

Effecten klimaatverandering binnenduinrand Noord-Holland



Auteur(s)

Henk Wolters

Annemargreet de Leeuw

Effecten klimaatverandering binnenduinrand Noord-Holland

Opdrachtgever	Provincie Noord-Holland Ambtelijke Organisatie
Contactpersoon	Bas van de Pas
Referenties	-
Trefwoorden	Klimaatverandering; klimaatgerelateerde drivers; klimaatvariabelen; watersysteem; ecologie; gebruiksfuncties; kustgebied; Noord-Holland

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	24 februari 2022
Projectnummer	11207772
Document ID	11207772-000-ZWS-0001
Pagina's	99
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Henk Wolters, Annemargreet de Leeuw	Bijdragen van Bart van den Hurk, Marcel Taal, Jacco Groeneweg, Siem Jansen, Klaas-Jan van Heeringen, Joost Delsman, Janneke Pouwels, Marjolein Mens, Stéphanie IJff, Mike Woning, Hans Gehrels	

Aan: Geïnteresseerde Lezers

Bijlagen: Deltares Rapport "Effecten klimaatverandering binnenduintrand Noord-Holland"

Uw contactpersoon

S.P.J.M. van de Pas
BEL/OMB

Telefoonnummer +31235144946
bas.van.de.pas@noord-holland.nl

Betreft: Uitgave Studie "Effecten klimaatverandering binnenduintrand Noord-Holland"

Voorblad

22 april 2022

1|2

Voor u ligt de studie "Effecten klimaatverandering binnenduintrand Noord-Holland", die we als provincie Noord-Holland door Deltares hebben laten uitvoeren. Het doel van deze studie is om meer inzicht te krijgen in de actuele kennis rondom klimaatverandering en zeespiegelstijging en wat dat voor een effect heeft op water en klimaatgerelateerde indicatoren als waterveiligheid, wateroverlast, droogte, hitte en verzilting op de kustzone en binnenduintrand.

Deze studie geeft de meest actuele wetenschappelijke facts en figures weer. Informatie die van belang is voor de toekomstige ontwikkeling van de binnenduintrand. Zo kunnen we zorgen dat we ons kunnen voorbereiden op de gevolgen van de klimaatverandering. Daarom is aan Deltares ook gevraagd om aan te geven wat de mogelijke doorwerking is naar de verschillende sectoren: natuur, landbouw, drinkwatervoorziening, energie, industrie, recreatie en toerisme, infrastructuur en stedelijk gebied.

Per sector geeft Deltares aan wat de mogelijke kansen en bedreigingen van de klimaateffecten zijn. In het rapport staan geen oplossingsrichtingen of richtinggevende ruimtelijke impacts. Daar hebben we bewust niet om gevraagd, omdat dit een afweging is die we samen met andere partners willen maken, ook op bestuurlijk niveau. Op dit moment loopt er een ruimtelijke verkenning Binnenduintrand Noord-Holland (boven het Noordzeekanaalgebied). De wetenschappelijke kennis uit het rapport wordt gebruikt voor deze verkenning Binnenduintrand Noord-Holland.

Mocht u vragen hebben over de inhoud van het voorliggende rapport dan kunt u contact opnemen met Bas van de Pas (tel: 0653426984 / mail: bas.van.de.pas@noord-holland.nl).

Heeft u vragen over de verkenning Binnenduintrand, dan kunt u contact opnemen met Susanne Traudes-Noorlander (tel: 0621705919 / mail: noorlanders@noord-holland.nl)

Samenvatting

De Provincie Noord-Holland is in het najaar van 2021 gestart met een ruimtelijke verkenning voor de binnenduintrand Noord-Holland: welke opgaven spelen er, welke belangen, welke daarvan kunnen elkaar versterken (of juist helemaal niet), wat zijn mogelijke toekomstige beleidsalternatieven en wat zijn mogelijke transitiepaden. Ook wordt in beeld gebracht met welke toekomstige ontwikkelingen nu al rekening moet worden gehouden en hoe deze gecombineerd kunnen worden met de opgaven die er nu zijn. In zo'n ruimtelijke verkenning moeten klimaatverandering en de effecten ervan goed worden meegenomen, maar daarvan ontbreekt een goed en actueel overzicht.

Het doel van dit rapport is om in die behoefte te voorzien. Daartoe is een stapsgewijze aanpak gevolgd. In de eerste stap zijn de meest recente inzichten in de klimaatvariabelen die voor het studiegebied van belang zijn verzameld en op een rijtje gezet. Het studiegebied beslaat het Noord-Hollandse kustgebied en de binnenduintrand tussen het Noordzeekanaal en Den Helder tot een afstand van ca 10 km vanaf de kust. Als tweede stap is beschreven hoe de klimaatvariabelen doorwerken in het watersysteem. In de derde stap is beschreven hoe klimaatverandering, al dan niet via het watersysteem, doorwerkt in acht gebruiksfuncties of sectoren. Hierbij is de NAS-indeling gevolgd. Deze studie is niet primair gericht op de uitwerking van maatregelen voor klimaatadaptatie of op een analyse van sociaal-economische ontwikkelingen. De ideeën die we daarover in de bronnen en bij de betrokkenen zijn tegengekomen zijn wel opgenomen, om goed de verbinding te leggen met de ruimtelijke verkenning.

De klimaatscenario's van het KNMI, de Deltascenario's van het Deltaprogramma zoetwater en de scenario's over welvaart en leefomgeving van CPB en PBL zijn gebruikt om de bandbreedte van klimaatimpacts voor 2050 en verder te bepalen. Al deze scenario's zullen in 2023 worden bijgesteld. Aanvullend op de scenario's zijn recente inzichten in de mogelijke mate van zeespiegelstijging verwerkt.

Het rapport bestaat uit drie kernhoofdstukken die de drie stappen van de aanpak volgen van klimateffecten, via watersysteem effecten naar effecten op gebruiksfuncties.

Hoofdstuk 2, 'Klimaatverandering in cijfers' geeft een overzicht van klimaatvariabelen, de trends waarlangs die zich de afgelopen periode hebben ontwikkeld, de manieren waarop deze naar de meest recente inzichten verwacht worden te veranderen, en de onzekerheden die daarbij spelen. Het overzicht bevat 15 klimaatvariabelen. Een samenvattend overzicht van de bevindingen is in de tabel hieronder opgenomen.

Groep	Klimaatvariabele	Trends	Verwachtingen Urgentie indicatief aangegeven, oplopend van wit (neutraal) naar rood (urgent)
Hitte en koude	Gemiddelde oppervlaktetemperatuur	Geleidelijke stijging	Directe effecten kunnen kansen bieden voor bijv. toerisme, energieverbruik. Indirecte effecten (via neerslag, verdamping) zijn overwegend bedreigend en urgent.
	Extreme hitte	Toenemend	Toenemend

Groep	Klimaatvariabele	Trends	Verwachtingen Urgentie indicatief aangegeven, oplopend van wit (neutraal) naar rood (urgent)
	Koudegolven	Afnemend	Verder afnemend; met name effecten op natuur
	Vorst	Afnemend	Verder afnemend; met name effecten op natuur
Nat en droog	Seizoen gemiddelde neerslag	Geleidelijke stijging	Verdere stijging
	Intensieve neerslag en wateroverlast	Duidelijke stijging	Verdere stijging
	Droogte	Toenemend vooral in het voorjaar	Verdere stijging
Wind	Gemiddelde windsnelheid	Geen duidelijk signaal	Geen veranderingen verwacht
	Zware stormen	Geen duidelijk signaal	Geen veranderingen verwacht
Sneeuw en hagel	Sneeuw	Afnemend	Verder afnemend; effecten daarvan niet onderzocht
	Hagel	Gelijkblijvend	Mogelijk toenemend; trend en effecten niet onderzocht
Kust en zee	Relatieve zeespiegelstijging	Stijgend	Versterkt stijgend
	Kustmorfologie en hoogwaterveiligheid	Op peil door suppletiebeleid	Handhaven suppletiebeleid; lange termijn wordt onderzocht
Bodemdaling	Veenoxidatie	Stijgend, maar belang in studiegebied beperkt	Doorgaand, maar in het studiegebied beperkte omvang
	Differentiële zetting en klink	Beperkt	In het studiegebied beperkt in ernst en omvang

Bevindingen uit hoofdstuk 2 puntsgewijs:

- In KNMI's Klimaatsignaal'21 worden aanwijzingen gepresenteerd die aangeven dat in de kustzone de stijging van extreme zomerneerslag wat groter is dan in de rest van het land, mogelijk als gevolg van opwarmend zeewater.
- In de regio rond Amsterdam blijft in het huidige klimaat (1991-2020) bijna drie keer zoveel neerslag over (tot 360 mm/jaar) als in de buurt van Den Helder (120-160 mm/jaar).
- Het noorden en een smalle kuststrook hebben ook de hoogste mediaanwaarde voor het maximale neerslagtekort aan het eind van het groeiseizoen (ca 200 mm) (KNMI et al., 2021).
- Er is over de periode tussen 1965 en 2020 een kleine toename in het neerslagtekort tijdens het groeiseizoen maar die is in de provincie niet significant, en deze is in de regio dan ook niet duidelijk te koppelen aan klimaatverandering. Wel is er een significante toename van het neerslagtekort in de eerste lentemaanden van het groeiseizoen, april en mei (weliswaar van minder dan 1 mm per jaar).
- De gemiddelde windsnelheid boven het Noordzeegebied laat sinds de jaren '90 een zwakke afname zien, maar deze is niet duidelijk gerelateerd aan klimaatverandering.
- Projecties uit de nieuwste generatie klimaatmodellen laten voor West-Europa maar kleine veranderingen in het windklimaat zien en er zijn zowel gebieden met afname als met toename. De verandering dicht bij de Nederlandse kust is niet significant.
- In de zone waarin zand gesuppleerd wordt (de 'actieve' zone tot -8 m) spelen morfologische veranderingen door zowel suppleties als door zeespiegelstijging een rol, maar die door suppleties zijn het grootst. Dat zal zeer waarschijnlijk nog steeds

gelden als de zeespiegelstijging sneller verloopt dan nu, aangezien dan ook de hoeveelheden gesuppleerd zand zullen toenemen.

- Het is moeilijk te voorspellen hoe, bij snellere stijging van de zeespiegel en wellicht daardoor ook sneller optredende erosie, de suppleties worden vormgegeven. Het zal kunnen variëren tussen vaker suppleren of grotere suppleties. De eerste optie zal meer vragen opleveren over de ecologische impact, de tweede optie vraagt meer inzicht op de verspreiding van het zand op middellange termijn.
- De kustlijn volgt de ontwikkeling van de actieve zone. Deze blijft gedomineerd worden door de planning en het ontwerp van de suppleties.
- Voor een duurzame veiligheid bij een veel hogere zeespiegel is het beter als een breder duingebied meegroeit met de zeespiegel. Dit is een steeds belangrijker wordend argument om naast dynamisch kustbeheer ook dynamisch duinbeheer te voeren, waarin verstuing meer wordt toegelaten.
- Een breder duingebied zal leiden tot een vergroting van de zoetwaterbel en mogelijk tot verschuiving van zoute of brakke kwelstromen. Of en in welke mate zo'n verschuiving optreedt is afhankelijk van de lokale omstandigheden. Dit is voor het studiegebied nog niet onderzocht.
- Bodemdaling versterkt in een aantal gevallen de gevolgen van het opwarmen van de aarde. Zo kunnen de gevolgen van zeespiegelstijging groter worden doordat tegelijkertijd het maaiveld door bodemdaling lager komt te liggen. Ook kan de zoetwaterbeschikbaarheid minder worden door een verhoogde kwelflux, wat leidt tot verzilting.
- Kleiige gronden kunnen gevoelig zijn voor daling tijdens langere perioden van droogte, als er krimp optreedt door uitdroging. Dit kan een permanente daling als gevolg hebben, en daarbij schade veroorzaken.
- Het effect van klimaatopwarming op bodemdaling in het studiegebied is beperkt, vanwege het ontbreken van grote veengebieden. De kans op permanente krimp bij droogte neemt wel toe door klimaatopwarming en dit kan tot extra bodemdaling zorgen in de lokale veenpakketten en kleiige droogmakerijen in het onderzoeksgebied.
- Bij PWN zal in 2023 een verbeterd grondwatermodel operationeel worden, waarmee ook zoet-zoutdynamiek kan worden berekend.

Hoofdstuk 3, 'Doorwerking van klimaatverandering op het watersysteem', beschrijft de doorvertaling van veranderingen in de klimaatvariabelen naar het watersysteem, met de aandachtsgebieden hoogwaterveiligheid, wateroverlast, watertekorten, grondwaterstanden en verzilting. Waar mogelijk wordt daarover kwantitatieve informatie gepresenteerd. Daarnaast is informatie opgenomen over huidige en te verwachten knelpunten, en over mogelijke strategieën en maatregelen om daarmee om te gaan. Een impliciete aanname in de beschrijvingen is dat het meest relevante vigerende beleid in stand blijft. De kernboodschappen van hoofdstuk 3 per aandachtsgebied:

Hoogwaterveiligheid:

- De flexibiliteit van de maatregel zandsuppleties is erg groot. Als het nodig is, is het mogelijk om zelfs binnen het kustfundament zand te gaan verplaatsen; dat is technisch goed vol te houden.
- Vanwege de grote flexibiliteit van zandsuppletie komt het einde van de houdbaarheid van deze maatregel pas in zicht bij een zeespiegelstijging van 5 meter of meer. Die wordt op zijn vroegst na 2150 verwacht.
- Ruimtelijke claims zullen nodig zijn voor de handhaving van de veiligheidsnormen, om versterking van duinen, primaire en secundaire keringen mogelijk te maken.

- Met gerichte gebiedsontwikkeling en -inrichting in het binnenduinrandgebied kan de kwetsbaarheid verlaagd worden en het gebied robuuster gemaakt tegen overstromingen.
- Extreme zeewaterstanden zoals we ze nu kennen zullen bij een sterk stijgende zeespiegel veel vaker gaan voorkomen.
- Volgens een snelle analyse op basis van cijfermateriaal uit LIWO is de relatieve toename van de schade bij een overstroming vanuit zee bij verschillende terugkeerfrequenties beperkt. De schade bij overstroming vanuit het Markermeer neemt, ondanks dat het Markermeer een peilbeheerst systeem is, zeer sterk toe onder extremere omstandigheden.
- Indicaties over de kwetsbaarheid bij hogere waterstanden voor doorbraken uit regionale keringen konden niet worden afgeleid, omdat de schadecijfers niet online beschikbaar zijn gemaakt. Het zou interessant zijn om dit te onderzoeken.

Wateroverlast:

- Wateroverlast is een urgent aandachtsveld. Het doet zich in toenemende mate voor en heeft in 2021 gezorgd voor maatschappelijke onrust naar aanleiding van de extreme neerslag van juni.
- Ruimtelijke claims voor de bestrijding van wateroverlast zullen nodig zijn voor maatregelen om water vast te houden (met name in stedelijk gebied), voor bergingsgebieden, voor plaatselijke verruiming van het afvoerstelsel en voor de aanleg van aanvullende infrastructuur om water van kwetsbare naar minder kwetsbare gebieden te voeren.
- Bij extreme neerslaggebeurtenissen, zoals in juni 2021 rond Alkmaar, zal hoe dan ook een tijdelijke ruimtelijke claim gelegd worden voor waterberging. Het neerslagoverschot kan niet snel genoeg kan worden afgevoerd of in de bodem dringen, en leidt dan in het watersysteem tot een peilstijging. De meest kwetsbare plekken die dan tijdelijk als eerste en het langste onder water staan zijn bekend. De ruimteclaim voor de toekomst houdt in dat het grondgebruik op die plekken zo wordt gekozen dat het kan omgaan met tijdelijke natte omstandigheden.
- Aanleg van bergingsgebieden is hooguit een deel van de oplossing. De efficiëntste maatregelen liggen in ruimtelijke aanpassingen.
- Terreineigenaren kunnen maatregelen nemen om de infiltratie van neerslag in de bodem en de berging in de bodem te bevorderen, onder andere door structuurbederf (verslemping, vorming ploegzool) tegen te gaan.
- Twee omslagpunten in het denken over wateroverlast zijn al actueel:
 - Voor de aanpak van wateroverlast is gezamenlijke inzet nodig van alle betrokken partijen. In dat proces verschuift de nadruk van het handhaven van normen naar het vinden van een gezamenlijke oplossing waarin terreineigenaren medeverantwoordelijk zijn voor maatregelen. De verantwoordelijkheid verschuift dan van waterschappen naar de algemene democratie: goed RO-beleid.
 - Maar ook met zo'n aanpak zullen er buien optreden waarbij forse schade niet voorkomen kan worden. Een goede organisatie en voorbereiding, waar bewustwording deel van uitmaakt, kan helpen om te voorkomen dat overlast overgaat in een ramp.

Verzilting:

- Brak grondwater verzilt het oppervlaktewater, waardoor dit water ongeschikt wordt voor beregening. Ook kan brak grondwater in droge zomers tot in de wortelzone reiken en daar schade aan landbouwgewassen veroorzaken.
- In droge zomers treden nu reeds verziltingsproblemen op.

- Door een stijgende zeespiegel neemt de druk in het grondwater toe, tot zo'n 10 km vanaf de kustlijn. Deze toenemende druk leidt tot een toename van de brakke kwel, met name in de kop van Noord-Holland. De kweltoename heeft verder verziltende sloten en dunner wordende regenwaterlenzen tot gevolg. Bovendien zorgt de kweltoename voor een sneller opwaarts stromen van dieper, zouter grondwater, met op langere termijn extra verzilting tot gevolg, en in combinatie met een breder duingebied mogelijk ook tot een landinwaartse verschuiving van kwelstromen.
- Omslagpunten zijn te verwachten in technische zin (capaciteit van het wateraanvoersysteem, inclusief buffer Markermeer, wordt beperkend) en in landgebruik (reductie watervragend areaal of aanpassingen in het teeltplan worden nodig). Een tijdpad voor deze omslagpunten is nog niet te geven.
- Door ontwateringsmaatregelen (drainage) wordt een eventuele toename in winterneerslag snel afgevoerd en komt deze niet ten goede aan het grondwater. Hier ligt een belangrijk aandachtspunt in de gebieden waar de ligging van het grensvlak tussen zoet en zout grondwater ondiep ligt, omdat daar een hogere zeespiegel snel tot zoutproblemen voor de landbouw kan leiden.
- Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is uitgerekend hoeveel doorspoeling nodig is om de huidige chlorideconcentratie te handhaven bij een toenemende zoutvrucht. Het betreft hier een indicatieve analyse. De onzekerheid in de uitkomsten is groot. Een mediane toename van de doorspoelvraag van zo'n 50% is te verwachten bij 1 meter zeespiegelstijging, toenemend tot 200% toename bij 3 meter zeespiegelstijging.

Watertekorten:

- Verminderde waterbeschikbaarheid en grotere watertekorten treden de laatste jaren prominent op de voorgrond, mede als gevolg van de droge zomers van 2018 en 2019.
- In de huidige klimaatscenario's is rekening gehouden met een toename van de verdamping in de zomer van 4 tot 11 % in 2050 en van 4 tot 15 % in 2085, ten opzichte van de Referentie2017.
- Bij sterke klimaatverandering (Deltascenario's Warm en Stoom) neemt de watervraag aan het hoofdwatersysteem in 2050 met 30% tot 60% toe. In een extreem droog jaar en bij sterke klimaatverandering kunnen de tekorten boven de 100 miljoen m³ per jaar uitkomen. Er wordt dan voornamelijk gekort op doorspoeling en beregening.
- In de huidige situatie kan in deze watervraag worden voorzien vanuit het Markermeer, ook in zeer droge jaren. Een stresstest voor de IJsselmeerbuffer geeft echter aan dat in de toekomst de buffer op het IJsselmeer/ Markermeer steeds frequenter volledig uitgeput kan raken. Dit heeft in Noord-Holland onder andere gevolgen voor de zomergrondwaterstand in een zeer droog jaar; deze wordt in de binnenduinrand van Noord-Holland 5 tot 25 cm lager.
- De watervraag voor peilbeheer kan verder toenemen als bodemdaling wordt tegengegaan door het veenweidegebied te vernatten met technische maatregelen zoals onderwaterdrainage of drukdrainage. In een gevoeligheidsanalyse is berekend dat de watervraag voor peilbeheer in Noord-Holland hierdoor in een zeer droog jaar verder kan toenemen met 13% (huidig klimaat) tot 23% (Stoom2050).
- Ook in het wateraanvoersysteem kunnen knelpunten gaan optreden, met name in de benedenstroomse aanvoergebieden (waaronder de bollengebieden), als de watervraag onder invloed van klimaat en zeespiegelstijging (met verzilting als gevolg) fors stijgt.
- Maatregelen tegen watertekorten zijn in te delen in maatregelen om de watervraag te beperken, de waterbeschikbaarheid te verhogen of om beter om te gaan met de gevolgen van tekorten. In hoofdstuk 4 komt dit per sector aan de orde.

Grondwaterstanden:

- In de duinen zijn de grondwaterstanden de afgelopen jaren gestegen, zowel in de winter als in de zomer. De berekeningen wijzen op een continuering van deze trend. Dit grondwater is zoet. In de duinzoom leiden de hogere grondwaterstanden in de duinen al tot extra wateroverlast en die zal toenemen. Een strategische keuze ligt voor over hoe met deze wateroverlast om te gaan: draineren of conserveren (met gevolgen voor het ruimtegebruik).
- In de peilbeheerste gebieden is het effect van toenemende jaarneerslagsommen op de grondwaterstanden niet of veel minder zichtbaar omdat neerslagoverschotten daar veel sneller (in uren tot dagen) tot afvoer komen. De zomergrondwaterstanden worden in enkele poldergebieden lager door een toenemend neerslagtekort in de zomerperiode, maar in de meeste poldergebieden is de verandering niet significant.

Hoofdstuk 4, 'Doorwerking naar sectoren', beschrijft de klimaateffecten voor acht sectoren: natuur, landbouw, drinkwatervoorziening, energie, industrie, recreatie en toerisme, infrastructuur en stedelijk gebied. Gedeeltelijk lopen de klimaateffecten via het watersysteem, gedeeltelijk hebben ze directe gevolgen (bijvoorbeeld als het gaat om toenemende hittestress). De effecten zijn vaak beschreven als bedreigingen, maar waar van toepassing ook als kansen, bijvoorbeeld voor de kustrecreatie. Net als voor het watersysteem zijn maatregelen benoemd die worden onderzocht om negatieve klimaateffecten tegen te gaan. In samenhang daarmee is in de gevallen waar dat van toepassing is, kort geschetst welke strategische keuzes richting kunnen geven aan de toekomstige selectie van maatregelen. Tenslotte is aangegeven of te verwachten is dat deze maatregelen zullen leiden tot ruimteclaims. Een samenvattende tabel van hoofdstuk 4 is hieronder opgenomen. De tabel laat zien dat de meest urgente groepen klimaatvariabelen naar verwachting ook zullen leiden tot de grootste ruimteclaims. Dit zijn prioritaire aandachtsgebieden voor de ruimtelijke verkenning. Urgentie en omvang van ruimteclaims zijn in deze studie niet gekwantificeerd.

Sector	Belangrijkste groepen klimaatvariabelen	Urgentie (indicatief)	Mogelijke maatregelen, voorliggende strategische keuzes	Ruimtelijke impact (kwalitatief)
Natuur	Hitte en koude Nat en droog Kust en zee	Hoog (speelt al en wordt erger)	Duinen: - Al of niet doorgaan met het tegengaan van successie - Doelstellingen Natura2000 aanpassen of niet - Wijze van uitvoering van zandsuppleties en dynamisch kust- en duinbeheer; uitbouw van de kust of niet Binnenduintrand: - Realiseren van aaneengesloten natuur - Grondwaterstand laten oplopen of draineren Aquatische natuur: - Verbeteren waterkwaliteit - Aanleg natuurvriendelijke oevers	Sterk
Landbouw	Nat en droog Kust en zee	Hoog (speelt al en wordt erger)	Wateroverlast: - Bevorderen infiltratie en andere maatregelen op kavelniveau, vasthouden, liever dan richten op snel afvoeren - Aanleg aanvullende berging (met verdeling/aanvoermogelijkheden)	Sterk

Sector	Belangrijkste groepen klimaatvariabelen	Urgentie (indicatief)	Mogelijke maatregelen, voorliggende strategische keuzes	Ruimtelijke impact (kwalitatief)
			<ul style="list-style-type: none"> - Alleen waar knelpunt: verruiming waterlopen Watertekort: - Maatregelen op bedrijfsniveau (bodemstructuur- en infiltratieverbeterende maatregelen, waterconservering, druppelirrigatie, aanpassing teeltplan) vs. verruimen wateraanvoer i.c.m. berekening - Functieverandering - Uitbaten mogelijkheden lokale grondwaterberging Verziltting: - Aanpassen gewaskeuze vs. verruimen wateraanvoer voor doorspoeling en berekening, of zelfs ontziltting <p>Op termijn komen door verziltting en watertekorten omslagpunten in beeld en is de huidige praktijk van landgebruik en wateraanvoer wellicht niet te handhaven; het eerst in de bollenteelt.</p>	
Drinkwater	Nat en droog Kust en zee	Middel (toenemende druk)	<ul style="list-style-type: none"> - Aanpassingen leidingenstelsel - Vergroten zoetwaterbel duinen bij hogere grondwaterstanden - Uitbaten mogelijkheden lokale grondwaterberging - Ruimtereservering binnenduintrand voor eventuele verplaatsing van dicht bij de kust gelegen drinkwaterinfrastructuur landinwaarts, vanwege zeespiegelstijging - Aanleg buffervoorraden in het IJsselmeer 	Beperkt tot groot
Energie	Nat en droog	Laag	- Faciliteren koelwatervraag Petten; neemt waarschijnlijk af door autonome ontwikkelingen	Beperkt
Industrie	Nat en droog	Laag	- Faciliteren koelwatervraag; deze is in het studiegebied beperkt van omvang	Beperkt
Recreatie en toerisme	Hitte en koude Nat en droog Kust en zee	Hoog (speelt al en wordt erger)	- Faciliteren toenemende recreatiedruk, of proberen de druk te verplaatsen	Sterk
Infrastructuur	Hitte en koude Nat en droog Kust en zee Bodemdaling	Laag	- Aanleg- en onderhoudsmaatregelen klimaatrobuust vormgeven	Beperkt
Stedelijk	Hitte en koude Nat en droog Bodemdaling	Hoog (speelt al en wordt erger)	<ul style="list-style-type: none"> - Maatregelen eigenaren voor vasthouden en bergen - Grondwateroverlast binnenduintrand: draineren of faciliteren - Wateraanvoer naar stedelijk gebied in droge perioden - Aanleg bergingsgebieden rondom de stad 	Sterk

Bevindingen uit hoofdstuk 4 puntsgewijs:

- Dynamisch kustbeheer draagt bij aan het herstellen van de natuurlijke gradiënten langs de kust en aan het behoud van kwetsbare Natura-2000 habitattypen en rodelijstsoorten.
- Door vochtiger omstandigheden zal de duingroei versnellen, wat kan leiden tot sterkere natuur.
- Voor duinbeheerders zal het tegengaan van successie waarschijnlijk het belangrijkste aandachtspunt blijven.
- Wanneer in het laagveengebied grotere aaneengesloten natuurgebieden worden gerealiseerd, kan het waterbeheer beter op de natuur worden afgestemd en kan met

peilbeheer een hogere grondwaterstand worden gerealiseerd voor het behoud en herstel van kritische habitats als veenmosrietlanden en kunnen soorten als de roerdomp zich uitbreiden.

- Het verhogen van het waterpeil in de binnenduintrand kan bijdragen aan het op peil houden van de zoetwatervoorraad onder de duinen en biedt kansen voor synergie tussen waardevolle natte natuur en drinkwatervoorziening.
- Klimaatverandering kan leiden tot een ecologische achteruitgang wanneer de watertemperatuur te veel toeneemt.
- Maatregelen die de bollensector zelf kan nemen om klimaatverandering het hoofd te bieden zijn onder andere verminderen van uitspoeling van bestrijdingsmiddelen en nutriënten, verminderen van het watergebruik en vasthouden van water.
- Voor de Deltascenario's Warm en Stoom, met sterke klimaatverandering, wordt een toename van het verdampingstekort (het verschil tussen potentiële en actuele verdamping) berekend van jaarlijks gemiddeld meer dan 20 mm in het duingebied en in diverse poldergebieden, als gevolg van de toename in verdamping in de zomer. Voor de Deltascenario's Rust en Druk met gematigde klimaatverandering wordt een beperkte verandering van het verdampingstekort berekend.
- In de landbouwgebieden in Noord-Holland ten noorden van het Noordzeekanaal ontstaat de meeste wateroverlastschade door overstromingen vanuit het watersysteem (bij benadering 156 miljoen euro voor de komende 50 jaar). De schade door plasmvorming bedraagt bij benadering 65 miljoen euro voor de komende 50 jaar.
- Bredere duinen hebben een grotere zoetwaterbel. Dit geeft kansen voor drinkwaterwinning en natuur.
- Door gebruik te maken van ondergrondse opslag van drinkwater, een zogeheten Aquifer Storage and Recovery (ASR) systeem, beoogt PWN de beschikking te krijgen over een strategische voorraad voor terugwinning en directe distributie als drinkwater.
- Wonen en recreëren zullen met elkaar de strijd om de ruimte voeren, met als risico dat niet alleen de drukke gebieden drukker zullen worden, maar ook de rustige gebieden druk gaan worden. De Kop heeft te maken met demografische krimp en heeft daardoor een andere relatie met en mogelijk zelfs een afhankelijkheid van toerisme en toeristische voorzieningen.
- Een groei van de recreatiedruk met de verwachte 30% heeft grote ruimtelijke claims tot gevolg, voor o.a. verblijfs- en dagrecreatiefaciliteiten en infrastructuur.
- In het stedelijke gebied valt op dat van de drie dreigingen (wateroverlast, droogte, extreme hitte) droogte in alle gemeenten met afstand de grootste schade oplevert, veroorzaakt door het hoge bedrag voor de schadepost 'Fundering panden'.

Concluderend

De klimaatvariabelen met de hoogste urgentie vanwege hun gevolgen voor natuur, ruimtelijke kwaliteit en economie zijn zeespiegelstijging, extreme hitte, extreme neerslag en droogte. De maatregelen die kunnen worden genomen om de negatieve gevolgen hiervan te beperken gaan gepaard met ruimtelijke claims en moeten daarom deel uitmaken van een ruimtelijke verkenning. De aanbeveling is om in een eerste vervolgstap de omvang van de ruimtelijke claims, hun ontwikkeling in de tijd, en de termijn waarop ze gehonoreerd zullen moeten worden in overleg met betrokkenen te kwantificeren.

Enkele omslagpunten in het denken over klimaatverandering in het studiegebied dienen zich al aan, met name bij de bestrijding van wateroverlast, verziltingsbestrijding en natuurbeheer. De urgentie van deze problematiek zal zich doorzetten. Op termijn zullen ook strategische ruimtelijke keuzes nodig zijn in het waterveiligheidsbeheer, de landbouw, de recreatie en het stedelijk gebied. De aanbeveling is om in een tweede vervolgstap de voorliggende strategische keuzes met hun implicaties, samenhang en plaatsing in de tijd in overleg met betrokkenen in detail te beschrijven als onderbouwing van de toekomstige besluitvorming.

Niet alle gevolgen van klimaatverandering zijn negatief. Voor de recreatiesector en de landbouw zijn ook positieve effecten te verwachten, zoals hogere bezoekersaantallen, een langer groeiseizoen en andere mogelijkheden voor gewaskeuze.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Doel van de studie	15
2	Klimaatverandering in cijfers	17
2.1	Ter inleiding	17
2.2	Scenario's	18
2.2.1	Scenario's die in dit rapport worden gebruikt	18
2.2.2	De Deltascenario's toegelicht	19
2.3	Hitte en koude	22
2.4	Nat en droog	23
2.5	Wind	25
2.6	Sneeuw en hagel	26
2.7	Kust en zee	26
2.7.1	Relatieve zeespiegelstijging	26
2.7.2	Kustmorfologie	27
2.8	Bodemdaling	29
3	Doorwerking van klimaatverandering op het watersysteem	33
3.1	Hoogwaterveiligheid	35
3.1.1	Huidige waterveiligheidsnormen voor Noord-Holland	35
3.1.2	Landgebruik en hoogteligging	37
3.1.3	Gevoeligheid voor overstroming	38
3.1.4	Gevoeligheid bij overstromingen vanwege doorbraak van de primaire keringen	40
3.1.5	Gevoeligheid bij overstromingen vanwege doorbraak boezemkade	43
3.1.6	Mogelijke maatregelen	44
3.1.7	Er komt meer informatie beschikbaar	44
3.2	Wateroverlast	45
3.3	Verzilting	49
3.4	Waterbeschikbaarheid en watertekorten	55
3.4.1	De vraag naar zoet water	56
3.4.2	De buffervoorraad van zoet water	58
3.4.3	Oppervlaktewatertekort	59
3.4.4	Stresstest IJsselmeerbuffer	60
3.5	Grondwaterstanden	61
4	Doorwerking naar sectoren	65
4.1	Natuur	66
4.1.1	Kustnatuur	68
4.1.2	Terrestrische natuur	69
4.1.3	Aquatische natuur	70

4.1.4	Schade door natuurbranden	73
4.2	Landbouw	73
4.2.1	Beregend areaal	73
4.2.2	Verdampingstekort en droogterisico	74
4.2.3	Wateroverlast	77
4.2.4	Verzilting	78
4.2.5	Overige effecten	78
4.3	Drinkwatervoorziening	78
4.4	Energie	80
4.5	Industrie	80
4.6	Recreatie en toerisme	82
4.7	Transport en infrastructuur	83
4.7.1	Kritieke infrastructuur	84
4.7.2	Wegen	84
4.7.3	Vaarwegen	85
4.7.4	Spoorwegen	86
4.8	Gebouwde omgeving en ruimtelijke ordening	87
4.8.1	Klimaatvariabelen in stedelijk gebied	87
4.8.2	Gevolgen en kwetsbaarheid	88
4.8.3	Klimaatschade	92
4.8.4	Ruimte voor lokaal water	93
5	Bronnen	95

1 Doel van de studie

Aanleiding en doel

De Provincie Noord-Holland is in het najaar van 2021 gestart met een ruimtelijke verkenning voor de binnenduintrand Noord-Holland: welke opgaven spelen er, welke belangen, welke daarvan kunnen elkaar versterken (of juist helemaal niet), wat zijn mogelijke toekomstige beleidsalternatieven en wat zijn mogelijke transitiepaden. Ook wordt in beeld gebracht welke toekomstige ontwikkelingen eraan komen en hoe dit gecombineerd kan worden met de opgaven die er nu zijn. In deze ruimtelijke verkenning moeten klimaatverandering en de effecten daarvan goed worden meegenomen, maar daarvan ontbreekt een goed en actueel overzicht. Het doel van de voorliggende studie is om hierin te voorzien door getallen en beeldmateriaal over mogelijke klimaatverandering en de effecten daarvan in het gebied te verzamelen en overzichtelijk te presenteren.

Werkwijze

De verkenning is een technisch-inhoudelijke kwantitatieve en kwalitatieve analyse. Het gaat hierbij over klimaatvariabelen als zeespiegelstijging, temperatuur, gemiddelde weersomstandigheden en weersextremen. Tevens geeft de studie een indicatie wat de belangrijkste klimaateffecten zijn (zowel in positieve als in negatieve zin) op:

- Waterveiligheid;
- Wateroverlast;
- Zoetwaterbeschikbaarheid en wateraanvoermogelijkheden;
- Werking boezemsysteem en boezem- en grondwaterpeilen;
- Droogte en verdroging;
- Verzilting en waterkwaliteit;
- Bodemdaling.

Vervolgens worden doorvertalingen gemaakt naar de belangrijkste gebruiksfuncties in het gebied.

Uitgangspunt is dat gebruik wordt gemaakt van bestaande kennis en informatie en van lopende onderzoeken. De informatie wordt op een overzichtelijke manier voor het studiegebied samengebracht en gepresenteerd op de twee gevraagde schaalniveaus: lokaal en regionaal. Het zichtjaar van de studie is 2040/2050. Daarbij worden voor relevante parameters doorkijkjes gegeven naar 2100 en voor zeespiegelstijging nog verder, tot 2300.

Het studiegebied

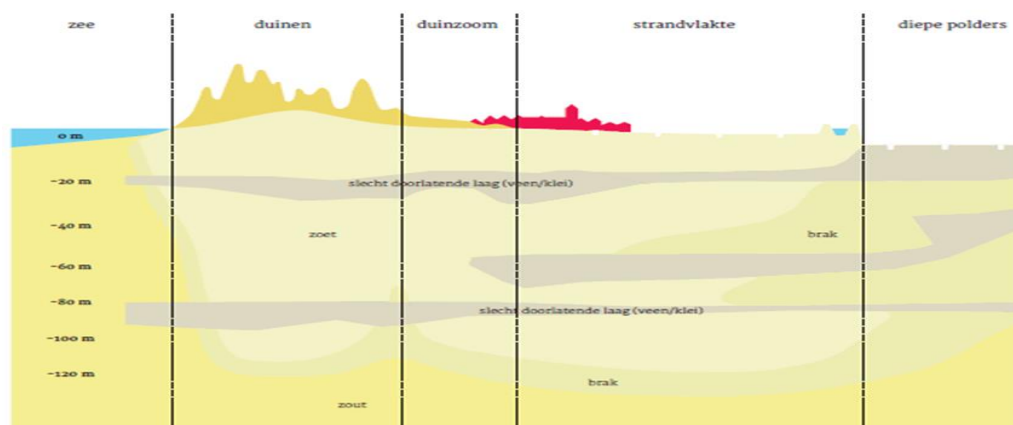
Het studiegebied is de binnenduintrand van Noord-Holland benoorden het Noordzeekanaal, het rood omkaderde gebied in Figuur 1-1. Het studiegebied omvat de compartimenten voorkust, kust, strand, duinen, binnenduinen en polders. Het Noord-Hollands kanaal, als belangrijk onderdeel van het Noord-Hollandse watersysteem, wordt hierin meegenomen.

Het gebied waarmee het studiegebied belangrijke uitwisseling heeft beslaat het deel van de provincie Noord-Holland tussen het Noordzeekanaal en Den Helder. Effecten zoals overstromingen, waterbeschikbaarheid en verzilting in het binnenduintrandgebied staan niet los van die in de rest van de provincie en worden over het gehele deel van de provincie ten noorden van het Noordzeekanaal gezien. Zo houdt het boezemsysteem niet op bij de rand van het studiegebied, en komt ook aangevoerd zoetwater voor een belangrijk deel van buiten het studiegebied (het IJsselmeer).



Figuur 1-1 Globale ruimtelijke afbakening van het studiegebied

Figuur 1-2 laat een typische west-oost dwarsdoorsnede zijn in het zuidelijke deel van het studiegebied. In het noordelijke deel ontbreken duinen of is de duinstrook heel smal.



Figuur 1-2 Schematische west-oost dwarsdoorsnede door het zuidelijke deel van het studiegebied. Bron: (H+N+S, 2020).

2 Klimaatverandering in cijfers

De kernboodschappen van dit hoofdstuk

Tabel 2.1 Klimaatgerelateerde drivers en klimaatvariabelen

Groep	Klimaatvariabele	Trends	Verwachtingen Urgentie indicatief aangegeven, oplopend van wit (neutraal) naar rood (urgent)
Hitte en koude	Gemiddelde oppervlaktetemperatuur	Geleidelijke stijging	Directe effecten kunnen kansen bieden voor bijv. toerisme, energieverbruik. Indirecte effecten (via neerslag, verdamping) zijn overwegend bedreigend en urgent.
	Extreme hitte	Toenemend	Toenemend
	Koudegolven	Afnemend	Verder afnemend; met name effecten op natuur
	Vorst	Afnemend	Verder afnemend; met name effecten op natuur
Nat en droog	Seizoensgemiddelde neerslag	Geleidelijke stijging	Verdere stijging
	Intensieve neerslag en wateroverlast	Duidelijke stijging	Verdere stijging
	Droogte	Toenemend vooral in het voorjaar	Verdere stijging
Wind	Gemiddelde windsnelheid	Geen duidelijk signaal	Geen veranderingen verwacht
	Zware stormen	Geen duidelijk signaal	Geen veranderingen verwacht
Sneeuw en hagel	Sneeuw	Afnemend	Verder afnemend; effecten daarvan niet onderzocht
	Hagel	Gelijkblijvend	Mogelijk toenemend; trend en effecten niet onderzocht
Kust en zee	Relatieve zeespiegelstijging	Stijgend	Versterkt stijgend
	Kustmorfologie en hoogwaterveiligheid	Op peil door suppletiebeleid	Handhaven suppletiebeleid; lange termijn wordt onderzocht
Bodemdaling	Veenoxidatie	Stijgend, maar belang in studiegebied beperkt	Doorgaand, maar in het studiegebied beperkte omvang
	Differentiële zetting en klink	Beperkt	In het studiegebied beperkt in ernst en omvang

2.1 Ter inleiding

Voor de selectie en ordening van de klimaatvariabelen volgen we de aanpak die is gekozen in de recente rapportage van IPCC-werkgroep I. Klimaatvariabelen (zogenaamde Climatic Impact-Drivers, CID's) zijn daar geordend in zeven groepen en 35 variabelen. De lijst van het IPCC is aangepast aan de omstandigheden in Noord-Holland. Voor het studiegebied onderscheiden we zes groepen: hitte en koude, nat en droog, wind, sneeuw en hagel, kust en zee, en bodem.

In die zes groepen vallen in totaal 15 variabelen, zoals aangegeven in Tabel 2.1¹. Deze variabelen komen aan de orde in de paragrafen 2.3 t/m 2.8. De meeste variabelen hebben in het recente verleden al veranderingen ondergaan en de verwachting is dat deze trends zullen doorzetten. De onzekerheid over de mate waarin dat gebeurt is vervat in klimaatscenario's, die worden besproken in paragraaf 2.2. Informatie over recente en verwachte veranderingen in de regio en context van deze studie is afgeleid van publicaties van o.a. het KNMI.

De klimaatvariabelen hebben in verschillende combinaties hun doorwerking naar het watersysteem (hoofdstuk 3), naar ecologie (marien, aquatisch en terrestrisch; hoofdstuk 4) en sociale economie (direct of via veranderingen in de hydrologische kringloop): landbouw, industrie, energie, drinkwater, wonen, transport en visserij (eveneens in hoofdstuk 4).

2.2 Scenario's

2.2.1 Scenario's die in dit rapport worden gebruikt

Om meer grip te krijgen op onzekere toekomstige klimaatontwikkelingen gebruiken veel van de in dit rapport aangehaalde publicaties scenario's. In de meeste gevallen zijn deze scenario's, als het gaat om klimaatverandering, gebaseerd op de KNMI-klimaatscenario's van 2014 (KNMI 2015). Voor sociaaleconomische ontwikkelingen worden vaak de scenario's van Welvaart en Leefomgeving 'Hoog' en 'Laag' (de WLO-scenario's) gebruikt (CPB en PBL, 2015).

De KNMI'14 scenario's en de WLO-scenario's zijn onder andere gebruikt in de vier Deltascenario's van het Deltaprogramma Zoetwater (Wolters, et al., 2018): Stoom, Warm, Druk en Rust (zie Figuur 2-1). Omdat deze scenario's in het voorliggende rapport veel gebruikt worden zijn ze in de volgende sectie in meer detail toegelicht.

De droogteschade in stedelijk gebied en in de landbouw die wordt gepresenteerd in de Klimaatschadeschatter is berekend voor het WH scenario (KNMI 2015) in 2050.

PWN heeft in het verleden gerekend aan de effecten van klimaatverandering op de hydrologie in het duingebied. De aannamen daarbij waren een toename van de neerslagsom van 8% en een zeespiegelstijging van 50 cm in 2085. Een verbeterd model, waarmee ook zoet-zoutdynamiek kan worden berekend, zal in 2023 operationeel worden (van Genuchten, mond.meded.). Voor analyses van de toekomstige watervraag gebruikt PWN het Deltascenario Stoom.

In paragraaf 2.7.1 zijn de recente kennisontwikkelingen omtrent zeespiegelstijging kort beschreven. Deze vormen aanleiding om voor dit aspect niet alleen de huidige maximale waarde van 85 cm te hanteren (in scenario's Warm en Stoom), maar ook hogere waarden. In dit rapport worden zoutberekeningen gepresenteerd die zijn uitgevoerd voor 3 meter zeespiegelstijging.

In 2023 zullen zowel de KNMI-scenario's als de WLO-scenario's worden bijgesteld. In het kielzog daarvan wordt ook gewerkt aan een herziening van de deltasceario's. De nieuwe KNMI-scenario's zullen een vergelijkbare structuur hebben als de KNMI'14 scenario's (een assenstelsel met een as voor verschillende mondiale opwarmingsniveaus in specifieke tijdsintervallen, en een andere as voor verschillende regionale hydrologische responsen).

¹ Kanttekening: een nadeel van deze indeling is dat het gedeeltelijk gaat om primaire drivers en gedeeltelijk om de gevolgen daarvan, die zelf weer driver zijn voor gevolgeffecten. Dit nadeel is niet te vermijden, welke indeling men ook kiest.

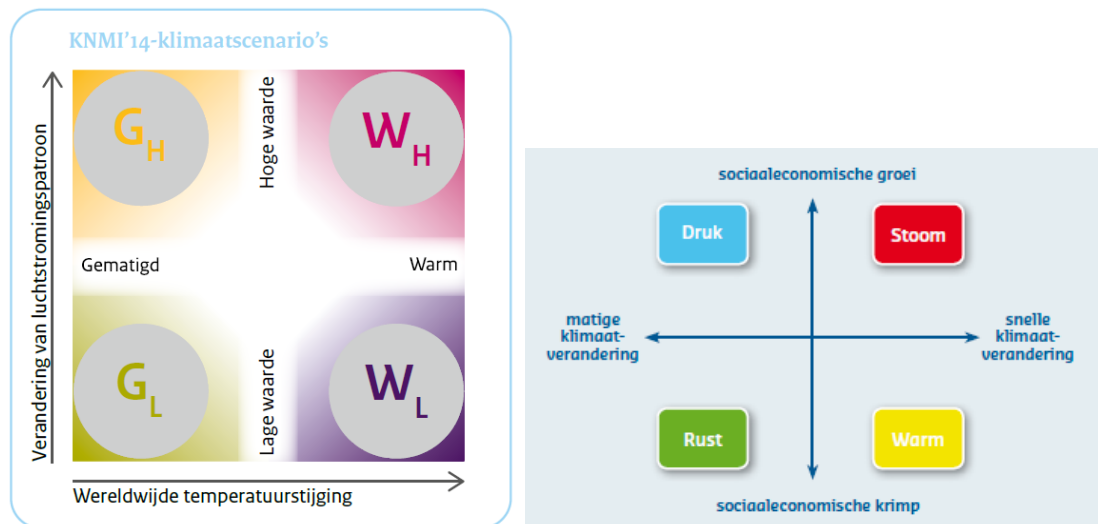
Er wordt echter een expliciete koppeling van die temperatuurniveaus aan sociaaleconomische (SSP/RCP) scenario's gemaakt, inclusief een scenario dat consistent is met een 2-graden Parijs-scenario (SSP1-2.6) en een high-end scenario (SSP5-8.5), die wellicht wat verder uit elkaar liggen dan de KNMI'14 scenario's. Een derde opwarmingsniveau wordt gekoppeld aan een tussengelegen scenario SSP2-4.5, maar deze wordt niet in het hoofdproduct opgenomen.

2.2.2 De Deltascenario's toegelicht

De vier Deltascenario's zijn ontwikkeld voor gebruik in het Deltaprogramma Zoetwater. Elk van de vier is een combinatie van een klimaatscenario (KNMI'14) en een sociaaleconomisch scenario (onder meer: landgebruik, bodemdaling, doorspoeling, onttrekkingen). Deze twee ontwikkelingen, klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkeling, zijn te beschouwen als autonoom: ze zijn sterk afhankelijk van externe krachten waarop Nederland weinig invloed heeft. De snelheid van deze ontwikkelingen is zeer onzeker, hoewel de richting (zeker voor klimaatverandering) wel bekend is. De Deltascenario's beschrijven zo goed mogelijk de plausibele bandbreedte in deze ontwikkelingen, in hun onderlinge samenhang en met hun mogelijke consequenties voor ruimtegebruik en watervraag. Hiermee spannen we de bandbreedte van de mogelijke toekomstige zoetwaterproblematiek op.

De KNMI'14 scenario's omvatten vier scenario's voor de toekomstige klimaatverandering: G_L , G_H , W_L en W_H (zie Figuur 2-1, links). In de Deltascenario's wordt het scenario's G_L als ondergrens (matige klimaatverandering) en het scenario W_H (sterke klimaatverandering) als bovengrens gebruikt (Figuur 2-1, rechts).

In 2017 zijn de Deltascenario's geactualiseerd met de meest recente sociaaleconomische scenario's (CPB, et al., 2015; Wolters, et al., 2018). Deze betreffen verhaallijnen per sector en aangepaste landgebruikskarten, ontwikkeld door PBL en de Vrije Universiteit Amsterdam (Claassens, et al., 2017). Vervolgens zijn deze verhaallijnen en kaarten door Deltares vertaald naar modelinvoer voor het Nationaal Water Model, ten behoeve van de knelpuntenanalyse zoetwater (Hunink, et al., 2018). Als referentiescenario, het vertrekpunt voor de verkenningen, is de stand van zaken en het beleid genomen zoals beschreven in de zogenaamde Referentie2017 (Mens, et al., 2019).



Figuur 2-1 Links: KNMI '14 scenario's (KNMI 2015), rechts: Deltascenario's (Wolters, et al., 2018)

Klimaatscenario's

Onderstaande figuur geeft de uitgangspunten van de vier klimaatscenario's wat betreft klimaat.

KLIMAAT	scenario	Zichtjaar 2050						Zichtjaar 2085			
		REF'17	Deltascenario's 2017 (KNMI14)					Deltascenario's 2017 (KNMI14)			
			DRUK	STOOM	RUST	WARM	DRUK-Parijs	DRUK	STOOM	RUST	WARM
	onderliggend KNMI-scenario		GL	WH	GL	WH	GL				
temperatuurstijging	oC	0	1	2	1	2	1	1,5	3,5	1,5	3,5
zeespiegelstijging	cm	0	15	40	15	40	15	25	80	25	80
jaarneerslagsom	mm	851	+4%	+5%	+4%	+5%	+4%	+5%	+7%	+5%	+7%
jaarsom pot. verdamping	mm	559	+3%	+7%	+3%	+7%	+3%	+3%	+10%	+3%	+10%
pot.verdamping zomer	mm	266	+4%	+11%	+4%	+11%	+4%	+4%	+15%	+4%	+15%
verandering gemiddelde	%	0	+5%	-20%	+5%	-20%	+5%	+5%	-30%	+5%	-30%
jaarlijkse laagste 7-daagse Rijnafvoer *											

Figuur 2-2 Kengetallen klimaat en veranderingen afvoerregimes Rijn en Maas per scenario voor de zichtjaren 2050 en 2085 (Wolters, et al., 2018)

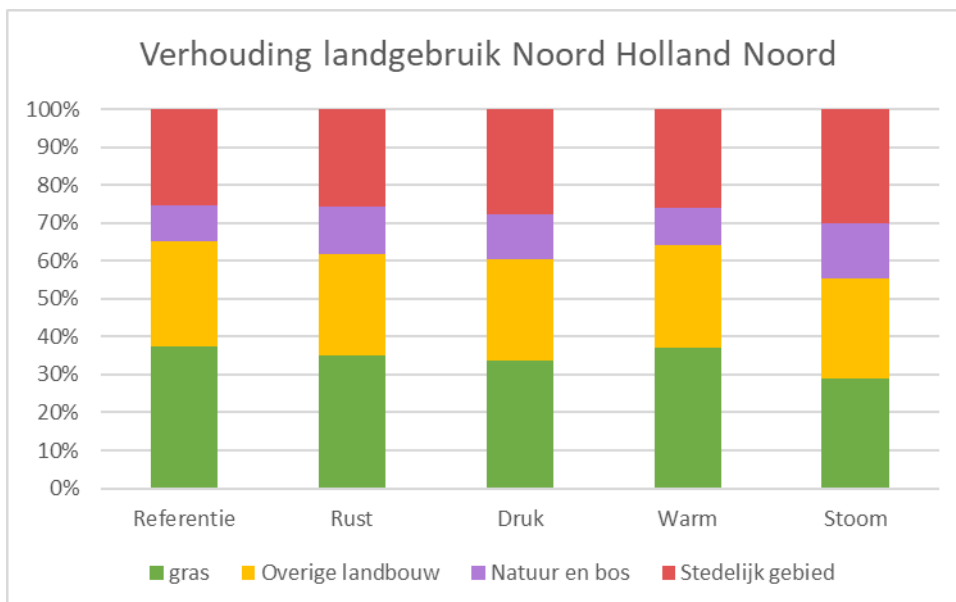
Sociaaleconomische scenario's

Onderstaande figuur geeft de uitgangspunten van de vier klimaatscenario's wat betreft sociaal-economie.

SOCIAAL-ECONOMIE		scenario	REF'17	Zichtjaar 2050				
onderliggend WLO-scenario				DRUK	STOOM	RUST	WARM	Parijs
			WLO-H	WLO-H	WLO-L	WLO-L	WLO-H	
aantal inwoners	miljoen	17	19	19	16	16	19	
omvang BBP	miljard €	600	1320	1320	940	940	1320	
economische groei	%/j		2	2	1	1	2	
stedelijk gebied	% opp	18	20	21	18	18	20	
natuur en recreatie	% opp	23	26	25	24	24	27	
landbouw	% opp	60	54	54	58	57	53	

Figuur 2-3 Kengetallen sociaal-economie per scenario voor het zichtjaar 2050 (Wolters, et al., 2018)

Bij de Deltascenario's zijn landgebruikskaarten ontwikkeld die zijn meegenomen in de modelberekeningen. Figuur 2-4 toont de hoe het landgebruik in Noord-Holland varieert tussen de verschillende Deltascenario's. Het areaal landbouw (gras en overige landbouw) neemt in alle scenario's af. De grootste afname is zichtbaar in het scenario Stoom. De afname van het landbouwareaal komt ten goede van de arealen natuur en stedelijk gebied. De grootste toename van het stedelijk gebied is te zien in het scenario Druk en Stoom.



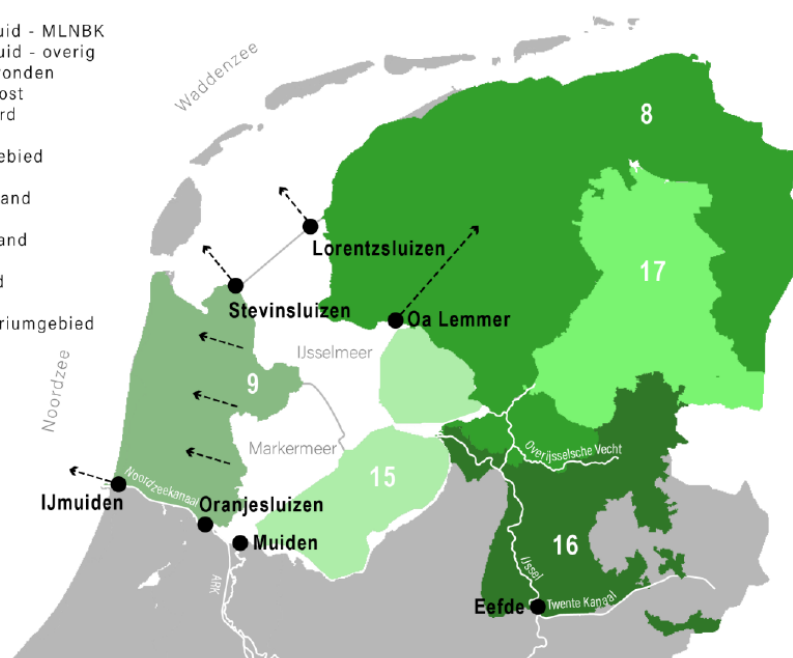
Figuur 2-4 Verdeling van de verschillende landgebruikstypes in Noord-Holland, in hoofdklassen voor de referentie en de verschillende Deltascenario's.

Regio-indeling

Voor de analyses van de knelpuntenanalyse is Nederland opgedeeld in 5 hoofdregio's en 17 deelregio's. De deelregio's in het voorzieningsgebied IJsselmeer zijn weergegeven in Figuur 2-5. Deelregio 9 (Noord-Holland Noord) komt overeen met het interessegebied van dit rapport.

IJsselmeergebied

- 1 Waddeneilanden
- 2 Hoge zandgronden Zuid - MLNBK
- 3 Hoge zandgronden Zuid - overig
- 4 Centrale hoge zandgronden
- 5 Hoge zandgronden Oost
- 6 Rivierengebied - Noord
- 7 Rivierengebied - Zuid
- 8 Fries-Gronings kustgebied
- 9 Noord-Holland Noord
- 10 Midden-West Nederland
- extern verzilt
- 11 Midden-West Nederland
- niet extern verzilt
- 12 Zuid-West Nederland
- met aanvoer
- 13 Zuid Westelijk estuariumgebied
- zonder aanvoer
- 14 Zuid-Limburg
- 15 IJsselmeerpolders
- 16 IJssel-Vecht delta
- 17 Drents Plateau

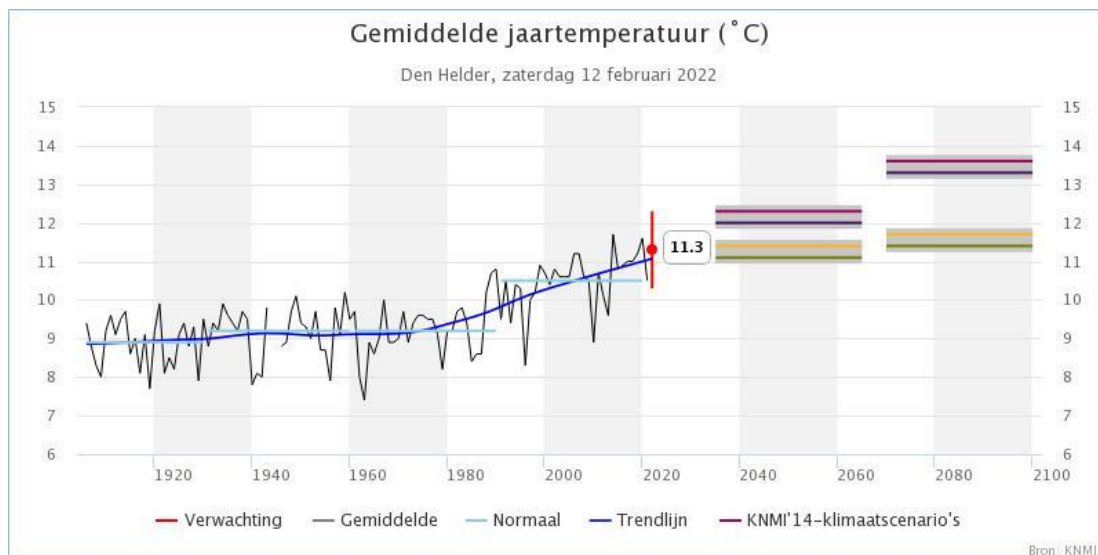


Figuur 2-5 Gebiedsschematisatie voorzieningsgebied IJsselmeer (een van de 5 hoofdregio's) en de onderverdeling naar deelregio's. Ook de belangrijkste wateraanvoerroutes zijn hierin weergegeven.

2.3 Hitte en koude

Gemiddelde oppervlaktetemperatuur

In Nederland is de jaargemiddelde temperatuur sinds de jaren '60 van de 20^e eeuw ongeveer twee keer zo snel gestegen als de mondiaal gemiddelde temperatuur. Volgens de KNMI'14 scenario's G_H en W_H (KNMI 2015) zal de temperatuur harder blijven stijgen dan wereldgemiddeld, volgens de G_L en W_L scenario's blijft de lokale stijging in de pas met de wereldgemiddelde stijging. De trend in de gemiddelde jaartemperatuur voor KNMI-station Den Helder is zichtbaar gemaakt Figuur 2-6.



Figuur 2-6 Gemiddelde jaartemperatuur Den Helder 1908-2021. Bron: <https://www.knmi.nl/klimaat> (februari 2022)

Regionale verschillen in het studiegebied worden vooral veroorzaakt door de ligging ten opzicht van zee (dichtbij zee is er gemiddeld wat minder bewolking en daardoor een wat hogere dagtemperatuur). Verder zullen verschillende landschapstypen een ander verloop hebben: droge en/of stedelijke gebieden warmen vooral overdag onder zomerse omstandigheden meer op dan landelijk gebied met veel begroeiing. Gedurende warme episoden zullen in de stad ook de nachten aanmerkelijk warmer worden dan de landelijke omgeving.

Extreme hitte en vorstdagen

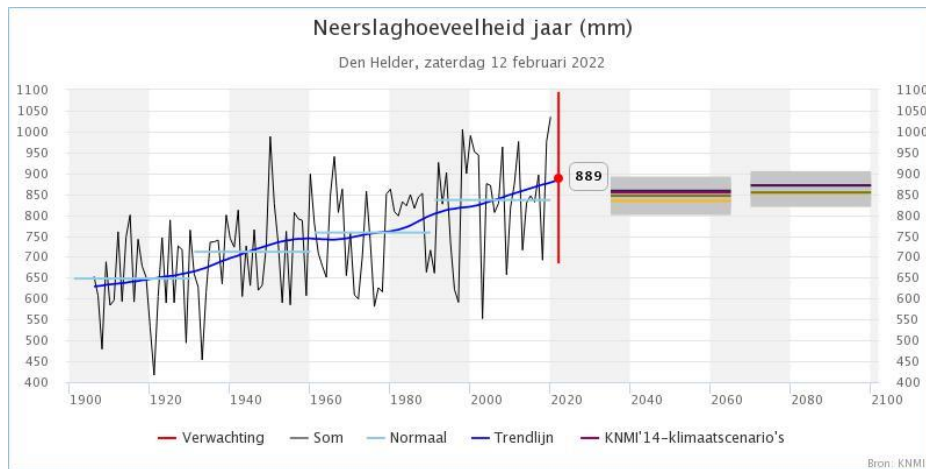
In het kustgebied is de opgetreden stijging van het aantal tropische dagen (KNMI en Lijn43, 2021) minder dan in het binnenland. Voor de regio Amsterdam zijn de KNMI'14 scenario's vertaald naar een verandering van het aantal zomerse dagen en vorstdagen². Het aantal zomerse dagen (dagtemperatuur > 25°) verdubbelt van 20 dagen nu naar 30 tot 50 dagen aan het eind van de eeuw (afhankelijk van het scenario). Het aantal vorstdagen van 48 dagen nu neemt af tot ongeveer 16 aan het eind van de eeuw. De gemiddeld warmste zomerdag stijgt harder dan de gemiddelde temperatuur, vooral in de G_H en W_H scenario's.

² klimaatverandering-mra.vormgeving.com

2.4 Nat en droog

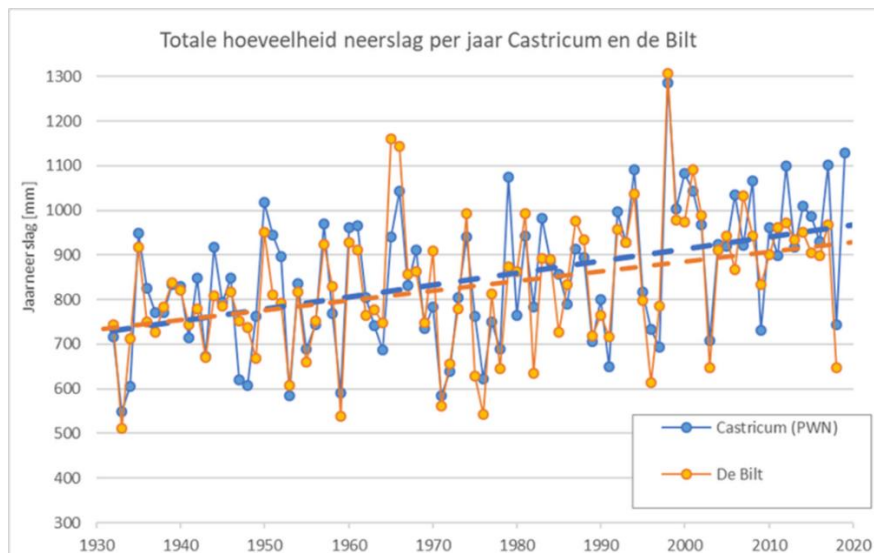
Gemiddelde neerslag

De neerslag varieert vrij sterk over de ruimte, maar neemt gemiddeld over het land duidelijk toe: van 780 mm/jaar rond de jaren 60 in de 20^e eeuw, tot 851 mm/jaar in het tijdvak 1991-2020, zo'n 10% in ca 30 jaar. De jaarlijkse neerslaghoeveelheden voor KNMI-station Den Helder zijn weergegeven in Figuur 2-7.



Figuur 2-7 Jaarneerslagsom te Den Helder, 1908-2021. Bron: <https://www.knmi.nl/klimaat> (februari 2022)

Binnen de provincie Noord-Holland valt er relatief veel neerslag boven de regio Amsterdam, en minder in het noordelijke deel van de provincie (KNMI et al., 2021). In de klimaatscenario's neemt de jaarneerslagsom toe met circa 5% per graad opwarming, vooral in de herfst en winter. Ook het aantal dagen met neerslag is gestegen. Er zijn geen duidelijke ruimtelijke patronen in de verandering van de gemiddelde neerslag. Het kusteffect³ lijkt er alleen in extreme neerslag te zijn.



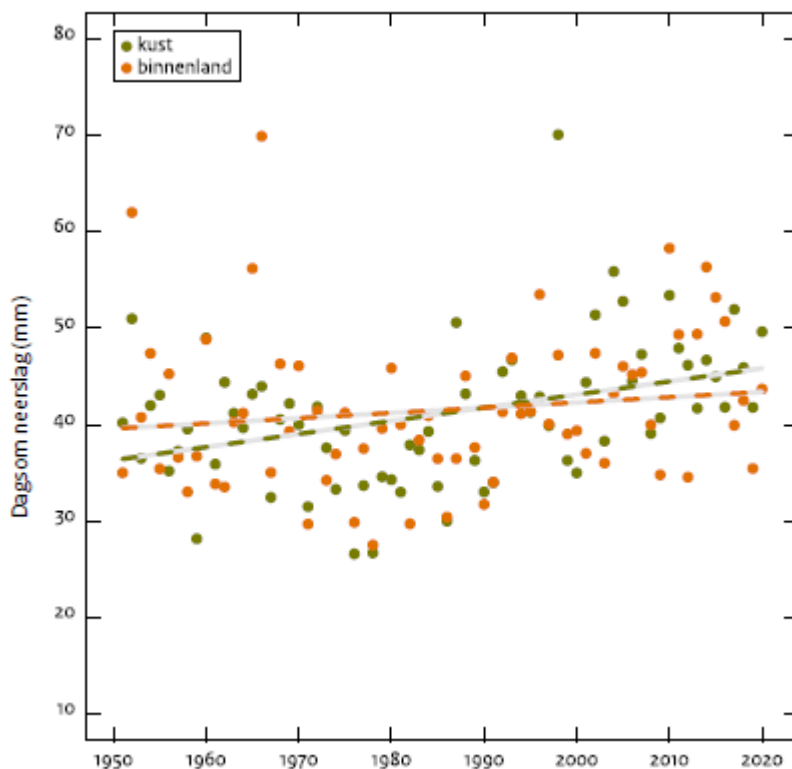
Figuur 2-8 Jaarneerslagsom te Castricum 1930-2020 vergeleken met die te De Bilt. Bron: Fonck en Borst, 2020

³ Hoe warmer het water van Noordzee en IJsselmeer, hoe meer water er verdampt. Bij een westenwind kan er daardoor in de herfstmaanden in de kuststrook meer neerslag vallen dan het landelijk gemiddelde. Dit is het kusteffect.

Het neerslagstation van PWN in het duin bij Castricum laat een duidelijke toename zien van de hoeveelheid jaarneerslag (van 720 naar 960 millimeter) over de gemeten periode 1932 tot en met 2019 (Figuur 2-8). Deze toename wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door een forse stijging in de hoeveelheid neerslag in de wintermaanden. Aan het begin van de meetperiode viel er in de zomer ongeveer evenveel regen als in de winter, tegenwoordig valt er in de winter ongeveer 100 millimeter meer regen dan in de zomermaanden (die ook nog iets natter zijn geworden) (Borst en Fonck, 2020).

Intensieve neerslag

Ook de statistiek van de extreme neerslag is duidelijk veranderd, met vooral een toename van het aantal winterse dagen met intense (>10 mm) neerslag in de afgelopen decennia. In de klimaatscenario's neemt de intensiteit van extreme buien toe, waarbij de regionale veranderingen in de pas lopen met het landelijk beeld. Frequentiecurven voor verschillende duur en herhalingstijden voor het huidig klimaat zijn in de Bosatlas van het Klimaat opgenomen (pagina 67). De huidige statistiek van het effect van opwarming op urneerslagsommen is gebaseerd op KNMI'14 maar zal in 2023 worden bijgesteld. In het Klimaatsignaal'21 worden eerdere bevindingen over de mate waarin extreme neerslag in kortdurende buien verandert met de omgevingstemperatuur wat gematigd (tot ca 8% per graad opwarming, terwijl er eerder sprake was van tot 14% per graad), maar worden ook aanwijzingen gepresenteerd die aangeven dat in de kustzone de stijging van extreme zomerneerslag wat groter is dan in de rest van het land, mogelijk als gevolg van opwarmend zeewater; zie Figuur 2-9.



Figuur 2-9 Dagelijkse neerslagextremen (herhalingstijd eens per vijf jaar, 8-8 uur dagelijkse neerslagsommen) geaggregeerd over stations in een kustzone van ongeveer 50 km breed, en die in het binnenland, voor het zomerhalfjaar (april tot en met september). De lijnen geven het resultaat van een trendanalyse over de hele periode. Extremen aan de kust nemen sneller toe dan die in het binnenland (KNMI, 2021).

Ook worden aanwijzingen gevonden dat buien die op warme dagen onder vochtige omstandigheden ontstaan en gewoonlijk beperkt zijn van omvang, zich in grotere complexen ontwikkelen. In de KNMI'23 scenario's zullen nieuwe statistieken van de invloed van opwarming op de neerslagverdeling over duur en intensiteit worden gepresenteerd.

Droogte

Niet alleen de jaarsom van de neerslag, ook het jaarlijks neerslagoverschot (neerslag minus referentieverdamping) heeft een grote ruimtelijke variatie binnen de provincie. In de regio rond Amsterdam blijft in het huidige klimaat (1991-2020) bijna drie keer zoveel neerslag over (tot 360 mm/jaar) als in de buurt van Den Helder (120-160 mm/jaar). Het noorden en een smalle kuststrook hebben ook de hoogste mediaanwaarde voor het maximale neerslagtekort aan het eind van het groeiseizoen (ca 200 mm) (KNMI et al., 2021). Er is over de periode tussen 1965 en 2020 een kleine toename in het neerslagtekort tijdens het groeiseizoen maar die is in de provincie niet significant, en deze is in deze regio dan ook niet duidelijk te koppelen aan klimaatverandering. Wel is er een significante toename van het neerslagtekort in de eerste lentemaanden van het groeiseizoen, april en mei (weliswaar van minder dan 1 mm per jaar).

Klimaatscenario's tonen een sterke toename van de verdamping in de zomer, met daarop een toename op de kans op droge perioden. In de gebieden waar rivier-afvoer een rol speelt in de regionale waterbalans, zoals het IJsselmeer, strekt deze invloed zich uit over het hele Rijnstroomgebied. De verandering van het neerslagtekort treden vooral op bij de G_H en W_H scenario's. Het gemiddelde maximale neerslagtekort neemt volgens KNMI'14 toe met 15 tot 20% per graad opwarming, en het tekort dat eens per 10 jaar wordt overschreden (nu landelijk gemiddeld zo'n 230 mm) in vergelijkbare mate.

Er zijn geen duidelijke aanwijzingen dat de weersystemen die zorgen voor droge perioden zich in clusters voordoen. Wel leidt de algemene opwarming en toename van de potentiële verdamping tot een verhoging van de kans dat er meerdere achtereenvolgende jaren een groot neerslagtekort vertonen.

Het Klimaat signaal'21 onderstreept het belang van een gecombineerde analyse van neerslag, verdamping en rivierafvoer, maar geeft hiervan geen kwantitatieve uitwerking.

2.5 Wind

Gemiddelde windsnelheid

Windpatronen kennen een grote ruimtelijke en temporele grilligheid. De gemiddelde windsnelheid boven het Noordzeegebied laat sinds de jaren '90 een zwakke afname zien, maar deze is niet duidelijk gerelateerd aan klimaatverandering. Ook de frequentie van het aantal stormen vertoont grote jaar-tot-jaar verschillen en fluctuaties over langere tijdschalen. Dit is onder andere zichtbaar in langzame en snelle fluctuaties van de gemiddelde zeespiegel langs de Nederlandse kust; zie (KNMI, 2021).

Stormen

Projecties uit de nieuwste generatie klimaatmodellen (CMIP6) laten voor West-Europa maar kleine veranderingen in het windklimaat zien en er zijn zowel gebieden met afname als met toename. Ondanks dat in deze nieuwe projecties de grootste toename van de maximale windsnelheid dicht bij de Nederlandse kust ligt, bedraagt dit verschil in maximale windsterkte tussen 1991-2020 en 2071-2100 slechts 0,35 m/s, ofwel 2% van het gemiddelde jaarmaximum. Deze verandering is niet significant. De toename komt voor rekening van wind uit zuidwestelijke richting. Voor de wateropzet langs de Nederlandse kust is dat echter minder relevant. Sterker nog, de gemodelleerde eens-per-jaar wateropzet in Hoek van Holland toont een afname over de historische periode, maar deze afname is niet significant.

Hetzelfde geldt voor de toekomstprojecties. Ondanks dat er geen effect van de wind is op de hoogste waterstanden, nemen de hoogste waterstanden in de toekomst wel toe als gevolg van zeespiegelstijging.

2.6 Sneeuw en hagel

Langs de kust zijn er 3 tot 6 dagen per jaar waarop een gesloten sneeuwdek van 1 cm of meer wordt gemeten. De kans op sneeuw neemt toe met de afstand tot de kust.

Hoewel de KNMI-scenario's geen expliciete waarden geven voor veranderingen in de kans op sneeuw is de verwachting dat deze kans zal afnemen. Door IPCC verzamelde waarnemingen op hoge breedtegraden en in berggebieden laten namelijk duidelijk zien dat sneeuwval afneemt bij een toename van de temperatuur en een afname van het aantal vorstdagen, zoals ook in Nederland wordt verwacht.

De kans op grote hagelstenen is in het binnenland groter dan in het studiegebied aan de kust, waar jaarlijks een paar procent kans op hagelstenen groter dan 1.5 cm is (KNMI et al., 2021). Intensivering van de extreme neerslag zoals weergegeven in de KNMI scenario's impliceert ook een vergroting van de kans op (grote) hagelstenen, maar kwantitatieve schattingen voor het studiegebied zijn hiervoor niet beschikbaar.

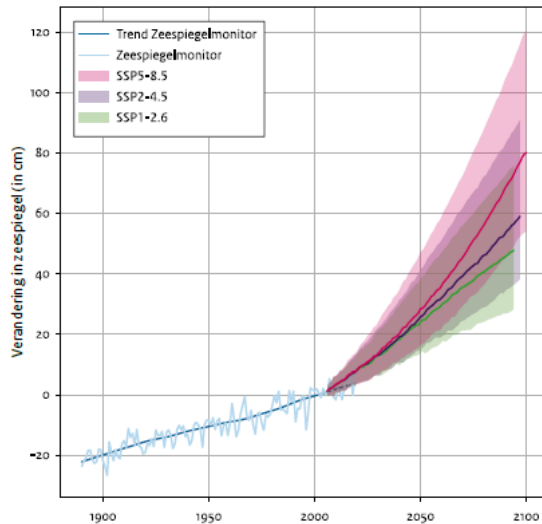
2.7 Kust en zee

2.7.1 Relatieve zeespiegelstijging

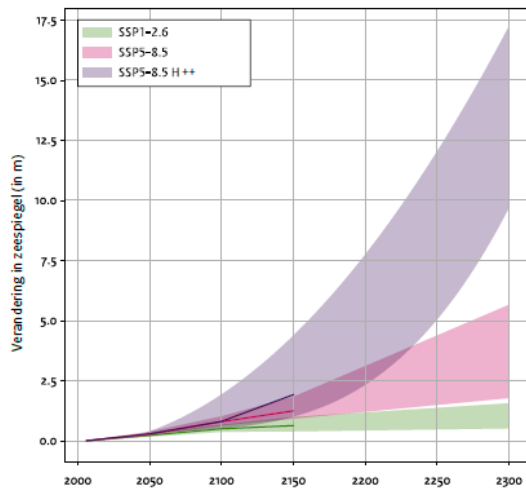
De scenario's voor zeespiegelstijging die momenteel in de Deltascenario's worden gebruikt (15/40 cm in 2050, 25/80 cm in 2085) zijn terug te voeren naar de KNMI'06 scenario's. Een kwantitatieve kleine bijstelling in de KNMI'14 scenario's is geen aanleiding geweest om de Deltascenario's op dit punt te actualiseren: de bijstelling bedroeg minder dan 10 cm voor de gehanteerde tijdvakken.

Toch zijn er veel recente kennisontwikkelingen omtrent zeespiegelstijging. Met name inzicht in de mogelijk beperkte stabiliteit van de grote ijskappen op Antarctica en Groenland hebben ook in het recente IPCC-rapport aanleiding gegeven om ook "low likelihood/high impact" scenario's te ontwikkelen, die op kunnen lopen tot 2 m stijging in 2100 en nog eeuwen doorgaande stijging daarna. Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is specifiek gericht op de verkenning van de houdbaarheid van de huidige beschermingsstrategieën voor dergelijke scenario's, waarbij ook rekening wordt gehouden met de mate waarin de tijd die nodig is voor aanpassing van die strategieën consistent is met de snelheid waarmee de zeespiegel kan stijgen.

Ook wordt de bodemdaling – van belang voor de bepaling van de relatieve zeespiegelstijging – beter in kaart gebracht. Lokale bodemdaling door inklinking van veen draagt niet bij aan de relatieve zeespiegelstijging, omdat de peilbuizen waarmee die wordt vastgesteld zijn verankerd in de pleistocene zandlaag (zie ook paragraaf 2.8).



Figuur 2-10 Zeespiegel aan de Nederlandse kust zoals waargenomen en volgens de nieuwe, indicatieve zeespiegelprojecties. De getrokken lijnen in groen, paars, rood geven de mediaan aan van die projecties, het gekleurde gebied de 90%-bandbreedte. Het nulpunt van de mediaanlijnen ligt bij het jaar 2005; de bandbreedte in 2005 komt overeen met de natuurlijke variabiliteit. Bron: KNMI 2021.



Figuur 2-11 Zeespiegelscenario's voor de Nederlands kust tot 2300 voor de SSP1-2.6 en SSP5-8.5 scenario's en SSP5-8.5 met het meenemen van onzekere ijskap-processen zoals het instorten van ijskliffen aan de rand van Antarctica (SSP5-8.5 H++). De mediaanlijnen van die drie scenario's kunnen slechts tot 2150 worden berekend. De aangegeven bandbreedte in kleur komt overeen met de waarschijnlijke bandbreedte van 67% (KNMI, 2021).

2.7.2 Kustmorfologie

Kustonderhoud

Het Nederlandse kustbeleid is gebaseerd op bouwen met de natuur door zandsuppleties. Er wordt zoveel zand naar de kust gebracht als nodig is om lokaal de erosie te bestrijden. Dit zand verspreidt zich vervolgens zodanig langs en dwars op de kust dat op een langere tijdschaal (meerdere tot tientallen jaren) het kustprofiel gelijk blijft. De hele bodem is dan ongeveer net zo veel hoger komen te liggen als de zeespiegel is gestegen. De kustlijnzorg is in Nederland op deze flexibel en adaptief. Jaarlijks wordt de ligging opgemeten en op basis daarvan wordt een suppletieprogramma opgesteld. De omvang van het suppletieprogramma groeit in principe mee met de zeespiegelstijging.

De lokale behoefte aan sediment (overschrijdingen van de basiskustlijn⁴) bepaalt de verdeling over Nederland van het jaarlijkse 'suppletiebudget'. Op www.rijkswaterstaat.nl/kustonderhoud is het vigerende programma te vinden. De verwachting is dat tot zeker 2035 dit de praktijk van het kustlijnonderhoud blijft (zie onder meer (Rijkswaterstaat, 2020)).

Voor de gehele Nederlandse kust zijn overzichtsdocumenten beschikbaar, de zogenaamde beheerbibliotheken. Voor de Noord-Hollandse kust is (Mastbergen, et al., 2018) te raadplegen. Een recente rapportage die overzicht geeft van uitgevoerde en verwachte suppleties voor Noord-Holland ten noorden van het Noordzeekanaal, voor de komende 15 jaar op basis van de huidige praktijk, is (Röbke, et al., 2021). Deze beschrijft ook het systeemgedrag van deze kustvakken.

De morfologische veranderingen die worden veroorzaakt door suppleties zijn goed onderzocht. Deltares heeft vele suppleties in samenwerking met Rijkswaterstaat geëvalueerd. In de zone waarin gesuppleerd wordt (de 'actieve' zone tot -8 m) spelen zowel de morfologische veranderingen door de suppleties als de veranderingen door zeespiegelstijging een rol, maar de morfologische veranderingen door suppleties zijn het grootst. Dat zal zeer waarschijnlijk nog steeds gelden als de zeespiegelstijging sneller verloopt dan nu, aangezien dan ook de hoeveelheden gesuppleerd zand zullen toenemen. Gezien het voorafgaande speelt dit pas op zijn vroegst na 2035.

Ontwikkelingen in planning en ontwerp van suppleties

Het is niet te voorspellen of er veranderingen optreden in het beleid ten aanzien van ontwerpen van suppleties en het kustonderhoud, in het bijzonder op lange termijn (na 2035). Als er bijv. in de toekomst meer met systeemsuppleties (die zo groot zijn dat ze de waterbeweging en grootschalige morfologie langdurig beïnvloeden, zoals de Zandmotor) gewerkt gaat worden zullen er meer morfologische veranderingen worden geïnduceerd. De aanleg van de Hondsbossche duinen is hier ook een voorbeeld van. Evenzo is moeilijk te voorspellen hoe, bij snellere stijging van de zeespiegel en wellicht daardoor ook sneller optredende erosie, de suppleties worden vormgegeven. Het zal kunnen variëren tussen vaker suppleren of grotere suppleties. De eerste optie zal meer vragen opleveren over de ecologische impact, de tweede optie vraagt meer inzicht op de verspreiding van het zand op middellange termijn.

Het is mogelijk dat er bij snellere zeespiegelstijging veranderingen gaan optreden in de grootschalige waterbeweging, de resttransporten en het netto noord-zuid transport van zand. Dit zal in het bijzonder effect hebben op het diepere deel van de kust (diepe vooroever, van -8 tot -20 m). Hiernaar zal in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, onderdeel Zandige Kust, onderzoek worden gedaan. Dit programma is begin 2022 gestart en bepaalt nu zijn prioriteiten.

Stormen en kustmorfologie

Bij het voorafgaande is geen aandacht besteed aan eventuele veranderingen in het wind- en stormklimaat. Voor de langjarige ontwikkeling van de kustlijn ten opzichte van de Basiskustlijn zal dit beperkte invloed hebben. Deze volgt de ontwikkeling van de actieve zone. Deze blijft op die tijdschaal gedomineerd worden door de planning en het ontwerp van

⁴ De Basiskustlijn (BKL) wordt beleidsmatig vastgesteld. De eerste keer was dit in 1990 op de plaats van de toenmalige kustlijn. Daarna is de BKL een aantal malen herzien door gerichte verleggingen, onder meer na versterkingen. Vigerend is de BKL 2017. In 2022 loopt weer een herziening. Op plaatsen waar de natuurfuncties prevaleert geldt soms de afspraak de kustlijn niet te handhaven na overschrijdingen van de BKL. Dit komt vooral voor bij Waddeneilanden. Zie voor ligging BKL en trends van de kustlijn: (Rijkswaterstaat, 2021).

de suppleties. Een storm is een kortdurend verschijnsel. Na afloop ervan herverdeelt het zand zich weer.

Als er snellere lokale erosie is zal dit in het suppletieprogramma gevolgen hebben. Uitzonderingen hierop zijn mogelijk in getijsystemen⁵, maar die vallen buiten het onderzoeksgebied.

Een enkele storm zal wel tijdelijk (weken tot maanden) effect kunnen hebben op gebruiksfuncties, bijv. door veranderde strandbreedte en tijdelijke effecten op leefgebieden voor plant en dier.

Kustonderhoud en hoogwaterveiligheid

Zoals hierboven omschreven geldt voor de zandige kust dat de sterkte van de kerende duinen op peil blijft bij het uitvoeren van de kustlijnzorg (voor de zeedijken geldt deze aanname overigens ook). De duinen groeien, net als strand en vooroever, mee met de zeespiegel, voornamelijk de waterkerende zeereep. Op veel plaatsen langs de Hollandse kust is in de afgelopen jaren de duinenrij door de uitgevoerde suppleties zeewaarts uitgebreid en daarmee robuuster geworden tegen stormen.

Voor een duurzame veiligheid bij een veel hogere zeespiegel is het beter als een breder duingebied meegroeit met de zeespiegel. Dit is een steeds belangrijker wordend argument om naast dynamisch kustbeheer ook dynamisch duinbeheer uit te voeren, waarin verstuiving meer wordt toegelaten. De belangrijkste reden voor dynamisch duinbeheer is momenteel de natuurwinst die ermee bereikt wordt. Zie voor meer informatie (De Groen, et al., 2019) en <https://www.natuurlijkveilig.nl/over-natuurlijk-veilig/onderzoek-duinen>.

Wanneer het stormklimaat niet wezenlijk verandert (en er zijn geen aanwijzingen dat dat gaat gebeuren; zie paragraaf 2.5) van het huidige zijn extra versterkingen van de zeereep, bovenop de zandsuppleties voor het kustlijnonderhoud, niet nodig. Mocht dit uit metingen wel het geval blijken dan kan besloten worden tot extra versterkingen in de vorm van zandsuppleties of integrale ontwikkelingstrajecten zoals gebeurd is met de Zwakke Schakels.

2.8 Bodemdaling

Bodemdaling in Nederland varieert ruimtelijk aanzienlijk. Er zijn verschillende oorzaken van bodemdaling. In de ondiepe ondergrond gaat het hierbij onder andere om het afbreken van veen (oxidatie van veen) als gevolg van ontwatering van veengebieden en het samendrukken van klei- en veengrond onder invloed van belasting. De snelheid van bodemdaling kan worden beïnvloed door externe factoren. Zo kan klimaatopwarming bodemdaling versnellen doordat grondwaterstanden verder uitzakken bij droogte en als gevolg van snellere oxidatie van veen bij hogere temperaturen. Door de bodemdaling kan schade ontstaan aan infrastructuur of bebouwing, bijvoorbeeld bij ongelijkmatige daling op de overgang van twee grondsoorten, zoals van veen- naar zandgrond.

Bodemdaling versterkt in een aantal gevallen de gevolgen van het opwarmen van de aarde. Zo kunnen de gevolgen van zeespiegelstijging groter worden doordat tegelijkertijd het maaiveld door bodemdaling lager komt te liggen. Ook kan de zoetwaterbeschikbaarheid minder worden door een verhoogde kwelflux, wat leidt tot verzilting.

Deze analyse is onder andere gebaseerd op de bodemdalingskaart, die de bodemdaling berekent voor verschillende scenario's (Erkens, et al., 2021). Figuur 2-13 toont tot 2100 het

⁵ Bijvoorbeeld veranderingen in de importen via zeegaten en liggingen van geulen.

scenario 'hoog', wat representatief is voor een situatie met peilindexatie en hogere temperaturen door sterke klimaatverandering.

Deze bodemdalingskaart is onder meer gebaseerd op ondergrondmodellen en een GLG-kaart (gemiddeld laagste grondwaterstand), waarbij afwijkingen in deze kaarten zich vertalen in de resultaten van de bodemdalingskaart, wat de oorzaak kan zijn voor extreme afwijkingen.

Bodemdaling door het ontwateren of belasten van slappe grond (klei- en veengronden) is een van de meest voorkomende vormen van bodemdaling. In het onderzoeksgebied zijn echter geen veengebieden van grote omvang aanwezig (Brouwer et al., 2021), maar zijn er slechts lokaal kleine en dunne pakketten te vinden in de ondergrond (Figuur 2-12). Op de bodemdalingskaart (Figuur 2-13) is te zien dat deze lokale veenpakketten wel de oorzaak kunnen zijn van beperkte tot relatief sterke bodemdaling, bijvoorbeeld ten zuiden van Bergen.

Een groot gedeelte van het onderzoeksgebied bestaat uit zand of kleiige droogmakerijen, die beide grotendeels ook een zandige ondergrond hebben, die gewoonlijk weinig bodembeweging kent⁶. De kleiige gronden kunnen wel gevoelig zijn voor daling tijdens langere perioden van droogte, als er krimp optreedt door uitdroging. Dit kan een permanente daling als gevolg hebben, en daarbij schade veroorzaken. Extremere droogte en een te lage waterbeschikbaarheid om grondwaterstanden en bodemvocht op peil te houden kan dit proces versnellen. Dit zou voornamelijk van toepassing zijn voor de kleipakketten aan het oppervlakte, bijvoorbeeld in de droogmakerijen in het noordoosten van het onderzoeksgebied (Figuur 2-13).

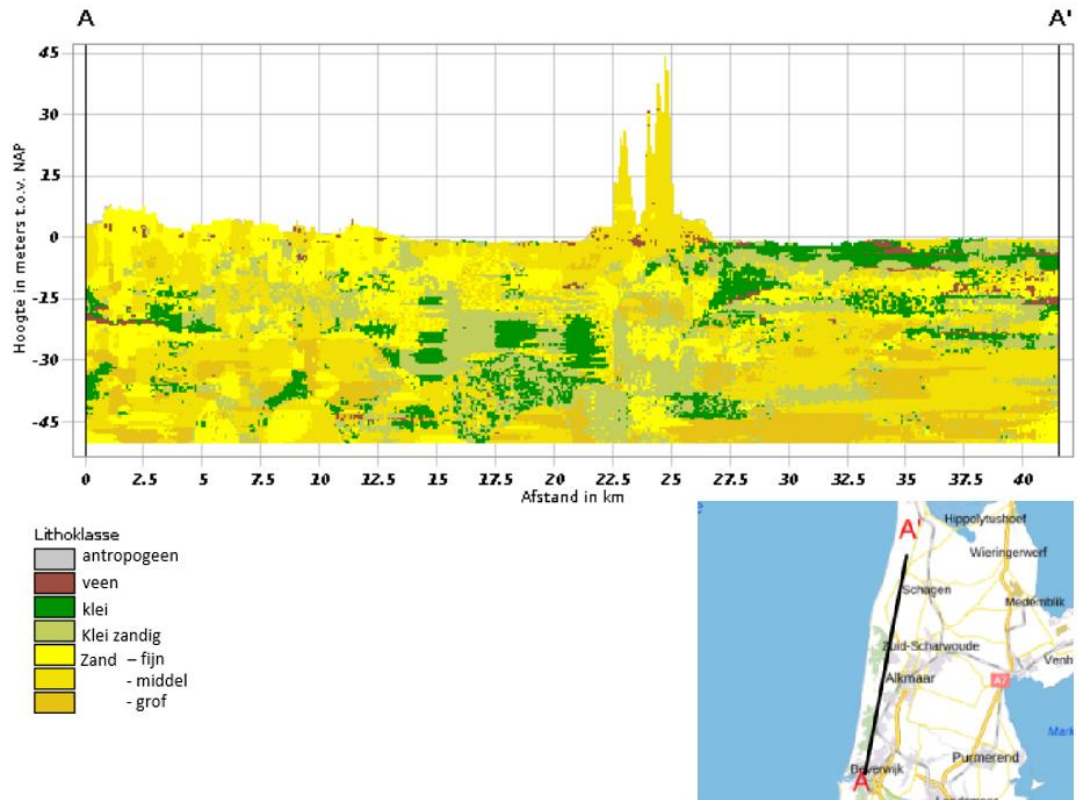
Andere oorzaken van bodemdaling zijn processen in de diepe ondergrond. Natuurlijke diepe bodemdaling door tektoniek en isostasie in het onderzoeksgebied dragen bij aan daling in een orde grootte van 0.1 mm per jaar (Kooi et al., 1998). In de berekeningen van de relatieve zeespiegelstijging van het IPCC en de zoutberekeningen voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (zie paragraaf 3.3) is met deze 'diepe' bodemdaling al rekening gehouden. De gasopslag bij de gasvelden Bergen kan ook een oorzaak van bodemdaling of zelfs bodemstijging zijn. De mate van bodembeweging is afhankelijk van de grootte van het veld, de eigenschappen van de ondergrond en de mate van gasopslag⁷. Dit zijn echter geen klimaateffecten.

Het effect van klimaatopwarming op bodemdaling in het studiegebied is beperkt, vanwege het ontbreken van grote veengebieden. De kans op permanente krimp bij droogte neemt wel toe door klimaatopwarming en dit kan tot extra bodemdaling zorgen in de lokale veenpakketten en kleiige droogmakerijen in het onderzoeksgebied.

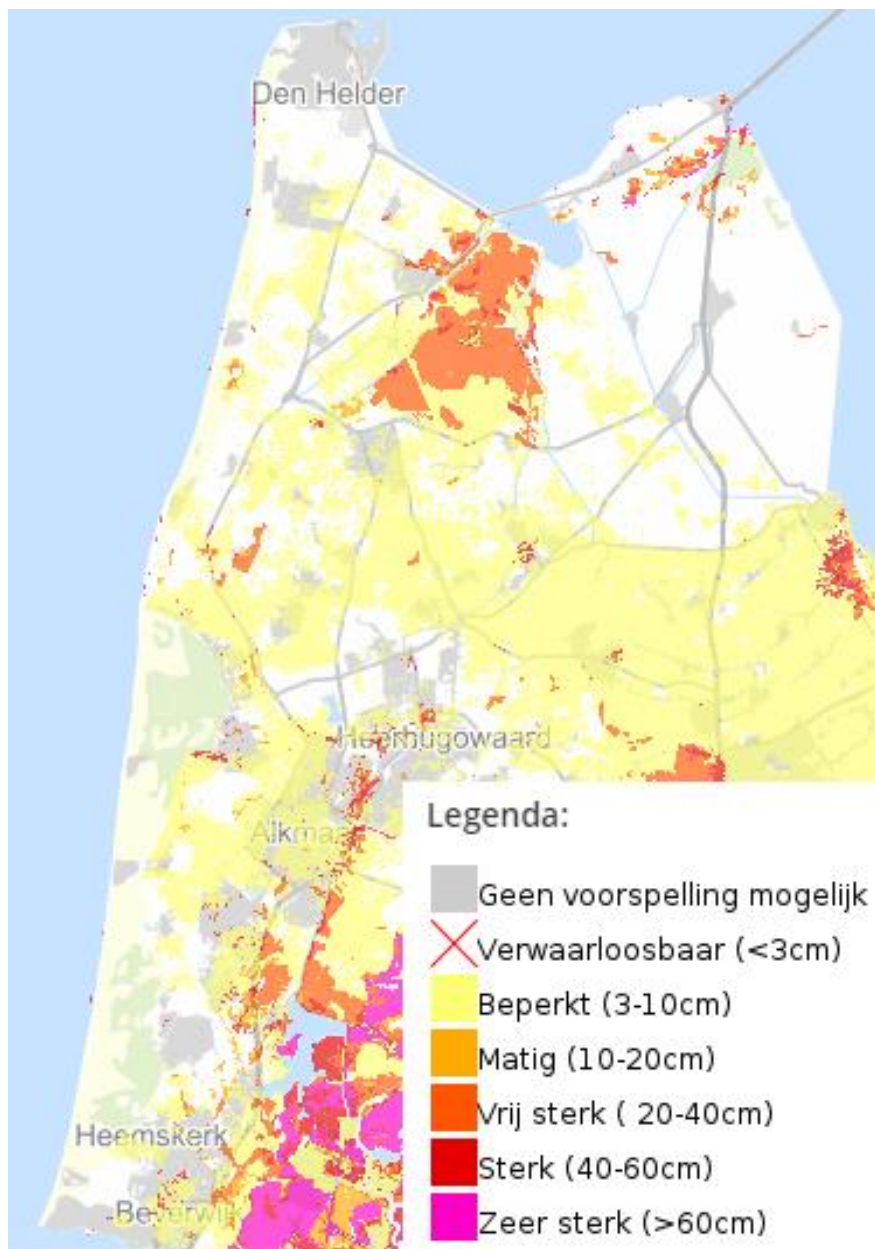
⁶ <https://www.stowa.nl/deltafacts/ruimtelijke-adaptatie/adaptief-deltamanagement/bodemdaling>

⁷ <https://nl.taqa.com/wp-content/uploads/sites/23/2021/04/PDF-6-Bodembewegingsanalyse-Bergen-II-GSB-en-PGI.pdf>

Verticale Doorsnede BRO GeoTOP v1.4



Figuur 2-12 Doorsnede van de opbouw van de ondergrond uit GeoTOP. Zand is de meest voorkomende lithoklasse, waardoor bodemdaling beperkt is in deze regio. Dunne veenpakketten komen slecht lokaal voor. Kleiige droogmakerijen zijn vooral in het noorden van het onderzoeksgebied te vinden. Bron: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>



Figuur 2-13 Bodemdalingskaart tot 2100 voor Noord-Holland voor het scenario 'hoog', wat representatief is voor een situatie met peilindexatie en sterke klimaatverandering (Erkens, et al., 2021). In de binnenduinrand is in sommige regio's kans op beperkte bodemdaling, met lokaal soms kans op vrij sterke bodemdaling. Bron: <https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/>.

3 Doorwerking van klimaatverandering op het watersysteem

De kernboodschappen van dit hoofdstuk

Hoogwaterveiligheid:

- De flexibiliteit van de maatregel zandsuppleties is erg groot. Als het nodig is, is het mogelijk om zelfs binnen het kustfundament zand te gaan verplaatsen; dat is technisch goed vol te houden.
- Vanwege de grote flexibiliteit van zandsuppletie komt het einde van de houdbaarheid van deze maatregel pas in zicht bij een zeespiegelstijging van 5 meter of meer. Die wordt op zijn vroegst na 2150 verwacht.
- Ruimtelijke claims zullen nodig zijn voor de handhaving van de veiligheidsnormen, om versterking van duinen, primaire en secundaire keringen mogelijk te maken.
- Met gerichte gebiedsontwikkeling en -inrichting in het binnenduinrandgebied kan de kwetsbaarheid verlaagd worden en het gebied robuuster gemaakt tegen overstromingen.
- Extreme zeewaterstanden zoals we ze nu kennen zullen bij een sterk stijgende zeespiegel veel vaker gaan voorkomen.
- Volgens een snelle analyse op basis van cijfermateriaal uit LIWO is de relatieve toename van de schade bij een overstroming vanuit zee bij verschillende terugkeerfrequenties beperkt. De schade bij overstroming vanuit het Markermeer neemt, ondanks dat het Markermeer een peilbeheerst systeem is, zeer sterk toe onder extremere omstandigheden.
- Indicaties over de kwetsbaarheid bij hogere waterstanden voor doorbraken uit regionale keringen konden niet worden afgeleid, omdat de schadecijfers niet online beschikbaar zijn gemaakt. Het zou interessant zijn om dit te onderzoeken.

Wateroverlast:

- Wateroverlast is een urgent aandachtsveld. Het doet zich in toenemende mate voor en heeft in 2021 gezorgd voor maatschappelijke onrust naar aanleiding van de extreme neerslag van juni.
- Ruimtelijke claims voor de bestrijding van wateroverlast zullen nodig zijn voor maatregelen om water vast te houden (met name in stedelijk gebied), voor bergingsgebieden, voor plaatselijke verruiming van het afvoerstelsel en voor de aanleg van aanvullende infrastructuur om water van kwetsbare naar minder kwetsbare gebieden te voeren.
- Bij extreme neerslaggebeurtenissen, zoals in juni 2021 rond Alkmaar, zal hoe dan ook een tijdelijke ruimtelijke claim gelegd worden voor waterberging. Het neerslagoverschot kan niet snel genoeg kan worden afgevoerd of in de bodem dringen, en leidt dan in het watersysteem tot een peilstijging. De meest kwetsbare plekken die dan tijdelijk als eerste en het langste onder water staan zijn bekend. De ruimteclaim voor de toekomst houdt in dat het grondgebruik op die plekken zo wordt gekozen dat het kan omgaan met tijdelijke natte omstandigheden.
- Aanleg van bergingsgebieden is hooguit een deel van de oplossing. De efficiëntste maatregelen liggen in ruimtelijke aanpassingen.
- Terreineigenaren kunnen maatregelen nemen om de infiltratie van neerslag in de bodem en de berging in de bodem te bevorderen, onder andere door structuurbederf (verslemping, vorming ploegzool) tegen te gaan.
- Twee omslagpunten in het denken over wateroverlast zijn al actueel:
 - Voor de aanpak van wateroverlast is gezamenlijke inzet nodig van alle betrokken partijen. In dat proces verschuift de nadruk van het handhaven van normen naar het vinden van een gezamenlijke oplossing waarin terreineigenaren medeverantwoordelijk zijn voor maatregelen. De verantwoordelijkheid verschuift dan van waterschappen naar de algemene democratie: goed RO-beleid.

- Maar ook met zo'n aanpak zullen er buien optreden waarbij forse schade niet voorkomen kan worden. Een goede organisatie en voorbereiding, waar bewustwording deel van uitmaakt, kan helpen om te voorkomen dat overlast overgaat in een ramp.

Verziltting:

- Brak grondwater verzilt het oppervlaktewater, waardoor dit water ongeschikt wordt voor beregening. Ook kan brak grondwater in droge zomers tot in de wortelzone reiken en daar schade aan landbouwgewassen veroorzaken.
- In droge zomers treden nu reeds verziltingsproblemen op.
- Door een stijgende zeespiegel neemt de druk in het grondwater toe, tot zo'n 10 km vanaf de kustlijn. Deze toenemende druk leidt tot een toename van de brakke kwel, met name in de kop van Noord-Holland. De kweltoename heeft verder verziltende sloten en dunner wordende regenwaterlenzen tot gevolg. Bovendien zorgt de kweltoename voor een sneller opwaarts stromen van dieper, zouter grondwater, met op langere termijn extra verziltting tot gevolg, en in combinatie met een breder duingebied mogelijk ook tot een landinwaartse verschuiving van kwelstromen.
- Omslagpunten zijn te verwachten in technische zin (capaciteit van het wateraanvoersysteem, inclusief buffer Markermeer, wordt beperkend) en in landgebruik (reductie watervragend areaal of aanpassingen in het teeltplan worden nodig). Een tijdpad voor deze omslagpunten is nog niet te geven.
- Door ontwatering wordt een eventuele toename in winterneerslag snel afgevoerd en komt deze niet ten goede aan het grondwater. Hier ligt een belangrijk aandachtspunt in de gebieden waar de ligging van het grensvlak tussen zoet en zout grondwater ondiep ligt.
- Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is uitgerekend hoeveel doorspoeling nodig is om de huidige chlorideconcentratie te handhaven bij een toenemende zoutvracht. Het betreft hier een indicatieve analyse. De onzekerheid in de uitkomsten is groot. Een mediane toename van de doorspoelvraag van zo'n 50% is te verwachten bij 1 meter zeespiegelstijging, toenemend tot 200% toename bij 3 meter zeespiegelstijging.

Watertekorten:

- Verminderde waterbeschikbaarheid en grotere watertekorten treden de laatste jaren prominent op de voorgrond, mede als gevolg van de droge zomers van 2018 en 2019.
- In de huidige klimaatscenario's is rekening gehouden met een toename van de verdamping in de zomer van 4 tot 11 % in 2050 en van 4 tot 15 % in 2085, ten opzichte van de Referentie2017.
- Bij sterke klimaatverandering (Deltascenario's Warm en Stoom) neemt de watervraag aan het hoofdwatersysteem in 2050 met 30% tot 60% toe. In een extreem droog jaar en bij sterke klimaatverandering kunnen de tekorten boven de 100 miljoen m³ per jaar uitkomen. Er wordt dan voornamelijk gekort op doorspoeling en beregening.
- In de huidige situatie kan in deze watervraag worden voorzien vanuit het Markermeer, ook in zeer droge jaren. Een stresstest voor de IJsselmeerbuffer geeft echter aan dat in de toekomst de buffer op het IJsselmeer/ Markermeer steeds frequenter volledig uitgeput kan raken. Dit heeft in Noord-Holland onder andere gevolgen voor de zomergrondwaterstand in een zeer droog jaar; deze wordt in de binnenduinrand van Noord-Holland 5 tot 25 cm lager.
- De watervraag voor peilbeheer kan verder toenemen als bodemdaling wordt tegengegaan door het veenweidegebied te vernatten met technische maatregelen zoals onderwaterdrainage of drukdrainage. In een gevoeligheidsanalyse is berekend dat de watervraag voor peilbeheer in Noord-Holland hierdoor in een zeer droog jaar verder kan toenemen met 13% (huidig klimaat) tot 23% (Stoom2050).
- Ook in het wateraanvoersysteem kunnen knelpunten gaan optreden, met name in de benedenstroomse aanvoergebieden (waaronder de bollengebieden), als de watervraag onder invloed van klimaat en zeespiegelstijging (met verziltting als gevolg) fors stijgt.
- Maatregelen tegen watertekorten zijn in te delen in maatregelen om de watervraag te beperken, de waterbeschikbaarheid te verhogen of om beter om te gaan met de gevolgen van tekorten. In hoofdstuk 4 komt dit per sector aan de orde.

Grondwaterstanden:

- In de duinen zijn de grondwaterstanden de afgelopen jaren gestegen, zowel in de winter als in de zomer. De berekeningen wijzen op een continuering van deze trend. Dit grondwater is zoet. In de duinzoom leiden de hogere grondwaterstanden in de duinen al tot extra wateroverlast en die zal toenemen. Een strategische keuze ligt voor over hoe met deze wateroverlast om te gaan: draineren of conserveren (met gevolgen voor het ruimtegebruik).
- In de peilbeheerste gebieden is het effect van toenemende jaarneerslagsommen op de grondwaterstanden niet of veel minder zichtbaar omdat neerslagoverschotten daar veel sneller (in uren tot dagen) tot afvoer komen. De zomergrondwaterstanden worden in enkele poldergebieden lager door een toenemend neerslagtekort in de zomerperiode, maar in de meeste poldergebieden is de verandering niet significant.

3.1 Hoogwaterveiligheid

Deze paragraaf geeft een kwalitatieve beschrijving van de kwetsbaarheid van het binnenduinrandgebied voor overstromingen, nu en onder invloed van klimaatverandering. Met gebiedsontwikkeling in het binnenduinrandgebied kan die kwetsbaarheid beïnvloed worden; met een vormgeving die het gebied robuuster maakt neemt die af, en met een vormgeving die geen rekening houdt met de kwetsbaarheid voor overstromingen neemt die toe.

Het startpunt voor omgaan met waterveiligheid is het huidige waterveiligheidsbeleid ten aanzien van overstromingen vanuit Noordzee, Waddenzee, meren en rivieren. Paragraaf 3.1.1 geeft een samenvatting van de huidige normen die in de wetgeving en bijbehorende regeling volgens de Waterwet gelden⁸. De normen die nu gelden zijn gebaseerd op kosten van versterkingsmaatregelen van waterkeringen en vermeden risico's. Ze zijn dus gebaseerd op schade- en slachtofferrisico's in het beschermde gebied. De ligging van bebouwd gebied is daarin bepalend. Daarom geeft paragraaf 3.1.2 een beeld van het huidige landgebruik en een globale ontwikkeling van verschillende typen landgebruik dat onder de zeespiegel komt te liggen bij stijgende zeespiegel – zonder toekomstige sociaaleconomische ontwikkelingen. Paragrafen 3.1.3, 3.1.4 en 3.1.5 geven een samenvatting van de kwetsbaarheid van het gebied op basis van nu beschikbare overstromingsscenario's, en wijst daarin kwetsbare gebieden aan. Ook is daarin gepresenteerd hoe de schade door overstromingen toeneemt onder invloed van extremere omstandigheden in het buitenwater. Paragraaf 3.1.6 schetst tot slot kort welk onderzoek op dit moment loopt. Dit onderzoek kan in de loop van de tijd nadere inzichten genereren die van belang zijn voor de gebiedsontwikkeling van de binnenduinrand.

3.1.1 Huidige waterveiligheidsnormen voor Noord-Holland

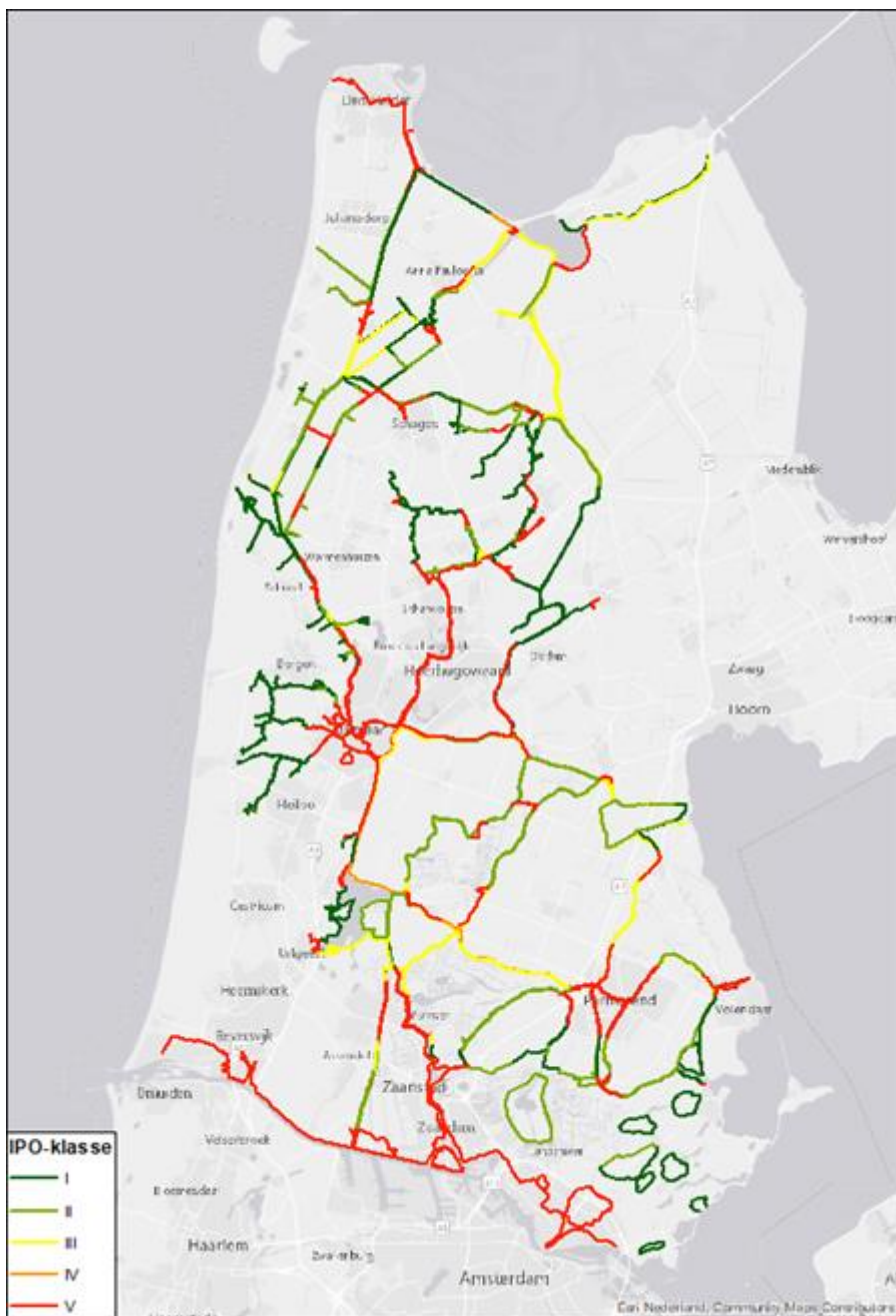
De huidige waterveiligheidswetgeving legt vast hoe waterbeheer en waterkeringbeheer voor de primaire keringen in Nederland plaatsvindt, hoe de rolverdeling en verantwoordelijkheden van overheidsorganisaties verdeeld zijn en hoe de financiering van waterstaatswerken verankerd is. Ook zijn daarin voor de primaire waterkeringen (dit zijn waterkeringen die Nederland beschermen voor bedreiging door buitenwater zoals zeeën, rivieren en meren) normen vastgelegd per traject. Figuur 3-1 geeft de ligging van de trajecten weer. De trajecten 13-1 t/m 13-9 en 12-2 hebben een norm met een signaleringswaarde van 1:3.000 en een ondergrenswaarde van 1:1.000. Voor traject 12-1 geldt een signaleringswaarde van 1:1.000 en een ondergrenswaarde van 1:1.000.

⁸ [wetten.nl - Regeling - Waterwet - BWBR0025458 \(overheid.nl\)](https://wetten.nl/Regeling-Waterwet-BWBR0025458)



Figuur 3-1 Normtrajecten zoals opgenomen in de Waterwet

Voor het regionale systeem van waterkeringen gelden andere afspraken. Hiervoor geldt dat de provincies normen vaststellen en richtlijnen afgeven voor het bepalen van het veiligheidsniveau van de regionale keringen (Figuur 3-2). De nu toegepaste systematiek is iets eenvoudiger dan de systematiek voor de primaire keringen en gebaseerd op een overschrijdingskansbenadering. Dat wil zeggen dat vastgelegd is tot welk waterniveau de regionale keringen het water veilig moeten kunnen keren. De landelijke normen zijn dus niet 1:1 te vergelijken met de regionale normen voor keringen.



Figuur 3-2 Regionale waterkeringen met bijbehorende IPO-klassen in het aandachtsgebied van deze studie.

De provincie Noord-Holland heeft besloten om dit te actualiseren, en heeft daartoe recent een speelveldverkenning laten uitvoeren (Nieuwjaar, 2022). Op dit moment gelden voor de regionale keringen de normen volgens de Waterverordening Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en het wijzigingsbesluit van 12 november 2018 (Provinciale Staten NH, 2018).

3.1.2 Landgebruik en hoogteligging

Uit (Inventarisatie van huidige kennis voor adaptatie aan zeespiegelstijging en het mogelijke ruimtebeslag op de lange termijn aan de Zuid- en Noord-Hollandse kust): De kans op een overstrooming door stormopzet neemt toe bij een stijgende zeespiegel. Grotere delen van het gebied komen dan onder zeespiegelniveau te liggen (Tabel 3.1). Ook door het grotere hoogteverschil kunnen de gevolgen van een overstrooming groter zijn. Bodemdaling kan het

verschil tussen land- en zeeniveau lokaal verder vergroten. Tabel 3.1 geeft het totaal aantal hectare per type landgebruik dat in Noord en Zuid Holland onder de grenswaarden NAP+0m t/m NAP+5m ligt.

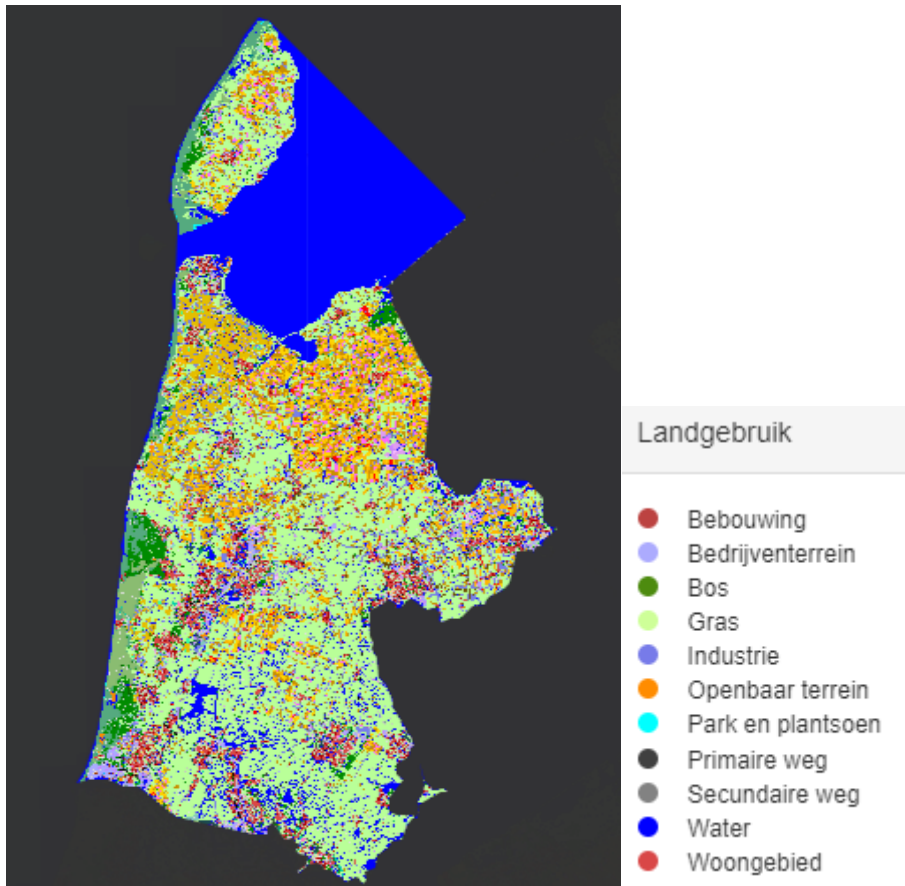
Tabel 3.1 Totaal aantal hectare per landgebruik dat onder de grenswaarden 0 t/m +5 m NAP ligt in Noord en Zuid Holland (Deltares, 2021)

	Ligging onder					
	NAP + 0 m (referentie)	NAP + 1 m	NAP + 2 m	NAP + 3 m	NAP + 4 m	NAP + 5 m
Bebouwd	43.400 100%	61.500 142%	69.800 161%	75.100 173%	79.100 182%	82.000 189%
Bedrijfsterreinen	10.800 100%	15.600 144%	18.900 175%	20.300 189%	23.000 213%	25.200 233%
Bos en natuur	20.600 100%	24.400 118%	26.900 131%	29.800 145%	34.000 165%	38.600 187%
Landbouw	288.300 100%	316.800 110%	328.400 114%	341.400 118%	352.190 122%	357900 124%

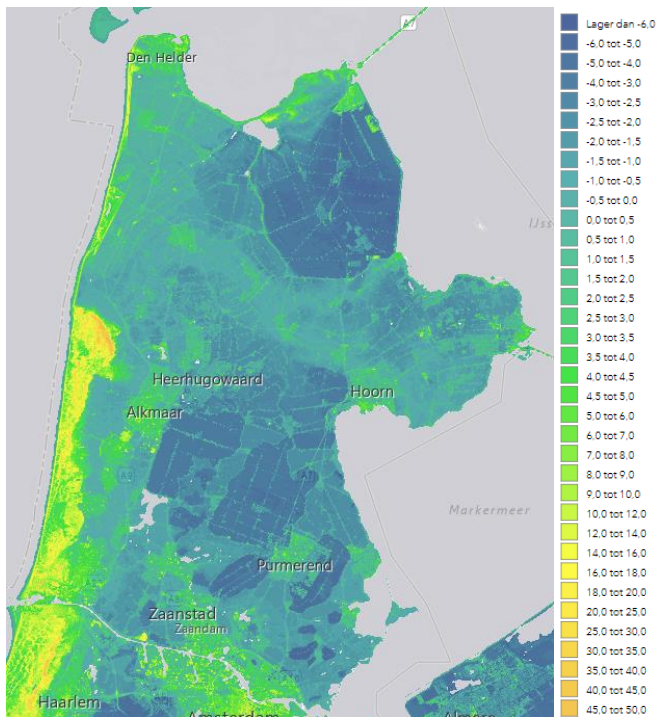
In de wetenschap dat schade door overstromingen vooral optreedt in de bebouwde omgeving, is hierin vooral de toename van het areaal bedrijventerreinen bij stijging van de zeespiegel opvallend.

3.1.3 Gevoeligheid voor overstroming

Een eerste indruk van de gevoeligheid voor overstromen volgt uit de combinatie van landgebruik en hoogteligging, zie Figuur 3-3 en Figuur 3-4. Noord-Holland kenschetst zich door de duinen, de boezem, de polders en daarbinnen de grote droogmakerijen. Figuur 3-4 geeft een weergave van de hoogteligging in Noord-Holland volgens het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). De polders zijn gemakkelijk herkenbaar omdat ze diep liggen.



Figuur 3-3 Ruimtelijke spreiding landgebruik (<https://hkn.klimaatatlas.net/>).



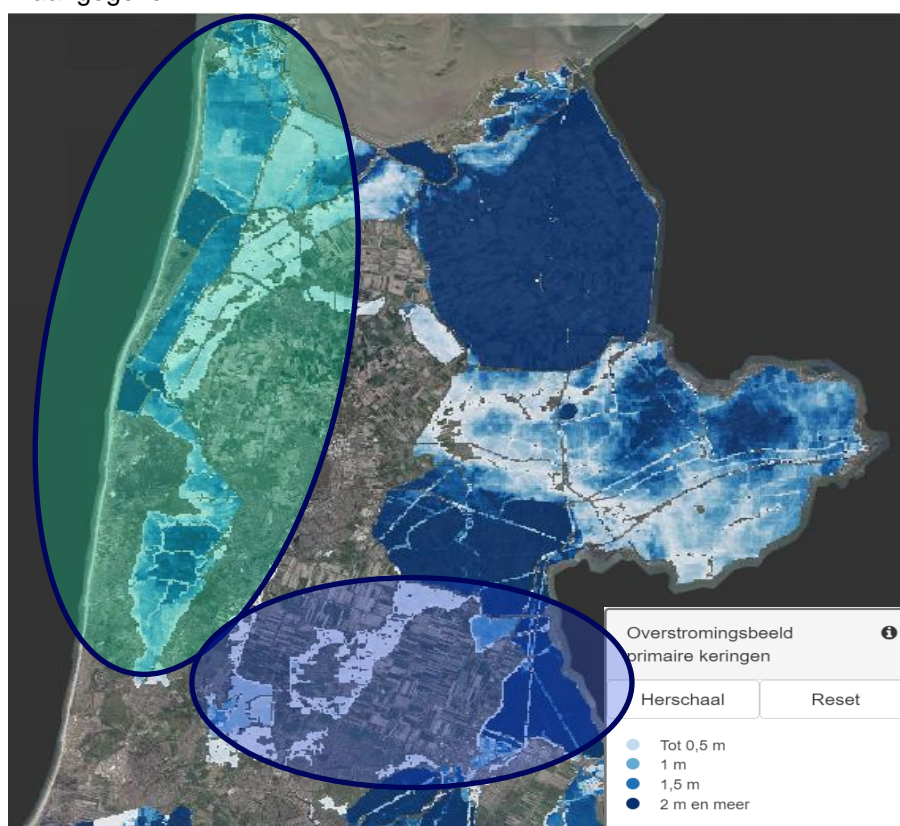
Figuur 3-4 Hoogteligging Noord-Holland, AHN⁹

⁹ [AHN Viewer | AHN](#)

3.1.4 Gevoeligheid bij overstromingen vanwege doorbraak van de primaire keringen

Door de oogharen bezien, op basis van een snelle scan van de losse overstromingsscenario's in LIWO^{10 11}, leiden de doorbraken van de primaire waterkeringen niet snel tot overstromingen van de binnenduinrandgebieden:

- Duindoорbraken leiden nauwelijks tot groot oppervlak van overstroomd gebied;
- Doorbraken bij Den Helder en bij de Balgzanddijk leiden tot een groter overstroomd gebied dat ook de binnenduinrand omvat: de gebieden die op Figuur 3-5 met de groene ellips aangeduid zijn;
- Doorbraken van de Wieringermeerdijk leiden weliswaar tot overstroming van de Wieringermeer, een groot gebied dus, maar daar blijft het dan naar verwachting ook bij;
- De oude Westfriese Omringdijk wordt nu met verschillende IPO-normen gekarakteriseerd, en vormt nog steeds een barrière waarmee overstromingen verminderen;
- Er is een doorbraakscenario waarbij water uit het Markermeer via het boezemstelsel naar binnen stroomt en het gebied bereikt dat in Figuur 3-5 met de blauwe ellips is aangegeven.



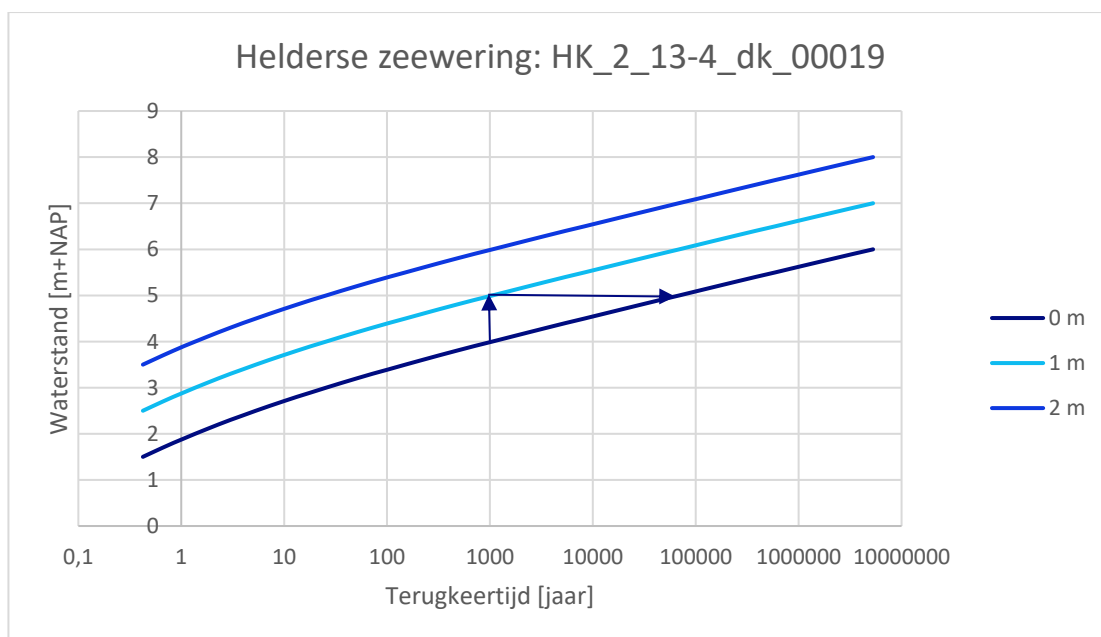
Figuur 3-5 Kaart van maximale overstromingsdiepte bij doorbraak van het primaire keringstelsel. Bron: Klimaatatlas van HHNK¹²

¹⁰ Het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen bevat kaartlagen voor professionals die zich bezighouden met (de voorbereiding op) wateroverlast en overstromingen in Nederland. Op basis van een recente set overstromingsscenario's toont LIWO o.a. de maximale overstromingsdiepte, overstromingskansen, evacuatie kentallen en informatie over gebiedsindeling en grenzen. .

¹¹ [Kaarten | LIWO \(basisinformatie-overstromingen.nl\)](#)

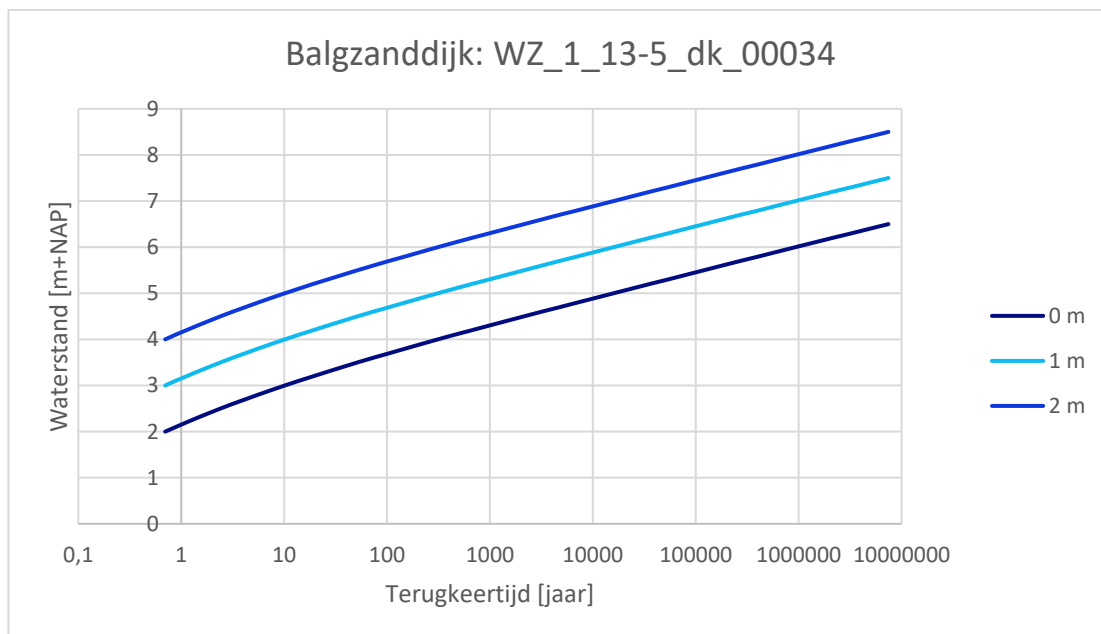
¹² [Klimaatatlas | Hhnk](#)

In het kader van deze rapportage is een vingeroefening gedaan hoe de schade door dergelijke overstromingen kunnen toenemen in meer extreme gebeurtenissen (of: bij hogere zeewaterstanden). Uit de algemene metadata van de LIWO-doorbraken is niet af te leiden bij welke buitenwaterstanden de berekeningen zijn gemaakt. Wel is aangegeven dat het schade onder omstandigheden horend bij verschillende terugkeertijden betreft. Daarom is uit het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium data over zeewaterstanden bij verschillende terugkeertijden en bij 0, 1 en 2 m zeespiegelstijging gedestilleerd. Ze zijn weergegeven in Figuur 3-6 en Figuur 3-7. De decimeringshoogte¹³ voor de zeewaterstanden is ongeveer 0,6 m. Het valt verder op dat door de vlakke ligging van de frequentielijnen, de kans op het optreden van een waterstand bij stijging van de zeespiegel met factoren 100 tot 1000 kan toenemen (de pijlen in Figuur 3-6 geven weer hoe dit afgelezen kan worden uit de grafiek). Extreme zeewaterstanden zoals we ze nu kennen zullen dus veel vaker gaan voorkomen.



Figuur 3-6: Waterstandsfrequentielijnen afgeleid uit Hydra-NL data voor de Helderse Zeewering bij 0, 1 en 2 m zeespiegelstijging. Eigen bewerking.

¹³ De decimeringshoogte is het absolute verschil in hoogte tussen het toetspeil en een waterstand met een overschrijdingsfrequentie die een factor 10 hoger of lager is dan die van het toetspeil. Het toetspeil is de waterstand die wordt gebruikt voor het beoordelen van de toestand van de waterkeringen conform de Waterwet.



Figuur 3-7: Waterstandsfrequentielijnen afgeleid uit Hydra-NL data voor de Balgzanddijk bij 0, 1 en 2 m zeespiegelstijging. Eigen bewerking.

Schadecijfers bij doorbraken van de Helderse zeewering en de Balgzanddijk zijn uit het LIWO afgeleid en relatief ten opzichte van elkaar geplaatst. De relatieve toename is in Tabel 3.2 weergegeven. Dit soort getallen hangen sterk af van de fysica in een gebied, en kunnen dus niet zomaar van toepassing worden verklaard op een willekeurig ander gebied. Het geeft een indicatie hoe onder extremere omstandigheden op zee de schade kan toenemen.

Tabel 3.2: Indicatieve, relatieve toename van de schade bij een overstroming vanuit zee bij verschillende terugkeerfrequenties. Snelle analyse op basis van cijfermateriaal uit LIWO.

Relatieve toename schade bij hogere buitenwaterstanden				
	Schade bij buitenwaterstand bij 1/1.000	Schade bij buitenwaterstand bij 1/10.000	Schade bij buitenwaterstand bij 1/100.000	Schade bij buitenwaterstand bij 1/1.000.000
Balgzanddijk	100%	109%	121%	135%
Helderse Zeewering	100%	110%	130%	146%

Uit de frequentielijnen blijkt dat de decimeringshoogte van de zeewaterstanden ongeveer 0,6 m bedraagt. Dat betekent dat de toename van de schade per factor 10 in de tabel, overeenkomt met een stijging van de zeespiegel van respectievelijk 0,6, 1,2 en 1,8 m.

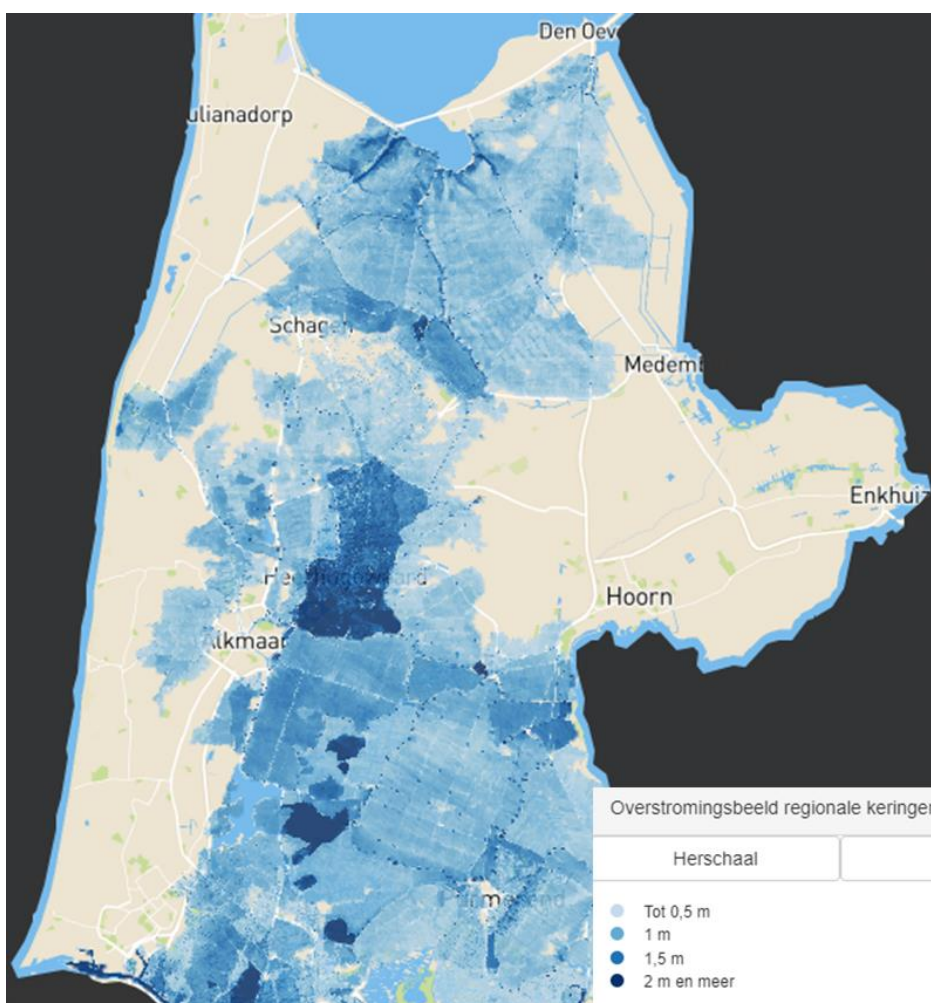
Overstromingen vanwege doorbraken uit het IJssel- en het Markermeer zullen meestal beperkt blijven tot het oostelijke deel van Noord-Holland en vooral in de droogmakerijen plaatshebben, dus buiten het studiegebied. Alleen in het geval aansluiting van de overstroming op het boezemwatersysteem wordt gemaakt, kan het water verder naar binnen stromen. Dit is bijvoorbeeld mogelijk bij een doorbraakscenario aan de Schardam en Keukendijk, aangeduid met de blauwe ellips op de kaart van Figuur 3-5. Ook voor dit scenario is de relatieve toename van de schade bij hogere buitenwaterstanden bekeken. Ondanks dat het Markermeer een peilbeheerst systeem is, neemt de schade in dit scenario zeer sterk toe onder extremere omstandigheden.

Tabel 3.3: *Indicatieve, relatieve toename van de schade bij een overstroming vanuit het Markermeer bij verschillende terugkeerfrequenties. Snelle analyse op basis van cijfermateriaal uit LIWO.*

Relatieve procentuele toename schade bij hogere buitenwaterstanden				
	Schade bij buitenwaterstand bij 1/1.000	Schade bij buitenwaterstand bij 1/10.000	Schade bij buitenwaterstand bij 1/100.000	Schade bij buitenwaterstand bij 1/1.000.000
Schardam en Keukendijk	100%	208%	358%	993%

3.1.5 Gevoeligheid bij overstromingen vanwege doorbraak boezemkade

Overstromingen vanuit het regionale systeem kunnen op dicht bij de binnenduinrand gelegen locaties plaats vinden. Een doorbraak raakt dit gebied dan wel. De overstromingsbeelden van doorbraken uit het regionale systeem zijn daarbij wel zo, dat ze kunnen leiden tot diep onder water staande gebieden, vooral de droogmakerijen.



Figuur 3-8: *Kaart van maximale overstromingsdiepte bij doorbraak van de regionale keringen Bron: Klimaatatlas van HHNK*

Bij de kaart dient opgemerkt te worden dat het een samengestelde kaart is van verschillende doorbraaklocaties. In werkelijkheid zullen die doorbraken niet allemaal gelijktijdig optreden. Ook valt op dat de overstromingsdiepten in het algemeen kleiner zijn dan de overstromingsdiepten ten gevolge van een doorbraak van een primaire kering. Dat komt

onder andere doordat het in de boezem aanwezige watervolume beperkt is en er dus minder water het gebied in kan stromen.

Indicaties over de kwetsbaarheid bij hogere waterstanden voor doorbraken uit regionale keringen konden niet worden afgeleid, omdat de schadecijfers niet online beschikbaar zijn gemaakt.

3.1.6 Mogelijke maatregelen

Houdbaarheid zandsuppleties aan de zandige kust

Gezien het karakter van de zandsuppleties (hun flexibiliteit, opschaalbaarheid en Nature-based oorsprong) is de houdbaarheid van de maatregel bijna onbegrensd. Het kuststelsel kan het zand zeker opnemen. Een aandachtspunt is de beschikbaarheid van het zand; naarmate die afneemt worden de kosten (in euro's en neveneffecten) groter. Gaan we over 100 jaar windmolenparken afbreken om het zand eronder vandaan te halen? De flexibiliteit van de maatregel is echter erg groot. Als het nodig is, is het mogelijk om zelfs binnen het kustfundament zand te gaan verplaatsen; dat is technisch goed vol te houden. Bredere maatschappelijke afwegingen kunnen tot andere besluiten leiden. Zo wordt frequent onderhoud als minder duurzaam en ongunstig voor de natuur beoordeeld omdat we zuinig willen zijn met het aantal ingrepen. Ook kan de houdbaarheid van de maatregel op termijn aanlopen tegen beperkingen door andere keuzes over de ruimtelijke inrichting. Dat speelt vooral bij zeegaten, havens en badplaatsen direct aan zee (voorbeeld: Vlaamse kust, waar het suppletiezand nu al over de boulevards stuift).

Zeedijken en regionale keringen

Als in reactie op klimaatverandering de zeedijken en de regionale keringen in stand worden gehouden en versterkt is dat een continuering van de gangbare praktijk. Dit vraagt wat ruimte; als het gaat om de regionale keringen is het zaak om er in de buurt van de boezem voor te zorgen dat die ruimte vrij blijft. De vraag is of het ook anders kan. Dan kom je op de insteek van 'waterveiligheidslandschappen'¹⁴, waarbij functies en opgaven worden gecombineerd. Het wordt zoeken naar de manier waarop je dat toch veilig en toekomstbestendig kan laten plaatsvinden. Het kernwoord is dan: beheersbare gevolgen. Een dergelijke aanpak vertoont veel parallellen met de strategie die HHNK ontwikkelt voor wateroverlast (zie paragraaf 3.2).

3.1.7 Er komt meer informatie beschikbaar

Vanwege het verschijnen van het IPCC rapport en recente ontwikkelingen door de hevige neerslag in Limburg en in de Kop van Noord-Holland wordt geïnvesteerd in nadere kennisontwikkeling en duiding. De resultaten van die studies zullen de komende tijd beschikbaar komen. Het betreft onder andere:

- Update van klimaatscenario's door het KNMI. Afhankelijk hiervan worden wellicht de hydraulische randvoorwaarden van Noordzee en Waddenzee, IJsselmeer en Markermeer bijgesteld. Ook kan intensivering van neerslagintensiteiten leiden tot verhoogde kans op hoge boezemwaterstanden, wat effect kan hebben op de resultaten van de toetsing van de regionale keringen.
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Het Deltaprogramma investeert in nadere analyses, ook voor waterveiligheid. In de loop van de komende jaren komen nadere gegevens hiervan beschikbaar.

¹⁴ <https://www.deltares.nl/nl/issues/gebiedsgerichte-oplossing-met-meerwaarde-voor-maatschappij-en-veiligheid/>

- Het Hoogheemraadschap heeft een expert-analyse uitgevoerd om helder te maken welke drivers voor (polder)gebieden bepalend zijn in het bereiken van omslagpunten. Dit is een interessante studie die binnenkort verschijnt.

3.2 Wateroverlast

Wateroverlast is de laatste jaren steeds prominenter op de agenda komen te staan. De huidige inzichten wijzen in de richting van nog verder toenemende en vaker voorkomende neerslagextremen. In de Deltascenario's (paragraaf 2.2) is de aanname dat de jaarneerslag in 2050 4 tot 5 % hoger zal zijn dan nu en in 2085 5 tot 7 %. In Nederland neemt de vochtigheid in de zomer toe met ongeveer 3 tot 7 % per graad wereldgemiddelde opwarming. Dit geeft een eerste schatting van de veranderingen in neerslagextremen in de zomer (KNMI, 2021): 3 tot 14 % toename in 2050 (temperatuurstijging 1 tot 2 °C) en 5 tot 25 % toename in 2085 (temperatuurstijging 1.5 tot 3.5 °C). De recente neerslaggebeurtenissen rond Alkmaar in juni 2021 en in Limburg in juli 2021 wijzen niet bepaald in de richting van de ondergrenzen van deze intervallen.

Er worden drie typen wateroverlast¹⁵ onderscheiden:

- Wateroverlast door kortdurende hevige neerslag (vaker in de zomer);
- Wateroverlast door langdurige neerslag (meestal in de winter);
- Grondwateroverlast (in het studiegebied in de binnenduinrand).

Deze drie typen kunnen in combinatie optreden. Het relatieve belang van elk van de drie verschilt per type landgebruik en bodem. Van oudsher is kortdurende hevige neerslag vooral bepalend in stedelijk gebied, grondwateroverlast ook vooral in stedelijk gebied (in het studiegebied in de binnenduinrand) en langdurige neerslag in het landelijk gebied. Door klimaatverandering is dit echter aan het schuiven: de neerslag in Limburg in juni 2021 was langdurig en hevig tegelijk en viel bovendien op een groot gebied, in de zomer. Per type wateroverlast kan een andere beheerder verantwoordelijk zijn. Daarover meer verderop in deze paragraaf.

Voor elk type landgebruik/gebied zijn er normen en richtlijnen die richting geven aan de inspanningen van de waterbeheerder om het waterafvoersysteem te dimensioneren. Van Bakel geeft in (HHNK, et al., 2020) een overzicht hoe de stationaire afvoernormen in de loop van de tijd zijn geëvolueerd. Het gaat hier overigens niet om echte wettelijke normen, maar meer om in de praktijk gegroeide uitgangspunten, waar om diverse redenen van kan worden afgeweken. Zijn conclusie is dat de achtergrond en onderbouwing van de normen in de literatuur niet scherp zijn omschreven. De afvoernorm ligt tegenwoordig gemiddeld op 14,4 mm/dag. Deze afvoer wordt ongeveer eens per jaar overschreden; kennelijk ligt daar een goede, empirische balans tussen kosten en baten. Voor het beheergebied van HHNK zijn de normen vastgelegd in de legger.

Naast de afvoernorm is er een aanvullende wettelijke norm, die betrekking heeft op het verwerken van kortdurende, intensieve buien. In die norm wordt de berging van systemen bekeken. Naast afvoercapaciteit is ook bergingscapaciteit nodig om de fluctuatie van neerslag op te vangen: de NBW-normen voor wateroverlast. Deze afspraken zijn vastgelegd

¹⁵ Wateroverlast is de algemeen gebruikte term voor de gevolgen van een teveel aan neerslag. De term kan echter weerstand oproepen, vooral bij de slachtoffers, wier land en eigendom onder water komen te staan. Het woord 'overlast' lijkt de ernst daarvan te bagatelliseren.

in de Provinciale Omgevingsverordening. Die norm gaat over de kans op overstrooming vanuit het open water¹⁶.

In de studie 'Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier 2', BWN2 (HHNK, et al., 2020) heeft HHNK het gehele beheergebied in detail laten doorrekenen voor 2-uurs buien (de 'piekbuien') en voor 2-daagse buien (de 'blokbuien') met T=10, 100, 1000. Uit de berekeningen zijn actuele knelpunten naar voren gekomen. Deze worden in de komende jaren aangepakt. In de voorliggende rapportage gaat het echter vooral om de extra inspanningen die in de toekomst nodig zijn om klimaatverandering het hoofd te bieden. De resultaten van de genoemde studie vormen de basis om in de komende periode richting aan die inspanningen te geven.

Wateroverlast in het landelijke gebied kan worden bestreden door ontwateringsmaatregelen op perceelsniveau, onder verantwoordelijkheid van de eigenaren, zoals aanleg van drainage of het voorkomen van verslemping; en door afwateringsmaatregelen op polder- en boezemniveau, onder verantwoordelijkheid van het waterschap, door voldoende dimensionering van het afvoersysteem. In het stedelijke gebied ligt de verantwoordelijkheid gedeeltelijk bij gemeenten (zorgplicht) en gedeeltelijk bij eigenaren.

Uit de BWN2-studie van HHNK komt naar voren dat in het huidige klimaat en met het huidige landgebruik circa de helft van de schade door wateroverlast wordt veroorzaakt door plasmvorming op percelen en in stedelijk gebied, en de andere helft door overstrooming van waterlopen. Het eerste type schade is niet te voorkomen door ruimere dimensionering van het watersysteem, omdat de schade al is ontstaan voordat het water dat systeem bereikt. De maatregelen moeten genomen worden op perceelsniveau en/of in het stedelijke gebied en de verantwoordelijkheid daarvoor ligt geheel of tenminste grotendeels bij eigenaren en gemeenten.

Voor het afwateringssysteem in polders en boezem onderzoekt HHNK de optie om zwaardere normen te gaan toepassen dan de huidige gemiddelde 14,4 mm/dag, om klimaatverandering het hoofd te bieden. Uit de BWN2-studie blijkt dat zo'n verzwaaring in specifieke gevallen soelaas kan bieden, maar op voorhand is duidelijk dat dit niet voldoende zal zijn.

In de BWN2-studie is onderzocht welke mogelijkheden bodemverbetering biedt. Hieruit is gebleken dat verhoging van het koolstofgehalte maar heel weinig bijdraagt, maar dat het verhogen van de infiltratiecapaciteit en het voorkomen van structuurbederf afhankelijk van de omstandigheden ter plaatse wel perspectief kan bieden. De effecten zijn echter op voorhand niet goed te kwantificeren, en daarom is bodemverbetering niet als standaard maatregel onderzocht in de BWN2-studie. Wel adviseert de studie het waterschap een faciliterende rol op het gebied van kennis en proces. Uitvoering van bodemmaatregelen ligt bij agrariërs; zij kunnen de maatregelen inzetten voor een betere gewasopbrengst, een vitalere bodem en een betere waterhuishouding en daarmee risico's op schade als gevolg van klimaatverandering verminderen. Overleg over dergelijke maatregelen kan een rol spelen in de gebiedsprocessen in het kader van het 'Handelingskader wateroverlast beperken' (zie hieronder).

¹⁶ Die kans mag niet boven een bepaalde grenswaarde komen (grasland 1:10 jaar; akkerbouw 1:25 jaar; hoogwaardige land- en tuinbouw 1:50 jaar; glastuinbouw 1:50 jaar; bebouwd gebied 1:100 jaar). De maximale kans op wateroverlast is daarbij gekoppeld aan een zogenaamd maaiveldcriterium: het percentage van elk type landgebruik dat bij de gegeven herhalingsstijd wel onder water mag komen te staan. Deze percentages variëren van 0 % voor bebouwd gebied tot 5 % voor grasland. Met deze normen is het afvoersysteem modelmatig getest op het verwerken van zeer hevige buien.

Ook wordt gekeken naar de aanleg van bergingsgebieden. Aan de aanleg van bergingsgebieden kleven echter nadelen: ze zijn in dit geval duur, mede omdat ze het nodigt zijn in gebieden waar de ruimtedruk hoog is (namelijk in de binnenduinrand: waar door de terreinhelling snelle afvoer optreedt, er veel stedelijk gebied is en veel kapitaalintensieve teelten), en bij intensieve buien zijn ze niet altijd effectief. In (HHNK, 2021a) is het functioneren van de bergingsgebieden tijdens de wateroverlast van juni 2021 geëvalueerd. De conclusie was dat het merendeel van de bergingsgebieden (evenals veel andere infrastructuur van het waterschap) goed heeft gefunctioneerd. De evaluatie wijst er echter ook op dat de waterbergingsgebieden alleen voor verlichting kunnen zorgen in de polders waarin zij zich bevinden. De waterbergingen hebben gezamenlijk ongeveer 600.000 m³ water opgevangen, wat neerkomt op slechts 1,2 mm van de 100 mm neerslag die is gevallen in een gebied van 50 bij 10 km. Zelfs als per waterberging alleen wordt gekeken naar de polder waarin ze zich bevinden, dan hebben de waterbergingen tussen 0-16 mm water geborgen van de ongeveer 100 mm die er gevallen is. En zelfs als de berging in het buitengebied vele malen groter zou zijn, dan nog zal een hoosbui hier niet snel genoeg naar toe kunnen worden afgevoerd. Berging is dus hooguit een deel van de oplossing. Daarom is HHNK met gebiedspartners op zoek naar maatregelen om de veerkracht van een gebied te vergroten. De efficiëntste maatregelen liggen in ruimtelijke aanpassingen. Want: het hele af/aanvoersysteem op een hogere norm brengen kost teveel geld en ruimte, en dat geldt ook voor aanleg van bergingsgebieden.

Daarom wordt in de 'Handelingskader wateroverlast beperken' van HHNK (in voorbereiding) ingezet op slim sturen van overtollig water: verdelen, bergen waar mogelijk. Een citaat: *'De klimaatadaptatie gaat voor een belangrijk deel om boven-normatieve investeringen. Het houvast dat vroeger werd geboden door de normsystematiek bestaat niet meer. We moeten nu, kijkend over de grenzen van ons eigen watersysteem, een nieuw kader vinden om samen met elkaar klimaatadaptatie vorm te geven.'* Met dit doel is HHNK enkele gebiedsprocessen gestart (HHNK, 2021b).

Het is denkbaar dat in de toekomst klimaatverandering verdisconteerd wordt in een verhoging van de huidige stationaire en dynamische (werk)normen, mits er praktisch uitvoerbare werkwijzen kunnen worden ontwikkeld om aan die normen te voldoen. De vraag op welk niveau eventuele bijgestelde normen terecht zullen komen staat nog volledig open. De uitkomst zal de resultante zijn van de resultaten van de lopende gebiedsprocessen en van de mate en snelheid van klimaatverandering.

Het denken over en omgaan met extreme neerslaggebeurtenissen is snel aan het veranderen onder invloed van recente gebeurtenissen, zoals bij Alkmaar in juni 2021 en in Limburg in juli 2021. Naar aanleiding van de wateroverlast in Limburg heeft Deltares in november 2021 een hackathon georganiseerd om een antwoord te vinden op de vraag: 'Wat als een dergelijke bui zich in centraal Nederland zou voordoen?' (de Bruijn en Slager, 2021). Bij een verplaatsing van deze bui naar het noorden zou een gebied zo groot als de helft van Nederland te maken krijgen met meer dan 110 mm regen in 48 uur (met daarbinnen een kerngebied van 50 bij 50 km met zelfs meer dan 200 mm in 48 uur). Dan is grote overlast en schade niet te voorkomen. Wel kunnen maatregelen worden genomen om te voorkomen dat de overlast zich tot ramp ontwikkelt: uitvoeren van stresstesten, maatregelen op het gebied van informatie-uitwisseling, opstellen van handelingsperspectieven voor beheerders, aangepast ruimtelijk beleid (locatie vitale functies, bergingsgebieden) e.d. Deze conclusies komen sterk overeen met die van de evaluatie van de wateroverlast van juni 2021 van HHNK.

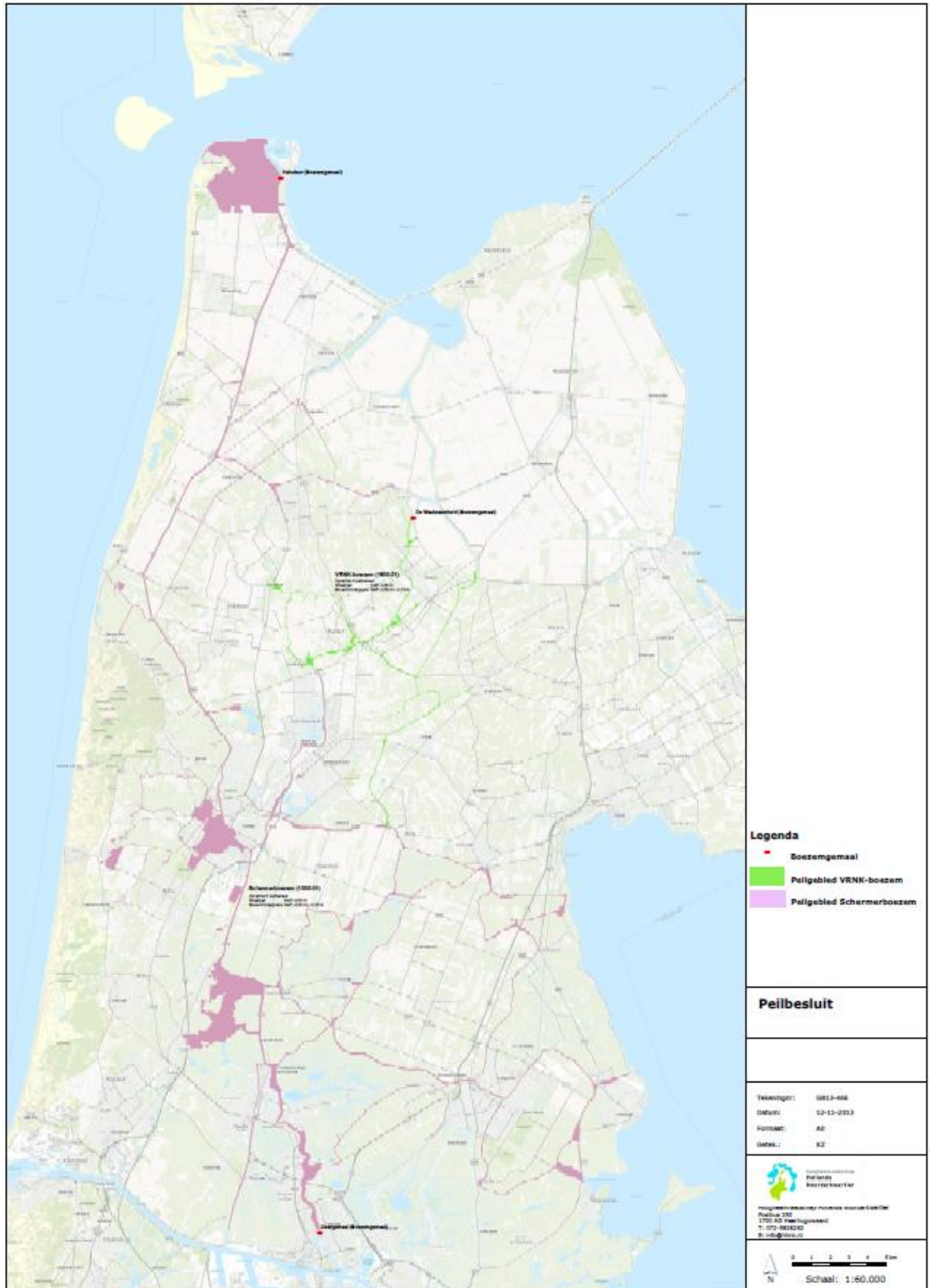
Grondwateroverlast in de binnenduinrand

Modelresultaten van de effecten van klimaatverandering van het Deltaprogramma Zoetwater en PWN wijzen in de richting van hogere grondwaterstanden in de duinen en het

binnenduinrandgebied; zie paragraaf 3.5. Hierdoor is vooral in de duinzoom (figuur 1-2) meer grondwateroverlast te verwachten, die zich in stedelijk gebied onder andere kan manifesteren in natte of ondergelopen kelders en in frequenter optreden van water op straat.

Wateroverlast door hoger wordende buitenwaterstanden

Het studiegebied binnenduinrand ligt voor het overgrote deel in de Schermerboezem van HHNK en voor een klein deel in de VRNK-boezem. De Schermerboezem heeft momenteel drie gemalen. Het Zaangemaal slaat uit op het Noordzeekanaal. Zolang daar het peil gehandhaafd blijft zijn daar geen veranderingen te verwachten. Gemaal Helsdeur bij Den Helder loost op de Waddenzee en zal te maken krijgen met een stijgende zeespiegel waardoor de afvoermogelijkheden worden belemmerd. Gemaal Mantel bij Schardam loost op het Markermeer. Een vierde gemaal bij Monnickendam (eveneens naar Markermeer) is in aanbouw. Het gemaal van de VRNK-boezem (Gemaal de Waakzaamheid) slaat uit op de Amstelmeerboezem die vervolgens onder vrij verval afvoert naar de Waddenzee. Dit gemaal zal dus eveneens te maken krijgen met een stijgende zeespiegel. Het hoogheemraadschap werkt aan een plan (verbetering natte infrastructuur Noordkop) om een toekomstbestendige bemaling op de Amstelmeerboezem te realiseren.



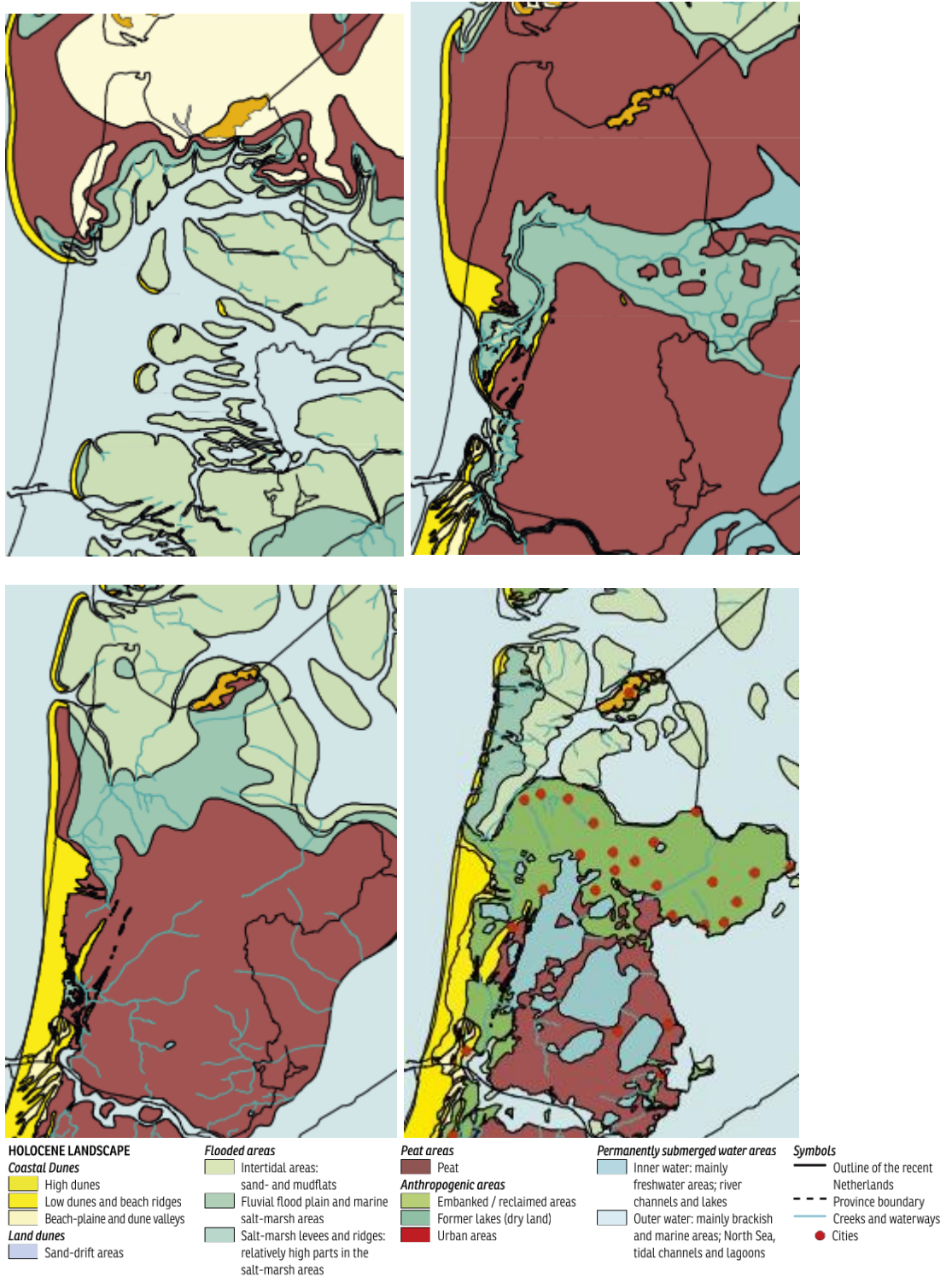
Figuur 3-9 Kaart Peilbesluit Schermerboezem (in roze) en VRNK-boezem (in groen), met de boezemgemalen aan de Waddenzee, de Amstelmeerboezem en het Noordzeekanaal (HHNK, 2014).

3.3 Verzilting

Het grondwater in de Nederlandse kustzone is dicht onder maaiveld brak tot zout, doordat grote delen van de kustzone op enig moment in de geschiedenis onder invloed van de zee stonden, en zout water de bodem inzakte. Brak grondwater verzilt het oppervlaktewater, waardoor dit water ongeschikt wordt voor beregening.

Ook kan brak grondwater in droge zomers tot in de wortelzone reiken en daar schade aan landbouwgewassen veroorzaken. Brak grondwater is niet de enige bron van verzilting in de kustzone. Schutten in zeesluizen zorgt voor een zoutlek naar de boezem, en ook zoutspray, effluent van RWZI's en waterinlaat zijn (beperkte) bronnen van zout. Om chlorideconcentraties in boezem- en polderwateren op een acceptabel niveau te houden worden veel wateren doorgespoeld met zoet inlaatwater.

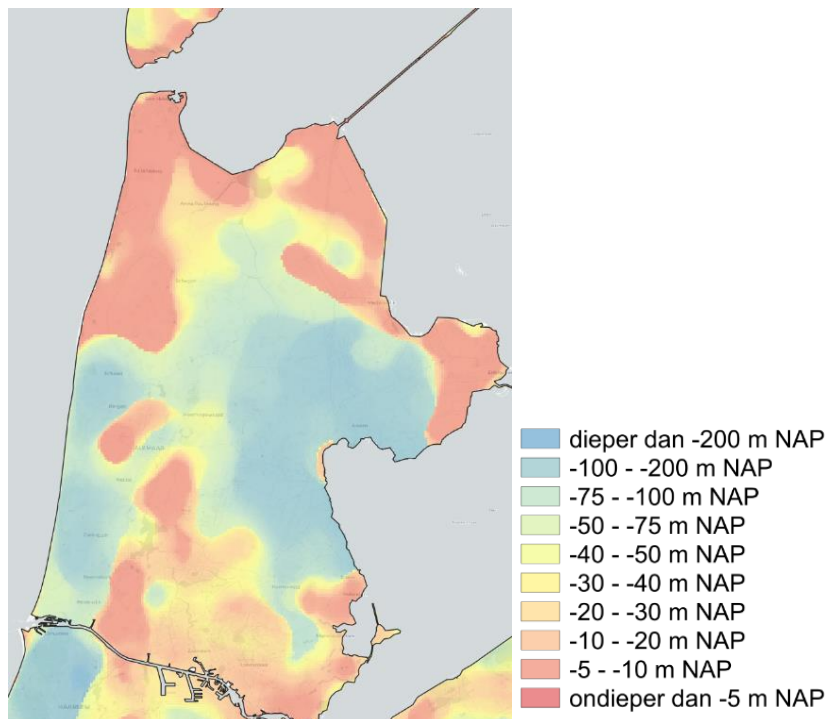
De zoet-zoutverdeling in de ondergrond houdt sterk verband met de Holocene landschapontwikkeling (Delsman, et al., 2014). De landschapontwikkeling van de binnenduinrand vanaf 6000 jaar geleden is weergegeven in Figuur 3-10 (Vos, 2015). Zo'n 6000 jaar geleden bereikte de Noordzee haar maximale transgressie: de kustlijn lag het verste landinwaarts. In Noord-Holland volgde de zee de oude Pleistocene monding van de Oer-IJssel, die bij Bergen in de Noordzee uitmondde. De kop van Noord-Holland bleef vooralsnog verschoond van mariene invloed. Rond 1500 v.C. sloot de kustlijn zich nagenoeg, alleen bij Bergen mondde de oer-IJ uit in de Noordzee. Achter de gesloten kustlijn ontstonden dikke veenpakketten, die uiteindelijk uitgroeiden tot zo'n 4 m boven zeeniveau, zodat zoet water kon infiltreren. Rond 800 n.C. was ook het zeegat van Bergen gesloten, maar was juist de kop van Noord-Holland onder zee-invloed gekomen. Deze zee-invloed bleef lang bestaan. Pas na 1500 n.C. werd de kop van Noord-Holland ingepolderd, en zijn ook de verschillende meren (Beemster, Schermer, etc.) drooggelegd. Deze binnenmeren stonden tot hun droogmaking in open verbinding met de Zuiderzee en waren brak.



Figuur 3-10 Landschapontwikkeling binnenduinrand, in 3850 v.C., 1500 v.C., 800 n.C. en 1500 n.C. (Vos, 2015).

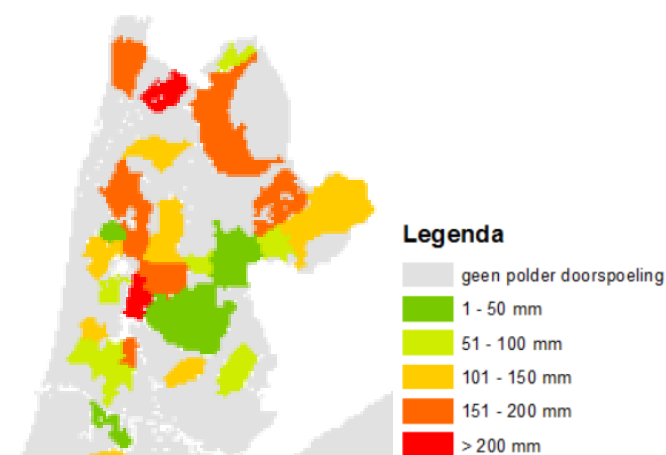
De invloed van de landschapsgeschiedenis op de zoet-zoutverdeling in het grondwater is goed terug te zien in Figuur 3-11. Figuur 3-11 toont de ligging van het zoet-zout grensvlak op basis van de in 2020 opgeleverde 3D grondwater chlorideverdeling (Delsman, et al., 2020). Patronen in deze kaart komen goed overeen met de Verziltingsstudie HHNK (Acacia Water, 2013).

Brak grondwater komt in Noord-Holland dicht onder de oppervlakte voor in gebieden waar de zee-invoed nog redelijk recent aanwezig was (kop van Noord-Holland, tussen Den Helder en Petten), of waar grondwater na droogmaking door een sterke kwelstroom naar de oppervlakte stroomt (Schermer, Wormer, zuidelijke Beemster). Ook de invloed van het IJ is nog duidelijk terug te zien aan de ondiepe ligging van het zoet-zout grensvlak rond het huidige Noordzeekanaal.



Figuur 3-11 Ligging zoet-zout grensvlak (1 g Cl/L) (Delsman, et al., 2020).

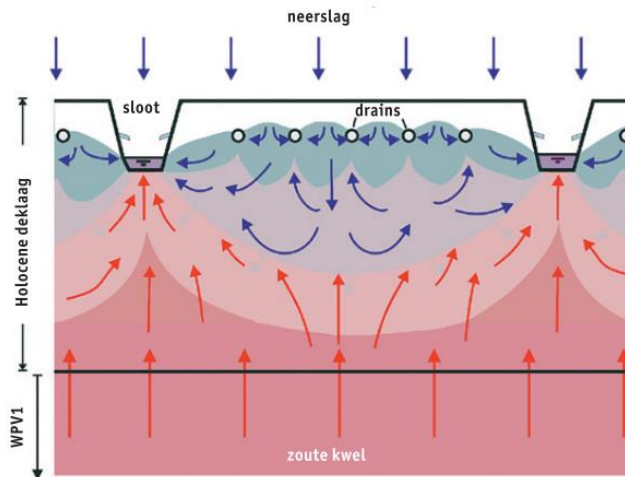
In de huidige situatie worden de boezemsystemen van Hollands Noorderkwartier en verschillende diepe polders doorgespoeld. De precieze hoeveelheden polderdoorspoeling zijn niet goed bekend, maar zijn recent ingeschat op basis van opgestelde water- en stofbalansen van de verschillende polders (Hunink, Walsum, et al., 2020; Boekel, et al., 2015). De binnenduinrand watert af op de Schermerboezem. Om de zouttong bij Den Helder terug te dringen wordt de boezem met maximaal 6,9 m³/s doorgespoeld ((HHNK, 2018); Tabel 3.4).



Figuur 3-12 Op basis van water- en stofbalansen (van Boekel, et al., 2015) ingeschatte benodigde doorspoeling in mm waterschijf per jaar (Hunink, Van Walsum, et al., 2020).

Door klimaatverandering en zeespiegelstijging kunnen verziltingsproblemen en de watervraag voor doorspoeling sterk toenemen. In de kop van Noord-Holland bevindt brak grondwater zich dicht onder het maaiveld, en is zoet water alleen in een dunne regenwaterlens aanwezig (Acacia Water, 2014). De Louw (2015) heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar regenwaterlensen.

In drogere zomers kan deze regenwaterlens vaker uitgeput raken (niet nader gekwantificeerd). Het brakke grondwater kan vervolgens tot in de wortelzone doordringen en leiden tot gewasschade (de Louw, et al., 2015). Door ontwatering wordt een eventuele toename in winterneerslag snel afgevoerd en komt deze niet ten goede aan het grondwater.



Figuur 3-13 Dunne regenwaterlens en brak ondiep grondwater (de Louw, et al., 2015).

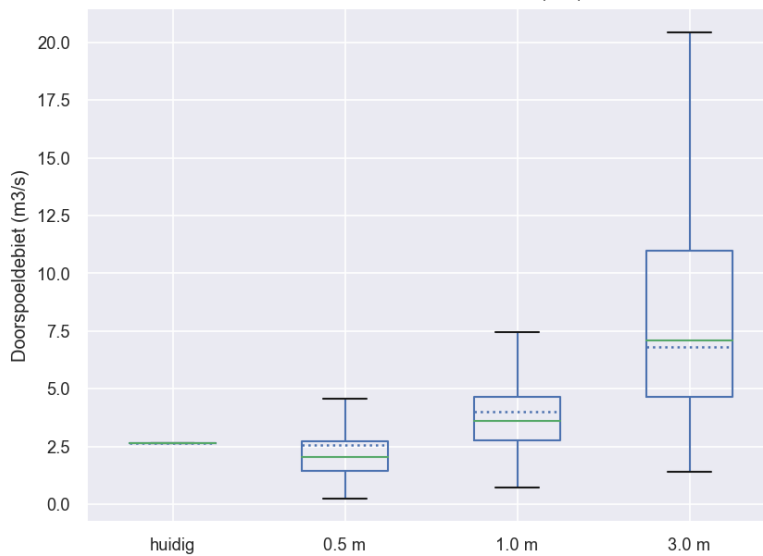
De binnenduinrand ligt geheel binnen de invloedssfeer van een stijgende zeespiegel. Door een stijgende zeespiegel neemt de druk in het grondwater toe, tot zo'n 10 km vanaf de kustlijn. Deze toenemende druk leidt tot een toename van de brakke kwel. Deze kweltoename heeft verder verziltende sloten tot gevolg, en leidt verder tot dunner wordende regenwaterlensen. Bovendien zorgt de kweltoename ook voor een sneller opwaarts stromen van dieper, zouter grondwater, met op langere termijn extra verzilting tot gevolg. Verbreding van het duingebied door zandsuppleties zal leiden tot een vergroting van de zoetwaterbel en mogelijk tot verschuiving van zoute of brakke kwelstromen landinwaarts. Of en in welke mate zo'n verschuiving optreedt is afhankelijk van de lokale omstandigheden. Dit is voor het studiegebied nog niet onderzocht.

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging zijn grondwatermodelberekeningen uitgevoerd van het effect van uiteindelijk 3 meter zeespiegelstijging op grondwaterverzilting en doorspoelbehoefte (Delsman, et al., 2022a). De kop van Noord-Holland komt in deze berekeningen naar voren als een gebied waar de verzilting sterk toeneemt. Ook de kans op verzilting van de wortelzone neemt duidelijk toe. Dat is niet onverwacht, gezien de aanwezigheid van ondiep brak grondwater, de ligging nabij de zee, en de aanwezigheid van een dik watervoerend pakket. In deze berekeningen is niet gekeken naar het effect van klimaatverandering (neerslag en verdampingspatronen). De gevonden toename van de zoutvracht (gedefinieerd als de kwelhoeveelheid maal de chlorideconcentratie, meestal uitgedrukt in kg/ha/jaar) is in lijn met eerdere studies, waar een duidelijke zoutvrachtoename rond Den Helder werd voorspeld (Acacia Water, 2013).

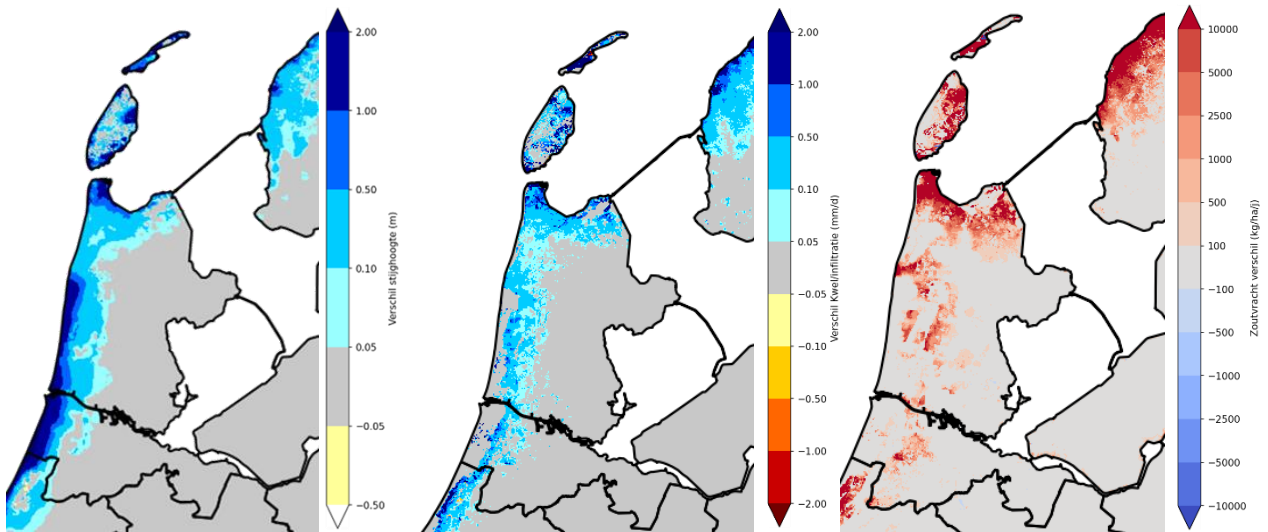
Gegeven de verwachte veranderingen in zoutvracht bij zeespiegelstijging is in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging uitgerekend hoe de doorspoelvraag in de doorspoelde gebieden verandert. In deze analyse is uitgerekend hoeveel doorspoeling

nodig is om de huidige concentratie te handhaven bij een veranderde zoutvracht. Hierbij zijn veranderingen in klimaat of sociaaleconomische ontwikkelingen niet beschouwd, het betreft dus alleen een indicatieve analyse. Wel is onzekerheid rond onder meer de verwachte zoutvracht en snelheid van zeespiegelstijging in de analyse meegenomen (Delsman, et al., 2022b).

Figuur 3-14 laat zien hoe de aldus berekende doorspoelvraag van het gebied 'Noord-Schermerboezem' (min of meer het beschouwde gebied) zich ontwikkelt voor een zeespiegelstijging van 0.5, 1 en 3 meter. De figuur laat zien dat de onzekerheid groot is, maar dat een mediane toename van de doorspoelvraag van zo'n 50% te verwachten is bij 1 meter zeespiegelstijging, toenemend tot 200% toename bij 3 meter zeespiegelstijging. Deze toegenomen doorspoelvraag vertaalt zich in een grotere watervraag aan het Markermeer, die gegeven ook toegenomen watervragen in het overige voorzieningsgebied van het IJsselmeer wellicht vaker niet voldaan kunnen worden (zie bijvoorbeeld (Pouwels, et al., 2021). Confrontatie met het beschikbare wateraanbod is nog niet beschouwd. Dit wordt in vervolganalyses binnen KP Zeespiegelstijging verder uitgewerkt.



Figuur 3-14 Berekende onzekerheid in doorspoelbehoefte voor district Schermerboezem Noord. De groene lijn in de boxplots geeft de mediaan uit de verdeling weer, de gestippelde blauwe lijn de 'best-guess' doorspoelvraag waarmee in KP Zeespiegelstijging is gerekend.



Figuur 3-15 Toename stijghoogte (grondwaterdruk) (links), leidend tot kweltoename (midden) en daarmee tot een toename van de zoutvracht (rechts) bij 3 m zeespiegelstijging (Delsman, et al., 2022a).

3.4 Waterbeschikbaarheid en watertekorten

Er is sprake van watertekort als er minder zoetwater beschikbaar is dan er nodig is voor het regionale gebruik voor peilbeheer, terugdringen van verzilting, drinkwatergebruik en andere toepassingen. Bronnen in Noord-Holland zijn lokale neerslag en het IJsselmeer/Markermeer, die uiteindelijk een bovenstroomse oorsprong kennen. Hierdoor zijn verschillende indicatoren van belang voor het bepalen van het risico op watertekort: niet alleen de lokale neerslag of potentiële verdamping, maar ook de wateraanvoer vanuit de IJssel en de verandering van aanwezige grondwatervoorraden zijn van belang.

Verminderde waterbeschikbaarheid en grotere watertekorten treden de laatste jaren prominent op de voorgrond, mede als gevolg van de droge zomers van 2018 en 2019. In de huidige klimaatscenario's is rekening gehouden met een toename van de verdamping in de zomer van 4 tot 11 % in 2050 en van 4 tot 15 % in 2085, ten opzichte van de Referentie2017.

In de 'Strategie waterverdeling' (HHNK, 2018) heeft HHNK uitgewerkt op welke wijze men het beschikbare water conform de verdringingsreeks in het beheergebied verdeelt. Deze strategie is begin 2019 vastgesteld door het algemeen bestuur na de droge zomer van 2018. De strategie geeft voor het huidige landgebruik en het huidige klimaat een compleet overzicht van de watervraag per type in het beheergebied (Tabel 3.4). De gegevens in Tabel 3.4 hebben betrekking op het gehele beheergebied van HHNK. Veranderingen hierin door klimaatverandering zijn nog niet in beeld gebracht.

Tabel 3.4: Inschatting van de watervraag Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK, 2018).

Watervraag	Onderdeel	Capaciteit (m ³ s)	Categorie landelijke verdringingsreeks
Peilhandhaving	Peilhandhaving	10,3	1
Doorspoeling	Terugdringen zouttong bij Den Helder	6,9	3
Facilitering gebruiksfuncties	Glastuinbouw	0,6	3
	Landbouw kapitaalintensief	9,4	3
	Landbouw (overig)	3,4	4
	Stedelijk gebied (plantsoenen / sportvelden)	0,7	3
	Stedelijk gebied (tuinen / volkstuinen)	0,3	3
Bijzondere watervragers	PWN*	3,1	2
	ECN	0,6	3
	Proceswater ontwikkelingen Wieringermeer	0,3	3
		35,6	

*Drinkwaterbedrijf PWN heeft een eigen waterinname vanuit het IJsselmeer en is daarbij onafhankelijk van wateraanvoer door HHNK. De zoetwatervraag van PWN kan bij beperkte waterbeschikbaarheid in het IJsselmeer/Markermeersysteem wel invloed hebben op andere gebruiksfuncties die lager staan in de verdringingsreeks.

Met de actualisatie waterverdeling worden nieuwe afspraken gemaakt over de watervraag en de categorieën van de regionale verdringingsreeks. De bijbehorende watervraagtabellen zullen naar verwachting flink afwijken van bovenstaande tabel.

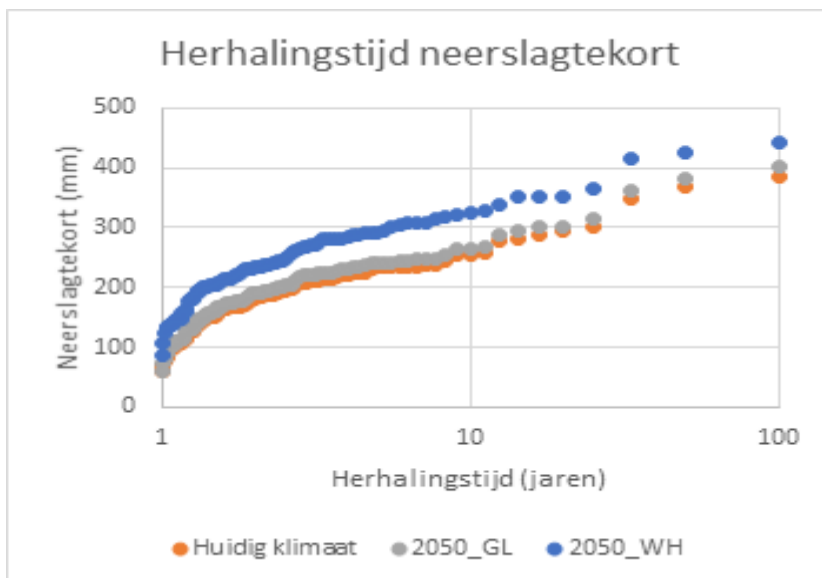
Op nationale schaal is in het Deltaprogramma Zoetwater een landelijke knelpuntenanalyse uitgevoerd die dient als gemeenschappelijke informatiebasis voor de maatregelverkenning. Deze knelpuntenanalyse is beschreven in (Mens, et al., 2019). De resultaten van deze analyse zijn relevant voor de gebiedsprocessen in de binnenduinstrand van Noord-Holland en worden hieronder beschreven.

3.4.1 De vraag naar zoet water

Het KNMI heeft voor de klimaatscenario's (paragraaf 2.2) gridbestanden op dagbasis aangemaakt voor de neerslag en de referentieverdamping volgens Makkink voor de periode 1-1- 1911 t/m 31-12-2011. De gridbestanden bevatten ruimtelijke variatie, afkomstig van de meetstations.

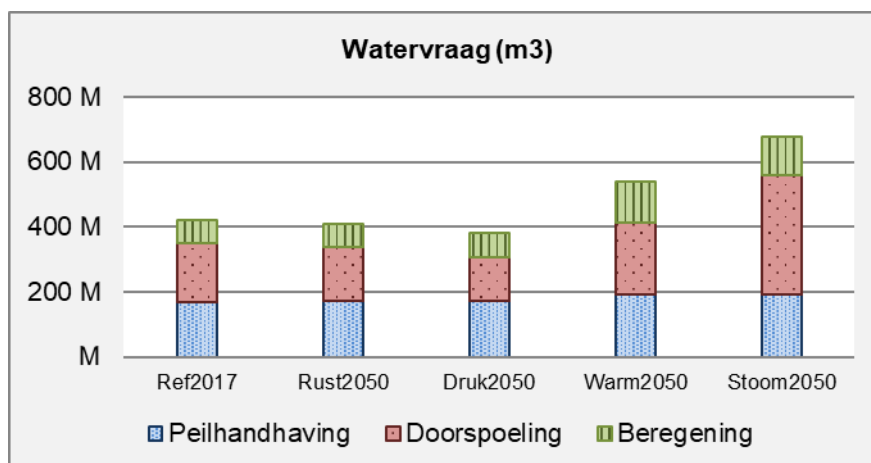
Deze gridbestanden zijn in lijn met de klimaatscenario's naar 2050 getransformeerd met behulp van de transformatietool van het KNMI¹⁷. De *transformaties* van de gridbestanden naar een toekomstig klimaat zijn niet ruimtelijk gedifferentieerd (Sluiter&Jilderda, 2017). Uit deze bestanden zijn (in combinatie met het landgebruik) neerslagtekorten berekend (Mens, et al., 2019); zie Figuur 3-16.

¹⁷ http://climexp.knmi.nl/scenarios_knmi14_form.cgi



Figuur 3-16 Maximaal neerslagtekort in het groeiseizoen in mm berekend voor Noord-Holland ten noorden van het NZK en zonder Texel, voor diverse herhalingstijden en voor drie scenario's. Bron: Mens et al, 2019.

Figuur 3-17 toont de watervraag van regio Noord-Holland Noord in het zomerhalfjaar voor verschillende scenario's, uitgesplitst naar de watervragers peilbeheer, doorspoeling en beregening vanuit oppervlaktewater. De watervraag is weergegeven voor het zeer droge jaar 1976; voor deze regio is dit een situatie die in het huidige klimaat gemiddeld eens in de 50 jaar voorkomt (Mens, et al., 2019).

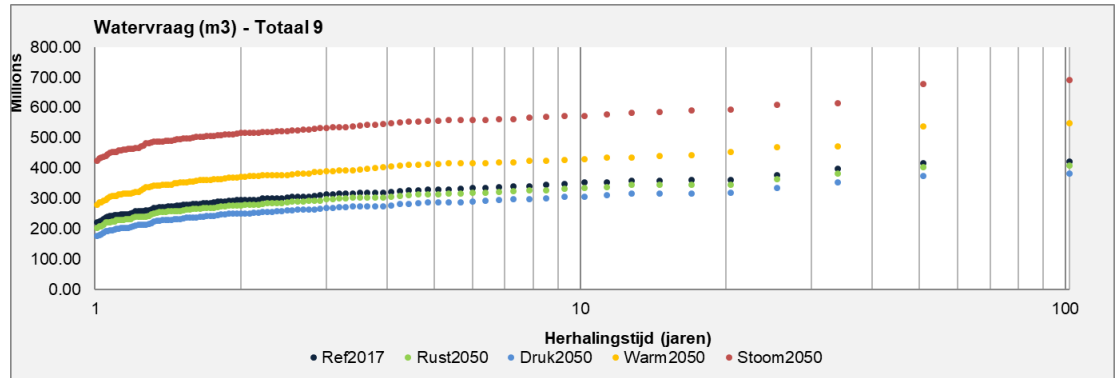


Figuur 3-17 Watervraag in regio Noord-Holland Noord in miljoen m3 in het zomerhalfjaar voor peilbeheer, doorspoeling en beregening uit het oppervlaktewater. Deze watervragen zijn weergegeven voor een T=50 jaar (1976) voor de Referentie 2017 en de scenario's Rust, Druk, Warm en Stoom voor het zichtjaar 2050.

Uit de figuur blijkt dat doorspoeling in de meeste scenario's de grootste watervrager is. Bij gematigde klimaatverandering (scenario's Rust en Druk) blijft de watervraag ongeveer gelijk of neemt deze iets af. Bij sterke klimaatverandering (scenario's Warm en Stoom) neemt de watervraag in 2050 met 30% tot 60% toe, afhankelijk van het sociaaleconomische scenario. De watervragen voor doorspoeling en beregening uit oppervlaktewater nemen het sterkst toe, veroorzaakt door interne verzilting, verdamping van het oppervlaktewater en een daling van het bodemvochtgehalte in het groeiseizoen. De watervraag voor peilbeheer kan verder

toenemen als ervoor wordt gekozen om bodemdaling tegen te gaan door het veenweidegebied te vernatten met technische maatregelen zoals onderwaterdrainage of drukdrainage; dit is niet in de figuur verwerkt. In een aparte gevoeligheidsanalyse (Hunink et al., 2021) is berekend dat de watervraag voor peilbeheer in Noord-Holland hierdoor in een zeer droog jaar verder kan toenemen met 13% (huidig klimaat) tot 23% (Stoom2050).

In Figuur 3-18 is de herhalingsjijd van de totale watervraag weergegeven. Ook hierin is de sterke toename van de watervraag in scenario Stoom zichtbaar. Deze toename is zichtbaar in droge, gemiddelde en natte jaren.



Figuur 3-18 Herhalingsjijd van de totale watervraag in regio Noord-Holland Noord in miljoen m3 in het zomerhalfjaar voor peilbeheer, doorspoeling en beregning uit het oppervlaktewater. Deze watervragen zijn weergegeven voor een T=50 jaar (1976) voor de Referentie 2017 en hetzelfde jaar getransformeerd naar de scenario's Rust, Druk, Warm en Stoom voor het zichtjaar 2050.

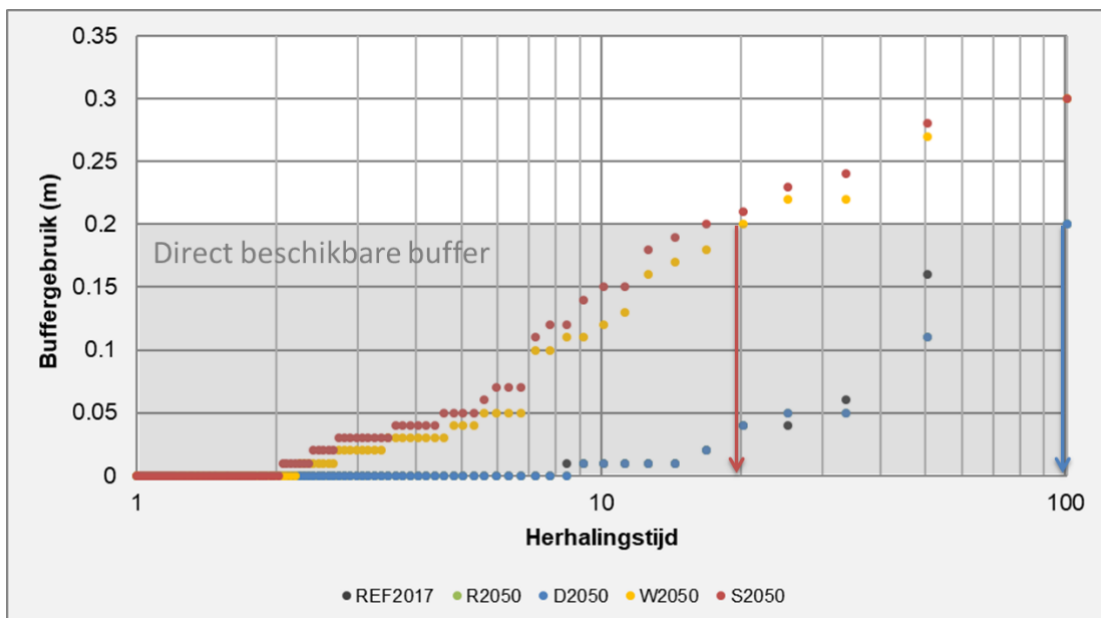
3.4.2 De buffervoorraad van zoet water

In de modelberekeningen van (Mens, et al., 2019) is het nieuwe peilbesluit van het IJsselmeer met het flexibel peilbeheer opgenomen. Dit is vertaald naar een peilbeheer voor het IJsselmeer en Markermeer, beschreven in (Hunink, et al., 2018)¹⁸.

In Figuur 3-19 is de herhalingsjijd van de benutting van de bufferschijf van het IJsselmeer voor het zomerhalfjaar weergegeven. Dit buffergebruik is hier gedefinieerd als het maximale verschil tussen het streefpeil en de berekende waterhoogte over het zomerhalfjaar. In de figuur is te zien dat bij het huidige klimaat in circa 10% van de jaren de buffer wordt aangesproken (de blauwe stippen komen boven nul rond T=10) en dat de buffer in alle doorgerekende omstandigheden toereikend is om in de watervraag te voorzien (aangegeven met de blauwe pijl). De scenario's Rust en Druk met matige klimaatverandering geven een vergelijkbaar beeld.

In de scenario's met sterke klimaatverandering (Warm en Stoom) wordt in ongeveer 50% van de jaren de buffer aangesproken (vanaf T=2) en is deze bij een herhalingsjijd van 20 jaar (rode pijl) niet meer voldoende voor alle watervragen.

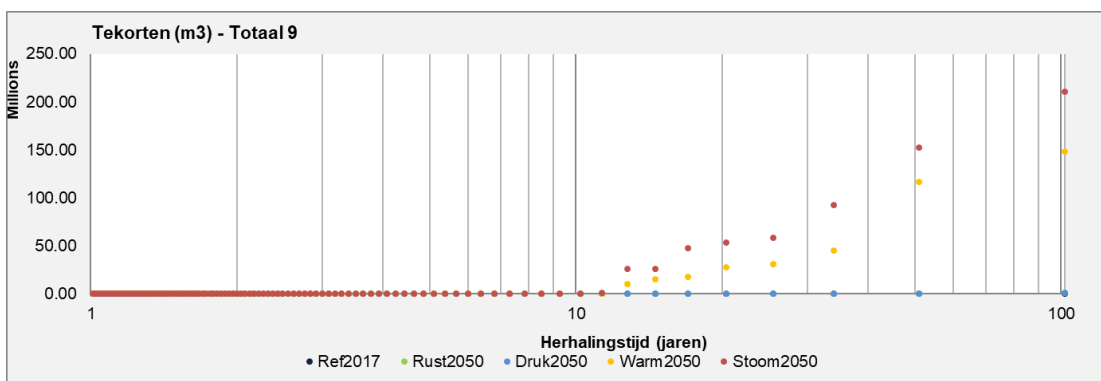
¹⁸ Enkele kanttekeningen: omdat het gebruikte model geen voorspelmodus heeft, kan het niet anticiperen op een eventuele droge periode en indien nodig de waterstand verder opzetten. In het model is er daarom voor gekozen om het 'streefpeil' in te stellen op -0,10 m NAP. De consequentie hiervan is dat het peil ook in een normaal jaar opgezet wordt, terwijl dat in de praktijk niet zal gebeuren. Omdat we voor de analyses alleen geïnteresseerd zijn in de droge jaren, is deze aanname verantwoord. Daarnaast gaat deze aanpak er impliciet vanuit dat er voldoende water beschikbaar is om het peil tijdig op te zetten. Het model houdt verder rekening met een tijdelijke opzet bij de start van het zomerseizoen, en iets eerder uitzakken naar winterstreefpeil conform het nieuwe (flexibele) peilbesluit.



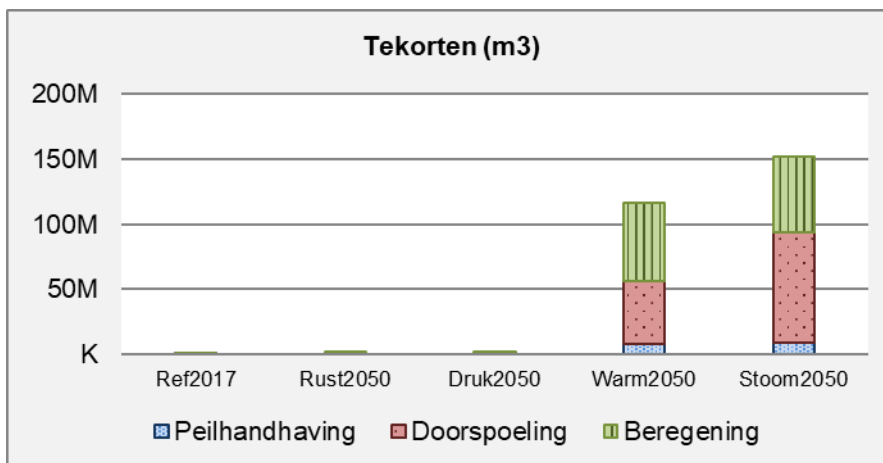
Figuur 3-19 Herhalingstijd buffergebruik voor het zomerhalfjaar IJsselmeer voor de Referentie 2017 (donkerblauw) en de scenario's Druk (blauw), Warm (geel) en Stoom (rood) 2050. Het scenario Rust heeft hetzelfde buffergebruik als Referentie 2017 en is daardoor niet zichtbaar in deze figuur (Mens, et al., 2019).

3.4.3 Oppervlaktewatertekort

Figuur 3-20 toont de berekende frequentie van optreden van watertekorten. In het huidige klimaat en in scenario Rust en Druk treden nauwelijks tekorten op. Bij sterke klimaatverandering zijn de tekorten in een droog jaar (herhalingstijd = 20 jaar) 30 miljoen m³ per jaar bij sociaaleconomische krimp (scenario Warm) en 50 miljoen m³ per jaar bij sociaaleconomische groei (scenario Stoom). In een extreem droog jaar kunnen de tekorten boven de 100 miljoen m³ per jaar uitkomen bij sterke klimaatverandering. Er wordt dan voornamelijk gekort op doorspoeling en beregening, zie Figuur 3-21.



Figuur 3-20 Herhalingstijd van het totale watertekort in regio Noord-Holland Noord in miljoen m³ in het zomerhalfjaar voor peilbeheer, doorspoeling en beregening uit het oppervlaktewater. Deze watertekorten zijn weergegeven voor een T=50 jaar (1976) voor de Referentie 2017 en de scenario's Rust, Druk, Warm en Stoom voor het zichtjaar 2050. Het scenario Rust en Referentie hebben dezelfde watertekorten als scenario Druk en zijn daardoor niet zichtbaar.



Figuur 3-21 Watertekort in regio Noord-Holland Noord in miljoen m3 in het zomerhalfjaar voor peilbeheer, doorspoeling en beregening uit het oppervlaktewater. Deze watertekorten zijn weergegeven voor een T=50 jaar (1976) voor de Referentie 2017 en de scenario's Rust, Druk, Warm en Stoom voor het zichtjaar 2050.

3.4.4 Stresstest IJsselmeerbuffer

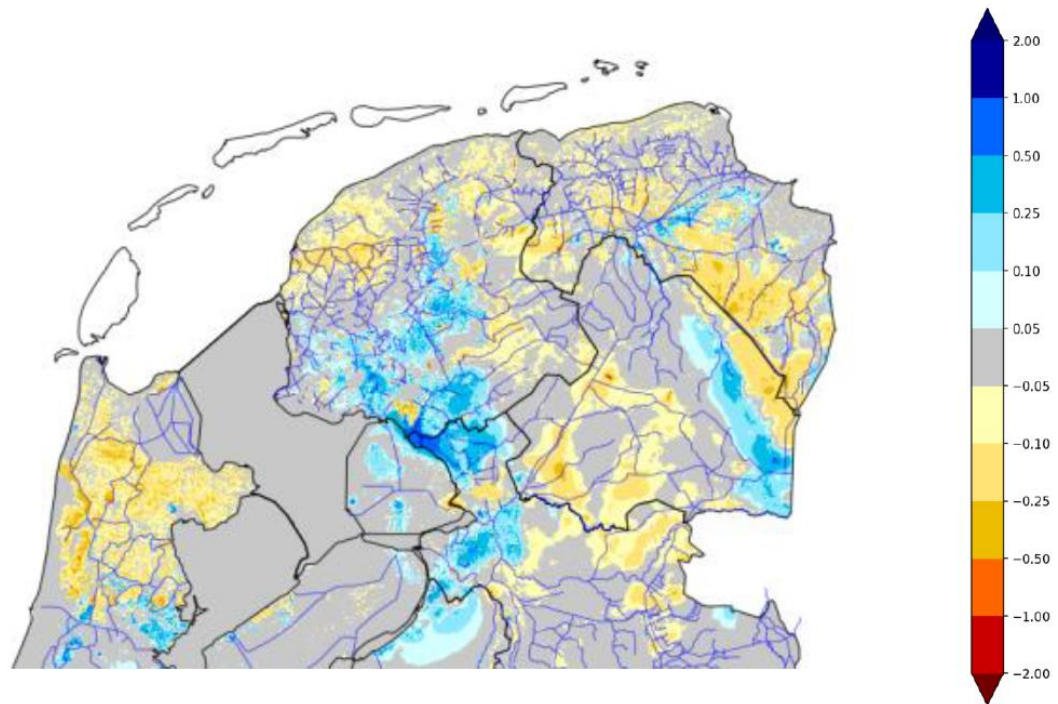
In 2021 is in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater een stresstestanalyse uitgevoerd naar het effect van nieuwe inzichten en onzekerheden op knelpunten in de zoetwatervoorziening (Pouwels, et al., 2021). Deze stresstest laat zien welke zoetwaterknelpunten overblijven na uitvoering van het Voorkeurspakket Zoetwater (Mens, et al., 2020) en als rekening wordt gehouden met de volgende vier onzekere ontwikkelingen:

- rivierbodemerrosie, waardoor de afvoerverdeling over de Rijntakken verandert en minder afvoer via de IJssel plaats vindt;
- maatregelen om bodemdaling in veenweidegebieden tegen te gaan (onderwaterdrainage en passieve peilstijging, die beide resulteren in een extra watervraag);
- grotere doorspoelvraag Afsluitdijk (op basis van praktijkervaringen tijdens droge zomer in 2018);
- kleinere buffer IJsselmeer omdat het zomerpeil van het IJsselmeer niet altijd tijdig kan worden opgezet.

Deze vier ontwikkelingen zorgen voor grotere druk op de bufferwerking van het IJsselmeer/Markermeer. De watervraag aan het IJsselmeer neemt toe als gevolg van de aanleg van onderwaterdrainage en passieve peilstijging en de grotere doorspoelvraag over de Afsluitdijk; de twee andere ontwikkelingen leiden tot een kleinere beschikbare watervoorraad. Als gevolg hiervan nemen de knelpunten in het voorzieningsgebied IJsselmeer/Markermeer flink toe in scenario Stoom2050:

- eens in de 5 jaar wordt de volledige IJsselmeerbuffer gebruikt en zakt het IJsselmeerpeil onder de -0,30 m NAP. Dit is in het huidige klimaat eens in de 15 jaar.
- eens in de 5 jaar kan meer dan 10% van de watervraag in het zomerhalfjaar niet geleverd worden.
- eens in de 15-20 jaar zakt het peil onder de -0,40 m NAP en ontstaan ook tekorten in het regionale peilbeheer.
- door de lagere debieten over de IJssel ontstaat eens in de 15 jaar een waterverdelingsvraagstuk: er is niet voldoende water om het IJsselmeer én de Twentekanalenvoldoende te voeden.

De onderstaande figuur geeft een beeld van de gevolgen van de vier onzekere ontwikkelingen op de zomergrondwaterstand in een zeer droog jaar. Te zien is dat de grondwaterstand in de binnenduinrand van Noord-Holland met 5 tot 25 cm afneemt.



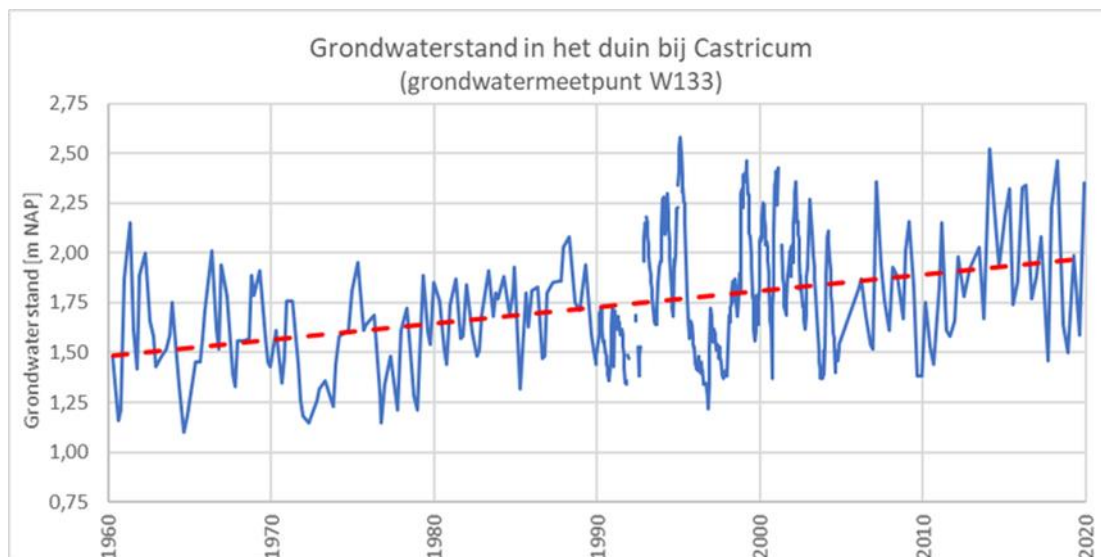
Figuur 3-22 Verandering LG3 (in meter) in een zeer droog jaar als gevolg van het stresspakket in scenario Stoom2050 (Pouwels, et al., 2021).

In het scenario Ref2017 nemen de knelpunten in Voorzieningsgebied IJsselmeer/Markermeer, als gevolg van de aanvullende aannamen van de stresstest, alleen in zeer droge jaren toe:

- eens in de 20 jaar wordt de volledige IJsselmeerbuffer gebruikt. Dit was eens in de 50-100 jaar.
- eens in de 50 jaar treden watertekorten van meer dan 10% van de watervraag per zomerhalfjaar op, waarbij ook tekorten ontstaan in het regionale peilbeheer.

3.5 Grondwaterstanden

De grondwaterstanden in het studiegebied zijn in het duingebied sterk verschillend van die in de peilbeheerste gebieden, de polders. De grondwaterstanden in de hogere duinen reageren door de processen van infiltratie en percolatie en langzame grondwaterafvoer met flinke vertraging op een neerslagoverschot. Daardoor zijn met name seizoen- of jaarsommen van de neerslag bepalend voor het grondwaterstandsverloop. In Figuur 3-23 is het grondwaterstandsverloop te zien van een meetpunt van PWN in het duingebied bij Castricum. De grondwaterstanden lopen in die periode flink op.



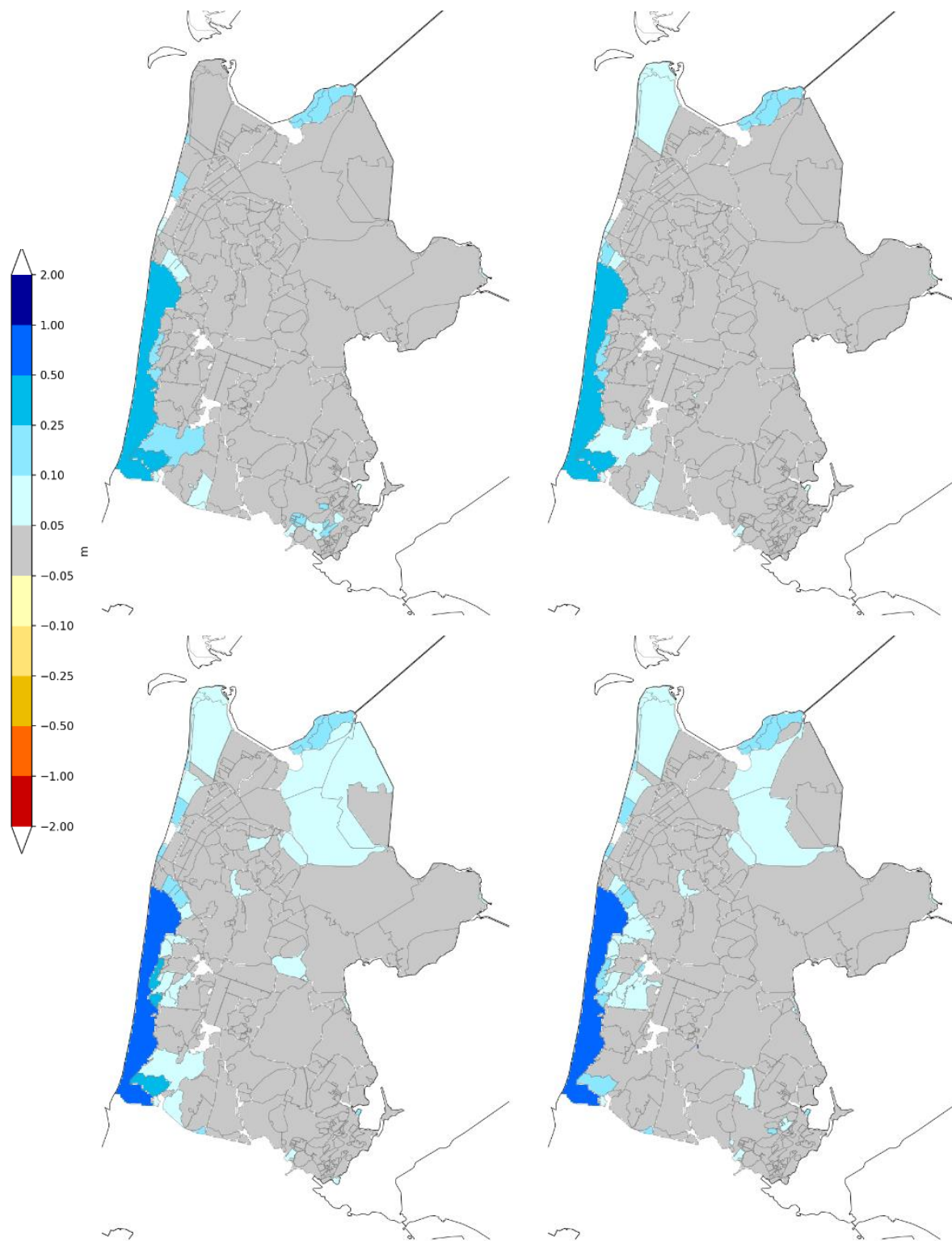
Figuur 3-23 Gemiddelde grondwaterstand (meter boven NAP) per jaar in het middenduin bij Castricum (PWN-beheergebied) (Bron: PWN).

In peilbeheerste gebieden is het effect van toenemende jaarneerslagsommen op de grondwaterstanden niet of veel minder zichtbaar omdat neerslagoverschotten daar veel sneller (in uren tot dagen) tot afvoer komen.

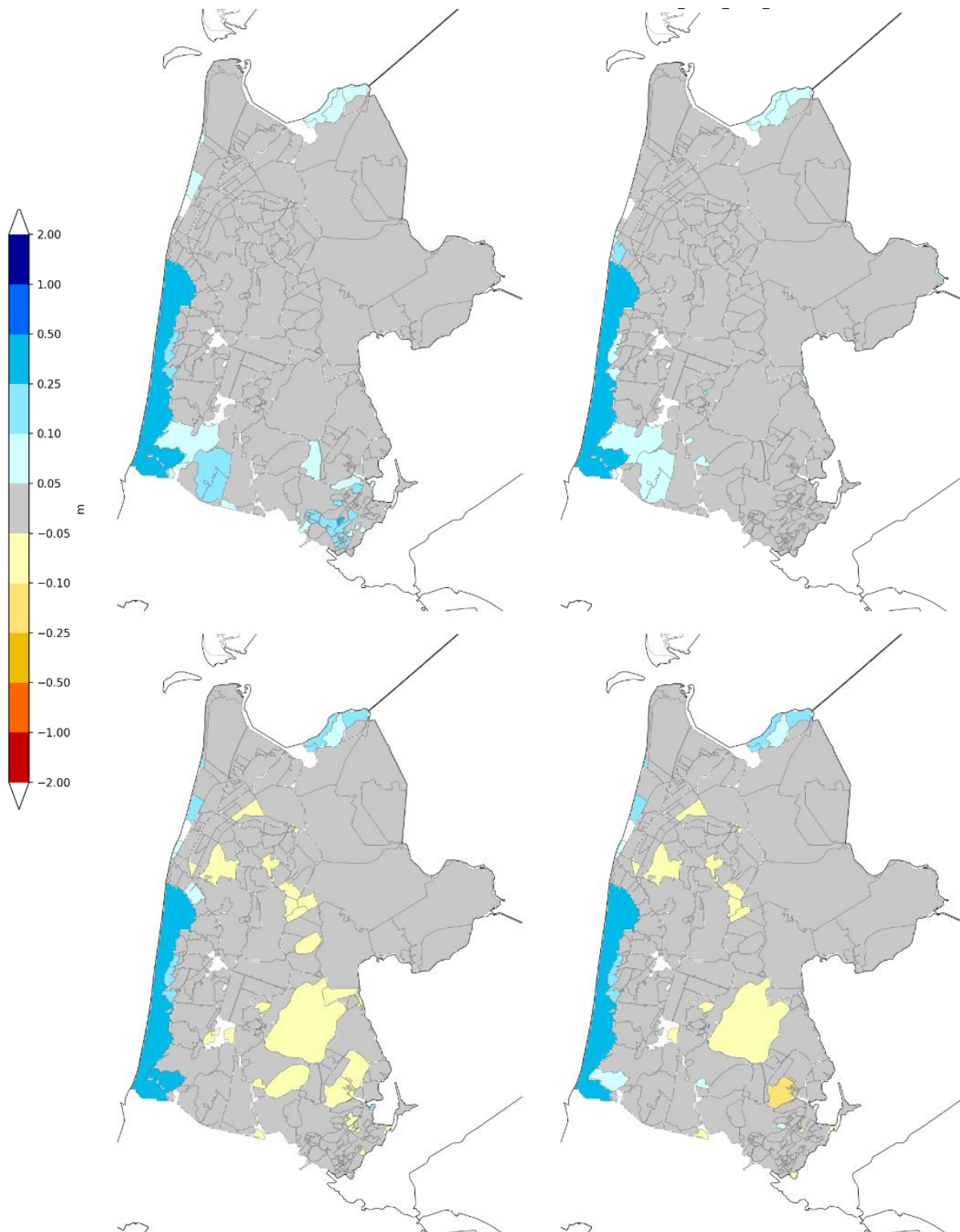
De grondwaterdynamiek kan in de toekomst veranderen als gevolg van klimaatverandering en/of een verandering in de grondwateronttrekkingen voor drinkwater, industrie en beregening. In Figuur 3-24 en Figuur 3-25 is de berekende verandering van de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) voor de verschillende scenario's weergegeven (Mens, et al., 2019).

In de scenario's Druk en Rust wordt een vergelijkbare verandering van de grondwaterstanden verwacht. In de infiltratiegebieden (bijvoorbeeld het duingebied) stijgen de GHG's en de GLG's als gevolg van een hogere gemiddelde neerslag in het matige klimaatscenario.

In de scenario's Warm en Stoom worden de GLG's in het poldergebied lager. Deze daling wordt veroorzaakt door : (1) bodemdaling, (2) toename van de potentiële verdamping en (3) lokaal toename van onttrekkingen uit het grondwater voor beregening.



Figuur 3-24 Verandering van de GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstanden) voor de scenario's Rust (links boven), Druk (rechts boven), Warm (links onder) en Stoom (rechts onder). De resultaten zijn gemiddeld weergegeven per poldergebied en gemiddeld over de doorgerekende periode van 100 jaar.



Figuur 3-25 Verandering van de GLG (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) voor de scenario's Rust (links boven), Druk (rechts boven), Warm (links onder) en Stoom (rechts onder). De resultaten zijn ruimtelijk gemiddeld per poldergebied en gemiddeld over de doorgerekende periode van 100 jaar.

4 Doorwerking naar sectoren

De kernboodschappen van dit hoofdstuk

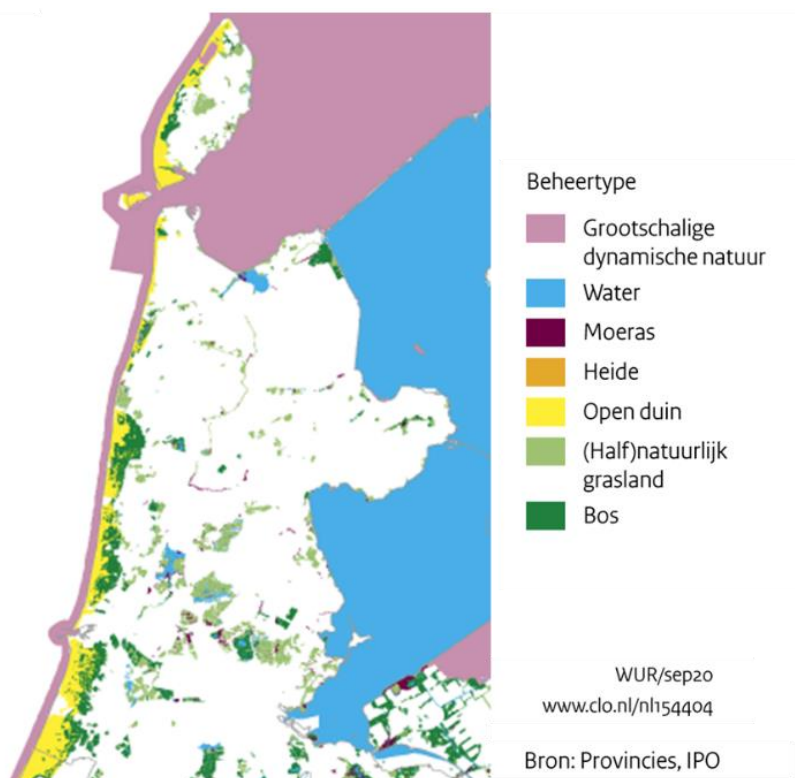
Sector	Belangrijkste groepen klimaatvariabelen	Urgentie (indicatief)	Mogelijke maatregelen, voorliggende strategische keuzes	Ruimtelijke impact (kwalitatief)
Natuur	Hitte en koude Nat en droog Kust en zee	Hoog (speelt al en wordt erger)	<p>Duinen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Al of niet doorgaan met het tegengaan van successie - Doelstellingen Natura2000 aanpassen of niet - Wijze van uitvoering van zandsuppleties en dynamisch kust- en duinbeheer; uitbouw van de kust of niet <p>Binnenduinrand:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Realiseren van aaneengesloten natuur - Grondwaterstand laten oplopen of draineren <p>Aquatische natuur:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verbeteren waterkwaliteit - Aanleg natuurvriendelijke oevers 	Sterk
Landbouw	Nat en droog Kust en zee	Hoog (speelt al en wordt erger)	<p>Wateroverlast:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bevorderen infiltratie en andere maatregelen op kavelniveau, vasthouden, liever dan richten op snel afvoeren - Aanleg aanvullende berging (met verdeling/aanvoermogelijkheden) - Alleen waar knelpunt: verruiming waterlopen <p>Watertekort:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maatregelen op bedrijfsniveau (bodemstructuur- en infiltratieverbeterende maatregelen, waterconservering, druppelirrigatie, aanpassing teeltplan) vs. verruimen wateraanvoer i.c.m. beregening - Functieverandering - Uitbaten mogelijkheden lokale grondwaterberging <p>Verziltning:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aanpassen gewaskeuze vs. verruimen wateraanvoer voor doorspoeling en beregening, of zelfs ontziltning <p>Op termijn komen door verziltning en watertekorten omslagpunten in beeld en is de huidige praktijk van landgebruik en wateraanvoer wellicht niet te handhaven; het eerst in de bollenteelt.</p>	Sterk
Drinkwater	Nat en droog Kust en zee	Middel (toenemende druk)	<ul style="list-style-type: none"> - Aanpassingen leidingenstelsel - Vergroten zoetwaterbel duinen bij hogere grondwaterstanden - Uitbaten mogelijkheden lokale grondwaterberging - Ruimtereservering binnenduinrand voor eventuele verplaatsing drinkwaterinfrastructuur vanuit duin vanwege zeespiegelstijging - Aanleg buffervorraden in het IJsselmeer 	Beperkt tot groot
Energie	Nat en droog	Laag	<ul style="list-style-type: none"> - Faciliteren koelwatervraag Petten; neemt waarschijnlijk af door autonome ontwikkelingen 	Beperkt
Industrie	Nat en droog	Laag	<ul style="list-style-type: none"> - Faciliteren koelwatervraag; deze is in het studiegebied beperkt van omvang 	Beperkt
Recreatie en toerisme	Hitte en koude Nat en droog Kust en zee	Hoog (speelt al en wordt erger)	<ul style="list-style-type: none"> - Faciliteren toenemende recreatiedruk, of proberen de druk te verplaatsen 	Sterk

Sector	Belangrijkste groepen klimaatvariabelen	Urgentie (indicatief)	Mogelijke maatregelen, voorliggende strategische keuzes	Ruimtelijke impact (kwalitatief)
Infrastructuur	Hitte en koude Nat en droog Kust en zee Bodemdaling	Laag	- Aanleg- en onderhoudsmaatregelen klimaatrobuust vormgeven	Beperkt
Stedelijk	Hitte en koude Nat en droog Bodemdaling	Hoog (speelt al en wordt erger)	- Maatregelen eigenaren voor vasthouden en bergen - Grondwateroverlast binnenduinrand: draineren of faciliteren - Wateraanvoer naar stedelijk gebied in droge perioden - Aanleg bergingsgebieden rondom de stad	Sterk

De sectoren waar de opgaven door klimaatverandering het urgentst zijn, zijn ook de sectoren waarin de maatregelen met de grootste ruimtelijke impact worden verwacht.

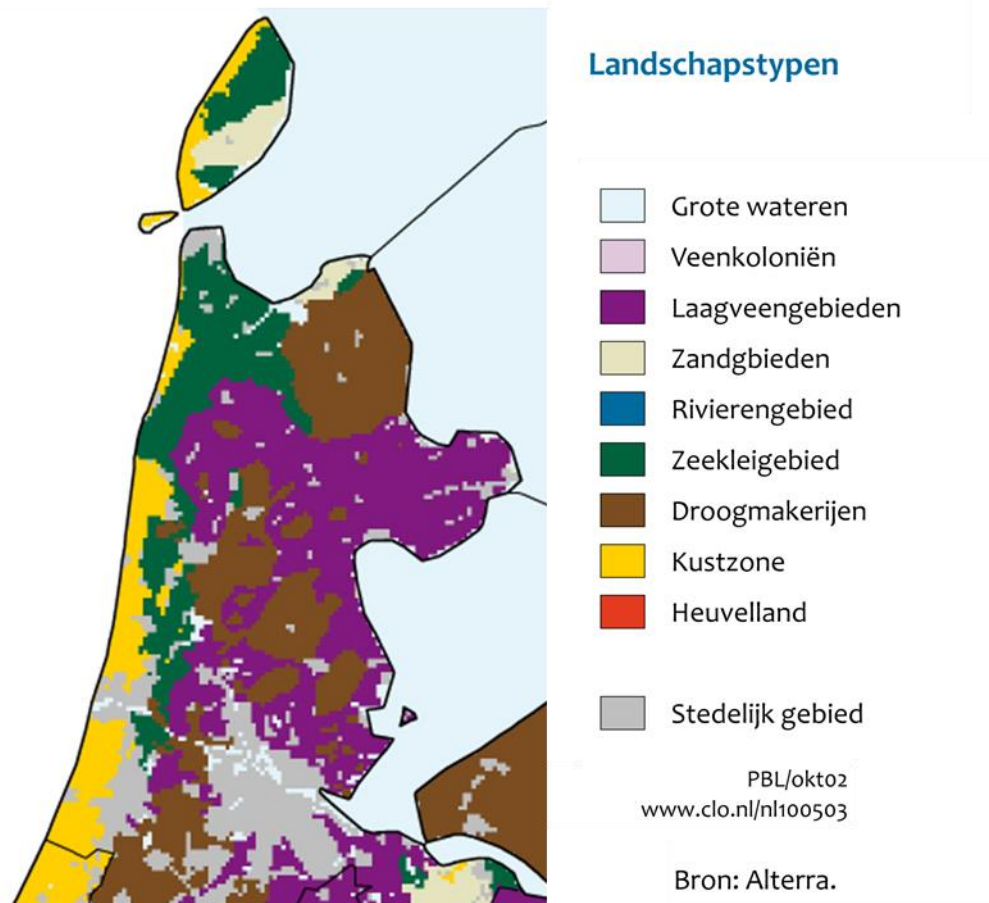
4.1 Natuur

Noord-Holland heeft verschillende typen natuur, die we voor deze rapportage opdelen in kustnatuur, terrestrische natuur en aquatische natuur. Met kustnatuur wordt de vooroever, het strand en de duinen bedoeld. De terrestrische natuur betreft (half)natuurlijk grasland in het veenweidegebied en bossen op droger gelegen plekken. Onder aquatische natuur scharen we de sloten, meren en moerassen in Noord-Holland.

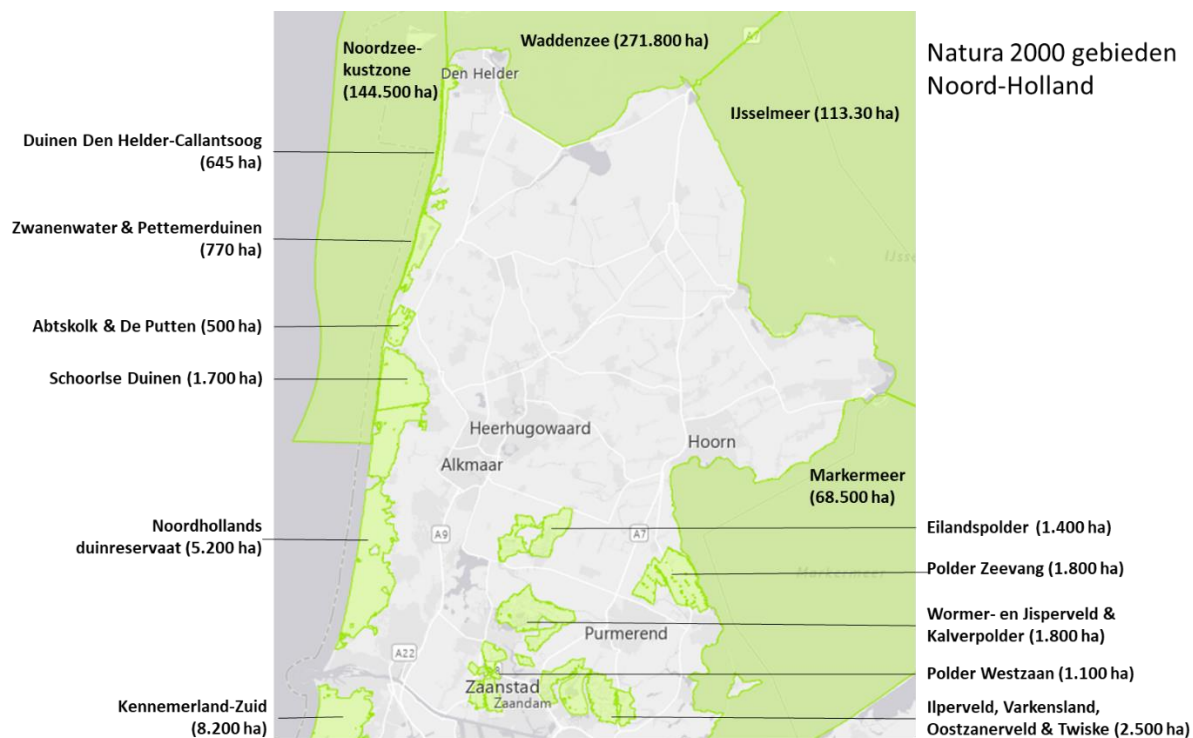


Figuur 4-1 Ecosysteemttypen volgens de Index Natuur en Landschap, 2019 (aangepast naar CLO 2020¹⁹)

¹⁹ [Index Natuur en Landschap | Compendium voor de Leefomgeving \(clo.nl\)](https://www.clo.nl/)



Figuur 4-2 Landschapstypen in het onderzoeksgebied. Landinwaarts van de zandige kustzone en in de Kop van Noord-Holland bevindt zich een strook zeeklei, de rest van Noord-Holland bestaat uit laagveengebieden, droogmakerijen (vaak met een zeekleibodem) en stedelijk gebied.



Figuur 4-3 Natura-2000 gebieden in het onderzoeksgebied van deze studie

4.1.1 Kustnatuur

De kustnatuur bestaat uit de vooroever, het strand en de duinen. Vanwege de hoge natuurwaarde is een groot deel hiervan aangewezen als Natura-2000 gebied (Figuur 4-3). Door de gradiënten in zoutgehalte, bodemvorming, vochtgehalte en successie zijn de duinen rijk aan plant- en diersoorten die voorkomen in verschillende habitats zoals duingrasland, vochtige duinvalleien en duinbossen. De vooroever is het ondiepe deel onder water en heeft een belangrijke functie als plek voor jonge vis, schelpdierbanken en foeragerende vogels.

Beheer

Tot de jaren '90 was het duinbeheer gericht op het vastleggen van zand. Hierdoor zijn hoge zanddijken ontstaan waarachter het wegvallen van dynamiek leidde tot versnelde successie, met grote oppervlakten aan struiken en bossen tot gevolg. De versnelde successie richting struweel (duindoorn) en de uitbreiding van nutriënt-minnende vegetaties is een probleem voor de instandhouding van bijvoorbeeld habitattypen grijze duinen en vochtige duinvalleien. Dit komt door de afname van konijnenpopulaties, het ontbreken van verstuivingsdynamiek en de hoge neerslag van atmosferische stikstof. Door de regelmatige strand- en vooroeversuppleties die Rijkswaterstaat nu al dertig jaar uitvoert is er voor de duinbeheerders ruimte ontstaan om het doorstuiven van zand in de duinen weer toe te staan zonder dat dit ten koste gaat van de kustveiligheid. Het laten doorstuiven van zand naar de duinen achter de zeereep, bijvoorbeeld door de aanleg van kerven, draagt bij aan het herstellen van de natuurlijke gradiënten langs de kust en aan het behoud van kwetsbare Natura-2000 habitattypen en rodelijstsoorten. Dit levert geschikt leefgebied op voor veel diersoorten, waaronder karakteristieke insecten van kustduinen en hun predatoren, zoals diverse broedvogels (Grauwe klauwier, Tapuit, Boompieper) en de Zandhagedis. Het creëren van open zandige plekken in het duin zorgt voor verjonging van de bodem, wat leidt tot situaties met een humusarmer en relatief basisch (minder zuur) milieu, waar karakteristieke pioniersoorten van kunnen profiteren. Op het strand en de vooroever leiden de suppleties tot bedelving en sterfte van bodemdiergemeenschappen. Onderzoek toont aan dat deze gemeenschappen zich binnen een aantal jaar weer kunnen herstellen (Prins, in prep.); zie ook *Onderwaternatuur versus zandsuppleties - Waterinfo Extra (rws.nl)*.

Effect van klimaatindicatoren

Voor de kustnatuur zijn de klimaatindicatoren hitte en koude, nat en droog, en kust en zee van belang. Ook wind is van belang maar daarin zijn geen veranderingen voorzien.

Hitte en koude: Een warmer klimaat met minder vorstdagen kan leiden tot verspreiding van nieuwe soorten. Zuidelijke plantensoorten van overstoven vloedmerken, zoals de gele hoornpapaver en de gelobde melde, kunnen zich gaan uitbreiden²⁰. Ook lijkt de blauwe zeedistel bij opwarming meer richting het strand voor te komen. Een hogere temperatuur van het zeewater heeft invloed op het leven in de zee. Zo maakt de schol al minder gebruik van de kustzone als kinderkamer en is de timing van het paaien vervroegd²¹. Klimaatverandering kan ervoor zorgen dat visstanden sterker gaan schommelen (van der Sleen, et al., 2022). Zowel in het duin als onder water kan het veranderend klimaat ertoe leiden dat nieuwe invasieve exoten zich gaan vestigen. Alertheid hierop blijft geboden.

Nat en droog: Grondwater en de dynamiek daarin is zeer bepalend voor de het voorkomen van de verschillende duinhabitats. Nattere of drogere omstandigheden door neerslagoverschot of langdurige droge perioden hebben daardoor een groot effect op de kustnatuur. Wanneer het grondwatervniveau in het duin stijgt door zeespiegelstijging en neerslagoverschot, zoals het Deltaprogramma Zoetwater en PWN verwachten (zie paragraaf 3.5 en 4.3), leidt dat tot vernatting van duinhabitats. Langdurige perioden van droogte in het

²⁰ [Bedreigingen en kansen - Het Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit \(OBN\) \(natuurkennis.nl\)](#)

²¹ [Invloed van klimaatverandering op mariene ecosystemen - WUR](#)

groeiseizoenen kunnen zorgen voor veranderde soortsaamenstelling in vochtige duinvalleien omdat het de waterstand verandert die bepalend is voor de soortsaamenstelling (Noest, 1991). Anderzijds is de ervaring van de droogte van 2018/19 dat de duinvegetatie goed bestand is tegen extremen en zich snel herstelt van droogte. De vochttoestand van de bodem hangt samen met de duindynamiek. Door vochtigere en warmere omstandigheden (inclusief een langer groeiseizoen) zal de duingroei mogelijk versnellen, wat kan leiden tot hogere primaire productie (Fonck, mond.meded.).

Kust en zee: Het suppletiebeleid heeft grote invloed op de morfologie van de kust en is daarmee ook bepalend voor de natuurontwikkeling. Zo leidt het zeewaarts uitbouwen van de kust tot bredere stranden waardoor meer ruimte komt voor de ontwikkeling van embryonale duinen, en voor het toestaan van dynamiek in de zeereep. De geochemische saamenstelling van het suppletiezand (waaronder het kalkgehalte) verschilt vaak van het van nature aanwezige sediment. Dit heeft op lange termijn gevolgen voor de bodemdiergemeenschap en de soortsaamenstelling van duinvegetatie. Zeker als de frequentie en hoeveelheden van kustsuppleties toenemen door toenemende erosiedruk als gevolg van de stijgende zeespiegel. Op het strand en de vooroever kan deze langzame verandering in sedimentsaamenstelling leiden tot veranderingen in de bodemdiergemeenschap (Prins, in prep.).

Maatregelen

Mogelijk leiden veranderingen in habitats door veranderde waterstanden tot problemen in de N2000 wetgeving. Het is verstandig om hierover vooraf het gesprek aan te gaan met de natuurbeheerders, provincie en ministerie en afspraken te maken hoe hiermee wordt gegaan (indien dat nog niet gebeurt). Voor duinbeheerders zal het tegengaan van successie, bijvoorbeeld door begrazing, maaien en afvoeren en het stimuleren van zanddynamiek in het duin, waarschijnlijk het belangrijkste aandachtspunt blijven, zeker als de stikstofdepositie niet drastisch afneemt.

4.1.2 Terrestrische natuur

De terrestrische natuur in Noord-Holland ten oosten van de kustzone bevindt zich op een strook zeeklei, uitgestrekte laagveengebieden en droogmakerijen die vaak een zeekleibodem bevatten. Bijna al het oppervlak hiervan is met de eeuwen geschikt gemaakt voor landbouw en wordt nog steeds als zodanig gebruikt. De natuurgebieden die zijn overgebleven zijn brakke laagveengebieden in verschillende verlandingsstadia (waaronder de Polder Westzaan, Eilandspolder, Wormer en Jisperveld en de Kalverpolder). In de laagveengebieden komen zeldzame vegetaties voor, waaronder trilvenen en veenheiden en het zijn belangrijke broedgebieden voor vogels. In deze laagveengebieden komen ook veenplassen voor die we in dit onderzoek scharen onder 'aquatische natuur'. Naast de natuurgebieden van Natura-2000 en Natuurnetwerk Nederland draagt ook agrarisch natuur- en landschapsbeheer bij aan de natuurwaarden van Noord-Holland. In Noord-Holland komt een belangrijk deel van de Nederlandse weidevogels voor. Een groot gebied in de provincie is planologisch beschermd als weidevogelleefgebied. Soortrijke weide- en hooilanden zijn belangrijk als vogel(broed)gebied voor weidevogels.

Beheer

De natuurwaarde van de gebieden in Noord-Holland staat onder druk door een gebrek aan geschikte leefgebieden, versnippering, onvoldoende waterkwaliteit, verdroging en eutrofiëring. Vanuit de provincie Noord-Holland worden in programma Natuurontwikkeling diverse natuurprojecten gefinancierd om het areaal aan natuur te vergroten, de kwaliteit ervan te verbeteren en de onderlinge verbinding te versterken (Provincie Noord-Holland, 2020). Dit laatste is in het licht van klimaatverandering extra belangrijk, omdat soorten gaan migreren. Zo zijn er ambities om de binnenduintrand in te richten als natuurgebied om de

natuurkwaliteit van de duinen te beschermen tegen ongewenste milieudruk als versnippering, stikstofdepositie en verdroging.

Effecten van klimaatindicatoren

Voor de terrestrische natuur zijn de klimaatindicatoren hitte en koude, nat en droog en bodemdaling van belang.

Hitte en koude Een warmer klimaat met minder vorstdagen kan leiden tot verspreiding van nieuwe soorten in de terrestrische natuurgebieden.

Nat en droog Laagveennatuur is gevoelig voor verdroging. Door de verschillende functies van het laagveengebied (naast natuur ook landbouw en bebouwing) is er vaak sprake van ontwatering met als gevolg een voor de natuur ongunstig grondwaterniveau. Door ontwatering kunnen de meest kritische planten- en diersoorten die afhankelijk zijn van een hoge grondwaterstand onder druk komen te staan. Daarnaast is een gevolg dat de veenafbraak en de bodemdaling zich voortzetten. Volgens paragraaf 3.5 kan de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand afnemen als gevolg van klimaatverandering in delen van het laagveengebied.

Bodemdaling Bodemdaling in laagveengebieden is een gevolg van de oxidatie van veen door een lage grondwaterstand, en is daarmee eerder een gevolg (indicator van achteruitgang) dan een oorzaak.

Maatregelen

Wanneer in het laagveengebied grotere aaneengesloten natuurgebieden worden gerealiseerd, kan het waterbeheer beter op de natuur worden afgestemd en kan met peilbeheer een hogere grondwaterstand worden gerealiseerd voor het behoud en herstel van kritische habitats als veenmosrietlanden en soorten als de roerdomp zich uitbreiden. Om weidevogels duurzaam te behouden voor Noord-Holland zijn soortenrijke weide- en hooilanden van groot belang.

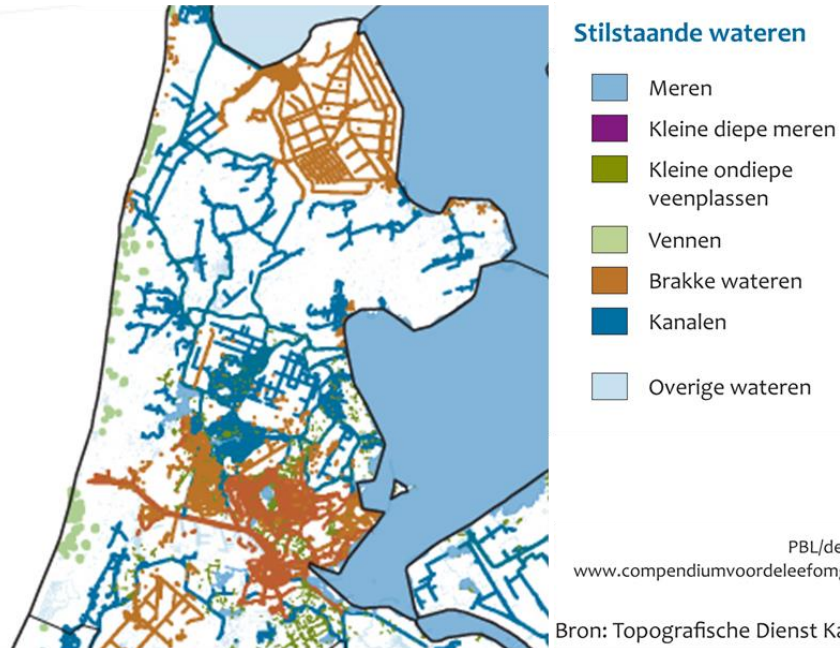
Het verhogen van het waterpeil in de binnenduinstrand door stuwen, waarmee gebiedseigen water wordt vastgehouden, kan bijdragen aan het op peil houden of zelfs vergroten van de zoetwatervoorraad onder de duinen en biedt kansen voor synergie tussen waardevolle natte natuur en drinkwatervoorziening (zie ook paragraaf 4.3).

4.1.3 Aquatische natuur

Aquatische natuur omvat de meren, sloten en kanalen in Noord-Holland. De ecologische kwaliteit hiervan wordt gemonitord voor de Kaderrichtlijn Water (KRW). Het oppervlaktewater staat voor een veelheid aan opgaven, waaronder eutrofiëring, chemische stoffen en te weinig natuurlijke inrichting en beheer. Er kan in het studiegebied onderscheid worden gemaakt tussen brak oppervlaktewater en zoet oppervlaktewater (Figuur 4-4; vergelijk deze met Figuur 3-11). De vennen in de duinen zijn in deze studie onderdeel van de kustnatuur. In het laagveengebied bestaat 10 tot 20% van het gebied uit sloten (CLO 2009²²). Vanwege de beperkte grootte zijn de meeste sloten geen waterlichaam in de KRW. De ecologische kwaliteit van een groot deel van de wateren in het studiegebied is in 2019 beoordeeld als ontoereikend in een KRW tussenrapportage (CLO 2020²³). Sommige soorten laten een positieve trend zien, zoals libellen (Provincie Noord-Holland 2019). Dit komt deels doordat de waterkwaliteit lokaal verbetert, maar is ook een effect van het warmer wordende klimaat.

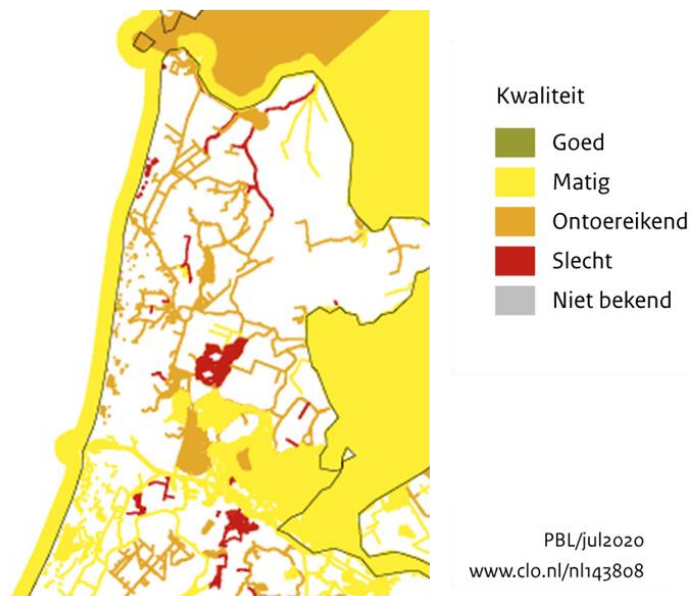
²² [Oppervlaktewater in Nederland | Compendium voor de Leefomgeving \(clo.nl\)](#)

²³ [Waterkwaliteit KRW, 2019 | Compendium voor de Leefomgeving \(clo.nl\)](#)



Figuur 4-4 Typen stilstaande wateren in Noord-Holland (aangepast naar CLO 2009²⁴)

Beoordeling ecologische kwaliteit, Kaderrichtlijn Water, 2019



Bron: IHW (waterschappen, RWS); bewerkt door PBL

Figuur 4-5 Beoordeling ecologische waterkwaliteit, Kaderrichtlijn Water, 2019 (CLO 2020²⁵)

Effecten klimaatindicatoren

Voor aquatische natuur zijn de klimaatindicatoren hitte en koude, nat en droog en kust en zee van belang.

Hitte en koude Opwarming van oppervlaktewater door klimaatverandering kan nadelige gevolgen hebben voor de waterkwaliteit en de ecologie (Kosten, et al., 2011) (Figuur 4-6).

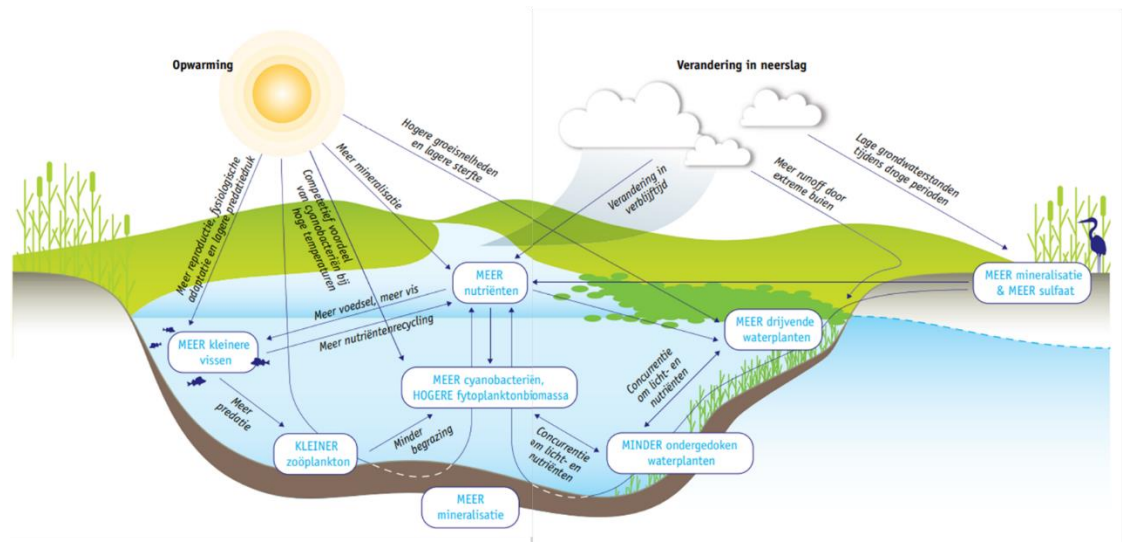
²⁴ [Oppervlaktewater in Nederland | Compendium voor de Leefomgeving \(clo.nl\)](#)

²⁵ [Waterkwaliteit KRW, 2019 | Compendium voor de Leefomgeving \(clo.nl\)](#)

Bij watertemperaturen hoger dan 20 °C gedijen ongewenste exotische planten en dieren, blauwalgen, ziekteverwekkers- en verspreiders beter. Bovendien kan een hogere watertemperatuur leiden tot zuurstofgebrek. Andere gevolgen zijn hogere interne fosfor- en stikstofbelasting als gevolg van door opwarming verhoogde nalevering vanuit het sediment (hogere temperaturen versnellen de mineralisatie, waarbij fosfor en stikstof vrijkomt). In Noord-Holland is de opwarming van het oppervlaktewater door klimaatverandering een risico (klimaat-effectatlas²⁶). Al deze veranderingen zullen het moeilijker maken om te voldoen aan de eisen van de KRW.

Nat en droog Fluctuaties in de waterstand van kleine wateren kunnen gevolgen hebben voor de ecologie. Droge zomers leiden tot droogval en hogere sterfte van kleine waterdiertjes in beken²⁷, en hoosbuien kunnen leiden tot vissterfte. In het studiegebied zijn deze effecten minder waarschijnlijk omdat de meeste oppervlaktewateren peilbeheerst zijn.

Kust en zee Verzilting van het oppervlaktewater door zoute kwel (een mogelijk gevolg van zeespiegelstijging, zie paragraaf 3.3) kan leiden tot een andere soortsaanstelling van de oppervlaktewateren. Met name de fluctuaties in zoutconcentraties vragen specifieke aanpassingen van organismen, en bijgevolg is er dan ook slechts een specifieke groep soorten die aan brakke condities zijn aangepast. De levensgemeenschappen in brakke wateren met lagere chloridegehalten bestaan vooral uit zoetwatersoorten die een hoger zoutgehalte kunnen verdragen. Bij hoger zoutgehalte leven kenmerkende zoutwatersoorten. Het aantal soorten bij chloridegehalten daar tussenin is laag (STOWA, z.d.).



Figuur 4-6 Belangrijkste effecten van klimaatverandering op eutrofiëring en eutrofiëringseffecten in oppervlaktewateren (Kosten, et al., 2011).

Maatregelen

Aanknopingspunten voor verbetering van de waterkwaliteit zijn herstel van zoet-zout overgangen, het voeren van een natuurlijk peil en het extensief schonen van sloten. In oppervlaktewateren blijft het verbeteren van de waterkwaliteit door het tegengaan van eutrofiering een belangrijk aandachtspunt, net als het aanleggen van meer natuurlijke oevers. Klimaatverandering kan leiden tot een ecologische achteruitgang wanneer de watertemperatuur te veel toeneemt.

²⁶ [Opwarming oppervlaktewater - Klimaat-effectatlas](#)

²⁷ [Kleine diertjes in beken lijden zwaar onder extreme droogte - WUR](#)

4.1.4 Schade door natuurbranden

Door hogere gemiddelde temperaturen, meer droogteperioden en vaker voorkomende hittegolven neemt de kans op natuurbranden toe. In de Klimaatschadeschatter zijn de kosten opgenomen voor de inzet van brandweer die daarvan het gevolg zijn. Voor de gemeenten in het studiegebied (Alkmaar, Bergen, Beverwijk, Castricum, Den Helder, Heemskerk, Heiloo, Langedijk, Schagen en Uitgeest) is dat in totaal 3,7 miljoen euro voor de periode 2018-2050, oplopend tot 4,7 miljoen euro bij sterke klimaatverandering. Schade aan de natuur en aan andere gebruiksfuncties is daarin niet verdisconteerd, dus de genoemde getallen zijn een uiterste ondergrens van de werkelijke te verwachten schade. De kaartbeelden van de Klimaatschadeschatter laten zien dat verreweg de meeste schade zal optreden in de duinen.

4.2 Landbouw

Klimaatverandering heeft via allerlei sporen invloed op de landbouw. Een goed overzicht is te vinden in (EEA, 2019). Landbouw heeft vooral te maken met de groepen klimaatvariabelen 'nat en droog' en 'verzilting'.

In de landbouw worden de klimaatveranderingen overwegend als bedreiging gezien (toename wateroverlast, toename droogteschade, toename zoutschade) maar gedeeltelijk ook als kans (verlenging groeiseizoen, mogelijkheden voor andere gewaskeuzen).

Kenmerkend voor het studiegebied is het grote areaal van de bollenteelt. Deze vormt een cluster van nationaal belang in het noorden van het studiegebied. De bollenteelt is kapitaalintensief en gevoelig voor de beschikbaarheid van voldoende water van goed kwaliteit, voor het zoutgehalte in de bodem, en het zoutgehalte in het oppervlaktewater dat wordt gebruikt voor beregening. Daarbij komt dat de eisen van diverse typen bollen sterk uiteen kunnen lopen en bepalend zijn voor de eisen aan het waterbeheer: 'de ene bol is de andere niet'.

4.2.1 Beregend areaal

De beregende arealen per gewastype in het voorzieningsgebied van HHNK zijn geïnventariseerd in de watervraagprognosetool van RDO Noord (HKV, Witteveen en Bos, 2020). Zie Tabel 4.1. De arealen hebben betrekking op het gebied dat als aanvoergebied is aangemerkt.

Tabel 4.1 Landgebruik van het beregende areaal in het voorzieningsgebied van HHNK volgens het Landelijk Hydrologisch Model, op basis van gegevens watervraagprognosetool RDO Noord

Landgebruik	Oppervlakte LHM (ha)	Beregend uit grondwater (%)	Beregend uit oppervlaktewater (%)
Gras	60.361	1,1	9,4
Mais	4.201	0,7	21,7
Aardappelen	7.867	0,5	48,7
Bieten	3.089	0,2	40,4
Granen	3.089	0,0	9,6
Overige landbouwgewassen	10.487	0,4	55,7
Boomteelt	234	0,0	74,7
Glastuinbouw	808	0,0	84,1
Boomgaard	45	0,0	25,4
Bollen	10.596	2,2	83,8

Uitgelicht: de bloembollenteelt

De bloembollenteelt is in het studiegebied een cruciale sector, niet alleen in economisch opzicht maar ook als watergebruiker en beeldbepalende landgebruiker.

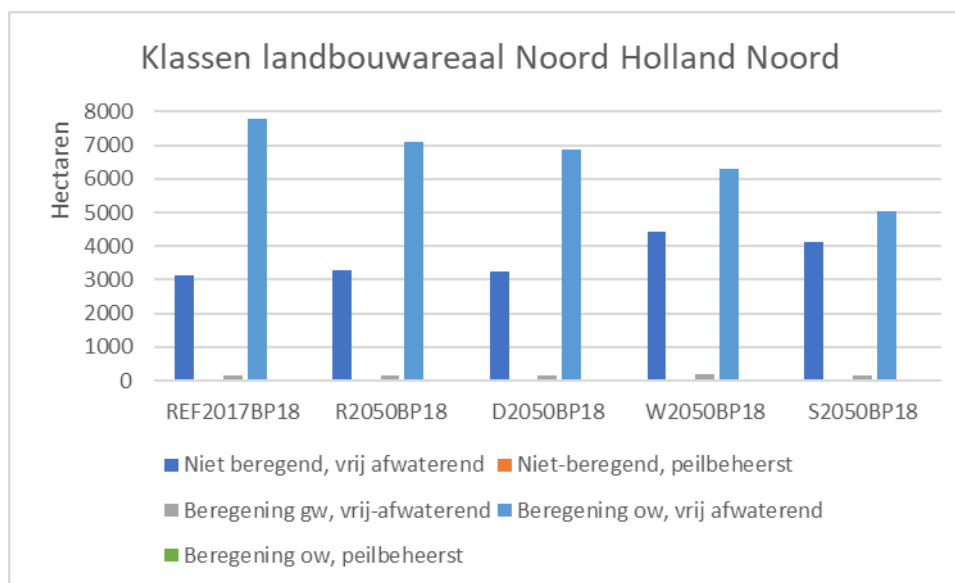
In (HHNK, 2018) is een bijlage opgenomen met de arealen bollen per soort in het beheergebied van HHNK, met daarbij de jaarlijkse opbrengst per ha volgens de NSO-typering 2017 van de WUR. Het areaal bloembollen en -knollen bedraagt circa 10.600 ha. De gewogen gemiddelde opbrengst van dat areaal bedraagt 26.300 euro per ha per jaar, in totaal zo'n 275 miljoen euro per jaar. Van het areaal van 10.600 ha ligt het grootste deel in het studiegebied (op grond van Figuur 3-3), maar een exact getal hiervan is niet beschikbaar.

Klimaatverandering vormt voor de sector een grote bedreiging, vooral door verzilting (die al voelbaar is (Acacia Water, 2014)), maar ook door toenemende droogte en wateroverlast. In de publicatie 'Samen werken aan water – Visie van de bloembollensector op waterkwaliteit en waterbeschikbaarheid' geeft de sector een overzicht van de uitdagingen en de maatregelen die de sector en de telers zelf kunnen nemen om die het hoofd te bieden zoals verminderen van uitspoeling van bestrijdingsmiddelen en nutriënten, vermindering van het watergebruik, vasthouden van water, onder het motto 'Wij moeten zelf initiatieven nemen en voorkomen dat anderen dat voor ons doen.'

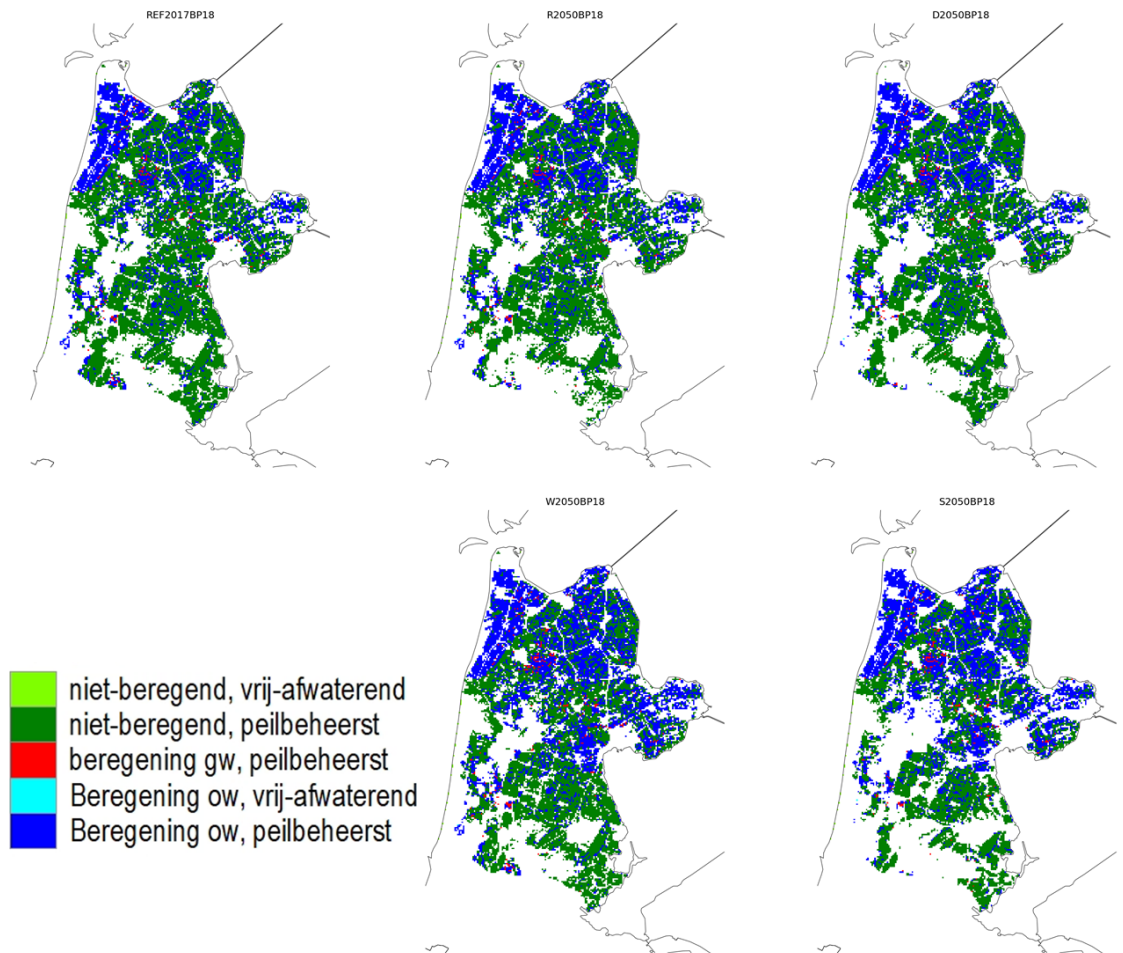
4.2.2 Verdampingstekort en droogterisico

Als gevolg van de klimaatverandering, veranderingen in het landgebruik of het waterbeheer kan het verdampingstekort veranderen. De mate waarin dat te verwachten is hangt onder andere af van de vraag of er berekend wordt of niet en of het peil al dan niet wordt beheerst en wateraanvoer mogelijk is.

De klassen die daarvoor in de regio Noord-Holland Noord zijn gehanteerd in het Deltaprogramma zijn als staafdiagrammen weergegeven in Figuur 4-7 en als kaartbeeld in Figuur 4-8.



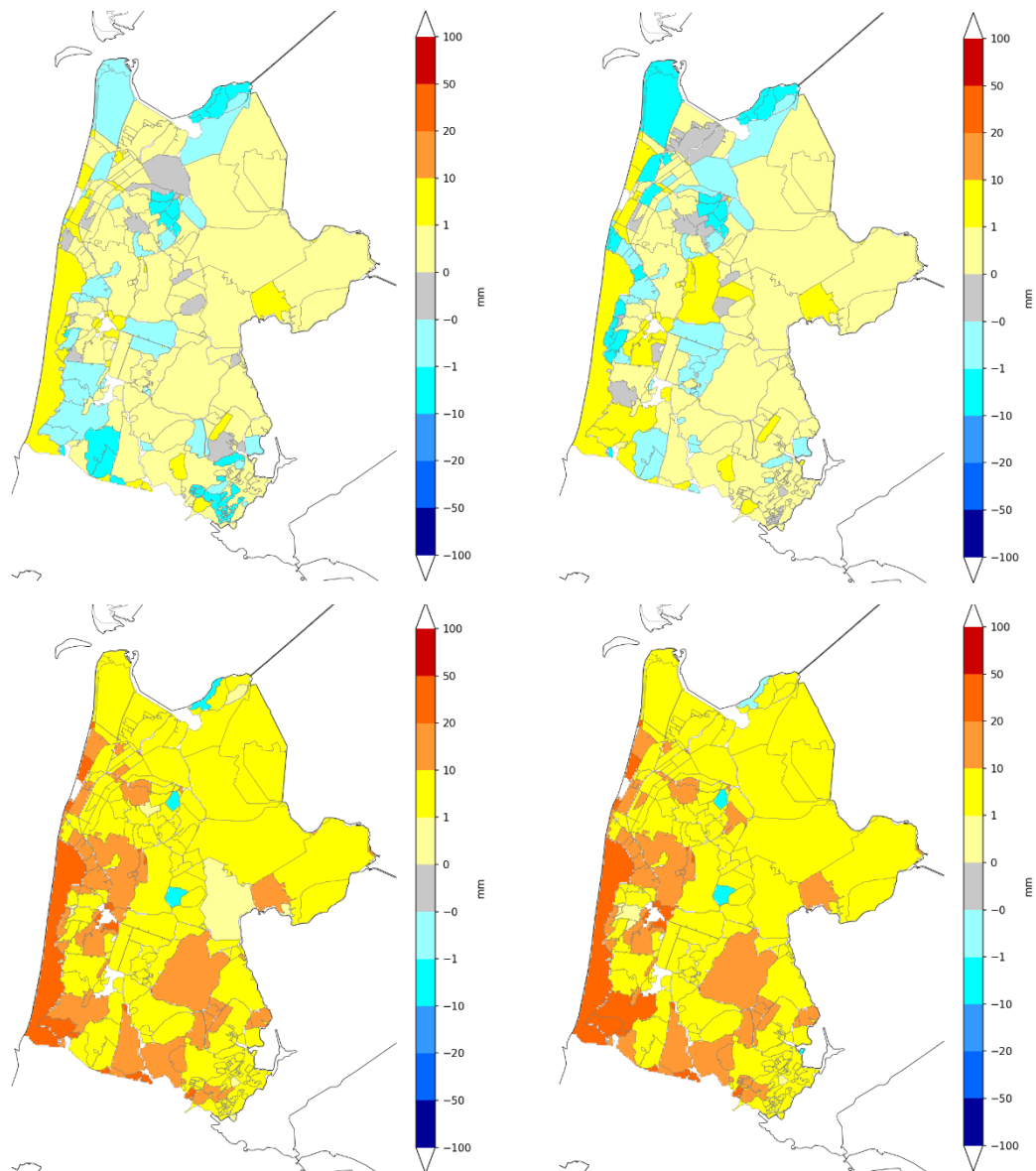
Figuur 4-7 Klassen landbouwareaal Noord-Holland Noord (Mens, et al., 2019).



Figuur 4-8 Kaartbeeld van de klassen landbouwareaal in Noord-Holland Noord (Mens, et al., 2019).

In Figuur 4-9 is de verandering van het gemiddelde verdampingstekort²⁸ weergegeven voor de vier Deltascenario's. Hierin is zichtbaar dat het klimaatscenario de grootste invloed heeft op het verdampingstekort. Voor de scenario's Warm en Stoom, met sterke klimaatverandering, wordt een toename van het verdampingstekort van meer dan 20 mm (over het hele jaar) berekend in het duingebied, als gevolg van de toename in verdamping. Voor de scenario's Rust en Druk met gematigde klimaatverandering wordt een beperkte verandering van het verdampingstekort berekend (Mens, et al., 2019).

²⁸ Het verdampingstekort is het tekort aan water in de wortelzone dat beschikbaar is voor verdamping via gewassen. In het DPZW is dit berekend als het verschil tussen potentiële en actuele verdamping, over de periode 2029-2011.



Figuur 4-9 Verandering van de gemiddelde verdampingstekorten ($T_{pot}-T_{act}$) in mm voor de scenario's Rust (links boven), Druk (rechts boven), Warm (links onder) en Stoom (rechts onder).

De schadeberekeningen van het Deltaprogramma Zoetwater zijn berekend als de gemiddelde opbrengstderving per jaar berekend over 100 weerjaren (100-jarige reeks), vermenigvuldigd met gewasprijzen, rekening houdend met prijseffecten door marktwerking. Opbrengstderving is gedefinieerd als het verschil tussen actuele en potentiële opbrengst, en wordt veroorzaakt door bodemvochttekort (deels beregeningstekort) en zout in het bodemvocht (deels door verzilt beregeningswater). Zoutstress is in het model zeer onzeker en mogelijk overschat. In deze regio wordt relatief veel zoutschade berekend vergeleken met de rest van Nederland.

Er zijn van het Deltaprogramma Zoetwater geen gegevens beschikbaar voor precies het studiegebied, maar voor Noord-Holland Noord (boven het Noordzeekanaal, exclusief Texel) zijn de opbrengstdervingen berekend als gemiddelde en voor een droog jaar (Tabel 4.2).

Tabel 4.2 Jaarlijks landbouwriscico door droogte, gemiddeld voor een reeks van 100 jaar, en in een droog jaar, in de landbouw in Noord-Holland Noord zoals berekend in het Deltaprogramma Zoetwater (afgeleid uit (Mens, et al., 2020)).

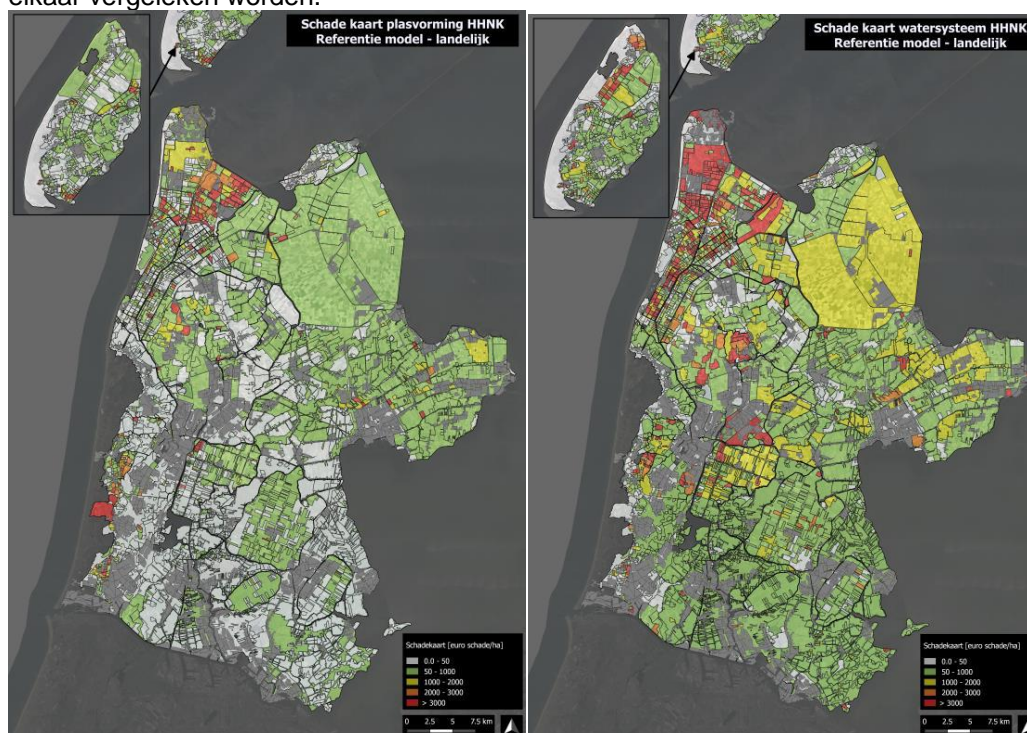
	Scenario	Jaarlijks risico (Meuro/jr)	Aandeel droogtestress (%)	Aandeel zoutstress (%)
Gemiddelde over reeks van 100 jaar	Referentie	75	16	84
	Stoom2050	87	20	80
Droog jaar	Referentie	267	26	74
	Stoom2050	308	40	60

Maatregelen

In de scenario's van het Deltaprogramma Zoetwater zijn maatregelen onderzocht om de droogte en verzilting tegen te gaan. Op grond van kosten-batenafwegingen is vervolgens een maatregelenpakket samengesteld. Daarbij zijn aannamen gedaan over de arealen die worden berekend, zoals weergegeven in Figuur 4-7 en Figuur 4-8 (N.B. de effecten van deze maatregelen zijn niet verwerkt in bovenstaande tabel).

4.2.3 Wateroverlast

De best beschikbare gegevens over schade door wateroverlast in het landelijke gebied zijn afkomstig van de BWN2-studie (HHNK et al., 2020). Deze gegevens hebben betrekking op het hele beheergebied van HHNK, zie Figuur 4-10 en zijn berekend voor het gebied buiten de bebouwde kom. De schade heeft dus ook betrekking op de daar aanwezige bebouwing. Het overgrote deel (niet exact bepaald) is echter toe te rekenen aan de landbouw. De meeste schade ontstaat door inundaties vanuit het watersysteem: voor de komende 50 jaar is dat 156 miljoen euro, tegen 65 miljoen euro door plaspvorming. Let wel: deze schadegetallen zijn op een andere manier berekend dan de schade door watertekorten, dus ze kunnen niet met elkaar vergeleken worden.



Figuur 4-10 Schade per hectare per peilgebied in landelijk gebied. Linker figuur: door plaspvorming, rechter figuur: door inundatie uit het watersysteem. Bron: HHNK 2020

4.2.4 Verzilting

In droge zomers treden reeds verziltingsproblemen op. Zo hebben bollentelers in de Koegraspolder te maken met gewasschade door verzilting²⁹ (Acacia Water, 2014), en hebben agrariërs in de Oostpolder te maken met brakke sloten (Acacia Water, 2019).

Door klimaatverandering en zeespiegelstijging kunnen verziltingsproblemen en de watervraag voor doorspoeling sterk toenemen. In de kop van Noord-Holland bevindt brak grondwater zich dicht onder het maaiveld, en is zoet water alleen in een dunne regenwaterlens aanwezig (Acacia Water, 2014). In drogere zomers kan deze regenwaterlens vaker uitgeput raken. Het brakke grondwater kan vervolgens tot in de wortelzone doordringen en leiden tot gewasschade (de Louw et al., 2015). Verhoging van de doorspoeling is een maatregel om dit te beperken (zie paragraaf 3.3). Deze maatregel loopt op termijn aan tegen beperkingen in de beschikbaarheid van doorspoelwater in het IJsselmeer/Markermeer (paragraaf 3.4.4).

4.2.5 Overige effecten

Klimaatverandering kan op nog meer manieren de landbouw beïnvloeden, zoals hieronder kwalitatief opgesomd. In deze studie is niet onderzocht in welke mate deze effecten relevant zijn of kunnen worden voor het studiegebied.

Groeiseizoen en gewasfenologie:

- De langere duur van het groeiseizoen heeft al geleid tot een noordwaartse uitbreiding van de gebieden die geschikt zijn voor meerdere gewassen.
- Er zijn veranderingen in de fenologie van gewassen waargenomen, zoals de vervroeging van de bloei en oogstdata in granen.

Gewasproductiviteit:

- Er is een stijging van de gewasproductiviteit te verwachten als gevolg van een verlenging van het groeiseizoen en een vermindering van de effecten van kou op de groei. Dit geldt zowel voor akkerbouwgewassen als voor weidebouw.
- Extreme weers- en klimaatgebeurtenissen (waaronder droogteperioden en hittegolven) kunnen de opbrengst van sommige gewassen sterk verminderen. Ook hagel zou hierin een factor kunnen worden maar het signaal is niet sterk (zie hoofdstuk 2).
- Er zijn effecten te verwachten van klimaatverandering op het optreden van plagen en ziekten.

Veeteelt:

- Hogere temperaturen kunnen negatieve gevolgen hebben voor de gezondheid en het welzijn van dieren; hittestress kan de productie van vee verminderen.
- Veranderingen in de verspreiding van ziekteverwekkers en vectoren van ziekteverwekkers kunnen zorgen voor uitdagingen. Parasieten en insectenoverlast kunnen de dierlijke productie negatief beïnvloeden.

4.3 Drinkwatervoorziening

Jaarlijks levert PWN in de provincie Noord-Holland aan 1,7 miljoen klanten (800.000 aansluitingen) circa 112 miljoen m³ drinkwater. Oppervlaktewater uit het IJsselmeer is met 70% veruit de belangrijkste bron. De drinkwaterproductiestations staan in

²⁹ Nieuwe Oogst, 2016. Koegraspolder lijkt nog stuurloos.

<https://www.nieuweoogst.nl/nieuws/2016/08/04/koegraspolder-lijkt-nog-stuurloos>

Andijk, Bergen, Heemskerk, Wijk aan Zee en Laren. In Heemskerk staat een productiebedrijf dat voorgezuiverd oppervlaktewater verder behandelt en geschikt maakt voor infiltratie in het duingebied of levering naar de productielocaties in Bergen en Wijk aan Zee.

De drinkwatervoorziening krijgt de komende decennia te maken met veranderingen in de watervraag en een mogelijke afname van het wateraanbod via IJssel en IJsselmeer. Voor analyses van de toekomstige watervraag maakt PWN gebruik van Deltascenario Stoom. Veranderingen in watervraag en -aanbod worden gedreven door klimaatverandering en economische ontwikkeling.

Bij het innamepunt in Andijk liggen twee innamebekkens. Er is voor 4 tot 10 dagen reserve bij de huidige vraag naar drinkwater. Als er in geval van een calamiteit geen IJsselmeerwater kan worden ingenomen, kan als alternatieve bron een beroep worden gedaan op een waterwinstation in Nieuwegein (ruwwaterbron: Lekkanaal) en de productiebedrijven van Waternet bij Vogelenzang (ruwwaterbron: Lekkanaal) en Weesperkarspel (bij Amsterdam Z.O., ruwwaterbron: Bethunepolder). PWN kan bij een calamiteit, met duinwater en de hierboven beschreven alternatieven tezamen, voor ongeveer 120 dagen drinkwater leveren aan het voorzieningsgebied (Factsheet PWN in (VEWIN, 2019)).

Het huidige systeem heeft één groot innamepunt en vele kilometers transportleiding. Falen van dergelijke leidingen heeft grote consequenties. Het streven van PWN is naar verhoging van de redundantie van het systeem, om daarmee de robuustheid te verhogen. Een mogelijke optie met ruimtelijke consequenties is de aanleg van 'klimaatbuffers', extra spaarbekkens op het IJsselmeer³⁰.

Langdurige kustuitbouw door zeer grote suppleties beïnvloedt de grondwaterstand in de duinen. Bij een uitbouw van de kust door een grote suppletie zal de grondwaterstand in het achterliggende duingebied stijgen (Pantelli, 2017). Bredere duinen hebben een grotere zoetwaterbel, wat kansen geeft voor drinkwaterwinning en natuur (zie ook paragraaf 4.1).

Zeespiegelstijging kan door verhoging van de grondwaterstanden, en zeker in combinatie met verhoogde dynamiek, een bedreiging zijn voor de westelijk in de duinen gelegen infiltratie-infrastructuur van PWN, omdat die onder water kan komen te liggen en/of overstoven kan raken. In het veld is dit overigens nog niet zichtbaar. Over de vraag hoe dit kan worden aangepakt wordt bij PWN nagedacht. Er moet rekening worden gehouden met een reservering in de binnenduinstrand als de bestaande infrastructuur oostwaarts verplaatst moet worden. Hiermee hangt samen dat de verwachting is dat door hogere grondwaterstanden in de duinen de verhouding tussen opgepompt neerslagwater en geïnfiltreerd IJsselmeerwater verandert, en de beïnvloeding van de grondwaterstand in de duinen rondom winlocaties versterkt wordt. Dit zal in meer detail worden geanalyseerd als het nieuwe grondwatermodel van PWN operationeel is (in 2023 en verder).

Door gebruik te maken van ondergrondse opslag van drinkwater, een zogeheten Aquifer Storage and Recovery (ASR) systeem, beoogt PWN de beschikking te krijgen over een strategische voorraad voor terugwinning en directe distributie als drinkwater. Het water uit een ASR kan benut worden om pieken in de drinkwatervraag op te vangen en vergroot de veerkracht bij problemen aan de bron en/of in het transportnetwerk. De inzet van ASR past daarmee in de nationale watertransitie van water afvoeren naar water vasthouden. Hierdoor kan de leveringszekerheid geborgd worden zonder de productie- en transportcapaciteit ('waterfabrieken', leidingen) te vergroten.

³⁰ <https://www.pwn.nl/over-pwn/pers-en-nieuws/drinkwater/dialogbijeenvakomsten-klimaatbuffer>

Het COASTAR-project³¹ gaat een kansenkaart ontwikkelen voor de mogelijkheden die de ondergrond in het voorzieningsgebied van PWN biedt om zich beter voor te bereiden op droogte³².

4.4 Energie

Voor de koeling van de ECN-kernreactor te Petten wordt zoet water uit de Schermerboezem onttrokken. Dit water wordt geloosd op de Noordzee. De onttrekking is vergund voor een maximaal debiet van 3300 m³/uur tot een maximum van 75.000 m³ per dag (ofwel 0,87 m³/s). In de praktijk wordt gemiddeld 0,46 m³/s onttrokken, ongeveer de helft van de vergunde hoeveelheid.

In 2016 is gestart met de vergunningaanvraag voor de nieuwe reactor. Deze zal naar verwachting veel minder koelwater onttrekken dan de oude reactor. Er bestaat een kans dat de oude en nieuwe reactor enkele jaren tegelijkertijd operationeel zijn en de watervraag tijdelijk hoger uitvalt. De plannen zijn echter nog niet definitief en de mogelijkheid bestaat zelfs dat de nieuwe reactor voor koeling helemaal geen gebruik maakt van oppervlaktewater uit de Schermerboezem. Varianten met koeling via lucht of zeewater worden ook beschouwd. (Bron: HHNK, 2018).

De watervraag voor de reactor te Petten is in het studiegebied de enige directe verbinding tussen waterbeheer en de energiesector. Klimaatverandering zal hier nauwelijks invloed op hebben. De sector is daarom voor deze studie van beperkt belang.

4.5 Industrie

In 2016 is een vergunningaanvraag gestart voor de levering en lozing van koelwater in verband met de bouw van diverse grote datacenters in de Wieringermeerpolder (buiten het studiegebied). Op termijn zou de koeling gaan plaatsvinden met voorgezuiverd IJsselmeerwater dat door PWN zal worden aangeleverd. Omdat de koeling zal gaan plaatsvinden via verdamping zal slechts een klein deel van het benodigde koelwater weer worden geloosd. In juli 2017 zijn de vooruitzichten dat binnen enkele jaren de netto onttrekking 0,3 m³/s gaat bedragen. De discussie hierover is gaande.

Er is geen landelijk ruimtelijk overzicht bekend van industriële onttrekkingen aan het oppervlaktewater zoals in Figuur 4-11. De figuur is afkomstig van KWR, dat deze heeft samengesteld op basis van vertrouwelijke data verkregen via VEMW.

De grootste industriële watergebruiker in Noord-Holland is Tata Steel te IJmuiden. Op het terrein van Tata Steel in Nederland staan onder andere twee cokesfabrieken, een pellets- en sinterfabriek, twee hoogovens, een (oxi)staalfabriek, een warmband- en twee koudbandwalserijen alsmede diverse fabrieken waar het staal gecoat of geverfd wordt. De productie van staal vergt een grote hoeveelheid water, met name voor koeling. Tata Steel maakt gebruik van verschillende typen water:

- Zeewater voor koeling van ovens waarin ijzererts gesmolten wordt.
- Zout grondwater. Dit wordt gebruikt als koelwater. Dit is bruikbaar omdat de temperatuur ervan heel constant is. Het zoute grondwater is afkomstig van de zee, en wordt dicht bij de kust opgepompt.
- Brakwater om te granuleren.
- Zoetwater (WRK)³³ voor directe koeling bij cokesproductie en staal.

³¹ <https://www.coastar.nl/>

³² <https://www.coastar.nl/kennisprogramma-coastar-breedt-uit-verkenning-naar-kansen-in-noord-holland/>

³³ WRK (N.V. Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland), is eigenaar van het waterwinstation ir. C.

- Zoetwater (WRK) voor gaswassen.
- Zoetwater (WRK) voor productie van demiwater.
- Drinkwater, voor niet-industrieel gebruik (kantoren).

Het zoete water is afkomstig van het Lekkanaal te Nieuwegein. Het wordt voorgezuiverd en dan via de WRK I- en WRK II-leidingen getransporteerd naar de Amsterdamse waterleidingduinen en naar de industrieën Tata Steel en Crown-van Gelder. (Bron: (KWR, 2017)).

In de toekomst worden weinig problemen verwacht met WRK-zoetwatertekorten. Het Lekkanaal wordt gevoed met water uit de Lek (via schutverliezen Prinses Beatrixsluizen) en via peilbeheer op het Amsterdam-Rijnkanaal. In principe is daardoor, ook tijdens droogte en lage afvoeren, voldoende water beschikbaar. In de toekomst, bij versnelde zeespiegelstijging en langdurige lage afvoeren als gevolg van droogte in het stroomgebied van de Rijn, kan de Lek verzilten als gevolg van zoutindringing via de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas. In uitzonderlijke gevallen kan dit zoute water ook het lekkanaal bereiken via de Prinses Beatrixsluizen. De kans hierop is zeer klein en de gevolgen kunnen worden verkleind door schutbeperkingen in te stellen. Bovendien bereidt Rijkswaterstaat volgens het recente Deltaplan Zoetwater een maatregel voor om de Lek zoet te houden tijdens lage rivierafvoeren, door meer water via stuw Hagestein (bovenstrooms van Lek/Lekkanaal) te sturen.

Biemond waar water uit het Lekkanaal wordt gewonnen.



Figuur 4-11 Industriële innamepunten oppervlaktewater voor gebruik proceswater; (Huiting, 2014) in (KWR, 2017).

Omdat de watervraag van de industrie in het studiegebied beperkt is, en ook de interactie tussen de grootste watergebruiker Tata Steel en het watersysteem in het studiegebied, is de industriesector in deze studie van beperkt belang.

4.6 Recreatie en toerisme

De recreatie- en toerismesector wordt op diverse manieren beïnvloed door klimaatverandering. Temperatuurstijging brengt kansen mee voor de sector omdat deze kan bijdragen aan een aangenamer ervaren temperatuur en een langer seizoen. Traditioneel beslaat de zomer de maanden juni, juli en augustus, maar het strandseizoen begint tegenwoordig al in april en loopt door tot en met oktober. Anderzijds kunnen droogte, extreme hitte (zie als voorbeeld Figuur 4-17) en zeespiegelstijging de kwaliteit van de leefomgeving aantasten, met negatieve gevolgen voor de sector. Daarnaast kan extreem weer schade en

overlast veroorzaken aan faciliteiten. De 'Factsheet Recreatie' (ref) geeft voor de binnenwateren een schematisch overzicht van de mogelijke doorwerkingen van droogte op recreatie in binnenwateren.

De recreatiedruk in het studiegebied neemt al jaren toe. PWN kijkt hiervoor, als beheerder van enkele grote faciliteiten in het duingebied, vaak naar de ontwikkelingen in de MRA. In het Toekomstperspectief 2040 staat hierover: *'Vanuit het MRA-gebied neemt de woning- en recreatiedruk op de kustlandschappen Metropool, Oase en in mindere mate Parkduinen toe. Wonen en recreëren zullen hier met elkaar de strijd om de ruimte voeren, met als risico dat niet alleen de drukke gebieden drukker zullen worden, maar ook de rustige gebieden druk gaan worden. De Kop heeft te maken met demografische krimp en heeft daardoor een andere relatie met en mogelijk zelfs een afhankelijkheid van toerisme en toeristische voorzieningen.'* Voor de covid-periode was de prognose dat de recreatiedruk het komende decennium zou toenemen met 30%. Deze toename is echter al opgetreden in de afgelopen covid-jaren 2020 en 2021. Deze bijzondere toename zal waarschijnlijk weer afnemen met het wegebben van de pandemie. Een groei van de recreatiedruk met 30% heeft grote ruimtelijke claims tot gevolg, voor o.a. verblijfs- en dagrecreatiefaciliteiten en infrastructuur.

Zeespiegelstijging heeft effecten op de kustrecreatie die afhankelijk zijn van de invulling van kustlijnverzorging. De frequentie en hoeveelheden van kustsuppleties kunnen toenemen en dit biedt zowel risico's (veel verstoring) als kansen (b.v. tijdelijke recreatiegebied zoals op de Zandmotor).

Bron: <https://klimaatadaptatienederland.nl/thema-sector/recreatie-toerisme/>

4.7 Transport en infrastructuur

Met de groei van demografie en economie neemt ook de mobiliteit toe. Onder meer door de groei van de steden neemt op landelijke schaal het aantal reizigerskilometers per trein toe met 18% in WLO-Laag tot 40% in WLO-Hoog; het overig openbaar vervoer met 8% tot 23%. Het aantal afgelegde kilometers per fiets (6% tot 10%) groeit eveneens, zij het in een lager tempo. Bij de auto is het beeld diffuser. In WLO-Hoog wordt een forse groei verwacht van het aantal gereden autokilometers (+32%), mede door een toename van het elektrisch rijden en daarmee dalende kosten per kilometer. In WLO-Laag wordt een beperkte daling van het aantal gereden autokilometers verwacht (-6%) ten opzichte van 2018. Na de sterke verkeersgroei in de periode ervoor, is dit dus een stabilisatie van de situatie voor de COVID-19-crisis. Het goederenvervoer groeit in termen van vervoerd gewicht in beide scenario's bij alle modaliteiten: over de weg met 5% tot 27%, per spoor met 32% tot 55% en via de binnenvaart met 6% tot 20% (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021). Deze gegevens zijn niet specifiek voor het studiegebied beschikbaar.

De potentiële effecten voor klimaatverandering voor infrastructuur voor Nederland in het algemeen worden hieronder beknopt weergegeven:

- **Hitte en koude:** Hitte in combinatie met droogte kan leiden tot een toename in de kans op bos- en bermbranden. Veelal gaat het dan vooral om beperkt zicht voor de gebruikers maar in sommige gevallen kan bovengrondse infrastructuur ook fysiek worden aangetast. Koude heeft in principe weinig effect op kritieke infrastructuur en/ of transport infrastructuur.
- **Nat en droog:** Nat kan op meerdere manieren effect hebben op kritieke infrastructuur en/ of transport infrastructuur. Langdurige natte perioden zoals bijvoorbeeld in de winter verwacht worden, kunnen leiden tot verhoogde grondwaterstanden en verhoogde waterstanden in rivieren, kanalen en watergangen. Vanuit de rivieren neemt de potentie tot overstromingen dan toe, met name als dit samenvalt met een lagere capaciteit voor

afvoer naar zee als gevolg hoge zee spiegel/ opzet op zee. Met name korte intense buien kunnen leiden tot plaatselijke erosie en/ of plasvorming op en langs wegen. Droge perioden, waardoor de waterstand in rivieren en kanalen ook afneemt, kunnen leiden tot verzilting en afname van de waterkwaliteit. Verder kan droogte tot grondwaterdaling leiden. Grondwaterdaling wordt in verband gebracht met bodemdaling.

- Kust en zee: met name zeespiegelstijging kan verhoogde grondwaterstand tot gevolg hebben. Verhoogde grondwaterstanden kunnen leiden tot opdrijven van tunnels, verdiepte liggingen en aquaducten.
- Bodemdaling: bodemdaling kan toenemen als gevolg van langere, drogere perioden in de zomer. Voor kritieke infrastructuur en/ of transport infrastructuur zijn de effecten vooral ongelijkmatige zettingen die tot problemen kunnen leiden voor de veiligheid tijdens gebruik. Hierdoor is mogelijk eerder groot onderhoud nodig met alle (kosten) consequenties van dien.
- De invloed van wind, sneeuw en hagel is beperkt.

4.7.1 Kritieke infrastructuur

KlimaatadaptatieNederland³⁴ somt kritieke infrastructuur als volgt op:

- Energie: elektriciteit, aardgas, olie;
- Telecom/ICT: basisvoorzieningen voor communicatie t.b.v. respons bij een calamiteit/overstroming of een publiek netwerk;
- Waterketen: drinkwater, afvalwater;
- Gezondheid (toegankelijkheid tot gezondheidszorg, bijv. ziekenhuizen);
- Keren en beheren van oppervlaktewater;
- Transport hoofdinfrastructuur: wegen, spoorwegen, vaarwegen.

Dezelfde bron geeft echter aan dat er geen complete lijst bestaat van vitale en kwetsbare functies op decentraal niveau.

Transportinfrastructuur wordt in de paragrafen hierna uitgewerkt en toegelicht. Voor de overige typen infrastructuur (telecom en gezondheid) zijn er bij de auteurs geen onderzoeken bekend naar de kwetsbaarheid voor klimaatverandering.

4.7.2 Wegen

De provincie Noord-Holland heeft 645 km wegen, 50 km vrij liggende busbanen en 246 km vaarwegen in eigendom. Langs een groot deel van deze N-wegen liggen fietspaden (384 km) die ook eigendom van de provincie zijn. Tot slot zijn er 590 kunstwerken (bruggen, sluisen, tunnels en ecoducten) aanwezig in de provincie³⁵. Deze getallen zijn niet specifiek voor het studiegebied beschikbaar.

Wegen en de bijbehorende grondlichamen en kunstwerken kunnen beïnvloed worden door klimaatverandering. Deze effecten kunnen zowel de infrastructuur zelf als het gebruik ervan beïnvloeden. Hierover zijn onder andere de volgende rapporten verschenen: (van Vliet, 2020); (van Ojen, 2020); (Borst, 2019); (Bles et al., 2020); (Bles et al., 2021).

Voor het landelijk hoofdwegenet is in 2020 in het Rijkswaterstaatproject Klimaatbestendige Netwerken (Bles et al., 2020) onder andere een stresstest uitgevoerd voor diverse klimaatgerelateerde bedreigingen. Op basis van dit onderzoek kunnen de volgende afwegingen gemaakt worden voor de provincie Noord-Holland:

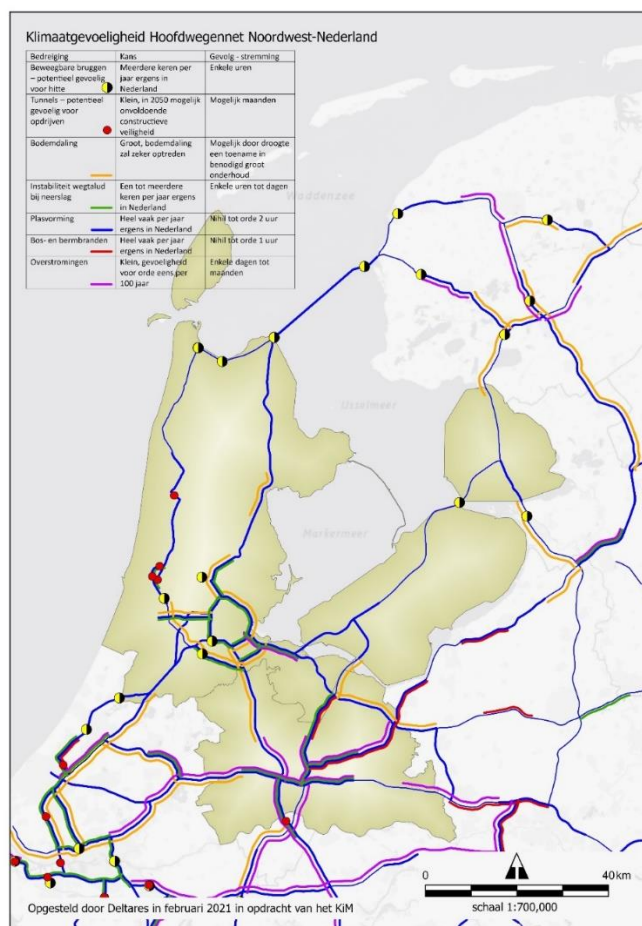
- Wateroverlast door plasvorming op de weg, erosie en afschuiving van het wegtalud door afstromend regenwater, het opdrijven van tunnels en andere kunstwerken als gevolg van verhoogde grondwaterstanden,

³⁴ [Vitale en Kwetsbare functies - Klimaatadaptatie \(klimaatadaptatienederland.nl\)](https://www.klimaatadaptatienederland.nl)

³⁵ https://www.noord-holland.nl/Onderwerpen/Verkeer_vervoer/Wegennet

- Overstroming vanuit het watersysteem (zie ook paragraaf 3.2 en 4.8)
- Hitte leidend tot thermische expansie / spatten van verhardingen of het niet kunnen sluiten van bruggen door uitzetting:
- Droogte leidend tot ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling door droogte: langdurige droogte kan de freatische grondwaterstand direct beïnvloeden. Zie ook paragraaf 2.8. Wel zien we klei en kleilig zand. Deze kan bij langdurige droogte krimpen wat ook van invloed kan zijn op de wegconstructie. Er zijn geen studies bekend specifiek voor dit risico in het studiegebied.

Uit (Bles, et al., 2021) zijn de belangrijkste risico's voor het HWN samengevat:



Figuur 4-12 Kaartbeeld van de klimaatgevoeligheid van het Hoofdwegennet in Noordwest-Nederland. In het studiegebied is met name de aanwezigheid van tunnels van belang. Bron: (Bles, et al., 2021).

4.7.3 Vaarwegen

Het vervoer van goederen groeit bij alle modaliteiten. Hierdoor ontstaan capaciteitsknelpunten op de goederencorridors. Op de vaarwegen ontstaan knelpunten bij diverse sluisen en bruggen, maar deze liggen buiten het studiegebied. Ook verslechtert door bodemerosie en klimaatverandering (onder andere droogte en zeespiegelstijging) de bevaarbaarheid van de vaarwegen waardoor er capaciteits- en robuustheidsknelpunten optreden (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021).

De provincie Noord-Holland onderhoudt ruim 250 kilometer vaarwegen³⁶. Voor het hoofdvaarwegennet is door Rijkswaterstaat een stresstest uitgevoerd om een beeld te krijgen

³⁶ https://www.noord-holland.nl/Onderwerpen/Verkeer_vervoer/Vaarwegen

van de klimaatbestendigheid in 2050. Deze is gebruikt om hierna een beeld te vormen van de klimaatgevoeligheid van het studiegebied.

Uit het overzicht voor geheel Nederland blijkt dat de effecten van klimaat voor het hoofdvaarwegennetwerk voor het studiegebied zeer beperkt zijn. De zeesluis IJmuiden zal met een beperkte toename van stremmingen te maken krijgen. Mogelijk hangt dit samen met het beperken van zoutindringing in tijden van hoog zeespiegel niveau in combinatie met lage debieten via de rivieren Nederland in.

Voor recreatievaart is in relatie tot klimaateffecten veel minder bekend.

Klemmende bruggen (zie paragraaf over wegen) kunnen ook voor de scheepvaart belemmeringen opleveren.

4.7.4 Spoorwegen

Volgens het CBS³⁷ bedraagt de totale lengte van het spoorwegtraject in Noord-Holland ca 344 km. Een deel hiervan ligt in het studiegebied, de exacte lengte is hier niet vastgesteld.

Volgens de Integrale mobiliteitsanalyse 2021 zijn grote delen van het spoornetwerk gevoelig voor inundaties en wateroverlast. De Blue Areas studie (Woning en van Buren, 2015) en de studie 'Klimaatbestendig Spoornetwerk' (Jak, 2021) bevestigen dit. Voor deze studie zijn kaarten gemaakt voor de gevolgen van inundaties door het falen van primaire waterkeringen, door het falen van regionale keringen en door intensieve neerslag. De resulterende kaarten laten zien dat alle drie de vormen gevolgen kunnen hebben in het studiegebied. De inundatiekansen nemen echter ondanks klimaatverandering niet toe zolang aan de waterveiligheidsnormen voldaan kan blijven worden.

Verder geven zowel het KiM als (Jak, 2021) aan dat hitte ook een probleem kan zijn voor het spoor met de kanttekening dat hitte een minder grote rol speelt in de kustgebieden.

Droogte, storm en onweer en overstromen vormen vooral een bedreiging op regionaal niveau. De gevoeligheid voor droogte en de verzakkingen die hierdoor ontstaan, vinden vooral plaats op bekende bodemdalingslocaties, zoals veengebieden. Deze vallen grotendeels buiten het studiegebied en komen alleen in beperkte mate voor in het uiterste zuiden en rondom Den Helder. De kustregio is gevoelig voor storm en onweer.

³⁷ <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/71024ned/table>



Figuur 4-13 klimaatgevoeligheid van de spoorwegen [bron: KIM]

4.8 Gebouwde omgeving en ruimtelijke ordening

4.8.1 Klimaatvariabelen in stedelijk gebied

De belangrijkste klimaatgerelateerde parameters van Tabel 2.1 voor de gebouwde omgeving en het stedelijk gebied zijn: droogte, intensieve neerslag en wateroverlast, en extreme hitte. Uiteraard is een stijgende zeespiegel ook van belang, maar deze wordt geadresseerd onder hoogwaterveiligheid.

Om die kwetsbaarheden in beeld te krijgen dienden alle overheden uiterlijk in 2019 een stresstest te hebben uitgevoerd voor de vier klimaatthema's: wateroverlast, hitte, droogte en overstroming. De monitorkaart stresstesten³⁸ geeft een overzicht van uitgevoerde stresstesten in Nederland.

³⁸ <https://klimaatadaptatienederland.nl/stresstest/monitor/kaart/>

4.8.2 Gevolgen en kwetsbaarheid

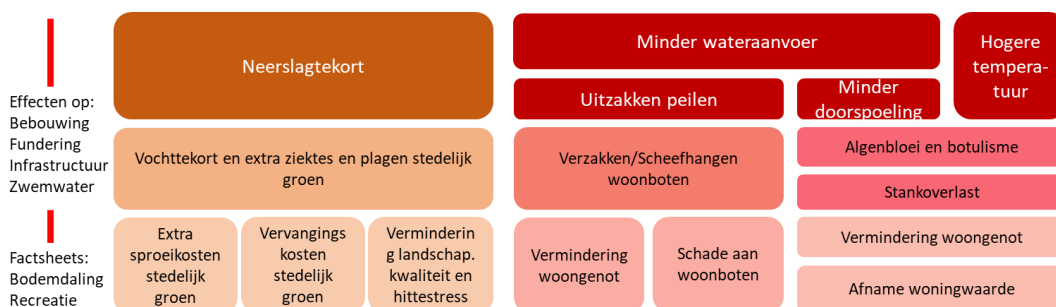
Droogte

Het effect van droogte op de gebouwde omgeving of het stedelijk gebied is divers, variërend van schade aan panden, funderingen en infrastructuur tot schade aan stedelijk groen (Hoogvliet et al., 2022). Figuur 4-14 toont een overzicht van denkbare effecten. Paragraaf 2.7 beschrijft dat er in het binnenduingsgebied een beperkt effect is te verwachten van klimaatopwarming op bodemdaling vanwege het ontbreken van grote veengebieden. Effecten die verband houden met bodemdaling en zetting zouden daarom relatief gering zijn.

Een effect waar in het studiegebied rekening mee moet worden gehouden is de verdroging van stedelijk groen. Tijdens droge en warme periodes kan een bodemvochttekort optreden met gevolgen voor het stedelijk groen. Het bodemvochttekort kan leiden tot verdroging en uiteindelijk uitval van beplanting. Ook is veel beplanting gevoeliger voor ziektes en plagen tijdens periodes van (droogte)stress. Dit leidt in potentie tot nog meer uitval. Om dit te voorkomen kan er meer berekend worden met als gevolg stijgende beheerkosten. Wanneer niet of onvoldoende wordt berekend stijgen de vervangingskosten van stedelijk groen. Wel nemen de kosten voor onkruidbestrijding af, door de verminderde groei.

Als schade ontstaat aan stedelijk groen dan neemt de landschappelijke kwaliteit in de stad af en kan hittestress toenemen. Afname van de landschappelijke kwaliteit heeft effect op het welzijn van de stadsbewoners en hittestress heeft vooral gevolgen voor kwetsbare groepen resulterend in gezondheidseffecten.

De andere effecten zijn gerelateerd aan afname van wateraanvoer naar het stedelijk gebied. Dit leidt mogelijk tot uitzakken van peilen en minder doorspoeling (Hoogvliet, et al., 2012). Het laatste effect is gerelateerd aan verminderde doorspoeling in combinatie met hogere (water)temperaturen. Deze factoren geven, samen met verschillende omgevingsfactoren, een groter risico op algenbloei en botulisme. Dit zorgt voor een verslechterde waterkwaliteit met gevolgen voor de gebruikers van het water en kan leiden tot stankoverlast. Dit resulteert direct in minder woongenot en kan effect hebben op de woningwaarde (Hoogvliet, et al., 2012).



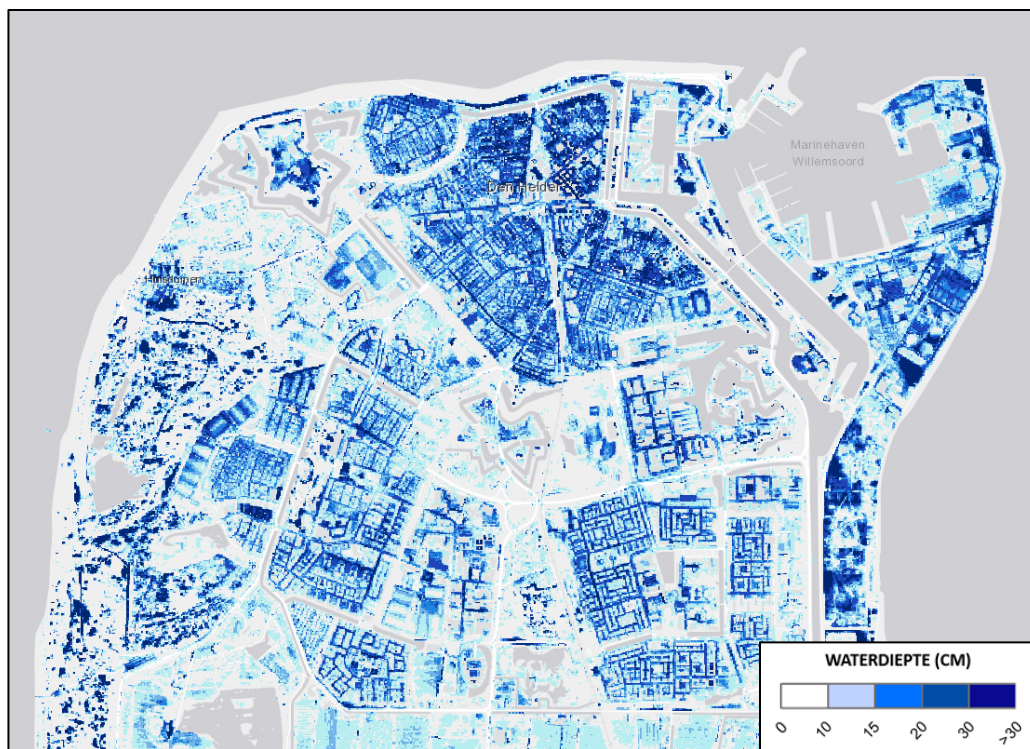
Figuur 4-14 Schematische weergave van de doorwerking van droogte op stedelijk gebied. Bron: (Hoogvliet et al., 2022).

Intensieve neerslag en wateroverlast

De hoeveelheid neerslag en extreme neerslag in de winter zullen toenemen, evenals de intensiteit van extreme regenbuien in de zomer. Ook hagel- en onweersbuien worden heviger. Hierdoor is er een grotere kans op wateroverlast. Figuur 4-15 toont indicatieve

modelberekeningen volgens de Klimaateffectatlas³⁹ van de maximale waterdiepte in Den Helder.

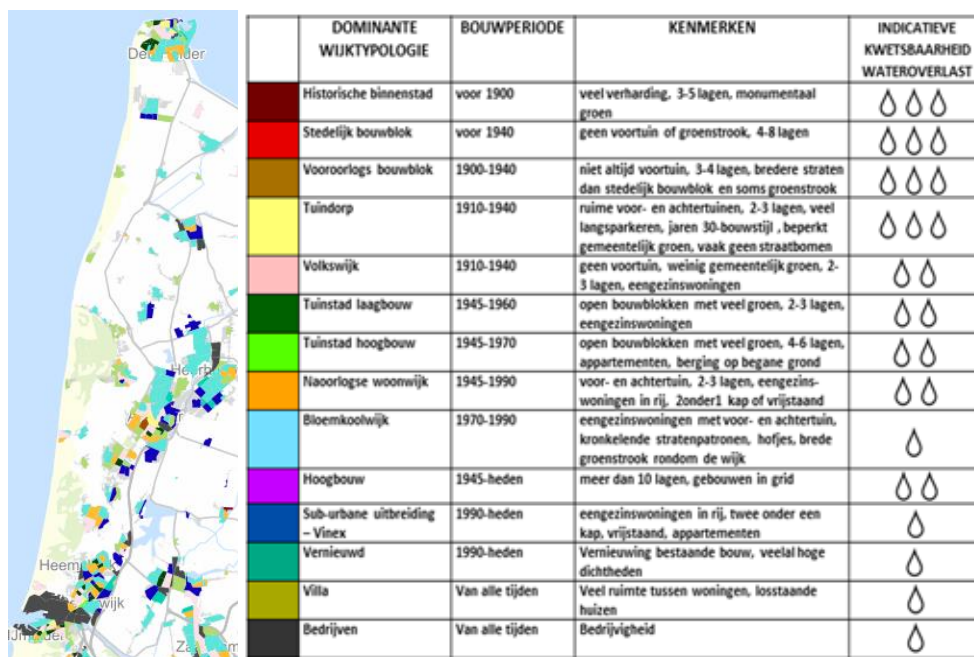
De kaart toont de maximale waterdiepte voor het stedelijk gebied en het buitengebied voor een extreme bui van 140 mm neerslag in 2 uur tijd. Deze bui komt in het huidige klimaat gemiddeld eens per 1000 jaar voor. De Klimaateffectatlas geeft aan dat deze kans door klimaatverandering aan het einde van de eeuw twee keer zo groot kan zijn.



Figuur 4-15 Maximale waterdiepte berekend voor Den Helder voor een extreme bui van 140 mm neerslag in 2 uur. Bron: <https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/>

De wijktypen in de gemeenten in de binnenduinstrand worden getypeerd als 'Bloemkoolwijk', 'Naoorlogse woonwijk', 'Tuinstad' en 'Vinex' die volgens de Klimaateffectatlas over het algemeen een gemiddelde of lagere kwetsbaarheid hebben voor wateroverlast.

³⁹ <https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/>



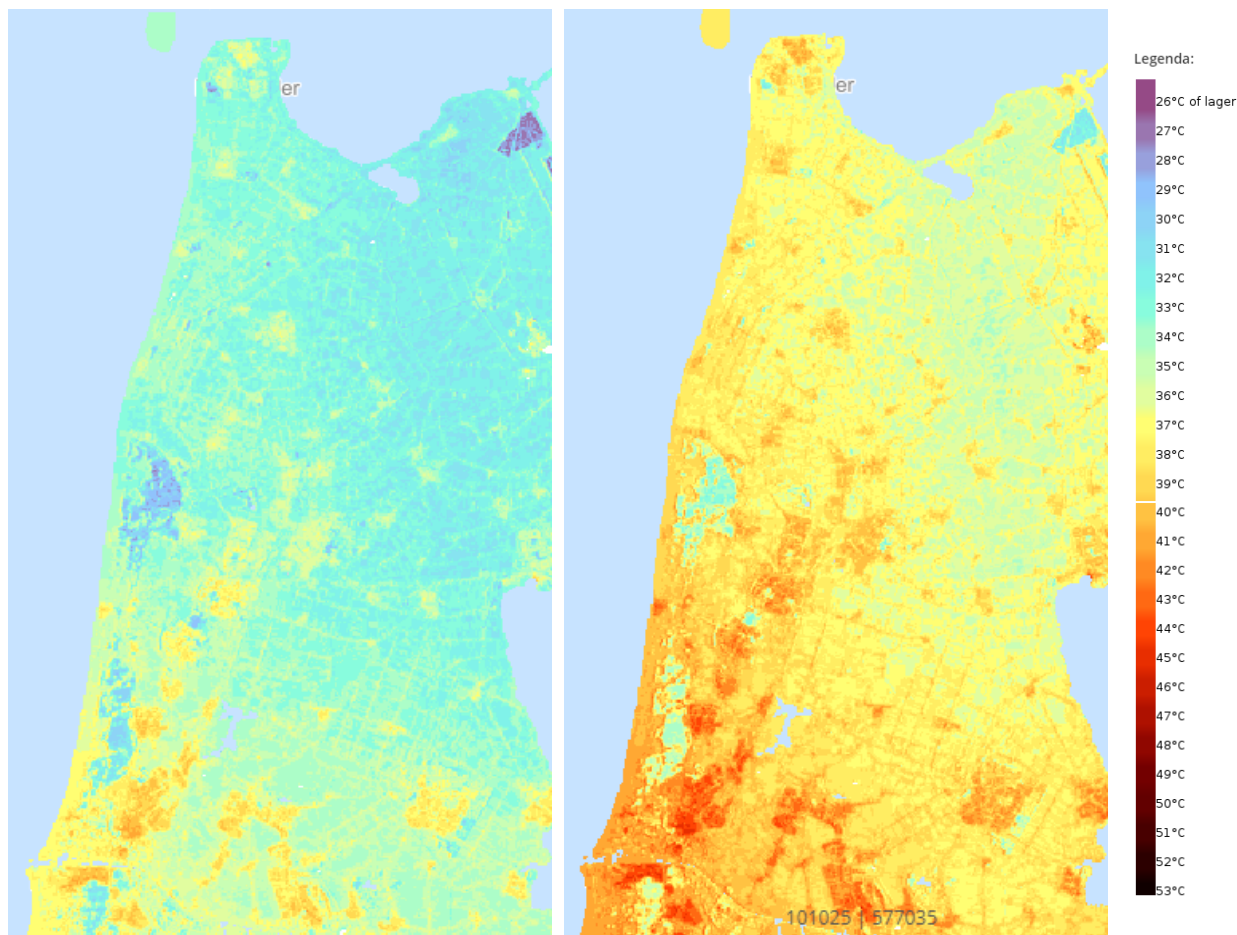
Figuur 4-16 Dominante wijktypologieën (met per wijk de kleur van het meest voorkomende wijktipe) gecombineerd met de indicatieve kwetsbaarheid voor wateroverlast volgens de Klimaateffectatlas. Bron: <https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/>

Extreme hitte

De gevolgen van de toenemende hitte in stedelijk gebied zijn divers. Hitte kan leiden tot gezondheidsproblemen en extra sterfte onder kwetsbare groepen. Ouderen met een leeftijd boven de 65 jaar en chronisch zieken zijn het gevoeligst voor sterfte door hitte, vooral als ze hart-, ademhalings- en nieraandoeningen hebben. Hitte kan ook leiden tot verminderde arbeidsproductiviteit en schade aan infrastructuur. In de gebouwde omgeving manifesteren de gevolgen van hitte zich in de buitenruimte (gebied), in woningen (gebouw) en direct bij mensen (gezondheid). Hitte-eilanden in stedelijk gebied kunnen zorgen voor opwarming van drinkwater in het leidingnet, want de grond warmt ook op. Drinkwatertemperaturen bij het leveringspunt boven de 25 °C kunnen zorgen voor kwaliteitsrisico's.

De Klimaateffectatlas illustreert met een kaartverhaal over de lokale gevoelstemperatuur⁴⁰ op welke manier hittestress zich manifesteert op een extreem hete zomermiddag, zie . De kaart geeft inzicht in de gevoelstemperatuur in het huidige klimaat, en in de situatie in 2050 bij sterke klimaatverandering (WH-scenario). Op sommige plekken, vooral in de stad, kan de gevoelstemperatuur hoog oplopen. De kaart laat zien waar het relatief warmer voelt en op welke plekken in de stad het op zo'n hete middag het minst comfortabel is.

⁴⁰ <https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/>



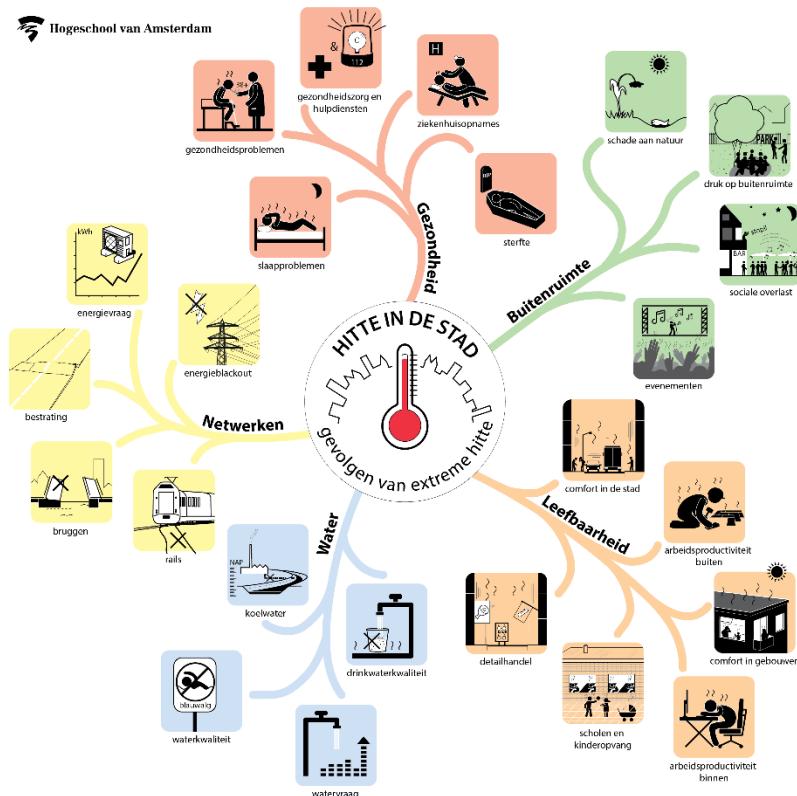
Figuur 4-17 Gevoelstemperatuur in het huidige klimaat en in de situatie in 2050 bij sterke klimaatverandering (WH-scenario). Bron: <https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/>

Grote delen van de binnenduinrand vertonen relatief lage temperaturen, maar toch zijn er ook stedelijke gebieden die hoge gevoelstemperaturen laten zien en dus gevoelig zijn voor hittestress, zoals in Beverwijk, Heemskerk en sommige wijken in Den Helder (Figuur 4-18).



Figuur 4-18 Gevoelstemperatuur in de situatie in 2050 bij sterke klimaatverandering (WH-scenario) rond Beverwijk en Heemskerk. Bron: <https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/>

De Hogeschool van Amsterdam heeft een mindmap samengesteld waarin de uiteenlopende gevolgen van hitte in stedelijk gebied inzichtelijk worden gemaakt (Figuur 4-19).



Figuur 4-19 Mindmap hitte in de stad: een interactieve tool om de gevolgen van extreme hitte in het bebouwde gebied in beeld te brengen. Bron Hogeschool van Amsterdam (2019), <https://www.hittebestendigestad.nl/mindmap/>

4.8.3 Klimaschade

De Klimaschadeschatter⁴¹, ontwikkeld in het NKWK Onderzoeksprogramma Klimaatbestendige stad⁴², geeft per gemeente de geschatte schades voor stedelijk en landelijk gebied, met en zonder klimaatverandering (onder scenario WH, KNMI'14) voor diverse schades als gevolg van droogte, wateroverlast en hitte. In tabel 4.3 is een overzicht gemaakt voor de binnenduintrandgemeenten waarbij voor de eenvoud alleen de maximale schattingen worden getoond bij sterke klimaatverandering. Zoals de klimaschadeschatter zelf al aangeeft, gaat het hier om indicatieve schattingen waarbij een groot aantal aannames is gedaan. De schades zijn hier omgerekend naar een bedrag per inwoner om de vergelijking tussen inwoners in verschillende gemeenten mogelijk te maken.

Opvallend is dat van de drie dreigingen droogte in alle gemeenten met afstand de grootste schade oplevert, veroorzaakt door het hoge bedrag voor de schadepost 'Fundering panden'. Volgens paragraaf 2.8 komen er echter in het gebied geen grote veengebieden voor, en zullen de effecten van bodemdaling en zetting relatief gering zijn. Er is nadere studie nodig om hierover uitsluitel te kunnen verschaffen.

Een andere opvallende constatering is dat hittestress met gemiddeld ongeveer 5% van de totale klimaschade een zeer geringe kostenpost is. De conclusie moet hier echter niet zijn dat hittestress niet belangrijk is, maar dat dit de beperking toont van de kennis die met een

⁴¹ <http://klimaschadeschatter.nl/>

⁴² <https://klimaatadaptatienederland.nl/overheden/nkwk-onderzoekslijn/>

schadeschatting zoals deze kan worden opgedaan. Hittestress kan name voor oudere en kwetsbare mensen leiden tot gezondheidsverlies en hogere sterfte dan elke andere hier genoemde dreiging.

Verder valt op dat de verschillen tussen gemeenten aanzienlijk zijn, met lagere kosten in Heemskerk en Den Helder, en duidelijk hogere kosten in Uitgeest en Schagen.

Tabel 4.3 Gemiddelde schade t/m 2050 in euro per inwoner door droogte, wateroverlast en hitte per gemeente in de binnenduinstrand, volgens de hoge schatting met sterke klimaatverandering (WH scenario). Bron: Klimaatschadeschatter. Toelichting: <http://klimaatschadeschatter.nl/>

Gemeente	Alkmaar	Bergen (NH)	Beverwijk	Castricum	Den Helder	Heemskerk	Heiloo	Langedijk	Schagen	Uitgeest	Gemiddeld
Aantal inwoners	108558	29974	41176	35772	55604	39164	23464	27992	46553	13528	421785
Droogte:	5.356	2.735	2.052	3.419	1.723	1.636	2.876	4.592	6.791	15.047	4.139
Fundering panden	4.791	2.077	1.592	1.759	1.697	1.321	1.226	3.435	6.071	6.416	3.204
Wegen en riolering	565	656	459	1.658	24	313	1.648	1.156	719	8.630	934
Publiek groen	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
Wateroverlast:	1.476	2.686	2.654	1.389	1.941	1.244	1.477	1.394	2.462	1.420	1.811
Panden indirecte schade	319	628	553	221	401	215	232	265	606	220	377
Panden directe schade	707	1.602	1.535	720	988	556	823	672	1.318	781	949
Hagel	450	456	566	448	552	473	422	457	537	419	485
Hitte:	352	330	341	322	343	317	323	326	342	322	337
Arbeidsproductiviteitsverlies	65	43	53	36	57	29	36	39	56	35	50
Ziekenhuisopnamen	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Sterfte	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251
Bestr. eikenprocessierups	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
TOTAAL per inwoner	7.185	5.750	5.047	5.129	4.007	3.196	4.675	6.312	9.595	16.789	6.287

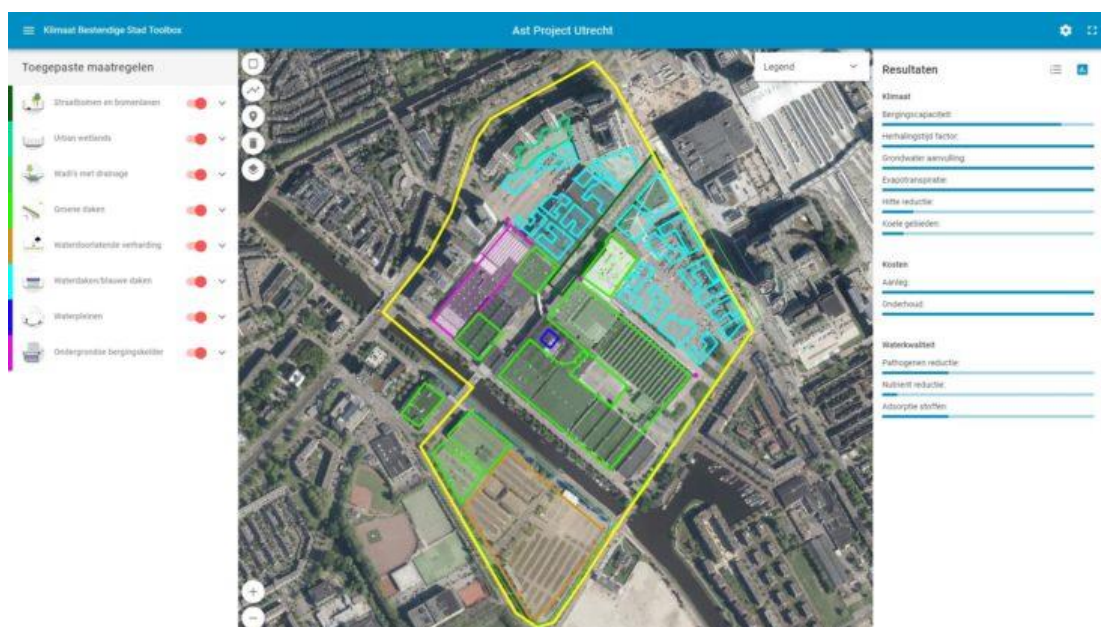
4.8.4 Ruimte voor lokaal water

Een belangrijke oplossing voor wateroverlast maar ook voor droogte is een ruimtelijke inrichting met daarin voldoende ruimte voor het watersysteem. Dat is eenvoudig gezegd maar vereist dat alle decentrale overheden samenwerken in het vinden van oplossingen. Bovendien zal een deel van de oplossing liggen in de private ruimte. In de woorden van (HHNK, et al., 2020): "Daarbij moeten we ingrijpen, aanpassen en meegroeien met de klimaatverandering in zowel het watersysteem als in de ruimtelijke inrichting. [...] We volgen daarbij de weg van het water. Iedere partner en inwoner kan bijdragen door in de private ruimte op het eigen perceel of rond de eigen woning waar de regen valt de kwetsbaarheid te verminderen, de capaciteit te vergroten en/of water te bergen."

De evaluatie van de wateroverlast in juni 2021 (HHNK, 2021a) maakt duidelijk dat voor het stedelijk gebied nadrukkelijk naar zeer lokale oplossingen voor ruimtelijke inrichting, waterberging en retentie moet worden gekeken – en bewoners op private grond daar een belangrijke rol in hebben.

Dit inzicht is sterk verwoord in de Intentieovereenkomst Klimaatbestendige Nieuwbouw in de MRA en Noord-Holland (MRA en Noord-Holland, 2021) waarin wordt vastgelegd dat alle partijen een rol hebben in de nieuwbouw. Hevige neerslag (1/100 jaar, klimaat 2050: 70 mm in één uur) moet voor een groot deel van de neerslag (40-70 mm) van een hevige bui op het bebouwd deel van privaat terrein worden verwerkt (geïnfiltreerd, opgevangen en/of vertraagd afgevoerd) op het terrein zelf of in extra (water)voorzieningen in het plangebied. Bovendien moeten groenblauwe structuren en de gebiedseigen biodiversiteit worden versterkt ('groen, tenzij...') (MRA, 2021).

In het NKWK Onderzoeksprogramma Klimaatbestendige Stad is een instrument ontwikkeld dat bij zich uitstek richt op groenblauwe maatregelen op de lokale schaal van een wijk of een huizenblok: de Toolbox Klimaatbestendige Stad⁴³ (TKS), zie Figuur 4-20. De TKS laat zien hoe effectief verschillende klimaatadaptatiemaatregelen zijn in een bepaalde wijk of buurt met wateroverlast, droogte of hitte. Verschillende maatregelen kunnen worden geselecteerd en op de kaart worden ingetekend. De tool berekent hoe effectief de gekozen maatregelen zijn, bijvoorbeeld door aan te geven voor hoeveel extra waterberging de maatregel zorgt, hoe sterk de afvoer van water erdoor vermindert, hoe sterk de waterkwaliteit verbetert of hoe sterk hittestress vermindert. Ook maakt de tool een schatting van hoeveel de maatregelen kosten. Daarna worden ook extra baten ingeschat, zoals verminderde zorgkosten en arbeidsverliezen, vermeden sterfgevallen, en stijging van de WOZ-waarde van woningen.



Figuur 4-20 Dashboard van de TKS met links een lijst van geselecteerde maatregelen, rechts de berekende resultaten en in het midden een kaart waarop de geselecteerde maatregelen zijn ingetekend. Bron: <https://klimaatadaptatienederland.nl/hulpmiddelen/overzicht/toolbox-ks/>

⁴³ <https://kbstoolbox.nl/>

5 Bronnen

- Acacia Water, 2013, Verziltingsstudie Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Acacia Water Rapport N20080278
- Acacia Water, 2014, Veldonderzoek Zoet En Zout Grondwater Koegraspolder., Acacia Water Rapport N20140550
- Acacia Water, 2019, Spaarwater; Rendabel En Duurzaam Agrarisch Watergebruik En Waterbeheer in de Verziltende Waddenregio, 84.
- Bles, T. et al., 2020, Gevoeligheid van het hoofdwegennet voor klimaatverandering - Uitkomst landelijke klimaatstresstest HWN, Deltares rapport, 11203738-003-BGS-0005
- Bles, T., De Jong, J., van Marle, M. and van Buren, R., 2021, Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet, hoofdvaarwegennet en spoor - ten behoeve van de NMCA
- Boekel, E. M. P. M. van, Roelsma, J., Massop, H. T. L., Mulder, H. M., Jansen, P. C., Renaud, L. V., Hendriks, R. F. A. and Schipper, P. N. M., 2015, 'Achtergrondconcentraties in het oppervlaktewater van HHNK', Alterra Rapport 2475
- van Boekel, E. M. P. M., Roelsma, J., Massop, H. T. L., Mulder, H. M., Jansen, P. C., Renaud, L. V., Hendriks, R. F. A. and Schipper, P. N. M., 2015, Achtergrondconcentraties in Het Oppervlaktewater van HHNK, Alterra Rapport 2475
- Borst, A., 2019, Provinciale tunnels in Noord-Holland – klimaatstresstest, Provincie Noord-Holland
- Borst, L. en Fonck, M., 2020, 'Het klimaat verandert, ook in de duinen', Nature Today (<https://www.naturetoday.com/intl/nl/nature-reports/message/?msg=25788>)
- Brouwer, F., Maas, G., Teuling, K. and et al., 2021, Bodemkaart en Geomorfologische Kaart van Nederland: actualisatie 2020-2021 en toepassing; Deelgebieden Gelderse Vallei Zuid en -West en Veluwe-Zuid., Wettelijke Onderzoekstaken Natuur&Milieu, WOt-technical report 134.
- de Bruijn, K. en Slager, K., 2021, 'Wat als 'de waterbom' elders in Nederland was gevallen? - Hackathon Deltares, november 2021.'
- Claassens, J., Koomen, E. and Rijken, B., 2017, Actualisering landgebruiksimulatie Deltascenario's; Achtergronddocument bij Ruimtescanner inzet
- CPB en PBL, 2015, Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's, PBL-publicatienummer: 1689
- De Groen, F., Van Zelst, V., Van der Valk, L. and Arens, B., 2019, Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeerepbeheer, Deltares rapport 11203683-002-ZKS-0014
- Delsman, J., Mulder, T. and America, I., 2022a, Grondwaterverziltning en watervraag bij versnelde zeespiegelstijging, Deltares rapport 11206798-014
- Delsman, J., Mulder, T. and America, I., 2022b, Grondwaterverziltning en watervraag bij versnelde zeespiegelstijging, Deltares rapport 11206798-014

- Delsman, J., Oude Essink, G., Huizer, S., Bootsma, H. and et al., 2020, Actualisatie Zout in Het NHI - Toolbox NHI Zoet-Zout Modelling En Landelijk Model., Deltares Rapport 11205261-003-BGS-0001. Utrecht
- Delsman, J. R., Hu-a-ng, K. R. M., Vos, P. C., de Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J. and Bierkens, M. F. P., 2014, 'Paleo-modeling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: an application to the Netherlands', *Hydrology and Earth System Sciences* 18(10), pp. 3891–3905 (<https://hess.copernicus.org/articles/18/3891/2014/>) accessed February 6, 2022
- Deltares, 2021, Inventarisatie van huidige kennis voor adaptatie aan zeespiegelstijging en het mogelijke ruimtebeslag op de lange termijn voor gebiedsgerichte bijeenkomsten in het kader van Kennisprogramma Zeespiegelstijging spoor IV; Zuid- en Noord-Hollandse Kust
- EEA, 2019, Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe, EEA Report No 04/2019
- Erkens, G., Melman, R. and Kooi, H., 2021, Actualisatie bodemvoorspellingskaarten, Deltares report
- H+N+S, 2020, 'Perspectief Binnenduinrand PWN Ruimte voor water, natuur en recreatie in Noord-Hollands binnenduinrand'
- HHNK, 2014, 'Toelichting op het peilbesluit Schermerboezem & VRNK-boezem'
- HHNK, 2018, Strategie waterverdeling HHNK Waterverdeling en waterbesparing bij dreigend en feitelijk watertekort, 18.261834
- HHNK, 2021a, Evaluatie bestrijding wateroverlast juni 2021
- HHNK, 2021b, 'Samen naar een klimaatbestendige toekomst - Visie van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier op ruimtelijke adaptatie', (<https://www.hhnk.nl/flysystem/media/visie-op-ruimtelijke-adaptatie-samen-naar-een-klimaatbestendige-toekomst.pdf>)
- HHNK, HKV Lijn in water, HydroLogic and Nelen&Schoorlans, 2020, Studie hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier 'Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier 2'- Een gebiedsbrede analyse en onderzoek naar klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast
- HKV, Witteveen en Bos, 2020, 'Watervraagprognosetool - Resultaten kengetallen en relaties wateraanvoerbehoefte o.b.v. LHM'
- Hoogvliet et al., 2022, 'Factsheet Stedelijk Gebied. Methodes om de maatschappelijke gevolgen van droogte te kwantificeren.'
- Hoogvliet, M., van de Ven, F. H. M., Buma, J. and et al., 2012, Schades door watertekorten en overschotten in het stedelijk gebied. Quick scan van beschikbaarheid schadegetallen en mogelijkheden om schades te bepalen.
- Huizing, H., 2014, Kosten Industriesector als gevolg van verzilting Brielse meer
- Hunink, Delsman, J., Prinsen, G., Bos-Burgering, L., Mulder, N. and Visser, M., 2018, Vertaling van Deltascenario's 2017 naar modelinvoer voor het Nationaal Water Model, Deltares rapport 11202240-009-ZWS
- Hunink et al., J. C., 2021, Het effect van onderwaterdrainage en passieve peilstijging in veenweidegebieden op knelpunten in de zoetwatervoorziening, Deltares rapport

- Hunink, J. C., Walsum, P. van, Vermeulen, P., Pouwels, J., Bootsma, H., Janssen, G., Swierstra, W., Prinsen, G., Meshgi, A., Veldhuizen, A., Lange, W. de, Hummelman, H. J., Bos-Burgering, L. and Kroon, T., 2020, Veranderingsrapportage LHM 4.0, Deltares rapport 11203718-000-BGS-0002., Utrecht.
- Hunink, Van Walsum, P., Vermeulen, P., Pouwels, P., Bootsma, H., Janssen, G. and Swierstra, W., 2020, Veranderingsrapportage LHM 4.0., Deltares Rapport 11203718-000-BGS-0002.
- Jak, S., 2021, Klimaatadaptatie 'Klimaatbestendig Spoornetwerk' voor dialoog met Provincie Noord-Holland. Prorail, powerpointpresentatie 20 sept. 2021.
- KNMI, 2015, 'KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie'
- KNMI, 2021, 'KNMI Klimaat signaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp', (www.knmi.nl/klimaat).
- KNMI en Lijn43, 2021, De Bosatlas van weer en klimaat, Noordhoff Atlasproducties ; KNMI, Groningen; De Bilt.
- Kooi, H. et al., 1998, 'Geological causes of recent (3/4100 yr) vertical land movement in the Netherlands', Tectonophysics 299 (1998) 297–316.
- Kosten, S., Schep, S. and van Weeren, B. J., 2011, Een frisse blik op warmer water: Over de invloed van klimaatverandering op de aquatische ecologie en hoe je de negatieve effecten kunt tegengaan, STOWA rapport
- KWR, 2017, Gevolgen van zoetwatertekorten voor industrie en drinkwaterproductie, KWR rapport 2017.099
- de Louw, P. G. B., Oude Essink, G., Eeman, S., van Baaren, E. S. and et al., 2015, 'Dunne Regenwaterlenzen in Zoute Kwelgebieden.', Landschap no.1:5-15 (<https://edepot.wur.nl/381018#:~:text=In%20zoute%20kwelgebieden%20zijn%20dunne,zout%20kwelwater%20de%20wortelzone%20bereikt.>).
- Mastbergen, D., Nederhoff, K., Van der Valk, B. and Maarse, M., 2018, Beheerbibliotheek Noord-Holland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust., Deltares rapport 11200538-002-ZKS-0005
- Mens, M., Hunink, J., Delsman, J., Pouwels, J. and Schasfoort, F., 2019, Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II: Voorlopige rapportage., Deltaresrapport 11203734-003, Delft.
- Mens, M., Schasfoort, F., Hunink, J., Pouwels, J., Delsman, J. and de Jong, J., 2020, Hydrologische en economische effecten van twee maatregelpakketten voor Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 11205271-005, Deltares, Delft.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021, Integrale Mobiliteitsanalyse 2021 Mobiliteitsontwikkeling en -opgaven in kaart gebracht
- MRA, 2021, Basisveiligheidsniveau Klimaatbestendige Nieuwbouw 3.0
- Nieuwjaar, M., 2022, Speelveldverkenning Actualiseren veiligheidsnormen regionale waterkeringen Noord-Holland

- 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(1–2), pp. 89–97 (<http://link.springer.com/10.1007/BF00157748>) accessed February 6, 2022.
- Pantelli, N. M., 2017, Global assessment of the potential effect of large sand replenishment on fresh groundwater resources. Additional thesis project.
- Pouwels, J., America, I., Delsman, J. and Mens, M., 2021, Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II – Het effect van nieuwe inzichten en onzekerheden op knelpunten in de zoetwatervoorziening., Deltares rapport 1206829-002
- Prins, T., in prep., Eindrapport Natuurlijk Veilig onderdeel vooroever
- Provincie Noord-Holland, 2019, Biodiversiteit in Noord-Holland 2019
- Provinciale Staten NH, 2018, 'Besluit van Provinciale Staten van Noord-Holland van 12 november 2018 tot wijziging van de Waterverordening Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.', (<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/prb-2018-8744.html>).
- Provincie Noord-Holland, 2020, Programma Natuurontwikkeling 2021-2025
- Rijkswaterstaat, 2020, Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust.
- Rijkswaterstaat, 2021, Kustlijnenkaart 2022
- Röbke, B., De Vet, L., Santinelli, G. and Holzhauer, H., 2021, TKI Dutch Coastline Challenge – Werkpakket 1: Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave voor de kustvakken Noord-Holland en Texel, Deltares report 11207047-001-HYE-0001
- van der Sleen, P., Zuidema, P. A., Morrongiello, J., Ong, J. L. J., Rykaczewski, R. R., Sydeman, W. J., Di Lorenzo, E. and Black, B. A., 2022, 'Interannual temperature variability is a principal driver of low-frequency fluctuations in marine fish populations', *Communications Biology* 5(1), pp. 28 (<https://www.nature.com/articles/s42003-021-02960-y>) accessed February 6, 2022.
- Sluiter, R. en Jilderda, R., 2017, Product Description Daily (transformed) climate grids for the Netherlands from 1910 – 2016, KNMI rapport TR-362
- STOWA, z.d., 'Deltafactsheet Brakke Wateren', (<https://www.stowa.nl/deltafacts/waterkwaliteit/kennisimpuls-waterkwaliteit/brakke-wateren>).
- VEWIN, 2019, Continu betrouwbaar drinkwater leveren Hoe doen we dat?
- van Ojen, F.A.D., 2020, Rapportage en advies Fase 2 Klimaatadaptieve provinciale infra Noord-Holland.
- van Vliet, M., 2020, Resultaten stresstest provinciale infrastructuur Provincie Noord-Holland
- Vos, P. C., 2015, Origin of the Dutch Coastal Landscape - Long-Term Landscape Evolution of the Netherlands during the Holocene, Described and Visualized in National, Regional and Local Palaeogeographical Map Series
- Wolters, H. A., van den Born, G. J., Dammers, E. and Reinhard, S., 2018, Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Deltares, PBL, WEcR.
- Woning, M. en van Buren, R., 2015, Blue Areas rail

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

Deltares

www.deltares.nl