (De Vries-Zimmerman et al., 2021). In de Middelduinen is door vernatting ook uitbreiding van duinvalleivegetatie opgetreden (Annema et al. 2020). Dat geldt ook voor de Kennemerduinen (Brakkee et al. 2024) waar vernatting is opgetreden door het stoppen van grondwaterwinning. Een belangrijke factor voor succesvol herstel is wel dat in geval van eutrofiering de bodem geplagd wordt om de nutriëntenrijkdom te verlagen en in geval van verzuurde, sterk verruigde valleien de vegetatie geplagd of gehopperd wordt (Annema et al. 2020).

Er is nog onvoldoende zicht op de mate waarin de freatische waterstandsdynamiek in de valleien zal veranderen en hoe dit de opbouw van organische stof zal beïnvloeden. Hoewel de aanvoer via kwel zal toenemen, neemt ook de verdamping in de valleien toe. Hierdoor zal (afhankelijk van de landschappelijke positie) de variatie tussen hoge en lage standen toenemen en treedt er mogelijk ook een faseverschuiving op in de tijd. Het is mogelijk om deze processen te onderzoeken in 2 of 3D met een modelcode waarin onverzadigde en verzadigde stroming zijn gekoppeld (bijv. Hydrus 2D/3D (Šimůnek et al., 2022)). Om vervolgens de effecten hiervan op duinvalleivegetatie te

bepalen is meer inzicht op basis van velddata nodig in de relatie van waterstandsdynamiek (seizoens- en meerjarig) en duinvalleivegetatie over een breed klimaatdoelgebied van Noordwest-Europa.

3.2.3 Deelconclusies effecten op vochtige duinvalleien

Puntsgewijs kunnen we op basis van de geanalyseerde literatuur het volgende concluderen:

- De vernattende trend door zeespiegelstijging en toenemende grondwateraanvulling is waarschijnlijk positief voor vochtige duinvalleivegetaties.
- Huidige laaggelegen valleien kunnen permanent inunderen en kunnen, als er verbindingen ontstaan naar de zee of het achterland, het duin gaan draineren. Hierdoor is bij ondiep gelegen zoet-zout grensvlakken verbrakking door upconing mogelijk.
- Onduidelijk is hoe de freatische grondwaterstandsdynamiek in de valleien zich zal ontwikkelen door de toenemende kwelfluxen, maar eveneens toenemende verdamping in voorjaar en zomer in de valleien. De doorwerking van verandering in de grondwaterstandsdynamiek op de vegetatie is ook nog niet goed bekend.
- De grondwaterstandsdynamiek is medebepalend voor de organische-stofopbouw en daarmee de successie van duinvalleivegetaties.
- Door toename van kwel kunnen duinvalleien in (oppervlakkig) ontkalkte duingebieden beter gebufferd worden tegen verzuring.
- Of vochtige duinvalleivegetaties zich daadwerkelijk kunnen uitbreiden wordt mede bepaald door de mate waarin successie wordt teruggezet, nutriëntenarme condities ontstaan/ gerealiseerd worden en of er voldoende dispersie van soorten kan plaatsvinden naar nieuwe geschikte standplaatsen.

4 Conclusies & aanbevelingen

De conclusies en aanbevelingen uit de voorgaande paragrafen zijn hier puntsgewijs overgenomen.

4.1 Conclusies

Gevolgen klimaatverandering op neerslag, verdamping en grondwateraanvulling:

- Op basis van observaties neemt de neerslag in het kustgebied zowel in de winter als in de zomer toe. Als deze trend wordt doorgetrokken naar 2050 en 2100 dan sluit deze ten aanzien van neerslag het beste aan bij het KNMI'23 HN scenario. Ten opzichte van de trend in de observaties is dit (landelijke) scenario echter minder nat.
- De referentieverdamping neemt toe langs de kust, maar minder dan in het binnenland.
- Het potentieel neerslagoverschot blijft minimaal gelijk of neemt toe.
- Zomerneerslag neemt licht toe en vooral in de vorm van zware buien.
- Door vegetatierugkoppelingen (afsterving vaatplanten in de zomer en toename mossen) is de (huidige) actuele grondwateraanvulling van korte duinvegetaties (ca. 550 mm) fors hoger dan het potentiële neerslagoverschot (ruim 300 mm). Deze neemt mogelijk meer toe in de toekomst. Bij verdergaande klimaatverandering kan het aandeel korstmossen in de moslaag toenemen wat mogelijk een remmend effect heeft op de toename van de grondwateraanvulling.
- De algemene trend in het duinlandschap is hydrologisch vernattend, maar de uitwerking op de belangrijke landschapsonderdelen is zeer verschillend: lage delen vernatten, terwijl grondwateronafhankelijke profielen sterker beïnvloed gaan worden door droogtestress van de vegetatie.
- Klimaatverandering kan door toename van piekbuien en effecten op de vegetatiestructuur van duingraslanden leiden tot meer verstuiving.

Gevolgen zeespiegelstijging en suppletie:

- Recente onderzoeken wijzen op een versnelling van de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust.
- In het kennisprogramma zeespiegelstijging gehanteerde zichtwaarden voor zeespiegelstijging gaan uit van een stijging tot 0.5-1.0 meter in 2100 en bij versnelde afsmelting van ijs op Antarctica 2.0 meter.
- Door suppletie kan de kustlijn op zijn plek gehouden worden. Dan stijgt het strand, de zeereep en voorste duinenrij mee met de stijgende zeespiegel.
- Doorstuiven van gesuppleerd zand uit de zeereep verder het duin in lijkt op basis van huidige metingen zonder kerven en parabolisering beperkt. Toenemende droogte kan wel voor versterkte verstuiving van het bestaande duin zorgen door afsterving van vaatplanten.
- Effect van zeespiegelstijging op de zoetwaterlens is door het vastleggen van de kustlijn en de toenemende potentiële grondwateraanvulling beperkt zolang geen drainage uit het duin optreedt.
- Zeespiegelstijging zorgt echter wel voor hogere freatische grondwaterstanden in het duin.
- Toename van oppervlakkige afstroming daarmee drainage van water uit het duin is bij zeespiegelstijging een belangrijke factor voor de ontwikkeling van de zoetwaterlens en mogelijk bepalend voor het dunner worden van deze lens.

Gevolgen voor vochtige duinvalleien:

- De vernattende trend door zeespiegelstijging en toenemende grondwateraanvulling is waarschijnlijk positief voor vochtige duinvalleivegetaties.

- Huidige laaggelegen valleien kunnen permanent inunderen en kunnen, als er verbindingen ontstaan naar de zee of het achterland, het duin gaan draineren. Hierdoor is bij ondiep gelegen zoet-zout grensvlakken verbrakking door upconing mogelijk.
- Onduidelijk is hoe de freatische grondwaterstandsdynamiek in de valleien zich zal ontwikkelen door de toenemende kwelfluxen, maar eveneens toenemende verdamping in voorjaar en zomer in de valleien. De doorwerking van verandering in de grondwaterstandsdynamiek op de vegetatie is ook nog niet goed bekend.
- De grondwaterstandsdynamiek is medebepalend voor de organische-stofopbouw en daarmee de successie van duinvalleivegetaties.
- Door toename van kwel kunnen duinvalleien in (oppervlakkig) ontkalkte duingebieden beter gebufferd worden tegen verzuring.
- Of vochtige duinvalleivegetaties zich daadwerkelijk kunnen uitbreiden wordt mede bepaald door de mate waarin successie wordt teruggezet, nutriënt arme condities ontstaan/ gerealiseerd worden en of er voldoende dispersie van soorten kan plaatsvinden naar nieuwe geschikte standplaatsen.

4.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

- Onderzoek de doorwerking van een veranderend klimaat op de daadwerkelijke grondwateraanvulling, dit met medeneming van terugkoppelingen in bodem en vegetatie. Bouw hierbij voort op het werk van Witte et al. (2008) en Voortman et al (2017). Neem hierbij ook de afwijking tussen gemeten trends en modelresultaten mee. Gebruik in de analyse voor terugkoppelingen in bodem en vegetatie empirische data uit een klimaatbereik in belangrijke mate de klimaatscenario's bestrijkt.
- Vertaal scenario's voor daadwerkelijke grondwateraanvulling naar geschikte modelparameters voor regionale hydrologische modellen van het duin
- Neem bij berekening van effecten van zeespiegelstijging op de zoetwaterlens mee of extra drainage kan gaan optreden door afstromende valleien en oude gegraven afwatering.
- Onderzoek modelmatig hoe toenemende grondwateraanvulling doorwerkt naar freatische grondwaterstanden en kwelfluxen in natte duinvalleien (dynamiek en faseverschuiving). Lokale relatief kleinschalige modellen voor verzadigd/onverzadigde stroming en transport (Sutra, Hydrus, Modflow-[USG](#)) zijn hiervoor het best geschikt.
- Onderzoek hoe verandering in seizoens- en meerjarige waterstandsdynamiek doorwerkt in duinvalleivegetatie
- Onderzoek hoe verandering in dynamiek en faseverschuiving doorwerkt op de organische stofdynamiek en successie van duinvalleien
- Onderzoek de mogelijke consequenties van klimaatverandering op de verstuiwingsgevoeligheid van duingraslanden en vertaal dat naar implicaties voor duinbeheer en recreatie.

5 Referenties

- Abesser, C., Clarke, D., Hughes, A. G., & Robins, N. S. (2017). Modelling small groundwater systems: experiences from the Braunton Burrows and Ainsdale coastal dune systems, UK. *Journal of Coastal Conservation*, 21, 595-614.
- Adema, E. B., Grootjans, A. P., Petersen, J., & Grijpstra, J. (2002). Alternative stable states in a wet calcareous dune slack in The Netherlands. *Journal of Vegetation Science*, 13(1), 107-114.
- Aggenbach, C.J.S., S.M. Arens, Y. Fujita, A. Kooijman, T. NeijSeptemberberjer , M. Nijssen,, P.J. Stuyfzand, M. van Til, J.H. van Boxel & L.H. Cammeraat (2018). Herstel Grijze duinen door reactiveren kleinschalige dynamiek. 2018/OBN 67-DK, Vereniging van Bos- en Natuureigenaren. Driebergen.
- Aggenbach, C.J.S., E. Remke & A.M. Kooijman (2024 in voorbereiding). Kalkarme Grijze duinen of Duinheide? De rol van wortelbiomassa, P-beschikbaarheid en plantstrategieën bij kleinschalige verstuuving in kalkarme en kalkrijke duinen. Rapport nummer 202x/OBNxxx-xx, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
- Baart, F., R. Leander, J. de Ronde, H. de Vries, V. Vuik en R. Nicolai (2015). Zeespiegelmonitor 2014. Rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging. Rapport Deltares 1209426.202.
- Baart, F., G. Rongen, M. Hijma, H. Kooi, R. de Winter en R. Nicolai (2019). Zeespiegelmonitor 2018. De stand van zaken ronde de zeespiegel. Rapport Deltares 1209426.202.
- Stolte, W., Baart, F., Muis, S., Hijma, M., Taal, M., Le Bars, D., Drijfhout, S. (2023) Zeespiegelmonitor 2022. Rapport Deltares 11209266-000-ZKS-0001
- Baedke, S. J., & Thompson, T. A. (2000). A 4,700-year record of lake level and isostasy for Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research*, 26(4), 416-426.
- Bamber, J.L., M. Oppenheimer, R.E. Kopp, W.P. Aspinall, R. M. Cook. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *PNAS*, 116, 11195-12001, 2019.
- Bartholomeus, R.P., Voortman, B.R., Witte, J.P.M. – De toekomstige grondwateraanvulling – H₂O 43(2010)17, p.35-37
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.-P.M., Runhaar, J. (2012). Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrology*, 5, 6, 808-818. DOI:10.1002/eco.271
- Beukeboom, T. J., (1976). The hydrology of the Frisian islands (Vol. 2). Rodopi.
- Borst, L., Fonck, M. (2020) Het klimaat verandert, ook in de duinen *Nature Today* 16-01-2020
- Brinkmann, N., Eugster, W., Buchmann, N., & Kahmen, A. (2019). Species-specific differences in water uptake depth of mature temperate trees vary with water availability in the soil. *Plant Biology*, 21(1), 71-81.
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *American Society of Civil Engineers Journal of the Waterways and Harbours Division* 88, 117-130.
- Buishand, T. A., De Martino, G., Spreeuw, J. N., & Brandsma, T. (2013). Homogeneity of precipitation series in the Netherlands and their trends in the past century. *International journal of climatology*, 33(4), 815-833.
- Calafat F and Chambers D 2013 Quantifying recent acceleration in sea level unrelated to internal climate variability *Geophys. Res. Lett.* 40 3661–6
- CBS, PBL, RIVM, WUR (2024). *Temperatuur in Nederland en mondiaal, 1907 - 2022 (indicator 0226, versie 15, 15 augustus 2023)* www.clo.nl. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen
- Chesnaux, R., Marion, D., Boumaiza, L., Richard, S., & Walter, J. (2021). An analytical methodology to estimate the changes in fresh groundwater resources with sea-level rise and coastal erosion in strip-island unconfined aquifers: illustration with Savary Island, Canada. *Hydrogeology Journal*.
- Chesnaux, R. (2016). Closed-form analytical solutions for assessing the consequences of sea-level rise on unconfined sloping island aquifers. *Global and Planetary Change*, 139, 109-115.

- Chesnaux, R., & Allen, D. M. (2008). Groundwater travel times for unconfined island aquifers bounded by freshwater or seawater. *Hydrogeology Journal*, 16, 437-445.
- Cirkel D.G. & Hornstra L. (2019) Kortsluitstroming in de onverzadigde zone, een veldstudie in Septemberjendel. BTO 2019.015 KWR Nieuwegein
- Clarke D, and Sanitwong Na Ayutthaya, S. (2011) Predicted effects of climate change, vegetation and tree cover on dune slack habitats at Ainsdale on the Sefton Coast, UK. *J. Coast. Cons.*, doi:10.1007/s11852-009-0066-7.
- Curreli, A., Wallace, H., Freeman, C., Hollingham, M., Stratford, C., Johnson, H., & Jones, L. (2013). Eco-hydrological requirements of dune slack vegetation and the implications of climate change. *Science of the total environment*, 443, 910-919.
- De Conto, R.M., D. Pollard. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591-597, 2016.
- Dangendorf S, Hay C, Calafat F M, Marcos M, Piecuch C G, Berk K and Jensen J 2019 Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s *Nat. Clim. Change* 9 705–10
- Daniels, E., Beersma, J., van der Schrier, G. (2021) Droogte in Nederland aan de hand van de indices SPI en SPEI *Meteorologica*, juni 2021
- DeVries-Zimmerman, S. J., Yurk, B., Fast, K. M., Donaldson, A., & Hansen, E. C. (2021). Waxing and waning slacks: The changing ecohydrology of interdunal wetlands/slacks in a Lake Michigan coastal dune complex during rising Lake Michigan-Huron levels. *Journal of Great Lakes Research*, 47(6), 1565-1580.
- Dullo, B.W. (2014) Dynamics of temporal wetlands under changing weather conditions [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen].
- Ezer T, Haigh I D and Woodworth P L 2016 Nonlinear sea-level trends and long-term variability on western European coasts *J. Coast. Res.* 32 744–55
- Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B., & Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(40), 10572-10577.
- Fetter Jr, C. W. (1972). Position of the saline water interface beneath oceanic islands. *Water Resources Research*, 8(5), 1307-1315.
- Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V. W., ... & Wu, Y. H. (2020). The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, 584(7821), 393-397.
- Grootjans, A.P., E.J. Lammerts & F. van Beusekom (1995). *Kalkrijke duinvalleien op de Waddeneilanden*. KNNV-uitgeverij, Utrecht.
- Grootjans, A. P., Ernst, W. H. O., & Stuyfzand, P. J. (1998). European dune slacks: strong interactions of biology, pedogenesis and hydrology. *Trends in Ecology & Evolution*, 13(3), 96-100.
- Grootjans, A. P., Geelen, H. W. T., Jansen, A. J. M., & Lammerts, E. J. (2002). Restoration of coastal dune slacks in the Netherlands. *Ecological restoration of aquatic and semi-aquatic ecosystems in the Netherlands (NW Europe)*, 181-203.
- Jones, M. L. M., Reynolds, B., Brittain, S. A., Norris, D. A., Rhind, P. M., & Jones, R. E. (2006). Complex hydrological controls on wet dune slacks: the importance of local variability. *Science of the Total Environment*, 372(1), 266-277.
- Jungerius, P. D., & Van der Meulen, F. (1988). Erosion processes in a dune landscape along the Dutch coast. *Catena*, 15(3-4), 217-228.
- Kamps, P., G. Nienhuis & J.P.M. Witte, 2008. Effects of climate change on the water table in the coastal dunes of the Amsterdam Water Supply. *Proceedings of MODFLOW and more 2008*
- Keddy, P. A., & Reznicek, A. A. (1986). Great Lakes vegetation dynamics: the role of fluctuating water levels and buried seeds. *Journal of Great Lakes Research*, 12(1), 25-36.
- Klimaathelpdesk <https://www.klimaathelpdesk.org/answers/wat-is-de-relatie-tussen-de-nao-en-het-weer-in-europa-in-een-veranderend-klimaat/> (visited 19-03-'24)
- KNMI 2021: *KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert*, KNMI, De Bilt, 72 pp.
- Dorland, R. van, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink, M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Septemberjaard, J. F.

- Septemberrink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel (2023) KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. De Bilt, 2023 | Scientific report; WR-23-02
- Lammerts, E. J., Maas, C., & Grootjans, A. P. (2001). Groundwater variables and vegetation in dune slacks. *Ecological Engineering*, 17(1), 33-47.
- Le Bars, D. (2018) Uncertainty in Sea Level Rise Projections Due to the Dependence Between Contributors. *Earth's Future* 6.9, pp. 1275–1291. issn: 23284277. doi: 10.1029/2018EF000849
- Le Bars, D., S. Drijfhout, and H. de Vries (2017) A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environmental Research Letters* 12.4, p. 044013. issn: 1748-9326. doi: 10.1088/1748-9326/aa6512.
- Le Bars, D., S. Drijfhout (2019) Contribution of Antarctic Ice Sheet to Sea Level Rise in the coming century. 2018 Report WBI WP4. 5 march 2019. KNMI.
- Lenderink, G., Van Septembergaard, E., & Selten, F. (2009). Intense coastal rainfall in the Netherlands in response to high sea surface temperatures: analysis of the event of August 2006 from the perspective of a changing climate. *Climate dynamics*, 32, 19-33.
- Mao, J. (2016) Water repellent soils: from molecule to ecosystem. PhD Thesis. Utrecht University.
- Masterson, J.P. & Garabedian, S.P. (2007) Effects of Sea-Level Rise on Ground Water Flow in a Coastal Aquifer System. *Groundwater* vol 45-no2 p209-217
- Nijenhuis, M. (2022) Evolutie van de kerf. Een onderzoek naar succes- en faalfactoren van kerven in de zeereep. Afstudeerscriptie Van Hall Larenstein
- Noest, V. (1991). Simulated impact of sea level rise on phreatic level and vegetation of dune slacks in the Voorne dune area (The Netherlands). *Landscape Ecology*, 6, 89-97.
- Noest, V. (1994). A hydrology-vegetation interaction model for predicting the occurrence of plant species in dune slacks. *Journal of Environmental Management*, 40(2), 119-128.
- Oude Essink, G.H.P., Waterman, R.E., (in prep). Impacts of offshore land reclamation on fresh groundwater volumes under coastal dunes and surface water in the hinterland
- Essink, O. (1996). Impact of sea level rise on groundwater flow regimes: a sensitivity analysis for the Netherlands (Vol. 7). Delft University Press.
- Peña, A.G. (2003) Castricum 30 years of lysimeterdata: sensitivity analysis and calibration with the SWAP model. Alterra Wageningen
- Philip, S. Y., Kew, S. F., Van Der Wiel, K., Wanders, N., & Van Oldenborgh, G. J. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094081.
- Rhymes, J., Wallace, H., Tang, S. Y., Jones, T., Fenner, N., & Jones, L. (2018). Substantial uptake of atmospheric and groundwater nitrogen by dune slacks under different water table regimes. *Journal of Coastal Conservation*, 22, 615-622.
- Rijkswaterstaat, 2020. Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust. Rapport ter onderbouwing van het beleidsadvies 'Kustgenese 2.0'.
- Rohani, S., Dullo, B., Woudwijk, W., de Hoop, P., Kooijman, A., & Grootjans, A. P. (2014). Accumulation rates of soil organic matter in wet dune slacks on the Dutch Wadden Sea islands. *Plant and soil*, 380, 181-191.
- Sluiter, R. (2011). De Bos Atlas van het klimaat. Noordhoff Atlasproducties & KNMI
- Simon K, Riva R and Vermeersen L 2021 Constraint of glacial isostatic adjustment in the North Sea with geological relative sea level and GNSS vertical land motion data *Geophys. J. Int.* 227 1168–80
- Šimůnek, J., Šejna, M., Brunetti, G., & van Genuchten, M. T. (2022). The HYDRUS Software Package for Simulating the One-, Two-, and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, Technical Manual I, Hydrus 1D, Version 5. x. PC Progress, Prague, Czech Republic, 334.
- Smith, S. M., & Medeiros, K. C. (2019). Recent groundwater and lake-stage trends in Cape Cod National Seashore: relationships with sea level rise, precipitation, and air temperature. *Journal of Water and Climate Change*, 10(4), 953-967.

- Grootjans, A. P., Sival, F. P., & Stuyfzand, P. J. (1996). Hydro-geochemical analysis of a degraded dune slack. *Vegetatio*, 126, 27-38.
- Oost, A., Arens, B., Graaf, S. van der. (red) (2022) Handleiding Dynamisering Zeereep. Programma naar een Rijke Waddenzee
- Philip, S. Y., Kew, S. F., Van Der Wiel, K., Wanders, N., & Van Oldenborgh, G. J. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094081.
- Steffelbauer, D. B., Riva, R. E., Timmermans, J. S., Kwakkel, J. H., & Bakker, M. (2022). Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea. *Environmental Research Letters*, 17(7), 074002.
- Stuyfzand, P. J., & Bruggeman, G. A. (1994, June). Analytical approximations for fresh water lenses in coastal dunes. In *Proc. 13th Salt Water Intrusion Meeting* (pp. 15-33).
- Stuyfzand, P. J. & Moberts, E M. L. (1987) De bijzondere hydrologie van kwelplassen in duinen met kunstmatige infiltratie. *H2O* (20)3:52-57 and 62.
- Stuyfzand, P.J. (2016). HYDROLENS 3.0, a package of closed-form analytical solutions for fresh groundwater lenses, set in Excel spreadsheet, for calculating the shape, salinity distribution, formation time and effects of climate change.
- Stuyfzand, P.J., Haan, M. de, Hofs, B. (2010) Gevolgen van kustverbreding en klimaatverandering voor duingrondwater, kunstmatig infiltraat, drinkwater en het duinecosysteem. KWR 09.092 KWR Nieuwegein
- Stuyfzand, P. J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands (PhD thesis). Faculty of Earth Sciences, VU University Amsterdam.
- Stuyfzand, P.J. (2017) Observations and analytical modeling of freshwater and rainwater lenses in coastal dune systems. *J. Coastal Conservation*, 2017 Vol. 21(5), 577-593, doi:10.1007/s11852-016-0456-6.
- Taal, M., Quataert, E., Spek, A. van der, Huisman, B., Elias, E., Wang, Z., Vermeer, N. (2023) Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging. Rapportnr. 11207897-002-ZKS-0004, Deltares
- Thijssse, J.P. (1939) Stortbuien op het duin. *De Levende Natuur* 43(11): 321-324
- Van den Brink & de Valk (2023) Guidance on the use of meteorological time series constructed to match the KNMI'23 climate scenarios, Technical report TR 408, KNMI, De Bilt
- Van Haren, R., van Oldenborgh, G. J., Lenderink, G., Collins, M., & Hazeleger, W. (2013). SST and circulation trend biases cause an underestimation of European precipitation trends. *Climate Dynamics*, 40, 1-20.
- van IJendoorn, C. O., de Vries, S., Hallin, C., & Hesp, P. A. (2021). Sea level rise outpaced by vertical dune toe translation on prograding coasts. *Scientific reports*, 11(1), 12792.
- van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S., Van Ulden, A., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., ... & Dijkstra, H. (2009). Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past*, 5(1), 1-12.
- Voortman, B. R., Bartholomeus, R. P., van Bodegom, P. M., Gooren, H., van der Zee, S. E., & Witte, J. P. M. (2014). Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: towards implementation of moss covered soils in hydrological models. *Hydrological Processes*, 28(26), 6251-6264.
- Voortman, B. R., Fujita, Y., Bartholomeus, R. P., Aggenbach, C. J. S., & Witte, J. P. M. (2017). How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation. *Ecohydrology*, 10(4), e1848.
- Vos, R. (2021) Memo Tijdlijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging KPZSS-WP2_240321 Rijkswaterstaat Water, Verkeer & Leefomgeving
- Wahl T, Haigh I D, Woodworth P L, Albrecht F, Dillingh D, Jensen J, Nicholls R J, Weisse R and Wöppelmann G 2013 Observed mean sea level changes around the north sea coastline from 1800 to present *Earth Sci. Rev.* 124 51–67
- Watson, P.J. 2016. "Identifying the Best Performing Time Series Analytics for Sea Level Research." In *Time Series Analysis and Forecasting*, 261–78. Springer.
- Wilcox, D.A., K.P. Kowalski, and M. L. Carlson. 2004. Relationships between Lake Ontario water levels and wetlands. Year 3 Report for the Wetland Habitat Quantity Performance Indicator Study. IJC Lake Ontario – St. Lawrence River Water Regulation Review Study.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel & P.W.T.J. Kamps, 2008. Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. Nieuwegein. Kiwa Water Research

- Witte, J. P. M., Bartholomeus, R. P., Voortman, B., Hagen van der, H., & van der Zee, S. E. A. T. M. (2012). Droge duinvegetatie zeer zuinig met water. *Landschap : tijdschrift voor landschapsecologie en milieukunde*, 3, 109-117. <https://edepot.wur.nl/24888>
- Woollings, T. and M. Blackburn, 2012: The North Atlantic jet stream under climate change and its relation to the NAO and EA patterns. *J. Climate* 25(3). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00087.1>