



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

Klimaatverandering en het mobiliteitssysteem

Taede Tillema, Saeda Moorman, Martijn van der Horst, Hidde Boonstra en Maarten Kansen

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM



Samenvatting

De infrastructuurnetwerken zijn gevoelig voor fysieke schade aan de infrastructuur en verminderde functionaliteit als gevolg van droogte, hitte, hevige neerslag en andere gebeurtenissen vanuit het klimaat. De kans op negatieve effecten neemt in een toekomstig klimaat toe. Soms kan intensief en gepland beheer en onderhoud (B&O) grote en dure herstelmaatregelen aan de infrastructuur voorkomen. Vaak gaat het echter om grootschaliger maatregelen in het domein van vervanging en renovatie (V&R). Het veranderend klimaat beïnvloedt ook het gebruik van infrastructuur en de activiteiten. De meest voor de hand liggende aanpassingen zijn hier: een andere routekeuze ('omrijden') indien mogelijk, vaker reizen of vervoeren (als voer- of vaartuigen door de beperkingen aan de infrastructuur minder zwaar beladen mogen zijn); de reis uitstellen of niet meer reizen (en dan bijvoorbeeld thuiswerken). Ook aanpassingen aan voer- en vaartuigen en modal shift tussen modaliteiten is een optie. De gebruikers van de verschillende typen infrastructuur zullen in de praktijk verschillende afwegingen maken tussen deze opties.

Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) heeft op verzoek van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) verkend wat een veranderend klimaat betekent voor het mobiliteitssysteem. Het mobiliteitssysteem zien we als de combinatie van de infrastructuur(netwerken), het gebruik daarvan ('mobiliteit'), activiteiten, zoals wonen, werken en recreëren, en de locaties waar infrastructuur-gebruikers die activiteiten ondernemen.

Het klimaat is het weer over een langere periode, bijvoorbeeld 30 jaar. Het is niet in één variabele te vangen, maar valt uit te drukken in een reeks indicatoren, zoals neerslag, zonnestraling, windrichting, temperatuur en verdamping en dat per jaar, per seizoen, per maand, per dag enzovoort. Tot het klimaat behoren zowel gemiddelde weerpatronen als extreme weersituaties.

Het klimaat is aan het veranderen. Het klimaat van nu is anders dan dat van 1950-1980 of van 1980-2010, en ook anders dan het klimaat dat bijvoorbeeld in 2030 en later deze eeuw wordt verwacht. Zowel de gemiddelden als de extremen in het klimaat veranderen, doordat de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer sinds de industrialisatie van de samenleving stijgt. Dit is vooral het gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen die met deze industrialisatie gepaard gaat. Deze ontwikkelingen zijn deels al onomkeerbaar. Ook als we snel stoppen met de emissie van broeikasgassen, moeten we ons voorbereiden op klimaatverandering.

De volgende hoofdonderzoeksvraag staat centraal in deze studie:

Hoe beïnvloedt het veranderend klimaat het integrale mobiliteitssysteem en welke mogelijke adaptatiemaatregelen zijn er om de negatieve gevolgen van het veranderend klimaat te beperken?



De hoofdvraag valt uiteen in 3 deelvragen:

- 1 Hoe gevoelig zijn de hoofdnetwerken van wegen, spoorwegen en vaarwegen, met de havens en luchthavens als knooppunten hierin, voor het veranderend klimaat? En wat zijn mogelijke adaptatiemaatregelen?
- 2 Welke invloed heeft het veranderend klimaat op het gebruik van de infrastructuur, op de activiteiten en de locaties waar infrastructuurgebruikers die activiteiten ondernemen? En wat zijn mogelijke adaptatiemaatregelen?
- 3 Wat betekenen een mogelijke zeespiegelstijging van op termijn 2-4 m en adaptatiestrategieën die Nederland dan kan volgen om niet te overstromen, voor het mobiliteitssysteem?

We vatten het veranderend klimaat samen in 5 thema's: droogte, wateroverlast, hitte, overstromen, storm & onweer. De eerste 4 zijn de centrale thema's in het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA), het vijfde hebben we toegevoegd vanwege zijn mogelijk grote impact op de spoorinfrastructuur. De inzichten over de infrastructuur (deelvraag 1) heeft IenW onder meer gebruikt voor de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA-2021). Deze opvolger van de Nationale Markt- en Capaciteitsanalyse (NMCA) heeft een bredere reikwijdte dan de 'traditionele' mobiliteitsknelpuntenanalyse van de NMCA. De IMA bevat bijvoorbeeld ook analyses van opgaven op het gebied van klimaatadaptatie, verkeersveiligheid en emissies van broeikasgassen, fijnstof en stikstofverbindingen.

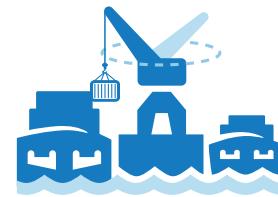
Gevoeligheid hoofdinfrastructuurnetwerken en adaptatiemaatregelen

Lijninfrastructuur, zoals hoofdwegen, hoofdvaarwegen en spoorwegen, is gevoelig voor negatieve effecten die samenhangen met de 5 onderscheiden klimaatthema's: droogte, wateroverlast, hitte, overstromen en storm & onweer. Het gaat bij negatieve effecten bijvoorbeeld om de ongelijke zakking van weg of spoor door bodemdaling en laagwater in de rivieren – beide veroorzaakt door droogte –, of instabiliteit van weg- en spoortaluds – veroorzaakt door extreme neerslag. Hierdoor ontstaat fysieke schade aan de infrastructuur of de functionaliteit van de infrastructuur wordt beperkt. De kans dat de infrastructuur dergelijke negatieve effecten ondervindt, neemt in een toekomstig klimaat toe. Enkele belangrijke bevindingen voor de 3 netwerken, gebaseerd op stresstesten die zijn uitgevoerd door de beheerders (met name Rijkswaterstaat en ProRail), zijn:

- **Wegen:** Op het hoofdwegennet vormt ongelijke zakking door bodemdaling als gevolg van droogte een relatief groot risico. Hiermee bedoelen we dat de kans dat ongelijke zakking optreedt maal het gevolg ervan (in termen van herstelkosten voor de beheerder en kosten voor de gebruikers als het netwerk gestremd raakt of minder goed functioneert) groot is. De gevoeligheid voor ongelijke zakking door droogte komt het meest voor in het westen en in het noorden van het land.
- **Vaarwegen:** Het grootste risico voor het hoofdvaarwegennet is droogte, ofwel lage rivierafvoeren. Laagwater door droogte in combinatie met bodemerrosie in de rivieren heeft invloed op de bevaarbaarheid van de rivieren (onder andere minder vaardiepte). De Waal heeft, vooral rond Nijmegen, een grote gevoeligheid voor onvoldoende diepte en bodemerrosie. Ook voor de gehele IJssel en het meest bovenstroomse traject van de Nederrijn zijn locaties te vinden die gevoelig zijn voor onvoldoende diepte en bodemerrosie.
- **Spoorwegen:** Voor spoorwegen is er niet één type negatief effect op de infrastructuur aan te wijzen dat een duidelijk groter risico heeft dan andere negatieve effecten. Grote delen van het spoornetwerk zijn gevoelig voor negatieve effecten die samenhangen met wateroverlast of hitte, zoals het onderwaterlopen van spoortunnels of het niet meer kunnen sluiten van bruggen die zijn uitgezet door hitte. De gevoeligheid van de spoorinfrastructuur voor negatieve effecten die samenhangen met droogte, zoals verzakkingen, is in de kustgebieden minder groot dan in de rest van het land.



Zee- en luchthavens hebben als knooppuntinfrastructuur te maken met dezelfde klimaatgevoeligheden en risico's als de lijninfrastructuur, te meer omdat op deze knooppunten wegen, vaarwegen en spoorwegen bij elkaar komen.



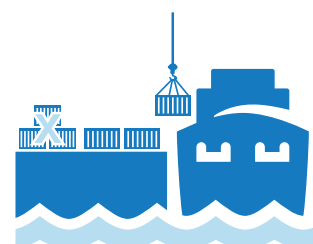
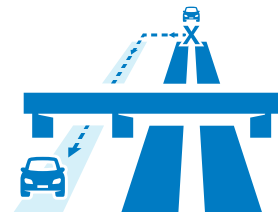
De mogelijke *adaptatiemaatregelen* zijn divers en verschillen per type negatief effect en per type infrastructuur. Soms kan intensief en vooraf gepland beheer en onderhoud (B&O) grote en dure herstelmaatregelen aan de infrastructuur voorkomen. Een concreet voorbeeld hiervan is het goed onderhouden van het asfalt van wegen om schade te voorkomen. Vaak gaat het echter om groot-schaliger maatregelen in het domein van vervanging en renovatie (V&R).

Gebruik van infrastructuur en activiteiten

Veel van de negatieve effecten die het klimaat heeft op het gebruik van infrastructuur en op activiteiten, zijn van tijdelijke aard. Veranderingen in het gebruik van infrastructuur zijn daarbij waarschijnlijker dan veranderingen in de activiteiten en activiteitenlocaties.

Over het algemeen is een gedragsaanpassing gemakkelijker wanneer het incident tijdig bekend is. Logisch redenerend zijn de meest voor de hand liggende aanpassingen: een andere routekeuze ('omrijden') of een andere vervoerwijze kiezen, vaker reizen of vervoeren (als de beperkingen betekenen dat een voer- of vaartuig minder zwaar beladen mag zijn); de reis uitstellen of niet meer reizen. De gebruikers van de verschillende typen infrastructuur zullen in de praktijk verschillende afwegingen maken tussen deze opties.

- **Gebruik van de weg:** omrijden is, zeker als de schade aan en verminderde functionaliteit van de infrastructuur vooral lokaal is (bijvoorbeeld 1 weg of 1 brug), een voor de hand liggende adaptatiemaatregel. In veel andere gevallen ligt uitstellen of afstellen van een reis voor de hand; denk aan de situatie dat er hevige regen of storm wordt voorspeld of wanneer bekend is dat een weg tijdelijk is gestremd door een bermbrand of omgewaaide boom op de weg. In plaats van te reizen kunnen mensen dan kiezen voor thuiswerken als dat mogelijk is. Als er beperkingen gelden aan het vervoerd gewicht, bijvoorbeeld bij een weg die verzakt, is het minder zwaar beladen van vrachtwagens ook een optie.
- **Gebruik van het spoor:** Bij het spoor is routekeuze ('omrijden') bij lokale schade of functiebeperking een optie, maar dan vooral voor reizigers en niet voor het spoorgoederenvervoer. Treinreizigers zullen vaak eerder kiezen voor een ander vervoermiddel (bijvoorbeeld bus, fiets, auto/taxi) dan voor een omrijroute per spoor. Omdat er via het spoor minder alternatieve routes zijn dan via de weg, zullen omrijroutes over het algemeen lang zijn. Vanuit de vervoerskant (bijvoorbeeld de NS) is het inzetten van vervangend busvervoer een mogelijke adaptatiemaatregel, maar dit werkt minder goed als een spoortraject onverwacht uitvalt. Het kost namelijk tijd en capaciteit om vervangend busvervoer te regelen.
- **Gebruik van vaarwegen:** Voor de binnenvaart is een verminderde bevaarbaarheid van rivieren door droogte (laagwater) het grootste negatieve effect dat de infrastructuur kan raken. Het kiezen van een andere vaarroute klinkt als een theoretisch interessante optie, maar voor vaarroutes over rivieren bestaat vaak geen goed alternatief. Het minder zwaar beladen van schepen is op de korte termijn de meest voor de hand liggende, en in de praktijk ook meest toegepaste, optie bij droogte. Als periodes met droogte frequenter gaan optreden, zouden ook structurelere wijzigingen kunnen optreden, zoals een modal shift naar het wegtransport. Voor de zeevaart kunnen rede-rijen (vaker) voor andere zeehavens kiezen als de keringen structureel vaker zouden moeten sluiten vanwege hoge waterstanden.



- **Gebruik van luchthavens:** Als een landingsbaan wordt getroffen door een negatief effect, zoals een verzakking door droogte of een overstroming, is de meest voor de hand liggende adaptatiemaatregel om, als dat mogelijk is, een andere baan te gebruiken voor het opstijgen en landen van vliegtuigen. Als de capaciteit hierdoor afneemt, kan dit leiden tot langere reistijden. Bij extreme weerscondities, zoals storm of mist, kunnen inkomende vliegtuigen uitwijken naar een andere luchthaven. Voor vertrekkende vliegtuigen is uitstel van de reis de meest geëigende optie vanuit het perspectief van de vervoerder (wat leidt tot bijvoorbeeld extra vertraging of uitval van een vlucht). Dit is voor de reiziger geen adaptatiemaatregel, omdat deze weinig keuzevrijheid heeft. Het overkomt de reiziger en leidt tot extra reistijd en ongemak. Als de vertraging lang gaat duren, kan een reiziger voor korte vliegafstanden (tot ongeveer 800 km) wel proberen de reis met de trein te maken.

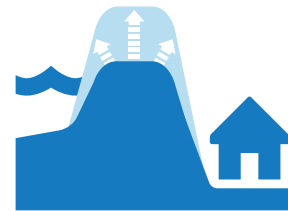


De effecten van zeespiegelstijging op het mobiliteitssysteem

Na 2050 nemen overstromingsrisico's door de zeespiegelstijging naar verwachting versneld toe. In deze studie hebben we verkend welke effecten een sterke zeespiegelstijging heeft op het mobiliteitssysteem. Daarbij nemen we als uitgangspunt een mogelijk grote zeespiegelstijging van +2 tot +4 m in de komende 100 tot 200 jaar en de 4 adaptatiestrategieën die Deltares hiervoor heeft uitgewerkt (Haasnoot et al., 2019). Samen beschrijven deze strategieën de oplossingsruimte voor de Nederlandse delta.

Het gaat om:

- **'Beschermen-gesloten':** Beschermen van de kust tegen overstromingen en erosie middels harde of zachte maatregelen, zoals keringen, zand-suppletie of wetlands. Rivierarmen worden bij zee afgesloten (met dammen of stormvloedkeringen). Rivierafvoeren worden door pompen en spuiscuizen in zee geloosd.
- **'Beschermen-open':** Idem als beschermen-gesloten, maar de rivieren blijven in open verbinding met de zee. Rivierdijken moeten daarom worden opgehoogd.
- **'Zeewaarts':** Creëren van nieuw, hoger en zeewaarts gelegen eilanden om de delta te beschermen tegen gevolgen van overstroming.
- **'Meebewegen':** Verkleinen van de kwetsbaarheid voor de gevolgen van een hogere zeespiegelstijging door water- of zouttolerant landgebruik (bijvoorbeeld gebouwen op palen), ophogen van land, ruimtelijke planning en migratie van de bevolking.



De strategieën hebben elk hun specifieke effect op activiteiten(locaties) van mensen en bedrijven, op de infrastructuur en op het gebruik daarvan. Daarbij verandert er bij de beide paden van ‘beschermen’ minder aan de ruimtelijke inrichting van Nederland dan bij de strategieën ‘zeewaarts’ en ‘meebewegen’. De scheepvaart ondervindt bij ‘beschermen’ grote veranderingen omdat hoogwaterkeringen (veel) vaker moeten sluiten naarmate de zeespiegel stijgt. Ook zullen, zeker bij ‘beschermen-open’, de hogere, en dus ook bredere, dijken veel ruimte kosten, maar deze bieden tegelijkertijd nieuwe mogelijkheden voor multifunctioneel ruimtegebruik, bijvoorbeeld voor nieuwe activiteiten of de aanleg van nieuwe infrastructuur.

Bij een keuze voor ‘zeewaarts’ is nieuwe infrastructuur (bruggen, dijken) nodig tussen de nieuwe eilanden onderling en tussen de eilanden en de kust. Ook kunnen eilanden nieuwe ruimte bieden voor de aanleg van zee- of luchthavens. Maar ook op zee is de ruimte schaars. Zo maken andere activiteiten, zoals visserij, scheepvaart en windparken, aanspraak op dezelfde ruimte. De aanleg van de eilanden vergt bovendien extreem veel zand, wat de praktische haalbaarheid van deze optie sterk bemoeilijkt.

De strategie ‘meebewegen’ vereist veel innovatie en hoge investeringskosten, bijvoorbeeld rondom de ontwikkeling van drijvende bebouwing (huizen, steden) en het aanleggen van en bouwen op megaterpen (opgehoogde stukken land). Onduidelijk is wat dit meebewegen betekent voor de infrastructuur: beweegt die ook mee of wordt vaste infrastructuur (weg, spoor) ingeruild voor vervoer over water? ‘Meebewegen’ leidt mogelijk tot meer verplaatsingen over water en tot de aanleg van bruggen tussen (delen van) steden die op terpen zijn gebouwd. Ook de migratie naar de hogere delen van Nederland (het oosten) is een zeer ingrijpende ontwikkeling. Als veel meer Nederlanders verhuizen naar de hoger gelegen delen van het land, leidt dat daar tot een grote dichtheid van bebouwing en meer vraag naar infrastructuur en mobiliteit.

Discussievragen

Tot slot hebben we in deze studie discussievragen voor beleidsmakers geformuleerd. Dit zijn vragen die in de (beleids)praktijk kunnen spelen rondom de relatie tussen klimaatverandering en zeespiegelstijging voor de infrastructuur, het gebruik van de infrastructuur, de activiteiten en de ruimtelijke inrichting. Een voorbeeld van zo’n discussievraag is: in hoeverre is het effectief en efficiënt om een corridor in één keer klimaatbestendig te maken in plaats van losse, op zichzelf staande locaties aan te pakken? Andere voorbeelden zijn vragen rond afwegingen tussen direct aanpakken van verstoringen of het uitstellen daarvan en afwegingen om al dan niet te differentiëren naar het belang van netwerken.



Inhoud

Samenvatting 2

Woord vooraf 9

1 Introductie 10

- 1.1 Aanleiding 10
- 1.2 Vraagstelling en aanpak 12
- 1.3 Afbakeningen en definities 14
- 1.4 Onderzoeksstappen en leeswijzer 17

2 Klimaatverandering 18

- 2.1 Inleiding 18
- 2.2 Belangrijke klimaatgerelateerde begrippen in deze studie 18
- 2.3 Verwachte klimaatveranderingen in scenario WH tot 2050 19

3 Conceptueel denkkader: klimaat en het mobiliteitssysteem 21

- 3.1 Inleiding 21
- 3.2 Transport-land use feedback cycle 21
- 3.3 Klimaat en het mobiliteitssysteem 23

4 Klimaatgevoeligheid van bestaande infrastructuurnetwerken 30

- 4.1 Inleiding 30
- 4.2 Methode voor gevoeligheidskaarten lijninfrastructuur 31
- 4.3 Gevoeligheid van het hoofdwegennet in beeld 34
- 4.4 Gevoeligheid van het hoofdvaarwegennet in beeld 38
- 4.5 Gevoeligheid van het hoofdspoorwegennet in beeld 42
- 4.6 Mogelijke adaptatiemaatregelen lijninfrastructuur 45
- 4.7 Gevoeligheid en adaptatiemaatregelen knooppuntinfrastructuur: havens en luchthavens 48
- 4.8 Conclusies: belangrijkste klimaatrisico's, adaptatiemaatregelen en discussievragen voor beleid 49

5 Invloed van een veranderend klimaat op het gebruik van infrastructuur en op activiteiten 52

- 5.1 Inleiding 52
- 5.2 Gebruik van de infrastructuur: aanpassingen binnen een netwerk 52
- 5.3 Gebruik van de infrastructuur: aanpassingen tussen netwerken 56
- 5.4 Aanpassing in activiteiten 58
- 5.5 Conclusies: Belangrijkste aanpassingen in 'gebruik van de infrastructuur', 'activiteiten' en discussievragen voor beleid 59

6 Invloed van een veranderend klimaat op het gebruik van infrastructuur en op activiteiten 64

- 6.1 Inleiding 64
- 6.2 De 4 adaptatiestrategieën 64
- 6.3 De adaptatiestrategieën en globale effecten op het mobiliteitssysteem 69
- 6.4 De adaptatiestrategieën en concrete vragen over het effect op het mobiliteitssysteem 70
- 6.5 Conclusies: adaptatiestrategieën en discussievragen voor beleid 74

7 Conclusies 76

- 7.1 Beantwoording deelvragen 76
- 7.2 Beantwoording hoofdonderzoeksvraag 80

Summary 82

Referenties 87

Bijlagen 91

- A Klimaatverandering en scenario's in 2050 91
- B Maatschappelijke kosten door negatieve effecten op de infrastructuur 98
- C Gevoeligheden hoofdwegennet MIRT-regio's 104
- D Gevoeligheid: relatie met kenmerken van infrastructuur & omgeving 108
- E Nieuwsberichten 113
- F Klimaatadaptatie van Nederlandse havenbeheerders 118
- G Effecten van droogte op de vaarweginfrastructuur en binnenvaart 121
- H Een natuurlijker toekomst voor Nederland in 2120 127
- I Luchthavens in zee 130

Colofon 131

Woord vooraf

In dit rapport verkent het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) de invloed van het veranderende klimaat op de mobiliteit. Daarnaast schetsen we een handelingsperspectief: wat zijn de mogelijkheden om ons aan te passen aan de ongewenste effecten die het klimaat heeft op de mobiliteit?

Klimaatverandering, als belangrijk en actueel thema, behoeft waarschijnlijk geen nadere toelichting. Mobiliteit hebben we in dit rapport opgevat in de breedst mogelijke zin: van de fysieke infrastructuur (wegen, spoorwegen, vaarwegen, zee- en luchthavens), de verschillende modaliteiten die van de infrastructuur gebruik maken (inclusief alle keuzes die daarbij gemaakt worden, zoals de keuze voor vervoermiddel, route en tijdstip) tot en met de activiteiten en de activiteitenlocaties waar al die infrastructuurgebruikers heen gaan.

We hebben in het rapport veel aandacht besteed aan definities en het conceptualiseren van het mobiliteits-systeem en al zijn mogelijke relaties met het veranderende klimaat. Dit hebben we gedaan om enerzijds alle relaties systematisch te kunnen aflopen en anderzijds een eenduidig denk- en begrippenkader te kunnen bieden voor nadere (beleids)discussies over dit onderwerp. Een minder conceptueel geïnteresseerde lezer zou het conceptueel ingestoken hoofdstuk 3 over kunnen slaan.

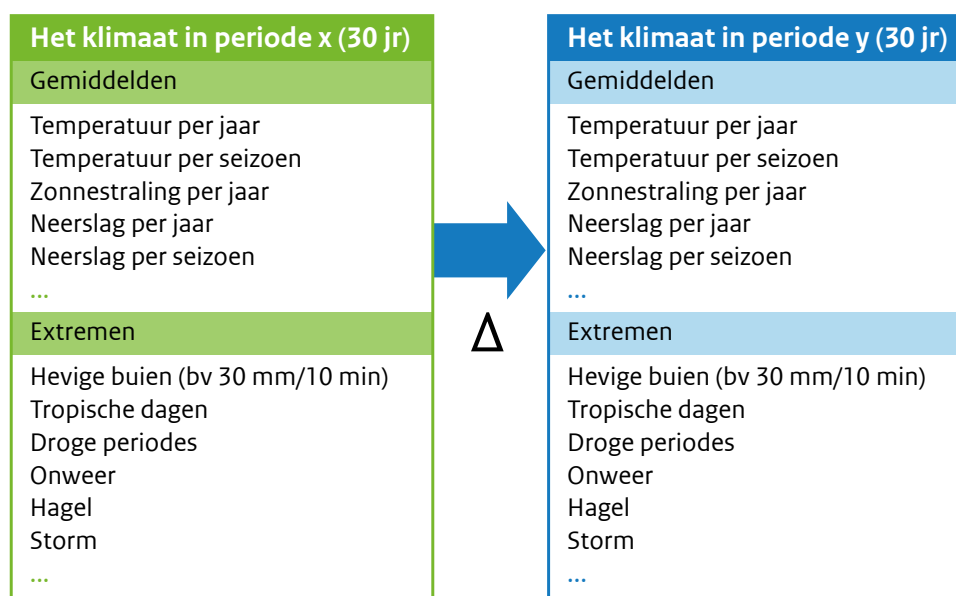
Het KiM is een kennisinstituut. Wij denken na over kennisvragen, maar geven geen beleidsadviezen. Beleidsafwegingen vallen dan ook buiten de reikwijdte van deze studie. Wel hebben we ons best gedaan om discussievragen op te werpen voor het beleid. Dit hebben we gedaan in de vorm van een vaste 'rubriek' discussievragen aan het eind van de belangrijkste hoofdstukken. We hopen beleidsmakers hiermee te inspireren in hun over- en afwegingen over de relatie klimaat en mobiliteit.

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Het klimaat is het weer over een langere periode. Vaak wordt hiervoor een periode van 30 jaar genomen. Hét klimaat bestaat dus eigenlijk niet. Belangrijk is om hierbij te vermelden over welke periode en welk gebied het gaat. Het klimaat is niet in één variabele te vangen, maar is wel uit te drukken in een reeks indicatoren, zoals neerslag, zonnestraling, temperatuur en verdamping per jaar, per seizoen, per maand, per dag, enzovoort. Tot het klimaat behoren zowel gemiddelde weerpatronen als extreme weersituaties, zoals de temperatuur op de koudste winterdag en die op de heetste zomerdag, het aantal tropische dagen, de hoogste windsnelheid en dergelijke.¹

Het klimaat is aan het veranderen. Het klimaat van nu is anders dan dat van 1950-1980 of van 1980-2010 en ook anders dan het klimaat dat bijvoorbeeld in 2030 en later deze eeuw wordt verwacht. Zowel de gemiddelden als de extremen in het klimaat veranderen, zie figuur 1.1.



Figuur 1.1 Conceptueel overzicht van klimaatgemiddelden, -extremen en een veranderend klimaat (aangegeven door periode x en y en de verandering Δ daartussen).

Deze veranderingen worden veroorzaakt doordat de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer sinds de industrialisatie van de samenleving aan het stijgen is. Die stijging is vooral het gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen die met deze industrialisatie gepaard gaat. Deze klimaatverandering is deels al onomkeerbaar. Ook als we snel stoppen met de emissie van broeikasgassen, moeten we ons voorbereiden op de gevolgen van de klimaatverandering.

¹ KNMI (2015) onderscheidt in totaal bijna 50 variabelen en indicatoren om het klimaat te beschrijven.

De klimaatverandering is al enige tijd aan de gang en zal bovendien nog enige tijd voortduren. Voor Nederland betekent dit enerzijds dat de gemiddelden veranderen; denk aan het stijgen van de gemiddelde temperatuur per jaar en van de hoeveelheid neerslag in de winter. Anderzijds gaan sommige extreme weersituaties, die we ook nu al kennen, vaker voorkomen, zoals hevige buien, hagel en onweer. Hetzelfde geldt voor hittegolven en periodes met langdurige droogte. Extremen aan de koude kant, zoals vorst- en ijsdagen, worden juist zeldzamer.² Tegelijkertijd stijgt het gemiddelde niveau van de zeespiegel doordat het water van de oceanen uitzet en het landijs op Groenland en Antarctica en gletsjers smelten (IenW, 2019). Ook Nederland krijgt hiermee te maken.

Om de komende decennia goed voorbereid te zijn op de gevolgen van de klimaatverandering, is het van belang tijdig te onderzoeken hoe gevoelig de infrastructuur is voor situaties die in een toekomstig klimaat wellicht vaker voorkomen dan in het huidige klimaat. Hoe reageren bestaande wegen, spoorwegen en waterwegen op heftige buien of langdurige droogte: ontstaat er schade of wordt de infrastructuur minder bruikbaar? Vereisen specifieke gevoeligheden bij bestaande infrastructuur in de toekomst andere beheermaatregelen dan nu? Moet nieuwe infrastructuur anders worden ontworpen om vanaf het begin minder klimaatgevoelig te zijn? De planning van nieuwe infrastructuur duurt jaren, vanaf de vroege verkenningsfase van projecten tot en met de realisatie. Die infrastructuur ligt daarna voor decennia vast in het landschap. Denk aan spoortracés die al meer dan honderd jaar oud zijn. Dat zijn redenen om nu al na te denken over de effecten die het klimaat de komende decennia, en verder in de toekomst, kan hebben op de infrastructuur.

Maar de invloed van het klimaat, en de veranderingen hierin, reikt verder dan de infrastructuur. Het beïnvloedt ook de vervoermiddelen, routes, rijtijden, activiteiten en locaties voor die activiteiten die mensen en bedrijven kiezen. Klimaatverandering heeft dus een effect op het totale mobiliteitssysteem. Ook voor het totale systeem is het goed om tijdig in beeld te hebben welke veranderingen op stapel staan. Daarbij is het op voorhand goed te beseffen dat ‘het klimaat’ ook gewoon ‘het weer’ is, zij het over een lange periode gerekend, met alle variaties die daar nu al in voorkomen. We zijn in dit land al gewend ons dagelijks aan weergrillen aan te passen: bij een hittegolf gaan we naar het strand, bij regenachtig weer doen we een indoor-activiteit en bij regen pakken we eerder de auto of het openbaar vervoer dan de fiets. De vraag is dus ook of het vaker voorkomen van extreme situaties er de komende jaren voor zorgt dat we onze routes, rijtijden, activiteiten, enzovoort in de toekomst anders gaan aanpassen dan we nu al doen als zich zo’n extreme situatie voordoet.

Vraag van IenW

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) gevraagd te onderzoeken wat de gevolgen zijn van een veranderend klimaat voor de infrastructuur, en daarnaast ook breder de effecten van klimaatverandering op het totale mobiliteitssysteem te verkennen. Omdat dit laatste terrein nog relatief onontgonnen is, zal het vooral gaan om een verkenning op basis van de ons bekende relaties tussen weer en mobiliteitskeuzes en activiteiten. Ook mogelijke aanpassingsmaatregelen zijn belangrijk voor IenW.

De inzichten over de infrastructuur gebruikt IenW onder meer voor de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA). Deze opvolger van de Nationale Markt- en Capaciteitsanalyse (NMCA) heeft een bredere reikwijdte dan de ‘traditionele’ mobiliteitsknelpuntenanalyse van de NMCA. De IMA bevat bijvoorbeeld ook opgaven op het gebied van klimaatadaptatie, verkeersveiligheid en emissies van broeikasgassen, fijnstof en stikstofverbindingen.

De verkenning van de klimaatgevoeligheid van de infrastructuur en de effecten van het klimaat op het totale mobiliteitssysteem past voor IenW binnen een goede voorbereiding op wat de komende decennia kan gebeuren als gevolg van een nu al onomkeerbare klimaatverandering.

² <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/gevolgen-klimaatverandering>

1.2 Vraagstelling en aanpak

De volgende onderzoeksvraag staat centraal in dit onderzoek:

Hoe beïnvloedt het veranderend klimaat het integrale mobiliteitssysteem en welke mogelijke adaptatiemaatregelen zijn er om de negatieve gevolgen van het veranderend klimaat te beperken?

De hoofdvraag valt uiteen in 3 deelvragen:

- 1 Hoe gevoelig zijn de hoofdnetwerken van wegen, spoorwegen en vaarwegen, met de havens en luchthavens als knooppunten hierin, voor het veranderend klimaat? En wat zijn mogelijke adaptatiemaatregelen?
- 2 Welke invloed heeft het veranderend klimaat op het gebruik van de infrastructuur, op de activiteiten en op de locaties waar infrastructuurgebruikers die activiteiten ondernemen? En wat zijn mogelijke adaptatiemaatregelen?
- 3 Wat betekenen een mogelijke zeespiegelstijging van op termijn 2-4 m en adaptatiestrategieën die Nederland dan kan volgen om niet te overstromen, voor het mobiliteitssysteem?

Bij de 3 deelvragen is de vervolgvraag aan de orde welke afwegingen een rol kunnen spelen bij het kiezen van adaptatiemaatregelen. Die afwegingen behandelen we in de vorm van een rubriek ‘discussievragen voor beleid’. De discussievragen beantwoorden we niet, maar deze zijn bedoeld om inspiratie te bieden aan beleidsmakers die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat en het mobiliteitssysteem.

Van de 3 deelvragen is de eerste het meest concreet te beantwoorden, omdat er al onderzoek naar wordt gedaan, zoals stresstesten. Bij de tweede en derde deelvraag is dit minder het geval, zodat de beantwoording daarvan een meer verkennend karakter heeft.

De deelvragen 1 en 2 hebben beide 2050 als richtpunt. Ze focussen op verschillende elementen van het mobiliteitssysteem: de infrastructuur (deelvraag 1), het gebruik daarvan en de activiteiten (deelvraag 2). Het veranderende klimaat hebben we bij deze 2 deelvragen gevat in 5 thema's: droogte, wateroverlast, hitte, overstromen, storm & onweer. De eerste 4 thema's zijn de centrale thema's in het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA), het vijfde thema hebben we toegevoegd vanwege de mogelijk grote impact op de spoorinfrastructuur.

Deelvraag 3 richt zich, in tegenstelling tot de deelvragen 1 en 2, op één specifiek klimaatthema: ‘overstromen’ door een sterke zeespiegelstijging. Deze deelvraag richt zich op de verdere toekomst (100-200 jaar vooruit) en een zeespiegelstijging van +2 tot +4 m. We kiezen hierbij de invalshoek van de adaptatiestrategieën die mogelijk zijn om met een dergelijke sterke zeespiegelstijging om te gaan en (deels) te voorkomen dat het daadwerkelijk tot ‘overstromen’ komt. De zeespiegelstijging en de strategieën om ermee om te gaan, beïnvloeden het mobiliteitssysteem allereerst in het landgebruik (waaronder activiteitenlocaties). Vervolgens beïnvloeden ze ook de andere elementen van het mobiliteitssysteem: de activiteiten die mensen en bedrijven op locaties ondernemen, de infrastructuur tussen activiteitenlocaties en het gebruik van infrastructuur om aan activiteiten te kunnen deelnemen.

Deelvraag 1: Gevoeligheid hoofdnetwerken en adaptatiemaatregelen

Voor deze deelvraag brengen we in kaart hoe gevoelig infrastructuur is voor negatieve effecten die samenhangen met de 5 klimaatthema's droogte, wateroverlast, hitte, overstromen en storm & onweer. Denk bij negatieve effecten bijvoorbeeld aan verzakkingen van wegen en spoorwegen en laagwater in de rivieren. De gevoeligheid hiervoor wordt bepaald door kenmerken van de infrastructuur en de omgeving en verandert in principe niet bij klimaatverandering, mits deze binnen zekere grenzen blijft.³ Deltares heeft de gevoeligheden in opdracht van het KiM op een landelijke kaart zichtbaar gemaakt voor 3 netwerken: hoofdwegen, hoofdvaarwegen en hoofdspoorwegen. De gevoeligheidskaarten zijn gemaakt voor de IMA van IenW. De kaarten zijn gebaseerd op de zogenoemde klimaatstresstesten. Klimaatstresstesten zijn een stap in de uitvoering van de afspraken uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA)⁴ en hebben tot doel de gevoeligheden van de infrastructuur voor klimaatgerelateerde bedreigingen in beeld te brengen (IenW, 2018).

Om de kaarten voor de IMA overzichtelijk te houden, is ervoor gekozen alleen de gevoeligheden te tonen die in 2050 de grootste risico's opleveren. Bij risico gaat het om de kans dat een negatief effect op de infrastructuur daadwerkelijk optreedt maal het gevolg dat dit negatieve effect heeft. De keuze om de selectie te baseren op de risico's in het jaar 2050 is in lijn met de Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie, waarin als doel is gesteld dat Nederland in 2050 klimaatbestendig en waterrobuust is ingericht en dat bij (her)ontwikkelingen geen extra risico ontstaat op schade en slachtoffers voor zover dat redelijkerwijs haalbaar is (Bles et al., 2020). In aanvulling op de gevoeligheid van de infrastructuur verkennen we voor de IMA in dit KiM-onderzoek ook de mogelijke adaptatiemaatregelen om de kans op negatieve effecten op de infrastructuur te verkleinen.

Deelvraag 2: Effecten van klimaat op het gebruik van infrastructuur, op activiteiten en op activiteitenlocaties

Deze deelvraag richt zich op het verkennen van de gevolgen die het klimaat heeft voor het verkeer en het vervoer dat gebruik maakt van de infrastructuur. Daarbij maken we onderscheid naar gedragsaanpassingen binnen een infrastructuurnetwerk en aanpassingen tussen netwerken onderling. Aanpassingen binnen een netwerk gaan over gedragsaanpassingen en over aanpassingen van de voer- en vaartuigen die van het netwerk gebruik maken. Aanpassingen tussen netwerken gaan over modal shift en integratie tussen netwerken. Daarnaast gaat deze deelvraag ook over de mogelijke manieren waarop reizigers, vervoerders en verladers hun activiteiten (bijvoorbeeld wonen, werken, winkelen) en de locatie van hun activiteiten (bijvoorbeeld de locatie van een distributiecentrum) aanpassen. Net als bij deelvraag 1 richten we ons op de effecten die in de komende decennia kunnen optreden (het richtpunt is 2050).

Deelvraag 3: Zeespiegelstijging en de mogelijke gevolgen voor het mobiliteitssysteem

Voor na 2050 nemen overstromingsrisico's door zeespiegelstijging toe (Baart et al., 2019). Het Delta-programma houdt vooralsnog rekening met een zeespiegelstijging van maximaal 1 m aan het eind van deze eeuw (IenW, 2019). Er zijn echter aanwijzingen dat de zeespiegel na 2050 versneld gaat stijgen, eind van deze eeuw een hoger niveau bereikt dan het Delta-programma veronderstelt, en daarna nog doorstijgt (Haasnoot et al., 2018).

³ Bij extreme klimaatveranderingen die zich eerder over eeuwen dan over decennia voltrekken kan dit anders liggen, bijvoorbeeld als er dan weerfenomenen optreden die we nu in onze contreien nog niet kennen, zoals tropische cyclonen, moessons en dergelijke.

⁴ <https://klimaataadaptatienederland.nl/overheden/deltaplan-ra/>

Deze deelvraag beantwoorden we door te verkennen wat het effect is op het mobiliteitssysteem van een zeespiegelstijging van +2 tot +4 m in de komende 100 tot 200 jaar. Bij zo'n zeespiegelstijging gaat het erom strategieën te bedenken en uit te voeren die ervoor moeten zorgen dat Nederland niet 'ongecontroleerd' overstroomt. Deltares heeft 4 van dergelijke strategieën beschreven in de publicatie 'Strategieën voor adaptatie aan hoge en versnelde zeespiegelstijging' (Haasnoot et al., 2019): 'beschermen-open', 'beschermen-gesloten', 'meebewegen' en 'zeewaarts'. Deze 4 strategieën beschrijven in grote lijnen de oplossingsruimte voor de Nederlandse delta. Ook Wageningen University & Research (WUR) heeft een toekomstbeeld gemaakt voor de Nederlandse delta; dit is te omschrijven als een combinatie van 'zeewaarts', 'meebewegen' en 'beschermen', al naar gelang de locatie in het land, zoals kust of rivierengebied (WUR, 2019); zie bijlage H.

Meerwaarde van deze studie

Rijkswaterstaat en ProRail voeren klimaatstresstesten uit op respectievelijk de hoofdwegen, de hoofdvaarwegen en het spoor. De klimaatgevoeligheid van de netwerken brengen zij daarmee gedetailleerd in kaart. Wat is dan de meerwaarde van de voorliggende studie?

- **Integraal netwerkperspectief:** Een eerste meerwaarde van deze studie is dat het KiM alle infrastructuur-netwerken tegelijkertijd meeneemt in de analyse van de klimaatgevoeligheid. Daarbij richten we ons op een hoger abstractieniveau dan de stresstesten van Rijkswaterstaat en ProRail. We doen dit op landelijk niveau, maar brengen ook regionale verschillen in kaart. Hiermee worden ook de mogelijke infrastructuuropgaven op landelijk niveau zichtbaar en vergelijkbaar gemaakt.
- **Integraal systeemperspectief:** Een tweede meerwaarde is dat we, naast de gevolgen voor de fysieke infrastructuur, ook effecten verkennen op het gebruik van de infrastructuur, op activiteiten en op activiteitenlocaties, inclusief modalshifteffecten. De ons bekende studies doordenken niet de afhankelijkheden en complexiteit op een dergelijk integraal systeemniveau.
- **Verschillende tijdsperspectieven:** Een laatste belangrijke meerwaarde is dat we niet alleen kijken naar de invloed van het klimaat in de komende decennia, maar ook de gevolgen verkennen die een grote zeespiegelstijging op langere termijn heeft voor het mobiliteitssysteem.

Het integrale netwerk- en systeemperspectief kan klimaatgerelateerde beleidsdiscussies op landelijk en projectoverstijgend niveau faciliteren. Ter inspiratie en startpunt van dergelijke discussies formuleren we op verschillende relevante onderwerpen enkele discussievragen voor het beleid.

1.3 Afbakeningen en definities

We hanteren in dit onderzoek de onderstaande afbakeningen en definities. De klimaatgerelateerde begrippen en definities komen aan bod in hoofdstuk 2.

Het mobiliteitssysteem

We zien het mobiliteitssysteem als een systeem dat bestaat uit de volgende onderdelen:

- De fysieke infrastructuur (wegen, spoor, vaarwegen, havens);
- Het gebruik van de fysieke infrastructuur door mensen en bedrijven met verschillende vervoerwijzen (tijdstop, route, keuze van vervoermiddel en dergelijke);
- De activiteitenlocaties en de ruimtelijke spreiding ervan;
- De activiteiten die mensen en bedrijven op die ruimtelijk verspreide locaties ondernemen, zoals wonen, werken, winkelen, produceren, recreëren. Om deel te kunnen nemen aan die activiteiten moeten ze er naartoe reizen.

De hoofdinfrastructuur en integraliteit staan centraal

Voor het eerste onderdeel van het mobiliteitssysteem richten we ons vooral op de hoofdinfrastructuur: hoofdwegen (in beheer van Rijkswaterstaat), spoorlijnen (ProRail), de hoofdvaarwegen (Rijkswaterstaat), en zeehavens van nationaal belang. Voor luchthavens maken we onderscheid naar de hoogteligging van de verschillende Nederlandse vliegvelden, maar we richten ons vooral op Schiphol als belangrijke internationale luchthaven. We analyseren de verschillende hoofdinfrastructuren en modaliteiten in hun onderlinge samenhang. Een voorbeeld van een integrale benadering is dat we onderzoeken of lage toekomstige rivierwaterstanden op termijn tot een modal shift kunnen leiden van het water naar de weg en het spoor. Een ander voorbeeld is dat reizigers mogelijk vaker gebruik maken van de auto wanneer de trein uitvalt door een storm.

Klimaatadaptatie/-aanpassing en geen klimaatmitigatie

Klimaatadaptatie is het proces waarbij de samenleving zich aanpast aan het actuele of verwachte klimaat en de effecten daarvan, om de schade die gepaard kan gaan met een veranderend klimaat te beperken en de kansen die de klimaatverandering biedt te benutten (PBL, 2013). We onderscheiden verschillende typen aanpassingen, met name:

- Aanpassingen aan de fysieke infrastructuur, bijvoorbeeld ander asfalt;
- Andere mobiliteitskeuzes van mensen en bedrijven, bijvoorbeeld andere routes, tijdstippen of vervoersmodaliteiten;
- Een verandering van het gebruik van bestaande activiteitenlocaties door mensen en bedrijven, zoals het gebruik van (andere) werklocaties en andere winkelpatronen. De ruimtelijke inrichting van een gebied verandert hierdoor niet;
- Het verplaatsen van activiteiten naar nieuwe, nog niet bestaande activiteitenlocaties, zoals een nieuwe woonwijk, een nieuw industrieterrein of een nieuwe haven. Hierdoor verandert ook de ruimtelijke inrichting van het gebied en de activiteiten die er plaatsvinden.

In dit rapport gebruiken we de woorden ‘aanpassing’ en ‘adaptatie’ als synoniemen. Naast adaptatiemaatregelen zijn er ook maatregelen die beogen de verandering van het klimaat te stoppen of te beperken, door de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, bijvoorbeeld met auto's die minder CO₂ uitstoten. Deze maatregelen, ook wel mitigatiemaatregelen genoemd, vallen buiten de reikwijdte van deze studie. Dergelijke mitigatiemaatregelen kunnen ervoor zorgen dat de temperatuur in 2050 minder is gestegen dan waar in worstcase-klimaatscenario's van wordt uitgegaan.

Focus op directe effecten op het mobiliteitssysteem

We richten ons op de manier waarop het klimaat het mobiliteitssysteem direct treft, en niet op de indirecte effecten van klimaatverandering op andere markten. We kijken dus wel naar hoe de binnenvaartsector omgaat met lage rivierwaterstanden, maar niet naar het effect daarvan op de markt voor producten of arbeid. Ook externe kosten (bijvoorbeeld milieu- of verkeersveiligheidseffecten van een modal shift) vallen buiten de reikwijdte van dit onderzoek.

Periode tot 2050 en daarna

De deelvragen 1 (infrastructuur) en 2 (gebruik van infrastructuur en activiteiten) hebben, zoals beschreven in paragraaf 1.2, beide 2050 als richtpunt. Deelvraag 3 ('focus op zeespiegelstijging') richt zich op de verdere toekomst (100-200 jaar of zelfs nog verder vooruit). Daardoor zit er een 'tijdgat' van ten minste 50 tot 100 jaar tussen de deelvragen. In hoeverre de (onzekere) inzichten voor 2050 in deze studie relevant zijn voor de periode na 2050, hangt onder andere af van de onzekerheden over hoe het klimaat zich na 2050 verder ontwikkelt en van andere externe ontwikkelingen die het mobiliteitssysteem beïnvloeden (zie ook paragraaf 3.3). Op basis van de huidige inzichten en kennis is het niet goed mogelijk deelvragen 1 en 2 te beantwoorden in de context van de periode na 2050.

Disruptieve technologische ontwikkelingen en het mobiliteitssysteem

In de periode tot 2050 (deelvraag 1 en 2) en na 2050 (deelvraag 3) kunnen zich disruptieve technologische ontwikkelingen voordoen die de kwetsbaarheid van het huidige mobiliteitssysteem voor een veranderend klimaat beïnvloeden. Als we ons in 2050 bijvoorbeeld allemaal door de lucht zouden verplaatsen, dan kan het minder relevant zijn om te kijken naar de klimaatgevoeligheid van de huidige wegen en spoorlijnen.

Wij gaan er in dit rapport, in lijn met de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO) van de planbureaus (CPB & PBL, 2015), vanuit dat de infrastructuur (weg, spoor, vaarweg) in 2050 nog steeds intensief worden gebruikt. Dit betekent dat het relevant is om naar het effect te kijken van klimaat(verandering) op de weg, spoor en vaarweg. Daarbij kan wel meer gebruik worden gemaakt van deelsystemen, van autonoom vervoer en van andere (voertuig)innovaties (zie ook paragraaf 3.2).

Evacuatie bij overstromen/rampen buiten beschouwing

Een flinke bui komt relatief vaak voor, maar heeft meestal een klein gevolg, zoals een tijdelijk lagere rijnsnelheid. Daarnaast zijn er gebeurtenissen met grotere gevolgen, zoals langdurige droogte die de bevaarbaarheid van vaarwegen verslechtert. En als overtreffende trap kan zich een ramp voordoen. Een ramp is over het algemeen een onverwachte gebeurtenis; de kans daarop is klein, terwijl de gevolgen die met de ramp gepaard gaan, zeer groot zijn. Op het gebied van klimaat gaat het vooral om overstromingen. Het advies bij overstromingen is in principe ‘Ga Omhoog en Blijf Droog’ (RWS, 2016), dus om in het bedreigde gebied een veilige hoge plaats op te zoeken. Wanneer een overstroming voorspelbaar is, is evacuatie een belangrijke preventieve maatregel. Bij het uitvoeren hiervan is het mobiliteits-systeem onmisbaar. Voorbeelden van adaptatiemaatregelen bij overstromingen zijn ‘reversed laning’⁵ op wegen, maatregelen om het spoor in niet-getroffen regio’s operationeel te houden⁶ en het afsluiten van dijkdoorsnijdende tunnels door zogenoemde kanteldijken. In het rapport ‘Evacueren, als het tóch gebeurt’ gaat Rijkswaterstaat (RWS, 2016) uitgebreid in op de mogelijke inzet van de hoofdinfrastructuur voor, tijdens en na een overstroming. In onze studie laten we dit onderwerp daarom verder buiten beschouwing.

⁵ Het middels verkeersmanagement omkeren van de rijrichting (bijvoorbeeld beide rijbanen in dezelfde richting) waardoor er meer wegcapaciteit is om te evacueren.

⁶ RWS (2016) noemt hierbij het ‘4-kwadranten model’ als voorbeeld. Dit wordt tijdens Koningsdag rondom Amsterdam gehanteerd.

1.4 Onderzoeksstappen en leeswijzer

Tabel 1.1 geeft een overzicht van de verschillende stappen in dit onderzoek, beschrijft de aanpak en verwijst naar de hoofdstukken waar we de verschillende stappen uitwerken.

Stap	Toelichting	Onderzoeksaanpak	Hoofdstuk
Stap 1	Context: verkenning klimaatverandering	Literatuuronderzoek naar klimaateffecten die van belang zijn voor het mobiliteitssysteem en de verwachte ontwikkeling in de tijd.	2
Stap 2	Conceptueel denkkader met effecten op het mobiliteits-systeem en mogelijke aanpassingsmaatregelen	Het conceptueel denkkader is geïnspireerd op de zogenoemde ‘transport-land use feedback cycle’ en brengt de verschillende elementen van het mobiliteitssysteem met elkaar in verband, conceptualiseert hoe het klimaat ingrijpt op het mobiliteitssysteem en maakt onderscheid tussen effecten en aanpassingsmaatregelen.	3
Stap 3	Gevoeligheid van hoofd-infrastructuurnetwerken voor negatieve effecten Deelvraag 1	Op basis van informatie uit onder meer uitgevoerde en lopende klimaatstresstesten, heeft Deltares in opdracht van het KiM en ten behoeve van de IMA de belangrijkste klimaatgevoeligheden in kaart gebracht voor netwerken in Nederland.	4
Stap 4	Invloed van het veranderend klimaat op het gebruik van de infrastructuur, op activiteiten en activiteitenlocaties Deelvraag 2	Op basis van literatuur en eigen expertise.	5
Stap 5	Aanpassing aan zeespiegelstijging en de gevolgen voor het mobiliteitssysteem Deelvraag 3	We verkennen de effecten die 4 door Haasnoot et al. (2019) ontwikkelde strategieën voor adaptatie aan grote zeespiegelstijging zouden kunnen hebben op het mobiliteitssysteem.	6

2 Klimaatverandering

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we de verwachte veranderingen in het klimaat die het mobiliteits-systeem kunnen beïnvloeden. In paragraaf 2.2 bespreken we de belangrijkste begrippen. Paragraaf 2.3 gaat over verschillende indicatoren van de klimaatverandering, zoals opwarming en optredende veranderingen in bijvoorbeeld neerslag en windrichting. Hiervoor gebruiken we het WH-scenario (sterke temperatuurstijging (warm), hoge waarde verandering luchtstromen) van het KNMI als basis (KNMI, 2015).

2.2 Belangrijke klimaatgerelateerde begrippen in deze studie

- **Klimaat:** Het weer over een periode van 30 jaar, met indicatoren zoals temperatuur, neerslag, verdamping, wind(richting), bewolking en zonnestraling, zowel gemiddelde waarden als extremen.
- **Klimaatteffect:** Deze term is gereserveerd voor directe klimaatgebeurtenissen, zoals neerslag en temperatuur. Klimaatteffect is een neutraal, feitelijk begrip.
- **Klimaatthema:** We onderscheiden 5 klimaatthema's: droogte, wateroverlast, hitte en overstromen, storm & onweer. De eerste 4 zijn overgenomen uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA). Storm & onweer is geen DPRA-klimaatthema, maar hebben we toegevoegd omdat met name de spoorinfrastructuur hiervan sterke negatieve effecten ondervindt. Het gaat bij de klimaatthema's vooral om (door mensen) ongewenste klimaatteffecten. Zo is 'wateroverlast' een subjectief begrip. Het zijn beleidsthema's.
- **Negatief effect op de infrastructuur:** Een gebeurtenis met een negatief effect op (de functionaliteit van) de infrastructuur, zoals het optreden van bermbranden, plasvorming op de weg en het afschuiven van een spoor- of wegtalud. Deze negatieve effecten houden verband met de 5 klimaatthema's. Zo hangt 'bermbranden' samen met het klimaatthema 'droogte' terwijl plasvorming op de weg en afschuiven van een talud samenhangen met het thema 'wateroverlast'. 'Verband houden met' is niet hetzelfde als 'veroorzaakt worden door'. De samenhang met een klimaatthema betekent wel dat een klimaatteffect, zoals hevige neerslag, een trigger kan zijn voor het optreden van het negatieve effect.
- **Klimaatgevoeligheid:** Deze term gebruiken we alleen in samenhang met de infrastructuur. Het gaat om gevoeligheid van infrastructuurnetwerken voor een negatief effect op de infrastructuur (zoals verzakking of plasvorming). De gevoeligheid wordt bepaald door kenmerken van de infrastructuur en de omgeving en verandert in principe niet bij klimaatverandering (binnen zekere grenzen).
- **Kans dat een negatief effect op de infrastructuur optreedt:** Door klimaatverandering verandert wel de kans dat de infrastructuur daadwerkelijk een negatief effect ondervindt. Bijvoorbeeld doordat de kans op hevige buien toeneemt, neemt ook de kans op afschuiving van een weg- of spoortalud op de hiervoor gevoelige plekken van de infrastructuur toe.
- **Risico van een negatief effect op de infrastructuur:** Het risico definiëren we als de kans dat het negatieve effect op de infrastructuur optreedt maal de gevolgen van het negatieve effect. Twee belangrijke typen gevolgen zijn: herstelkosten voor de beheerder als een netwerk beschadigd is geraakt en kosten voor de gebruikers als een netwerk gestremd raakt of minder goed functioneert.

- *Negatief effect op het gebruik van de infrastructuur:* Hiermee bedoelen we effecten die vanuit het oogpunt van de gebruiker van de infrastructuur ongewenst zijn, zoals het uitstellen van een reis of een langere reistijd of routekeuze die afwijkt van de oorspronkelijke keuze.
- *Negatief effect op activiteiten(locaties):* Hiermee bedoelen we effecten die negatief zijn voor de activiteiten die mensen en bedrijven willen doen en de locaties die ze hiervoor willen kiezen, bijvoorbeeld het uit- of afstellen van activiteiten en beperkingen in de locaties waar activiteiten kunnen plaatsvinden.

2.3 Verwachte klimaatveranderingen in scenario WH tot 2050

Worstcase-klimaatverandering

Het KNMI heeft 4 klimaatscenario's ontwikkeld, GH, GL, WH en WL; samen beschrijven deze scenario's de hoekpunten van het mogelijke klimaat in 2036-2065 (KNMI, 2015). De scenario's verschillen in de mate van wereldwijde temperatuurstijging (G voor een gematigde stijging en W, warm, voor een grotere stijging) en in verandering van luchtstromingspatroon (L voor een lage invloed van deze verandering en H voor een hoge invloed hiervan). In de H-scenario's waait het 's winters vaker uit het westen, wat een zachter en natter weertype oplevert, en 's zomers hebben hogedrukgebieden een grotere invloed op het weer, met als gevolg meer oostenwinden, en daardoor warmer en droger weer (zie ook bijlage A).

We gaan in dit rapport uit van het WH-scenario, dat van de 4 scenario's de grootste verandering in temperatuur en luchtstromingspatroon heeft. In WH is de gemiddelde jaartemperatuur in De Bilt 2,3°C hoger en het gemiddeld hoogste neerslagtekort in het groeiseizoen 30% groter dan in de periode 1981-2010. We richten ons daarmee op een worstcasesituatie om de invloed van een veranderend klimaat op het mobiliteitssysteem te onderzoeken. Die worstcasesituatie is gebaseerd op de huidige inzichten over klimaatverandering. In 2023⁷ komt het KNMI met nieuwe scenario's, die de KNMI'14-scenario's gaan vervangen.

⁷ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/knmi-klimaatscenario-s>

Overzicht van klimaatveranderingen tot 2050

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de belangrijkste klimaatveranderingen in het WH-scenario tot 2050, geordend naar de 4 klimaatthema's die worden onderscheiden in het DPRA, aangevuld met storm & onweer. Een uitgebreidere beschrijving van en uitleg over klimaatverandering staat in bijlage A.

Klimaatthema	Hoofdpunten klimaatverandering	
Wateroverlast	Neerslag	De totale neerslag neemt toe (+5%), maar niet in gelijke mate over het jaar. Neerslag in de winter neemt toe (+17%), neerslag in de zomer neemt af (-13%). Extreme buien, zoals een bui van 10 minuten waarin 30 mm neerslag of een bui van 1 uur waarin 70 mm neerslag valt, komen vaker voor (ca 2 keer vaker in 2050 dan in 2020).
Droogte	Neerslagtekort	Het gemiddeld hoogste neerslagtekort gedurende het groeiseizoen neemt 30% toe. De trend naar meer droogte speelt vooral in het zuiden en oosten (het binnenland, "hoog Nederland"), terwijl in het westen en noorden, dus het wijde kustgebied ("laag Nederland"), geen trend naar meer droogte is.
	Laagwater in rivieren	De laagwaterafvoer in de nazomer in de Rijn bij Lobith neemt af (-20%) ten opzichte van 1981-2010. De waterstand is relatief stabiel omdat het Rijnstroomgebied heel groot is, met veel demping door onder andere de grote meren. Voor de Maas, die een veel variabelere afvoerregime kent met zeer lage afvoeren in de (na)zomer, wordt verwacht dat die lage afvoeren in het droogste scenario in 2050 wel met 45% afnemen. Erosie in het rivierbed neemt toe bij droogte.
Hitte	Temperatuur	De gemiddelde temperatuur in De Bilt neemt 2,3°C toe. De opwarming is groot voor de koudste winterdagen en de warmste zomerdagen, maar relatief klein voor zachte winterdagen en koele zomerdagen. Het aantal ijsdagen per winter neemt af van 7 in het huidige klimaat tot minder dan 1 in 2050. Het aantal zomerse dagen (temperatuur >25°C) neemt met 70% toe.
Overstromen	Hoogwater in rivieren	Het afvoerregime van de Rijn en de Maas door het jaar heen wordt grilliger. De winterafvoeren nemen toe. De kans op extreem hoge afvoeren van de Rijn neemt naar verwachting sterk toe. Afvoerpieken in de Rijn tussen 14.000 en 15.000 m³/s zullen in 2050 ongeveer drie keer zo vaak optreden als nu. In de Maas wordt het verschil tussen winter- en zomerafvoeren veel groter dan nu.
	Zeespiegelstijging	De zeespiegel voor de Nederlandse kust blijft stijgen. Het tempo daarvan neemt toe, van 2,0 mm/j in 1981-2010 naar 3 à 8 mm/j in 2036-2065. Het uiteindelijke tempo hangt sterk af van de wereldwijde temperatuurstijging. Als rekening wordt gehouden met een mogelijk versnelde zeespiegelstijging vanwege gebeurtenissen op Antarctica, dan zou de zeespiegel voor de Nederlandse kust in 2050 met maximaal 50 cm kunnen stijgen ten opzichte van 1995, afhankelijk van het gevolgde scenario voor broeikasgasuitstoot. Een hogere zeespiegel leidt in de kustgebieden tot meer opdruk van zout kwelwater (grondwater).
Storm & onweer	Of stormen in Nederland door klimaatverandering vaker gaan voorkomen en ook zwaarder worden, is onduidelijk. Het wind- en stormklimaat vertoont grote natuurlijke variaties. Een aantal klimaatscenario's duidt erop dat westenwinden vaker voorkomen, maar de verwachte veranderingen in windsnelheid zijn in alle scenario's, dus ook WH, klein. Nederland krijgt in de toekomst vaker te maken met hevige hagelbuien en onweer. Het aantal bliksemslagen neemt in WH in 2050 toe met ongeveer 20-30%.	

Tabel 2.1 Belangrijkste klimaatveranderingen in KNMI'14-scenario WH en WHdry in 2050 (2036-2065), in vergelijking tot 1981-2020.

3 Conceptueel denkkader: klimaat en het mobiliteitssysteem

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we het conceptueel denkkader voor deze studie. Het denkkader is gebaseerd op de transport-land use feedback cycle (paragraaf 3.2). In paragraaf 3.3 passen we dit denkkader toe op de relaties tussen het klimaat en het mobiliteitssysteem. De waarde van het denkkader is dat het inzichtelijk maakt hoe (een veranderend) klimaat ingrijpt op de verschillende elementen van het mobiliteitssysteem: infrastructuur, gebruik van infrastructuur, activiteiten en landgebruik. Daarnaast laat het kader zien hoe die elementen elkaar onderling beïnvloeden en welke typen klimaatadaptatiemaatregelen er zijn. In de hoofdstukken 4, 5 en 6 diepen we de relaties tussen klimaat en de verschillende elementen uit dit denkkader praktisch uit.

3.2 Transport-land use feedback cycle

Het conceptueel denkkader is gebaseerd op de zogenoemde ‘transport-land use feedback cycle’ (Wegener & Fürst, 1999; Bertolini, 2009) (zie figuur 3.1). Het gebruik en de inrichting van het land bepalen waar mensen hun activiteiten uitvoeren: waar ze wonen, werken, recreëren, enzovoort (Bertolini, 2009). Het vervoerssysteem, oftewel de infrastructuur, maakt het mogelijk daadwerkelijk deel te nemen aan (ruimtelijk verspreide) activiteiten. Veranderingen in het vervoerssysteem maken bepaalde activiteitenlocaties meer of juist minder aantrekkelijk, wat kan leiden tot verandering in de ruimtelijke inrichting en het landgebruik. En zo begint de cyclus opnieuw.

De termijn waarop de onderdelen van de cyclus elkaar beïnvloeden, verschilt (zie de pijlen in figuur 3.1):

- Een verandering in het vervoerssysteem beïnvloedt de bereikbaarheid direct.
- Een verandering in de bereikbaarheid beïnvloedt de manier waarop mensen en bedrijven activiteiten ondernemen, relatief snel. Voorbeelden van activiteiten zijn wonen, werken, winkelen, recreëren. Deze activiteiten bevinden zich op plekken die ruimtelijk zijn verspreid. Om deel te kunnen nemen aan die activiteiten moeten ze er naartoe kunnen reizen.
- Een verandering in de bereikbaarheid kan op langere termijn (jaren) tot veranderingen in de ruimtelijke inrichting (‘grondgebruik’) leiden. Een concreet voorbeeld is het bouwen van een nieuwe woonwijk.
- Een verandering in de activiteiten(patronen) kan uiteindelijk leiden tot aanpassingen aan het vervoerssysteem, zoals het aanleggen van een nieuwe metrolijn in een druk stedelijk gebied. Dergelijke aanpassingen duren, van de eerste plannen tot realisatie, meestal jaren.



Figuur 3.1 Transport-land use feedback cycle. Bron: Bertolini (2009).

De cyclus is niet gesloten. Ook andere factoren hebben invloed op de ontwikkeling van de afzonderlijke componenten (Bertolini, 2009), zoals:

- **Grondgebruik:** Ruimtelijke ontwikkelingen zijn bijvoorbeeld ook afhankelijk van de beschikbaarheid van grond, omgevingskenmerken, ruimtelijk beleid of de economische dynamiek in een regio.
- **Activiteiten:** Individuele kenmerken van huishoudens en bedrijven, en kenmerken van de bredere sociaaleconomische context spelen een grote rol bij het ontstaan en veranderen van activiteitenpatronen, die groter is dan de rol van ruimtelijke factoren (zie ook Van Wee, 2013).
- **Vervoerssysteem:** De ontwikkeling van vervoerssystemen wordt niet alleen bepaald door de vraag naar verplaatsingen, maar ook door ontwikkelingen aan de aanbodzijde, zoals technologische innovatie of beleid.

3.3 Klimaat en het mobiliteitssysteem

We gebruiken de ‘transport-land use feedback cycle’ als kader en inspiratie om de relaties tussen het klimaat en het mobiliteitssysteem te doorgronden. We snijden het denkkader daarbij toe op de vraagstelling van dit rapport. Onze belangrijkste aanpassingen in en toevoegingen aan de oorspronkelijke ‘transport-land use feedback cycle’ zijn:

- Bijstelling van de 4 centrale elementen van de cyclus;
- Toevoeging van het klimaat als factor die inwerkt op de 4 elementen en onderscheid naar (negatieve) effecten die samenhangen met het klimaat en de aanpassingen hieraan;
- Toevoeging van actoren aan het model;
- Toevoeging van de termijn waarop aanpassingen plaatsvinden;
- Beschrijving van externe ontwikkelingen (buiten het klimaat) die het mobiliteitssysteem beïnvloeden.

Vier centrale elementen en het mobiliteitssysteem

Ten opzichte van de ‘transport-land use feedback cycle’ vervangen we de aanduiding ‘vervoerssysteem (netwerken)’ door de term ‘infrastructuur’ (zie figuur 3.2). Daaronder scharen we zowel de lijninfrastructuur, zoals wegen, spoor, vaarwegen, als de knooppuntinfrastructuur, zoals lucht- en zeehavens. Het gaat hier om de fysieke infrastructuur, het asfalt, de spoorrails, enzovoort.

Naast deze fysieke infrastructuur onderscheiden we het ‘gebruik van de infrastructuur’ door reizigers en vervoerders als apart element in de cyclus. Deze term vervangt de term ‘bereikbaarheid’, oftewel nabijheid, in het oorspronkelijke model van Bertolini (2009). Bereikbaarheid richt zich vooral op de potentie om activiteiten en bestemmingen te bereiken via vervoerwijzen, terwijl wij ons hier richten op het gebruik van de infrastructuur en de mobiliteitskeuzes die hiermee samenhangen, zoals routekeuze en keuze van vervoersmodaliteiten. Voorbeelden van vervoerders zijn NS, een binnenvaartondernemer en een wegvervoerder.

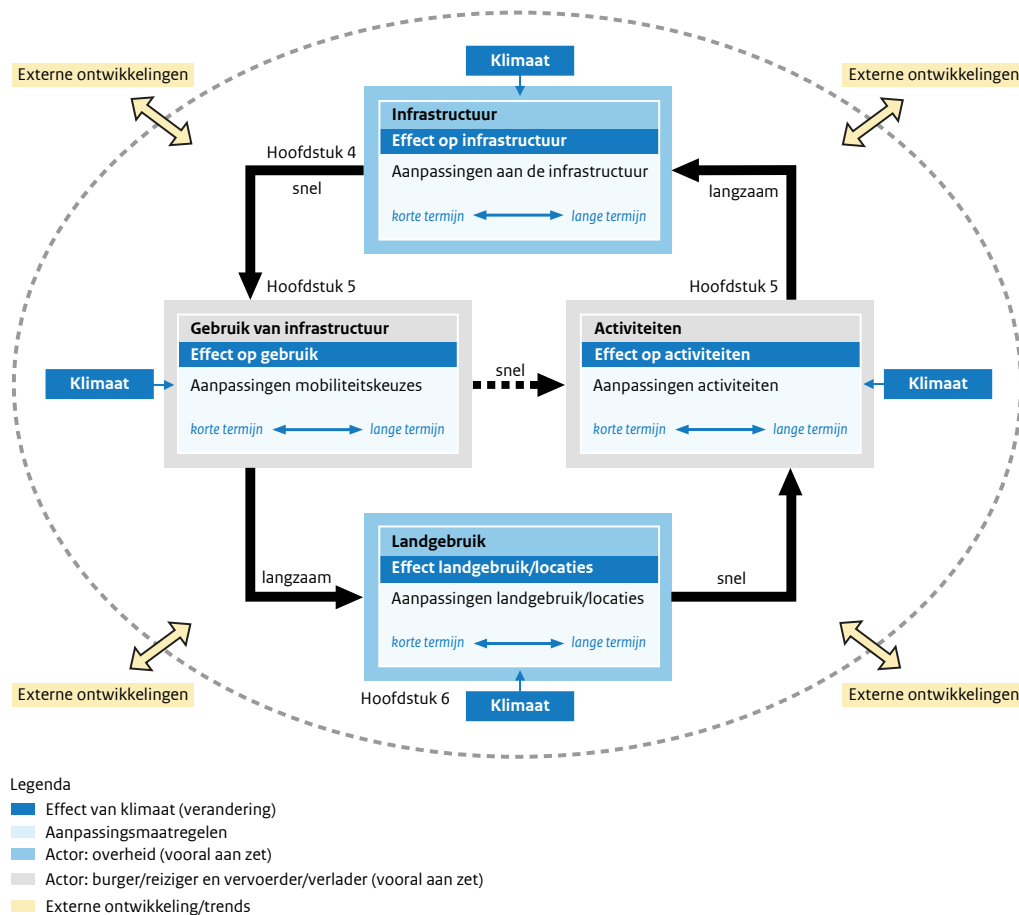
De term ‘grondgebruik’ uit het model van Bertolini vervangen wij door ‘landgebruik’, omdat dit beter past bij de ruimtelijke inrichting van het land; grondgebruik heeft de bijklank van ondergrond of bodem. Met dit ‘landgebruik’ bedoelen we de ruimtelijke spreiding van fysieke activiteitenlocaties zoals de lokalisatie van woonwijken, bedrijventerreinen en winkels.

De term ‘activiteiten’ uit het model van Bertolini blijft gehandhaafd. Hieronder verstaan we naast de activiteiten zelf ook het gebruik van de activiteitenlocaties.

Het mobiliteitssysteem in dit rapport bestaat uit de volgende 4 onderdelen:

- De fysieke infrastructuur (wegen, spoor, vaarwegen, havens);
 - Het gebruik van de infrastructuur inclusief de mobiliteitskeuzes;
 - De activiteitenlocaties en de ruimtelijke spreiding ervan (‘landgebruik’);
 - De activiteiten die mensen en bedrijven op de ruimtelijk verspreide locaties ondernemen, zoals wonen, werken, winkelen, produceren, recreëren (‘activiteiten’).
- Om deel te kunnen nemen aan die activiteiten moeten ze er naartoe reizen.

Hoewel de fysieke infrastructuurnetwerken ook onderdeel zijn van de ruimtelijke inrichting, en dus van het landgebruik, behandelen we 'infrastructuur', in lijn met de 'transport-land use feedback cycle', als een apart element in ons conceptueel denkkader.



Figuur 3.2 Inwerking van het klimaat op de aangepaste transport-land use feedback cycle.

Invloed van het klimaat op de cyclus en onderscheid tussen effecten en aanpassing

Het klimaat is een factor van buiten die invloed heeft op de 4 elementen in onze cyclus. Bij 'invloed' maken we onderscheid tussen:

- (Negatieve) effecten op de 4 elementen van het mobiliteitssysteem (donkerblauw gearceerd);
- Mogelijke aanpassingen als gevolg van of ter voorkoming van deze negatieve effecten (lichtblauw gearceerd).

We maken dit onderscheid bij alle 4 de elementen van de cyclus.

Het verschil tussen beide typen invloed, negatieve effecten en mogelijke aanpassingen verduidelijken we in tabel 3.1. Daarbij gaan we uit van een concreet negatief effect op de infrastructuur, namelijk erosie en afschuiving van een wegtalud door afstromend regenwater in een extreme bui. De tabel moet van boven naar beneden worden gelezen. Behalve dat hij het verschil tussen een negatief effect en een mogelijke aanpassing duidelijk maakt, laat de tabel zien hoe dit negatieve effect op de infrastructuur doorwerkt naar de andere 3 onderdelen van het mobiliteitssysteem. Door klimaatverandering kunnen extreme buien vaker gaan voorkomen (zie paragraaf 2.3, tabel 2.1).

Element in mobiliteits-systeem	Negatief effect	Aanpassing	Voornaamste actor
Infrastructuur (weg, spoor, vaarwegen)	Fysieke schade aan of verminderde functionaliteit van infrastructuur	Een aanpassing van de infrastructuur waarmee schade wordt hersteld of voorkomen.	Netwerkbeheerder, zoals Rijkswaterstaat en ProRail
Voorbeeld	Erosie en afschuiving van een wegtalud door afstromend regenwater in een extreme bui	• Het herstellen van de schade • Het preventief verstevigen taluds: maaieregime aanpassen, waterafvoer verbeteren, aanpassen grond naar minder schraal (zandig) mengsel • Het bieden van informatie over route-alternatieven (verkeersmanagement); • Een tijdelijk lagere maximumsnelheid op het getroffen segment	
Gebruik van infrastructuur	Afname van het gebruik van de getroffen infrastructuur met mogelijk langere reistijd tot gevolg	Aanpassing in gedrag (bijvoorbeeld andere mobiliteitskeuzes)	Reiziger/burger, vervoerder/verlader
Voorbeeld	Door de afschuiving van het wegtalud kan tijdelijk niet meer over het getroffen wegsegment worden gereden	• Het kiezen van een andere route • Omleidingsroute	
Activiteiten	Minder of geen mogelijkheid om activiteiten uit te voeren in een bepaald gebied	Aanpassing in gedrag (bijvoorbeeld andere activiteiten)	Reiziger/burger, vervoerder/verlader
Voorbeeld	De werklocatie is minder makkelijk te bereiken door de verminderde beschikbaarheid van de weg	Tijdelijk (vaker) thuiswerken totdat de weg weer hersteld is	
Landgebruik (ruimtelijke inrichting)	Waarschijnlijk geen effect op het fysieke landgebruik vanwege het tijdelijke en het sterk lokale karakter van de meeste negatieve effecten van klimaat op de infrastructuur	Zeer waarschijnlijk geen verandering van de ruimtelijke spreiding van activiteitenlocaties	Overheid (verschillende schaalniveaus), maar bijvoorbeeld ook woningbouwcoöperaties, natuurbeheerders en marktpartijen
Voorbeeld	-	-	-

Tabel 3.1 Voorbeelden om het verschil tussen negatieve effecten en mogelijke aanpassingen te verduidelijken per element van het mobiliteitssysteem. Het startpunt is een negatief effect op de fysieke infrastructuur.

Invloed van het klimaat: niet alleen via de infrastructuur

Behalve dat het klimaat via de infrastructuur doorwerkt op de rest van het mobiliteitssysteem, zoals tabel 3.1 illustreerde aan de hand van de afschuiving van een wegtalud, kan het klimaat ook rechtstreeks de 3 andere elementen – gebruik van de infrastructuur, activiteiten en landgebruik – beïnvloeden. In figuur 3.2 is dit aangeduid met de blokjes ‘klimaat’ die aangrijpen op elk van de 4 elementen van de cyclus.

Zo kan een storm ervoor zorgen dat windgevoelige vrachtwagens en caravans minder snel de weg opgaan. Hier is een rechtstreekse invloed op het ‘gebruik van de infrastructuur’ waarneembaar, terwijl de ‘infrastructuur’ zelf niet wordt beïnvloed. Een ander voorbeeld is het uitstellen van een activiteit, zoals recreëren in de natuur, vanwege het weer. Deze keuze heeft niet direct te maken met de conditie van de weg, of het gebruik ervan, maar ligt rechtstreeks op het vlak van de ‘activiteiten’. Tot slot is een overstroming een voorbeeld van een rechtstreekse invloed van het klimaat op het landgebruik; deze verloopt dus niet via een ander element van de cyclus. Door een overstroming komen gebieden onder water te staan, waardoor activiteiten in die gebieden tijdelijk niet kunnen plaatsvinden.

Aanpassingen per element in de cyclus

Aanpassingen (als gevolg van of ter voorkoming van negatieve effecten) kunnen plaatsvinden bij alle 4 elementen van de cyclus. Zo kan herstel van infrastructuur plaatsvinden nadat deze is beschadigd, maar ook kunnen er preventieve maatregelen worden getroffen om de infrastructuur minder kwetsbaar te maken voor de negatieve effecten van klimaat. Bij aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur kan gedacht worden aan andere mobiliteitskeuzes, zoals het veranderen van routes of het aanpassen van het tijdstip van reizen om zo de negatieve effecten veroorzaakt door het klimaat te vermijden. Ook kunnen burgers en bedrijven hun activiteiten (patronen) aanpassen. Zo kan een treinforens bijvoorbeeld besluiten om vaker thuis te werken als het spoor er vanwege onderhouds- of herstelwerkzaamheden tijdelijk uitligt. Een ander voorbeeld is het inkopen doen bij een andere bouwmarkt omdat de gebruikelijke bouwmarkt minder goed bereikbaar is vanwege een wegafsluiting. Door dergelijke aanpassingen verandert het gebruik van bestaande activiteitenlocaties, maar het landgebruik verandert hierdoor niet. Leidt de zeespiegelstijging er op de lange termijn toe dat nieuwe woonwijken worden aangelegd in hoger gelegen gebieden, dan verandert het landgebruik wel. En als gevolg hiervan veranderen de activiteiten (patronen).

Naast aanpassen kan ‘nietsdoen’ een keuze zijn. In dat geval ‘accepteert’ iemand de ontstane situatie. Zo kan een infrastructuurbeheerder besluiten schade aan de weg, zoals kleine scheuren door verzakking als gevolg van droogte, niet (meteen) te herstellen. De functionaliteit van de infrastructuur wordt hierdoor mogelijk beperkt, bijvoorbeeld omdat op de beschadigde weg tijdelijk een lagere maximumsnelheid geldt. De gebruiker van de infrastructuur ondervindt door deze verminderde functionaliteit een langere reistijd of kiest eventueel een andere route. De scheidslijn tussen ‘infrastructuur’ en ‘gebruik van de infrastructuur’ is hierbij lastig te trekken.

Op het terrein van ‘gebruik van de infrastructuur’ komt ‘nietsdoen’ vaak neer op het accepteren van een langere reistijd tussen herkomst en bestemming. Dit gebeurt waarschijnlijk alleen als het de gebruiker ontbreekt aan goede mogelijkheden om zich aan te passen, zoals het kiezen van een andere route. Bijvoorbeeld een automobilist die wacht voor een brug op de Afsluitdijk die door de hitte niet meer sluit, omdat omrijden te ver is. Vaak zullen mensen en bedrijven hun gedrag echter aanpassen, en bijvoorbeeld een andere route kiezen om de defecte brug te vermijden.

De keuzevrijheid bij het maken van aanpassingen varieert. Soms is deze groot. Een defecte brug over een rivier bijvoorbeeld is vaak makkelijk te ontwijken door een andere route of een andere vervoerwijze (bijvoorbeeld trein in plaats van auto) te kiezen. Maar er zijn ook voorbeelden waar de keuzevrijheid juist beperkt is of in het geheel niet bestaat. Een concreet voorbeeld betreft het herstel van beschadigde infrastructuur. Het is in de praktijk vaak geen reële optie om een defecte brug of een kapotte spoorbovenleiding niet te repareren. Daarnaast bestaan er door regelgeving afgedwongen aanpassingen, die de keuzevrijheid beperken. Zo kan de netwerkbeheerder een lagere snelheidslimiet voorstellen bij plaatsvorming op de weg, waardoor de weggebruiker een lagere snelheidslimiet krijgt 'opgelegd'.

Actoren en het mobiliteitssysteem

In het mobiliteitssysteem zijn veel verschillende actoren actief, zoals infrastructuurbeheerders, reizigers, verladers of logistiek dienstverleners, vervoerders, producenten, consumenten en overheden. De aanpassingen die deze actoren kunnen doen als een met het klimaat samenhangend negatief effect optreedt, verschilt per rol. Sommige actoren zijn onderling afhankelijk. Zo is een treinreiziger afhankelijk van de vervoerder (NS), die op zijn beurt weer afhankelijk is van de netwerkbeheerder die het spoor beheert (ProRail). Actoren kunnen ook meerdere 'functies' in de verkeers- en vervoerketen vervullen: een producent kan een verlader zijn en een consument is ook reiziger. Bij aanpassingen aan de 'fysieke infrastructuur' zijn vooral netwerkbeheerders zoals Rijkswaterstaat (wegen en vaarwegen) en ProRail (spoorwegen) aan zet. En wanneer het gaat om het plannen van nieuwe infrastructuur, dan komt het ministerie van IenW als actor naar voren.

Bij aanpassingen op het vlak van 'gebruik van de infrastructuur' en bij 'activiteiten' spelen de burger/reiziger en de vervoerder een belangrijke rol. Zij bepalen hoe ze van A naar B reizen en welke activiteiten ze ondernemen. Op het niveau van landgebruik zijn het overheden die een prominente rol innemen. Zij bepalen de ruimtelijke inrichting en geven de kaders mee waarbinnen ontwikkelingen kunnen plaatsvinden. Voorbeelden van andere relevante publieke en private partijen die betrokken zijn bij de ruimtelijke inrichting, zijn woningbouwcoöperaties, natuurbeheerders en marktpartijen, zoals projectontwikkelaars en aannemers.

Termijn van aanpassingen binnen de 4 centrale elementen

In paragraaf 3.2 beschreven we dat de termijn waarop de elementen van de cyclus (infrastructuur, gebruik, activiteiten, landgebruik) elkaar onderling beïnvloeden, verschilt. Daarnaast kunnen ook binnen de elementen verschillende termijnen aan de orde zijn. We doelen met name op de termijn waarop binnen zo'n element een aanpassing (aan een negatief effect) kan plaatsvinden.

Een aantal voorbeelden zijn:

- **Aanpassing op korte termijn.** Een voorbeeld hiervan voor 'infrastructuur' is het direct herstellen van schade door klimaatgerelateerde gebeurtenissen. Daarnaast kunnen veel aanpassingen in het verplaatsingsgedrag, zoals het uitstellen van een reis of omrijden, op korte termijn plaatsvinden. Dit geldt ook voor het aanpassen van bestaande voer- en vaartuigen (bijvoorbeeld een kortere trein inzetten). Het tijdelijk aanpassen van bepaalde activiteiten valt hier eveneens onder. Denk aan het thuiswerken of het niet naar het pretpark gaan op een stormachtige dag.
- **Aanpassing op middellange termijn.** Een beslissing om van een ander netwerk gebruik ('infrastructuurgebruik') te maken is een kortetermijnaanpassing. Een meer permanente modal shift naar een ander netwerk is een aanpassing die op de middellange termijn kan plaatsvinden, wanneer de condities in het eerdere netwerk definitief zijn verslechterd.
- **Aanpassing op lange termijn.** Het ophogen van bruggen vanwege hogere rivierafvoeren of zeespiegelstijging is een voorbeeld van een aanpassing aan de 'infrastructuur' op de lange termijn. Dit komt enerzijds doordat de zeespiegelstijging traag verloopt, waardoor een hogere brug pas op een wat langere termijn nodig is. Anderzijds neemt een infrastructuuraanpassing (van verkenning tot realisatie) zelf ook jaren in beslag. Het veranderen van activiteitenlocaties ('activiteiten en landgebruik'), zoals het verplaatsen van bedrijfsactiviteiten, is een ander voorbeeld van een aanpassing op de lange termijn. De periode van besluit, zoeken naar een locatie, bouwen en verhuizen duurt vaak jaren.

Veel aanpassingen in het mobiliteitssysteem zijn in eerste instantie tijdelijk (en niet structureel), zoals een andere routekeuze bij een niet-sluitende brug. Als klimaat(verandering) een structurele toename van (extreme) weerscondities inhoudt, kunnen actoren ervoor kiezen hun gedrag langdurig of structureel aan te passen. Zo zouden frequentere en langere periodes met lage rivierwaterstanden tot een permanente gedeeltelijke modal shift van binnenvaart naar weg en spoor kunnen leiden.

Externe ontwikkelingen die het mobiliteitssysteem beïnvloeden

De 'transport-land use feedback cycle' is geen gesloten systeem. We hebben in de voorgaande paragrafen het klimaat als factor van buiten toegevoegd. Naast het klimaat zijn er ook vele andere externe ontwikkelingen die op de cyclus kunnen ingrijpen, zoals externe ruimtelijke ontwikkelingen, sociaal-demografische en economische ontwikkelingen, en technologische ontwikkelingen in het mobiliteitsstelsel (zie paragraaf 3.2). Op de tijdhorizon die dit onderzoek bestrijkt (hoofdstukken 4 en 5: het jaar 2050; hoofdstuk 6: 100 à 200 jaar in de toekomst), kan op deze factoren veel veranderen.

Om ruimtelijke, sociaaleconomische en mobiliteitsontwikkelingen in te schatten, gebruiken we de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO) van de planbureaus (CPB & PBL, 2015). De WLO onderscheidt 2 scenario's (Hoog en Laag) op de termijn van 2030 en 2050. De WLO-scenario's zijn omgeven met veel onzekerheid. We richten ons hier vooral op externe trends en ontwikkelingen die invloed kunnen hebben op de relatie tussen klimaat(verandering) en het mobiliteitssysteem. Deze trends kunnen op hun beurt ook worden beïnvloed door een veranderend klimaat (zie de wederzijdse relaties van en naar de externe schil in figuur 3.2).

Ruimtelijke en sociaaleconomische ontwikkelingen en invloed op het mobiliteitssysteem

In Nederland wonen ruim 17,5 miljoen mensen. Tot 2030 blijft de bevolking volgens de WLO-prognoses doorgroeien. Na 2030 is verdere groei onzeker; migratie maakt daarbij het verschil. In 2050 wonen in scenario Hoog naar verwachting 19,2 miljoen mensen in Nederland. In scenario Laag krimpt de bevolking na 2030. Volgens dat scenario heeft Nederland in 2050 minder inwoners dan nu, namelijk 16,4 miljoen. De WLO verkent ook waar binnen Nederland het aantal inwoners zal groeien en met hoeveel. De prognose is dat de bevolking in de steden blijft groeien en dat het verschil tussen de Randstad en krimpgebieden toeneemt. In scenario Hoog groeit de bevolking in de Randstad anderhalf keer zo snel als de gehele Nederlandse bevolking. Scenario Laag gaat ervan uit dat de trek naar de stad in de toekomst afzwakt.

De verwachting in de WLO is dat de personenmobiliteit per auto en trein tot 2050 in beide scenario's blijft groeien. Dit komt doordat de bevolking groeit, de welvaart toeneemt, investeringen in het vervoersstelsel plaatsvinden en auto's zuiniger worden. Ook het internationale goederenvervoer neemt naar verwachting toe, terwijl het binnenlandse goederenvervoer waarschijnlijk minder snel groeit en mogelijk zelfs licht krimpt. Vervoer over de weg blijft de grootste categorie binnen het goederenvervoer en dit neemt verder toe, maar ook het spoorvervoer groeit sterk. De binnenvaart verliest juist marktaandeel. Ook vervoer via de lucht groeit flink; dankzij de wereldwijde groei van bevolking en economie stijgt de vraag snel.

De belangrijkste gevolgen die de geschetste ontwikkelingen hebben in relatie tot de onderzochte (negatieve) effecten van klimaat op het mobiliteitssysteem zijn voor dit rapport:

- De verwachtingen voor de WLO geven voor 2050 geen aanwijzingen dat transportnetwerken (veel) minder gebruikt gaan worden. Integendeel; de verwachting is dat de mobiliteit, en dus het gebruik van de netwerken, gaat toenemen. Maar dit is uiteraard onzeker. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de impact van de COVID-19-pandemie op de mobiliteit. Deze heeft grote effecten de korte termijn, maar wat de effecten op middellange en lange termijn zijn, is nog zeer onzeker (Knoope & Francke, 2020; Hamersma et al., 2020). We gaan er in deze studie, in lijn met de bestaande WLO, echter vanuit dat in 2050 de infrastructuur (weg, spoor, vaarwegen) nog steeds intensief worden gebruikt.

- De ‘trek’ naar de Randstad zorgt ervoor dat waarschijnlijk meer mensen dan nu in 2050 in gebieden onder de zeespiegel wonen. In hoofdstuk 6 verkennen we hoe een mogelijke grote zeespiegelstijging van +2 tot +4 m in de komende 100 tot 200 jaar het mobiliteitssysteem kan beïnvloeden. Hoe de bevolking zich in die periode gaat ontwikkelen, is onbekend. Als ook na 2050 de bevolking in de Randstad toeneemt, dan neemt het effect van een overstroming toe: meer mensen worden getroffen. En de kans op zo’n overstroming stijgt door klimaatverandering.

Technologische ontwikkelingen in het mobiliteitssysteem

Het mobiliteitssysteem innoveert. Denk hierbij aan ontwikkelingen zoals autonoom vervoer op land en door de lucht, vraaggestuurd en gedeeld vervoer (Mobility-as-a-Service) en digitalisering (Tillema et al., 2020). Als het gebruik van gedeeld vervoer toeneemt, kan dit leiden tot minder voertuigen en files op de weg. Tegelijkertijd is onzeker hoe en in welke mate het gebruik van deelvervoer gaat groeien. Ook ontwikkelingen op het vlak van autonoom vervoer zijn onzeker. De verwachting is dat er rond 2050 autonome voertuigen zijn die in bepaalde situaties (bijvoorbeeld op snelwegen) taken van de bestuurder kunnen overnemen, maar dat nog zeker niet alle voertuigen over deze autonome opties beschikken. In de publicatie ‘Paden naar een zelfrijdende toekomst’ (Tillema et al., 2017) houdt het KiM een grote marge aan: ergens tussen 2025 en 2045 zouden met enige regelmaat niveau 4-autonome voertuigen op wegen buiten de bebouwde te zien moeten zijn. Daarbij is de veronderstelling dat deze voertuigen op alle snelwegen (en eventueel andere wegen buiten de bebouwde kom) onder alle condities (dag en nacht en bij verschillende weersomstandigheden) autonoom kunnen rijden. De belangrijkste gevolgen van deze geschetste ontwikkelingen in relatie tot dit rapport zijn:

- We gaan ervan uit dat in 2050 de infrastructuur (weg, spoor, vaarweg) nog steeds intensief worden gebruikt. Dit betekent dat het relevant is om naar het effect te kijken van klimaat(verandering) op de weg, het spoor en de vaarweg (hoofdstuk 4).
- Autonome en bestuurderondersteunende systemen kunnen de bestuurder helpen zich veiliger te verplaatsen, bijvoorbeeld bij regenachtige condities. Nog steeds gelden de fysieke wetten. Zo is het niet mogelijk over een ondergelopen weg te rijden. De negatieve klimaateffecten en de adaptatiemaatregelen die we in hoofdstuk 4 (infrastructuur) en hoofdstuk 5 (gebruik infrastructuur) beschrijven, blijven daardoor relevant, ook als autonome systemen de komende decennia een vlucht gaan nemen.
- De digitalisering kan tot een hogere klimaatgevoeligheid leiden. Denk hierbij aan kortsluiting door wateroverlast. We nemen dit effect in hoofdstuk 4 mee bij het bepalen van de klimaatgevoeligheid van de netwerken.

We richten ons niet op klimaatmitigatie (zie de afbakening in paragraaf 1.3).

Technologische ontwikkelingen kunnen wel zorgen voor een schoner wagenpark, bijvoorbeeld door meer en betere elektrische voertuigen. Deze ontwikkelingen kunnen samen met strenger klimaatbeleid zorgen voor minder CO₂-uitstoot dan waar in het KNMI WH-scenario, uitgangspunt van dit rapport, vanuit is gegaan (zie paragraaf 2.3).

4 Klimaatgevoeligheid van bestaande infrastructuurnetwerken

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk laten we de ruimtelijke spreiding zien van de klimaatgevoeligheid van de bestaande infrastructuurnetwerken in Nederland. We richten ons dus op de relatie tussen klimaat en infrastructuur uit het conceptueel denkkader van hoofdstuk 3 (figuur 3.2).

Deltares heeft die relatie in opdracht van het KIM op een landelijke kaart zichtbaar gemaakt voor 3 netwerken: hoofdwegen, hoofdvaarwegen en hoofdspoorwegen (zie ook Bles et al., 2021). Voor hoofdwegen zijn aanvullend gedetailleerdere kaarten per MIRT-regio (Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport) gemaakt. Deze zijn te vinden in bijlage C. De kaarten zijn gebaseerd op de zogenoemde klimaatstresstesten voor het hoofdwegennet (HWN), het hoofdvaarwegennet (HVWN) en het spoornet (voor wegen en vaarwegen door Deltares; voor spoorwegen door ProRail). Klimaatstresstesten zijn een stap in de uitvoering van de afspraken uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA)⁸ en hebben tot doel gevoeligheden voor negatieve effecten die samenhangen met het klimaat, in beeld te brengen (IenW, 2020). De inzichten in dit hoofdstuk zijn gebruikt voor de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA). De IMA-2021 is de opvolger van de Nationale Markt- en Capaciteitsanalyse (NMCA).

In paragraaf 4.2 beschrijven we met methode we de klimaatgevoeligheidskaarten hebben gemaakt. Paragraaf 4.3 toont de gevoeligheidskaart voor het hoofdwegennet, paragraaf 4.4 gaat over het vaarwegennet en het spoornet komt in paragraaf 4.5 aan bod. In paragraaf 4.6 brengen we mogelijke adaptatiemaatregelen voor de 3 netwerken in kaart. Paragraaf 4.7 richt zich vervolgens op de gevoeligheid van en adaptatiemaatregelen voor knooppunten, zoals zeehavens en luchthavens. Enkele conclusies trekken we in paragraaf 4.8. Daar formuleren we ook 5 discussievragen, als inspiratie voor beleidsmakers die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat en infrastructuur(netwerken).

⁸ <https://klimaatadaptatienederland.nl/overheden/deltaplan-ra/>

4.2 Methode voor gevoeligheidskaarten lijninfrastructuur

In deze paragraaf beschrijven we de gevolgde methode om tot de gevoeligheidskaarten te komen. We beginnen met de selectie van de negatieve effecten op de infrastructuur waarvoor de gevoeligheid in kaart wordt gebracht. Daarna gaan we in verschillende subparagrafen dieper in op het thema klimaatgevoeligheid en de keuzes die zijn gemaakt om de interpretatie van de kaarten te vereenvoudigen.

Selectie negatieve effecten op de infrastructuur

In de stresstesten zijn veel negatieve effecten op de infrastructuur geanalyseerd. Om de kaarten voor de IMA overzichtelijk te houden hebben we ervoor gekozen alleen de negatieve effecten met de grootste ingeschatte risico's in het jaar 2050 te selecteren (zie tabel 4.1). Risico is gedefinieerd als de kans dat een negatief effect op de infrastructuur voorkomt, vermenigvuldigd met de gevolgen ervan als het zich daadwerkelijk voordoet. Bij wegen en spoorwegen is, in lijn met de stresstesten van Rijkswaterstaat, voor deze kans van voorkomen uitgegaan van het worstcase-klimaatscenario WH⁹ en bij vaarwegen van het scenario WHdry¹⁰ (Bles et al., 2021). Deze selectie op basis van risico heeft Deltares gemaakt aan de hand van stresstesten van Rijkswaterstaat en ProRail en hun eigen (niet-gepubliceerd) onderzoek over risico's. Vervolgens is de selectie een-op-een getest bij experts van Rijkswaterstaat en ProRail en geverifieerd in een toetsingssessie met experts van Deltares, Rijkswaterstaat, ProRail en het KiM. Deze experts kregen daarbij de volgende vraag voorgelegd: hebben we zo inderdaad de gevoeligheden in beeld die de grootste risico's opleveren? De gevoeligheid zelf is onafhankelijk van het klimaatscenario.

Op deze wijze zijn voor hoofdwegen, hoofdvaarwegen en spoorwegen respectievelijk 7, 5 en ruim 20¹¹ negatieve effecten geselecteerd die mogelijk kunnen optreden. Ze zijn in tabel 4.1 gerubriceerd naar de 4 klimaatthema's uit het DPRA – droogte, wateroverlast, hitte en overstromen –, aangevuld met 'storm & onweer' omdat in het bijzonder het spoorwegennet hier gevoelig voor is.

Het aantal van ruim 20 negatieve effecten voor spoorwegen dat ProRail op basis van risico's heeft geselecteerd, is te groot om overzichtelijk in kaart te kunnen brengen. Omdat een nadere selectie in dit stadium onmogelijk bleek, zijn de ruim 20 negatieve effecten in overleg met ProRail gebundeld tot de 4 DPRA-klimaatthema's, aangevuld met 'storm & onweer'. De klimaatgevoeligheden worden bij spoorwegen dus niet per afzonderlijk negatief effect, maar per klimaatthema (droogte, wateroverlast, enzovoort) in kaart gebracht.

Bijlage B (voorbeeld 1) bevat een relatieve orde van grootte van de 7 grootste risico's voor het hoofdwegennet, zoals bepaald door Deltares (Bles et al., 2021).

⁹ WH is een scenario van het KNMI (KNMI, 2015). KNMI heeft 4 klimaatscenario's ontwikkeld: GL, GH, WL en WH (KNMI, 2015). De scenario's verschillen in de mate van wereldwijde temperatuurstijging (G voor een gematigde stijging en W, warm, voor een grotere stijging) en in verandering van luchtstromingspatroon (L voor een lage invloed van deze verandering en H voor een hoge invloed hiervan). In de G-scenario's is de temperatuur in 2050 wereldwijd 1°C en in de W-scenario's 2°C hoger dan in 1981-2010. In de H-scenario's waait het 's winters vaker uit het westen, wat een zachter en natter weertype oplevert, en 's zomers hebben hogedrukgebieden een grotere invloed op het weer, met als gevolg meer oostenwinden, die warmer en droger weer met zich meebrengen.

¹⁰ Het scenario WHdry is een vijfde scenario, als variant op het WH-scenario van KNMI. Het heeft als toevoeging ten opzichte van WH dat er in de zomer grootschalige droogte op het Europees continent is. WHdry wordt beschreven in Klijn et al. (2015), een rapport van Deltares en KNMI. Bij lage rivierstanden speelt grootschalige droogte, dat wil zeggen droogte in een gebied dat veel groter is dan alleen Nederland, een belangrijke rol.

¹¹ Initieel ging het om ruim 30 mogelijke negatieve effecten.

Klimaatthema		Negatieve effecten op de infrastructuur		
		Hoofdwegen	Hoofdvaarwegen	Spoorwegen
Wateroverlast	Extreme neerslag (buien)	Plasvorming op de weg	Onvoldoende doorvaarthoogte bij bruggen door hoge rivierafvoeren	Onder water staan van spoor, stations-tunnels, spoortunnels en overwegen; wateroverlast in stations-gebied; wateroverlast technische installaties
		Erosie en afschuiving van wegtalud door afstromend regenwater in extreme bui		Erosie en afschuiving van spoortalud door afstromend regenwater in extreme bui
	Stijging grondwaterstand (inclusief zoute kwel door zeespiegelstijging)	Opdrijven van tunnels, verdiepte liggingen, aquaducten en lichtgewichtconstructies		Opdrijven van onderdoorgangen
Overstromen		Overstromen weg als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren)	Onderlopen van kades waardoor aanleggen van schepen wordt beïnvloed	Overstromen spoor als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren); extreme schade; uitval energievoorziening
Hitte		Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen door uitzetting	Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen door uitzetting	Storingen in installaties, niet kunnen sluiten beweegbare spoorbruggen door uitzetting, stroomtekort door airco in treinen
Droogte		Ongelijke zakking door bodemdaling	Onvoldoende vaardiepte door lage rivierafvoeren	Ongelijke zakking door bodemdaling; verminderde baanstabieleit
		Bos- en bermbranden	Onvoldoende vaardiepte door erosie rivierbodem	Bos- en bermbranden
			Onvoldoende waterbeschikbaarheid bij sluizen	
Storm & onweer				Bomen op spoor; trajecten hebben last van storm (beperking treindienst); spoorelektronica gevoelig voor bliksem

Tabel 4.1 Geselecteerde mogelijke negatieve effecten per netwerk, gekoppeld aan de 4 klimaatthema's uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) en 'storm & bliksem'.

Klimaatgevoeligheid huidige netwerken

De gevoeligheden worden weergegeven voor de *huidige netwerken*. Toekomstige aanpassingen aan of uitbreidingen van de netwerken zijn dus niet onderzocht, omdat noch de ligging noch de inrichting en andere kenmerken – die bepalend zijn voor de klimaatgevoeligheden – hiervan bekend zijn.

Wegen en spoor: De kaarten voor wegen en spoorwegen tonen de gevoeligheid van infrastructuurnetwerken voor de geselecteerde negatieve effecten. Deze gevoeligheid is het gevolg van de kenmerken van de infrastructuur en de omgeving, zoals ondergrond, hoogteligging, aanwezigheid van hemelwaterafvoer, type berm en dergelijke. In bijlage D is de samenhang tussen de kenmerken van de infrastructuur en de omgeving met de gevoeligheden nader uitgewerkt.

Hoewel de kans op een negatief effect en mogelijk ook de impact ervan kunnen toenemen door klimaatverandering, geldt dit in principe niet voor de klimaatgevoeligheid. De infrastructuur en haar omgeving blijven hetzelfde. Met andere woorden, wanneer het in een toekomstig klimaat, bijvoorbeeld in 2050 of 2080, vaker hevig regent, vergroot dit de kans dat zoiets als afschuiving van een talud zich voordoet op de hiervoor gevoelige locaties, maar er komen in principe geen extra gevoelige locaties bij.¹²

In de stresstest voor het hoofdwegennet (Bles et al., 2020) is aangenomen en onderbouwd dat klimaatverandering niet tot nieuwe gevoelige locaties leidt. Voor het spoorwegennet geldt hetzelfde. Met andere woorden, de gevoeligheidskaarten voor de hoofdwegen en spoorwegen laten de gevoelige locaties zien voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat.¹³

De spoor- en wegennetwerken zijn opgedeeld in segmenten. Voor ieder segment is de mate van klimaatgevoeligheid geanalyseerd. Bij wegen lopen de segmenten in principe van knooppunt tot knooppunt op het hoofdwegennet, behalve als deze afstand langer is dan circa 40 km: dan is dit segment opgedeeld in kortere segmenten van vergelijkbare lengte.¹⁴ Bij spoorwegen zijn segmenten gedefinieerd van grote stad naar grote stad of tussen belangrijke stations (bijvoorbeeld Utrecht-Amersfoort is 1 segment).

Er is onderscheid gemaakt in lijn- en puntgevoeligheden. Bij lijngevoeligheid gaat het om de fractie van het totale segment dat gevoelig is, terwijl gevoelige bruggen of tunnels een voorbeeld zijn van puntgevoeligheid.

Vaarwegen: In de stresstest voor vaarwegen heeft Deltares gekozen voor een andere benadering om klimaatgevoeligheid uit te drukken. Hier is het gemiddeld aantal dagen per jaar dat een locatie (inclusief puntlocaties zoals sluizen en bruggen) in het vaar netwerk gevoelig is voor een bepaald negatief effect, als indicator gebruikt. Deze getoonde gevoeligheid is daardoor wel gekoppeld aan een specifiek jaartal en klimaatscenario. Voor ‘onvoldoende vaardiepte’ en ‘onvoldoende waterbeschikbaarheid bij sluizen’ gaat het om het aantal dagen per jaar dat deze kunnen voorkomen in 2050. ‘Onvoldoende doorvaart-hoogte bij bruggen’ is gebaseerd op een zeespiegelstijging van 1 m in 2085 (zie Bles et al., 2021).

¹² De aanname dat er geen nieuwe gevoelige locaties bijkomen door klimaatverandering, is gedaan in de verschillende stresstesten. Deze aanname geldt wel binnen zekere grenzen van klimaatverandering. Bij extreme klimaatveranderingen die zich eerder over eeuwen dan over decennia voltrekken kan dit anders liggen, omdat er dan weerfenomenen kunnen optreden die we nu in onze contreien nog niet kennen.

¹³ Alleen voor ‘opdrijven van tunnels’ is de gevoeligheid hiervoor specifiek in kaart gebracht voor het jaar 2050.

¹⁴ Voor de regionale kaarten (zie bijlage C) is met kortere wegsegmenten gewerkt om gevoeligheden in meer detail te kunnen weergeven.

Alle netwerken: drempelwaarden voor klimaatgevoeligheid

Om de kaarten inzichtelijk te houden en te voorkomen dat alle wegen, spoor- en vaarwegen over de totale lengte als gevoelig worden aangemerkt, zijn alleen segmenten weergegeven waarvan de gevoeligheid een 'drempelwaarde' overschrijdt. Deze drempelwaarde verschilt per type negatief effect en per klimaatthema (dit laatste specifiek voor het spoor). De drempelwaarden zijn in een eerste fase op iteratieve wijze door experts van Deltares zodanig vastgesteld dat de meest gevoelige netwerksegmenten op basis van gegevens uit gedetailleerde stresstesten op de kaarten zichtbaar worden. Voor vaarwegen zijn de geldende normen en uitgangspunten uit het project KBN-HVWN¹⁵ van Rijkswaterstaat als drempelwaarden gehanteerd. De werkwijze van Deltares is gevalideerd via expert judgement van een brede groep van experts van ProRail, Rijkswaterstaat en het KiM. De drempelwaarden per negatief effect op de infrastructuur (bij wegen en vaarwegen) en per klimaatthema (bij spoor) worden nader toegelicht in Bles et al. (2021).

4.3 Gevoeligheid van het hoofdwegennet in beeld

Figuur 4.1 geeft de gevoeligheid van het huidige hoofdwegennet voor negatieve effecten op de infrastructuur. Als een weg(segment) gevoelig is voor meerdere effecten, dan is dit weergegeven door parallelle lijnen van verschillende kleur. Voor de overzichtelijkheid zijn rijstroken en rijbanen in beide richtingen samengenomen. De kaart is gebaseerd op gegevens uit de stresstest voor het hoofdwegennet (Bles et al., 2020). De kans dat de verschillende negatieve effecten optreden en hun impact in dat geval, zijn weergegeven in het kader linksboven in de kaart (zie figuur 4.1).

Voor welke negatieve effecten zijn de gevoeligheden in kaart gebracht?

Tabel 4.2 geeft de 7 negatieve effecten op het hoofdwegennet weer, waarvan volgens Deltares de risico's het grootst zijn. Bijlage B (voorbeeld 1) geeft de relatieve omvang van deze risico's weer op basis van (maatschappelijke) herstel- en stremmingskosten (Bles et al., 2021). De negatieve effecten zijn gegroepeerd naar de 4 klimaatthema's uit het DPRA: wateroverlast, overstromen, hitte en droogte. Wateroverlast heeft 2 mogelijke verschijningsvormen – buien en stijging van de grondwaterstand – die elk hun eigen bedreiging hebben: buien kunnen leiden tot plasvorming op de weg, erosie en het afschuiven van wegtaluds; een hoge grondwaterstand kan zorgen voor het opdrijven van tunnels en andere kunstwerken.

¹⁵ KBN-HVWN staat voor Klimaatbestendige Netwerken, onderdeel van het hoofdvaarwegennet (HVWN).

Klimaatthema	Negatieve effecten op de infrastructuur	
Wateroverlast	Extreme neerslag (buien)	Plasvorming op de weg
		Erosie en afschuiving van het wegtalud door afstromend regenwater in een extreme bui
	Stijging grondwaterstand (inclusief zoute kwel door zeespiegelstijging)	Opdrijven van tunnels, verdiepte liggingen, aquaducten en lichtgewichtconstructies
Overstromen		Overstromen van de weg als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren)
Hitte		Niet kunnen sluiten van beweegbare bruggen door uitzetting
Droogte		Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling door droogte
		Bos- en bermbranden

Tabel 4.2 Klimaatthema's uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) en daarmee samenhangende negatieve effecten voor het hoofdwegennet.

- *Plasvorming*. Plassen op de weg treden op als de afstromingscapaciteit van het wegdek de regenval niet kan verwerken, bijvoorbeeld als gevolg van een geringe dwarshelling ('verkanting') en relatieve laagtes (spoorvorming en 'kuilen'). Ze ontstaan in hevige buien met een buiduur van ongeveer 10 minuten. Dit zijn buien met een grote intensiteit en een relatief korte duur (Bles et al., 2020); het type buien waarin bijvoorbeeld ook aquaplaning kan voorkomen. Daarnaast kunnen er *plassen* ontstaan aan de kant van de weg, vaak als eerste op de vluchtstrook, waarna ze zich uitbreiden. Mogelijke oorzaken zijn een verhoogde berm net naast de weg of 'verstopt' zeer open asfaltbeton (ZOAB) op de vluchtstrook. Dergelijke locaties zijn extra gevoelig als water ook nog vanaf de weg naar deze plaats toe stroomt. Dit soort plassen treedt in de regel op bij extreme buien van een iets lagere intensiteit en van iets langere duur dan bovengenoemde 'aquaplaning'-buien. Een andere mogelijke oorzaak van plassen aan de kant van de weg is dat water vanuit de berm de weg op stroomt, bijvoorbeeld door een oplopende berm loodrecht op de rijrichting in combinatie met een beperkte hemelwaterafvoer, of een waterdicht obstakel (geluidscherm) dat afstroming van regenwater naar het omliggende gebied onmogelijk maakt. Omdat deze afstroming van de berm naar de weg vaak pas zal optreden bij grote hoeveelheden water, kunnen we hierbij uitgaan van een buiduur (of deel van een bui met deze kenmerken) in de orde van uren.
- Hevige regen kan zorgen voor *afschuiven van het wegtalud*, dat is het talud waar de weg op ligt. De grond spoelt als het ware weg. Dit gebeurde bijvoorbeeld in juni 2019 op de A10. Zie afbeelding E.2 in bijlage E. De gevoeligheid hiervoor hangt sterk af van de grondsoort waar de weg op ligt: hoe zandiger hoe gevoeliger.
- Een stijging van de grondwaterstand kan leiden tot het *opdrijven van tunnels*: het omhoog komen van de tunnel ten opzichte van de omgeving. Dit zorgt ervoor dat het wegdek buiten de tunnel en het wegdek in de tunnel niet meer goed op elkaar aansluiten. Een voorbeeld van opdrijving is de Vlaketunnel tussen Bergen op Zoom en Vlissingen: in november 2010 kwam het wegdek van de tunnel 15 cm omhoog.¹⁶ De tunnel was door de hiervoor benodigde herstelwerkzaamheden 3 weken volledig afgesloten. Zie afbeelding E.1 in bijlage E Nieuwsberichten.

¹⁶ Dit probleem werd overigens niet veroorzaakt door grondwater, maar door problemen met de verankering.

- *Overstromingen* zorgen ervoor dat wegen onder water lopen. Het gaat om overstromings-scenario's met een kans in de ordegrrootte van eens per 100 jaar. Het gaat met dergelijke scenario's om overstromingen vanuit het regionale systeem en overstromingen van onbeschermde gebieden. De gevoeligheid hiervoor is logischerwijs het grootst in de buurt van watersystemen.
- Bij hitte komt het voor dat *beweegbare bruggen niet meer kunnen sluiten* doordat ze uitzetten. Om dit probleem voor te zijn werden de Merwedebrug en de Brug over de Noord in de zomer van 2020 tijdelijk gesloten om ze in te korten.
- *Ongelijke zakking* treedt op bij droogte (en een lage grondwaterstand) en daaruit volgende bodemdaling (inklinking). De weg verzakt, maar niet overal in dezelfde mate, en dit leidt tot kuilen en scheuren in het asfalt, en daarmee mogelijk tot gevaarlijke verkeerssituaties en tot kostbare reparaties. Met name een talud waaronder veengrond aanwezig is, is gevoelig voor ongelijke zakking (als gevolg van oxidatie van het veen), terwijl een weg op een zandondergrond hier juist ongevoelig voor is.
- Het voorkomen van *bermbranden* hangt samen met droogte, maar is sterk afhankelijk van het type vegetatie naast de weg. Bij een droge, warme zomer vatten bermen langs de weg, maar ook langs treinsporen, snel vlam, bijvoorbeeld doordat de vonken van remmende treinen de droge berm aansteken. Ook afval in de berm of een weggegooid stuk kan een bermbrand veroorzaken.

Wat zien we op de kaart?

De gevoeligheid voor *ongelijke zakking* (door bodemdaling) komt het meest voor in het westen en in het noorden van het land, terwijl het oosten en zuiden van Nederland juist gevoeliger zijn voor '*bermbranden*'. Een verklaring hiervoor is dat in het westen en noorden de bodem vaker slap is, terwijl hoge zandgronden in het oosten en zuiden in de zomer kunnen verdrogen.

De gevoeligheid voor *instabiliteit van het wegtalud* komt het meest voor rondom de grote steden. Deze gevoeligheid is gerelateerd aan (extreme) neerslag. Rondom de grote steden is het aantal kunstwerken het grootst. En omdat de beschikbare ruimte er het kleinste is, zijn er veel steile taluds die een grotere kans op instabiliteit hebben.

Significante *overstromingskansen* (1/100 per jaar) vanuit rivieren en beken komen met name voor in het rivierengebied en rondom de Eems-Dollard in het noorden van het land.

Gevoeligheid voor *plasmvorming* speelt overal op het Nederlandse hoofdwegenet een rol, zij het op de ene plek wat meer (in de kaart is dit weergegeven met een dikke lijn) dan op de andere (dunne lijn). Het is lastig om een eenduidige verklaring te geven waarom wegen op de ene plek gevoeliger zijn voor plasmvorming dan op de andere. Het hangt vooral samen met lokale kenmerken van de weg en de omgeving, zoals het type asfalt, de aanwezigheid van hemelwaterafvoer en het type berm.

Op de kaart staan alle *beweegbare bruggen* van het hoofdwegenet. Beweegbare bruggen kunnen gevoelig zijn voor hoge temperaturen (hite), die maken dat ze niet meer open kunnen. Dit type bruggen bevindt zich met name in het westen en het noorden van het land. Welke bruggen in de praktijk daadwerkelijk gevoelig zijn voor hite, vergt nader onderzoek; ze zijn op de kaart daarom alle gemarkeerd als *potentieel* gevoelig.

Anders dan bij de beweegbare bruggen is de gevoeligheid van *tunnels* al wel in de praktijk onderzocht (Bles et al., 2020). Daarom zijn op de kaart alleen de gevoelige tunnels weergegeven. Deze bevinden zich met name in het zuiden en het westen van het land. Het gaat hierbij vrijwel altijd om tunnels die een waterweg kruisen.



Figuur 4.1 Gevoeligheid van het hoofdwegennet voor 7 negatieve effecten die door het klimaat beïnvloed worden.

Regionale kaarten hoofdwegenet

In bijlage C staan kaarten van het hoofdwegenet per MIRT-regio. Hierop zijn de segmenten korter dan op de landelijke kaart. Ook heeft Deltares in overleg met experts van ProRail, Rijkswaterstaat en het KiM voor lagere drempelwaarden van gevoeligheid gekozen. Hierdoor komen dus meer locaties (segmenten) in beeld en ook locaties in de infrastructuur die maar een kleine gevoeligheid voor het betreffende negatieve effect hebben. De mate van detail is op deze regionale kaarten dus groter dan op de landelijke kaart. Voor een nadere toelichting van de werkwijze zie Bles et al. (2021).

4.4 Gevoeligheid van het hoofdvaarwegenet in beeld

Figuur 4.2 geeft de klimaatgevoeligheden van het huidige hoofdvaarwegenet weer. De kaart is gebaseerd op de nog lopende onderzoeken van het project KBN-HVWN (klimaatbestendige netwerken, onderdeel hoofdvaarwegen) van Rijkswaterstaat.

Voor welke negatieve effecten zijn gevoeligheden in kaart gebracht?

Tabel 4.3 geeft de 5 negatieve effecten voor het hoofdvaarwegenet weer. Ze zijn gegroepeerd naar de klimaatthema's uit het DPRA: droogte, wateroverlast en hitte. De belangrijkste is droogte, of lage rivierafvoeren (droogte is de formele term in het DPRA). Dit effect van droogte wordt nog versterkt door bodemerosie.¹⁷ De doorvaarthoogte bij bruggen wordt beïnvloed door hoge rivierafvoeren en zeespiegelstijging. Hitte kan als gevolg hebben dat beweegbare bruggen niet meer kunnen sluiten.

Klimaatthema		Negatieve effecten op de infrastructuur
Droogte		Onvoldoende vaardiepte door lage rivierafvoeren
		Onvoldoende vaardiepte door erosie
		Onvoldoende waterbeschikbaarheid bij sluizen
Wateroverlast	Extreme neerslag	Onvoldoende doorvaarthoogte bij bruggen door hoge rivierafvoeren
Hitte		Niet kunnen sluiten van beweegbare bruggen

Tabel 4.3 Klimaatthema's uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) en daarmee samenhangende negatieve effecten voor het hoofdvaarwegenet.

¹⁷ Bodemerisatie leidt onder andere tot de volgende effecten: 1) de rivierbodem erodeert en het waterniveau daalt mee, maar de harde delen van de rivierbodem, (zoals vaste lagen) eroderen niet en vormen drempels voor de scheepvaart, 2) door ongelijkmatige erosie verandert de relatieve bodemligging van riviertakken en verandert de afvoerdeling over deze takken.

- **Onvoldoende¹⁸ vaardiepte door lage rivierafvoeren (als gevolg van klimaatverandering):** De vaardiepte in de rivier is afhankelijk van de bodemhoogte (en daardoor van het baggerbeleid) en de rivierafvoer. Door klimaatverandering kunnen lage afvoeren vaker optreden. Daardoor werkt de vaardiepte bij voortzetting van het huidige beleid (en het huidige baggerreferentievlak) vaker limiterend voor de beladingsgraad van de binnenvaart. Bij snelle klimaatverandering (KNMI'14-scenario WHdry 2050; Klijn et al., 2015) is berekend hoeveel dagen van het jaar de vaardiepte onvoldoende is. In de kaart zijn alleen de ondieptes van de Rijntakken (Waal, Nederrijn-Lek en IJssel) opgenomen. Ondieptes op andere riviertakken zijn beargumenteerd buiten beschouwing gelaten:
 - **Maas:** door de aanwezigheid van stuwen is de Maas in principe niet gevoelig voor ondieptes als gevolg van een lage rivierafvoer, omdat het waterpeil door het systeem van stuwen hoog gehouden kan worden.
 - **Rijn-Maasmonding:** Voor de binnenvaart is voldoende diepgang beschikbaar door de opstuwende werking van de zee.
 - **Overige vaarwegen (kanalen):** Binnen het huidige beleid worden waterstand en bodemhoogte van overige vaarwegen door klimaatverandering niet (direct) beïnvloed, waardoor er geen effect is op de diepte. Dit heeft ermee te maken dat kanaalsystemen gereguleerd zijn.
- **Onvoldoende vaardiepte door erosie (bodemontwikkeling):** De bodem van een natuurlijke rivier is continu in ontwikkeling. Deze morfologische respons verloopt langzaam en is nog steeds een reactie op maatregelen van de afgelopen eeuwen. Op basis van historische trends is de verwachte ontwikkeling ingeschat. Met hydraulische modellen is het effect op de afvoerdeling en de vaardiepten in kaart gebracht bij voortzetting van deze verwachte ontwikkeling (de situatie zonder ingrepen). Deze gevoeligheid komt bovenop de gevoeligheid door klimaatverandering.
- **Onvoldoende¹⁹ waterbeschikbaarheid bij sluizen:** In droge periodes kan de hoeveelheid beschikbare afvoerwater in de hoge delen van Nederland (Maas; sluis bij Eefde die Twentekanaal en IJssel verbindt) zo laag zijn dat sommige sluizen minder schuttingsen per dag kunnen uitvoeren dan onder 'normale' omstandigheden. De kaart laat het gemiddeld aantal dagen per jaar zien met beperkende maatregelen, uitgaande van het scenario WHdry 2050. In de lage delen van het land (sluizen Terneuzen, IJmuiden) bestaat vooral een risico op een te hoge zoutindringing.
- **Onvoldoende²⁰ doorvaarthoogte bij bruggen:** Door klimaatverandering wordt de waterstand vaker hoog, enerzijds door hogere rivierafvoeren (scenario WH 2085) en anderzijds door een snelle zeespiegelstijging. De kaart toont het aantal dagen per jaar waarop onvoldoende hoogte beschikbaar is om zonder beperkingen de containervaart uit te kunnen voeren.
- **Niet kunnen sluiten van beweegbare bruggen:** Hitte zorgt voor uitzetting. Wanneer een beweegbare brug te veel uitzet, kan deze niet meer open ('probleem voor scheepvaart') of niet meer sluiten ('probleem voor weg- of spoorverkeer').

Wat zien we op de kaart?

Figuur 4.2 geeft de gevoeligheid weer voor onvoldoende vaardiepte door lage rivierafvoeren en bodemerosie, voor beperkingen in de sluiscapaciteit en voor onvoldoende doorvaarthoogte bij een aantal vaste en beweegbare bruggen. Alle gevoeligheden gelden bij het 'worstcase'-scenario WHdry (zie paragraaf 2.3).

¹⁸ Voor de vaarwegen zijn eisen op het gebied van vaardiepte vastgelegd in internationale verdragen en nationaal beleid. Deze eisen kunnen verschillen per vaarweg.

¹⁹ Bij beperkingen in de waterbeschikbaarheid zijn maatregelen nodig om water te besparen, zoals beperkt schutten of water terugpompen om tegendruk te geven met zoet water.

²⁰ In internationale verdragen en nationaal beleid zijn eisen op het gebied van doorvaarthoogte vastgelegd. Deze eisen kunnen per vaarweg verschillen.

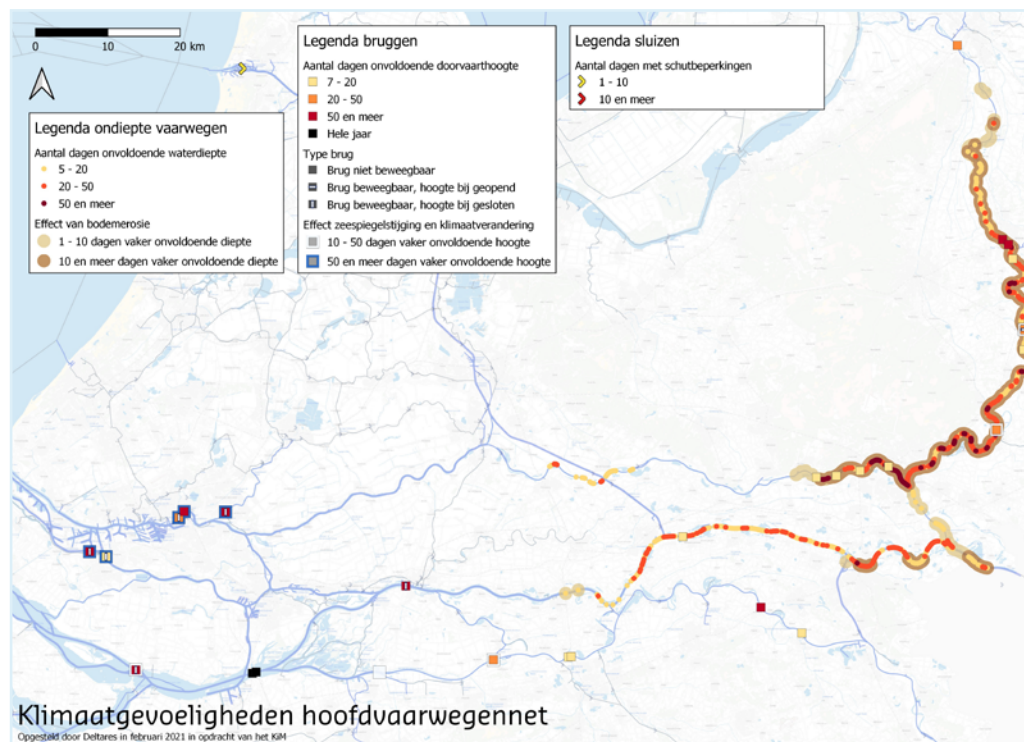
De *Waal* heeft, vooral rond Nijmegen, een grote gevoeligheid voor onvoldoende diepte en bodemerosie. Ook voor de gehele IJssel en het meest bovenstroomse traject van de Nederrijn zijn dergelijke gevoelige locaties voor onvoldoende diepte en bodemerosie te vinden. Op het gevoeligste punt van de *Waal* is er in het doorerekende klimaatscenario onvoldoende vaardiepte op meer dan 50 dagen per jaar.

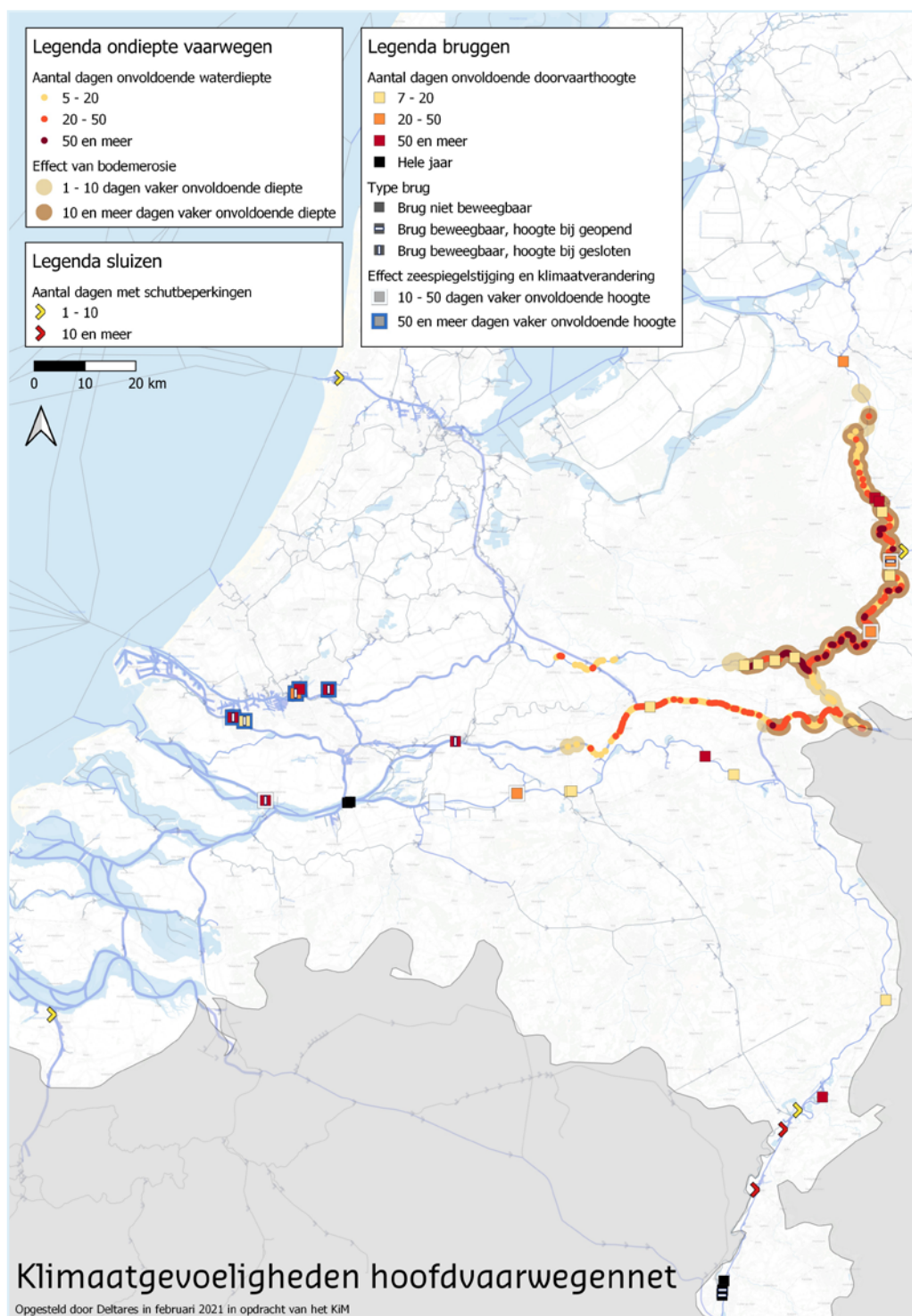
De *Maas* is een regenrivier en krijgt in een droge zomer te maken met zeer lage afvoeren. Door het systeem van stuwen en sluizen kan het waterpeil hoog gehouden worden. Maar om te voorkomen dat het peil zakt, is het bij lage rivierafvoer slechts een beperkt aantal keer per dag mogelijk te schutten; dit leidt tot langere wachttijden voor de scheepvaart. Vooral enkele zuidelijke sluizen (Born, Maasbracht, Heel) zijn hier gevoelig voor (zie figuur 4.2). Bodemprocessen (erosie) spelen bij de *Maas* een minder grote rol dan op de *Waal* en IJssel; dit heeft te maken met het gestuwde karakter van de rivier.

Naast de *Maas* zijn ook enkele andere trajecten gevoelig voor de dreiging van zuiniger schutten. De redenen hiervoor verschillen: bij sommige sluizen is er kans op onvoldoende waterbeschikbaarheid, of is de rivierafvoer te laag (*Maas*, Sluis Eefde), bij andere sluizen kunnen schutbeperkingen nodig zijn om zoutindringing te voorkomen (de zeesluizen bij IJmuiden en Terneuzen en de Stevin- en Lorentzsluizen).

De kaart toont verder een aantal vaste en beweegbare *bruggen* waar bij hoogwater op een aantal dagen per jaar de minimaal benodigde doorvaarthoogte kan worden onderschreden. In die situatie passen niet alle containerschepen onder de brug door. Daarbij is aangegeven of dit berekend is op basis van de geopende of gesloten brug. Immers, niet elke brug kan zomaar zeer regelmatig geopend worden, waardoor openen niet altijd een oplossing is. Deze gevoeligheid treedt vooral op bij de benedenstroomse *Maas* en daar waar de A27 het Amsterdam-Rijnkanaal kruist.

Verder, maar dit staat niet op de kaart, zijn de bruggen bij de Stevin- en Lorentzsluizen van de Afsluitdijk gevoelig voor uitzetting door hitte.





Figuur 4.2 Gevoeligheid hoofdvaarwegennet voor negatieve effecten die door het klimaat beïnvloed worden.

4.5 Gevoeligheid van het hoofdspoorwegennet in beeld

Figuur 4.3 is gebaseerd op de stresstest voor het spoor van ProRail. Deze was op het moment van schrijven van dit rapport (maart 2021) nog niet afgerond, maar enkele onderdelen zijn al in 2020 uitgevoerd. De stresstest richt zich op gevoeligheden voor negatieve effecten die in het jaar 2050 aan de orde kunnen zijn. Het spoornetwerk is opgedeeld in segmenten die in principe van stad naar stad lopen. Alleen segmenten waarvan de gevoeligheid voor de negatieve effecten per klimaatthema²¹ uitkomt boven de op basis van expert judgement gekozen drempelwaarde, zijn in kleur weergegeven. Voor de overzichtelijkheid zijn parallelle sporen samengenomen. Daarnaast zijn puntlocaties weergegeven die gevoelig zijn voor een specifiek negatief effect. De aanpak hiervoor staat in detail beschreven in Bles et al. (2021).

Voor welke negatieve effecten zijn de gevoeligheden in kaart gebracht?

De stresstest van ProRail heeft voor het huidige spoorstelsel circa 30 verschillende gevoeligheden in kaart gebracht, verdeeld over de 4 DPRA-klimaatthema's wateroverlast, droogte, hitte, overstromingen, aangevuld met het vijfde thema 'storm & onweer'. Op basis van risico's (combinatie van grote kans en groot gevolg of kleine kans en zeer groot gevolg) heeft ProRail 20 negatieve effecten geselecteerd. Tabel 4.4 laat deze selectie voor het spoornet zien, gegroepeerd naar wateroverlast, overstromen, hitte en droogte en storm & onweer. Op de kaart zijn de gevoeligheden ruimtelijk weergegeven. Voor een gedetailleerde beschrijving van de methode zie Bles et al. (2021).

Klimaatthema		Negatieve effecten
Wateroverlast	Extreme neerslag (buien)	Onder water staan van het spoor met als gevolg verweking van de spoorbaan; onder water staan stationstunnels; onder water staan spoortunnels; onder water staan overwegen; wateroverlast in stationsgebied; wateroverlast technische installaties
		Erosie en afschuiving van het spoortalud door afstromend regenwater in een extreme bui
	Stijging grondwaterstand (inclusief zoute kwel door zeespiegelstijging)	Opdrijven van onderdoorgangen
Hitte		Storingen technische installaties (o.a. in relaiskasten); uitzetten rails (spoorspattingen) en beweegbare spoorbruggen; extreem gebruik stroom voor airco in treinen
Droogte		Ongelijke zakkings als gevolg van bodemdaling door droogte; verminderde baanstabielheid door baanlichaam dat verzwakt, verzakt of afbrokkelt
		Bos- en bermbranden leiden tot slecht zicht
Overstromen		Overstromen van buitendijks spoor als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren); extreme schade aan infrastructuur; schade aan spoortunnels die onderdeel zijn van dijkkring; uitval energievoorziening
Storm & onweer		Bomen op het spoor; trajecten hebben last van storm (beperking treindienst); spoorelektronica gevoelig voor bliksem

Tabel 4.4 De 4 klimaatthema's uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) aangevuld met storm & onweer en de daarmee samenhangende negatieve effecten voor het spoornet.

²¹ De diverse negatieve effecten waarvoor het spoor gevoelig is, zijn per (overkoepelend) klimaatthema samengevoegd. De kans van optreden en de impact van optreden zijn voor elk van deze negatieve effecten verschillend, zodat het niet mogelijk is een kans en impact te geven voor de set van negatieve effecten binnen elk thema.

Wateroverlast heeft 2 mogelijke verschijningsvormen – buien en stijging van de grondwaterstand – die elk hun eigen negatieve effect hebben: buien kunnen leiden tot water op het spoor, in de stations- en spoortunnels en dergelijke, een hoge grondwaterstand kan zorgen voor het opdrijven van onderdoorgangen, zoals tunnels.

- *Wateroverlast* omvat de grootste set negatieve effecten. Wanneer het spoor langere tijd onder water staat, kan dit verweking van de spoorbaan tot gevolg hebben. Om de spoorbaan te herstellen zijn dan grootschalige herstelwerkzaamheden nodig, die in het ergste geval maanden kunnen duren. Daarnaast zijn technische installaties zoals relaaskasten gevoelig voor wateroverlast, omdat kortsluiting kan ontstaan. Ook onderdoorgangen zijn door hun verdiepte ligging vaak gevoelig voor wateroverlast. Wanneer spoortunnels of overwegen onder water komen te staan, raakt het treinverkeer gestremd; wanneer onderdoorgangen in de stations onder water komen te staan, kunnen perrons onbereikbaar worden.
- *Hitte* zorgt voor uitzetting, zowel van de spoorstaven²² als van de kunstwerken zoals bruggen. Wanneer een beweegbare brug te veel uitzet, kan deze niet meer sluiten. Hitte kan ook storingen veroorzaken door oververhitting van installaties, zoals relaaskasten. Maar ook het materieel is gevoelig. Wanneer veel treinen tegelijk worden voorgekoeld op een opstelterrein, kan dit het elektriciteitsnet overspannen waardoor deze treinen niet weg kunnen rijden. Niet voorcoelen gaat ten koste van comfort van de reiziger.
- *Droogte* kan op 2 manieren instabiliteit van de spoorbaan veroorzaken: door ongelijke verzakking en door verzwakken of afbrokkelen van de spoorbaan. Bij ongelijke verzakking verzakt de grond onder het spoor, maar niet overal in gelijke mate. Bij verzwakken of afbrokkelen van de spoorbaan wordt de spoorbaan zelf aangetast. Bij langdurige droogte wordt de kans op bos- en bermbranden groter; vonken die van remmende treinen af vliegen, verhogen die kans. Zie bijlage E, afbeelding E.3.
- De impact van *overstromen* van spoorinfrastructuur kan verschillende oorzaken hebben; de negatieve effecten in tabel 4.4 laten dit zien. De spoorinfrastructuur die buitendijks is aangelegd, zal vooral vaker last krijgen van overstromingen. Op plekken waar overstromingen niet snel verwacht worden (overstromingskans van 1/1000 per jaar) kan, als een overstroming zich toch voordoet, extreme schade aan de spoorinfrastructuur ontstaan, in het bijzonder aan spoortunnels. Daarnaast kan de energievoorziening van het spoor uitvallen omdat het elektriciteitsnet zelf uitvalt.
- *Storm en onweer* kunnen treinverstoringen veroorzaken door bliksem. Een groot deel van het spoor is voorzien van bliksemgeleiders maar deze kunnen niet alle risico's wegnemen. Wanneer een voorziening is getroffen tegen schade door bliksem, kan het enige tijd duren voordat het treinverkeer weer op gang komt omdat de veiligheids- en wisselsystemen moeten worden doorgemeten om beschadigde onderdelen te identificeren en te vervangen om nieuwe storingen te voorkomen. Hevige windstoten kunnen ervoor zorgen dat bomen op het spoor vallen, met mogelijk beschadiging van de bovenleiding tot gevolg. Zie het nieuwsbericht in bijlage E, afbeelding E.4. Hevige windstoten kunnen impact hebben op de naleving van de treindienstregeling; treinen moeten dan langzamer rijden om de veiligheid van de reizigers te borgen.

Wat zien we op de kaart?

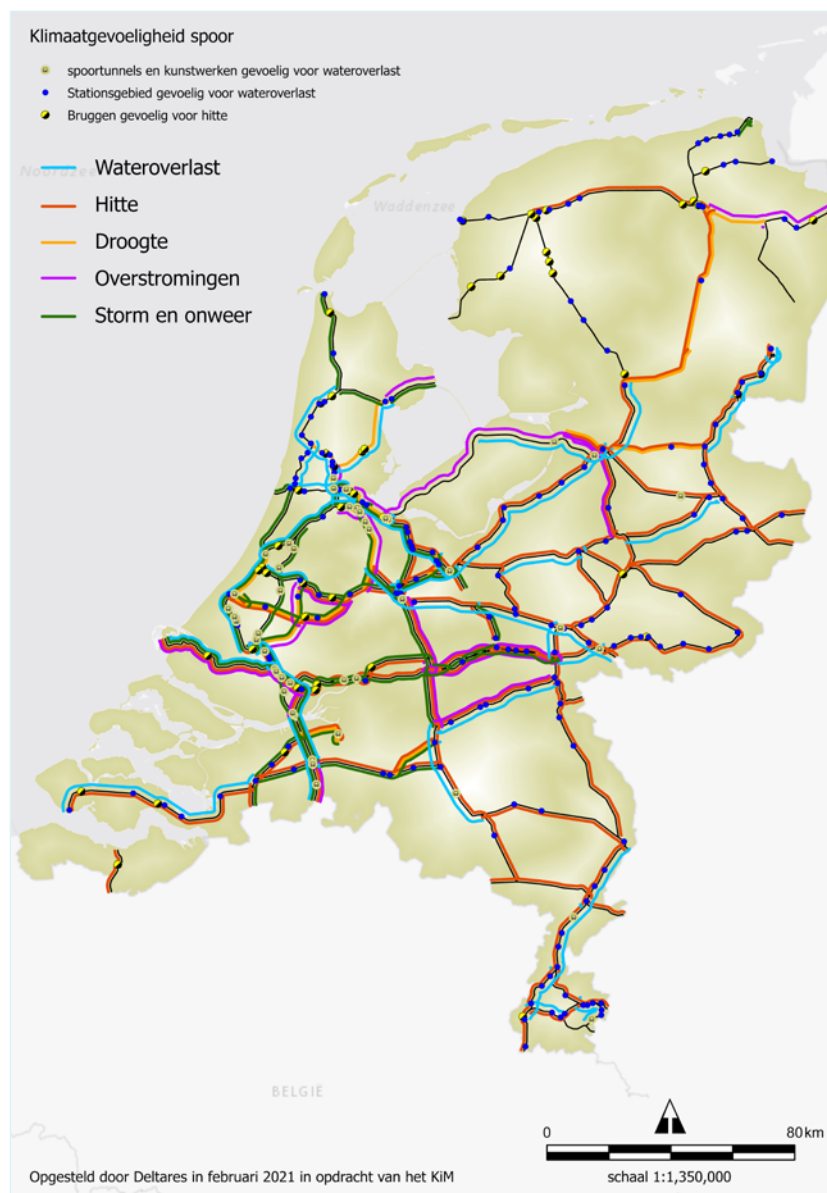
Grote delen van het spoornetwerk zijn gevoelig voor wateroverlast en hitte. Als wateroverlast optreedt, duurt herstel aan het spoor, zoals beschreven, vaak lang, met grote hinder voor de treindienst en reiziger tot gevolg. De spoortunnels die gevoelig zijn voor wateroverlast, zijn op de kaart apart weergegeven. Gevoeligheid voor hitte speelt ook over het hele netwerk maar minder in de kustgebieden. Hitte is een bedreiging die met name kortdurende, maar wel grote hinder voor de treindienst en de reizigers veroorzaakt. Het gaat bijvoorbeeld om storingen in installaties, het niet kunnen sluiten van beweegbare spoorbruggen door uitzetting en een hoog stroomgebruik door de airco in treinen (zie ook tabel 4.4). De beweegbare bruggen zijn daarnaast nog apart weergegeven in de kaart: zij bevinden zich met name in het noorden en westen van het land.

²² Dit kan leiden tot 'spoorspattingen', het knikken of verbuigen van spoorrails.
Zie bijvoorbeeld <https://www.youtube.com/watch?v=GAFMqD2mdAo>

Droogte, storm en onweer en overstromen vormen vooral een bedreiging op regionaal niveau. De gevoeligheid voor verzakkingen door droogte is vooral aanwezig op bekende bodemdalingslocaties, zoals veengebieden. De gevoeligheid voor storm en onweer komt vooral in de kustregio en langs de Betuweroute voor, terwijl gevoeligheid voor overstromen het grootst is bij de grote rivieren en wateren.

De spoorlijnen in de Randstad zijn over het algemeen gevoelig voor een groter aantal negatieve effecten dan die in andere regio's. Het traject Gouda-Woerden en de Haven van Rotterdam springen hierbij het meest in het oog.

Voor de interpretatie van de kaarten is het ook van belang om de klimaateffectatlas van ProRail (volgens ProRail nog te verschijnen) te raadplegen. Deze atlas toont de details en de aard van de verschillende gevoeligheden die onder de hier getoonde landelijke gevoeligheidskaart liggen. Een discussie over de noodzaak tot aanpassingen aan het spoor moet nog worden gevoerd.



Figuur 4.3 Gevoeligheid van het spoor voor negatieve effecten, gebundeld per klimaatthema.

4.6 Mogelijke adaptatiemaatregelen lijninfrastructuur

De kaarten uit de vorige paragrafen laten zien waar in Nederland zich gevoeligheden voor bepaalde negatieve effecten op de infrastructuur bevinden. Uit de kaarten kunnen we niet afleiden in hoeverre er noodzaak is om deze gevoeligheden te verminderen (adaptatie) en ook niet welke adaptatiemaatregelen effectief en efficiënt zijn.

Adaptatie kan in principe bestaan uit:

- het accepteren dat negatieve effecten op de infrastructuur optreden, maar deze laten gebeuren en/of schade achteraf herstellen,
- het beperken van schade en
- via preventieve maatregelen proberen schade te voorkomen.

In deze paragraaf gaan we met name in op de derde categorie: de preventieve maatregelen. In tabel 4.5 geven we een indicatie van concrete mogelijke adaptatiemaatregelen (in het rood), vooral gericht op het weerbaarder maken van de infrastructuur ter preventie van negatieve effecten op de infrastructuur. Deze maatregelen kunnen vragen om een extra investering.

Sommige van deze maatregelen liggen in het domein van vervangings- en renovatiewerkzaamheden (V&R), terwijl andere maatregelen meer te maken hebben met (gepland) beheer en onderhoud (B&O). Intensiever B&O kan grote en dure herstelmaatregelen aan de infrastructuur voorkomen. Kleine, goedkopere schades (bijvoorbeeld scheuren) komen hierdoor vroeg aan het licht, waardoor grote en dure reparaties tot op zekere hoogte kunnen worden vermeden (Algemene Rekenkamer, 2014²³). Voor een weerbaarder infrastructuur kan ook gezorgd worden door andere ontwerpeisen te stellen die schade door klimaateffecten voorkomen of beperken.

In tabel 4.5 koppelen we de mogelijke adaptatiemaatregelen aan de negatieve effecten op de infrastructuur uit paragraaf 4.2 (tabel 4.1). De maatregelen zijn gebaseerd op een verkenning van eerdere studies (KiM, 2008; Bles et al., 2020; Witteveen & Bos, 2020; zie ook bijlage D) en komen daarnaast voort uit interne KiM-denksessies en een collegiale toetsing door Rijkswaterstaat en ProRail. De maatregelen zijn indicatief. We bieden geen nader inzicht in de kosten en baten van deze adaptatiemaatregelen, omdat deze inzichten nog niet bekend zijn. Ook maken we geen onderscheid naar de omvang of ingrijpendheid ervan en kennen we geen prioritering toe.

In de risicodialogen die plaatsvinden in het kader van het DPRA, vindt wel een nadere afweging plaats van mogelijke adaptatiemaatregelen. Deze dialogen vinden momenteel plaats tussen gemeenten, waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat en relevante gebiedspartners.

²³ <https://www.rekenkamer.nl/publicaties/rapporten/2014/10/15/instandhouding-hoofdwegenet>

Klimaatthema		Negatieve effecten op de infrastructuur en een indicatie van mogelijke adaptatiemaatregelen (in rood)		
Water-overlast	Extreme neerslag (buien)	Hoofdwegen	Hoofdvaarwegen	Spoorwegen
		Plasvorming op de weg - Een betere waterafvoer en het voorkomen van verstoppingen (aanpak tijdens onderhoud) - Verkanting van de weg vergroten - Asfalt dat effecten van wateroverlast op verkeer en vervoer kan verminderen (bijv. ZOAB,²⁴ of een andere innovatief type asfalt) - Vaker schoonmaken van ZOAB-vluchtstroken en redresseerstroken - Monitoren bermhoogte en onderhouden indien nodig - Verkeersmanagementmaatregelen zoals een snelheidsbeperking door de netwerkbeheerder	Onvoldoende doorvaart-hoogte bij bruggen door hoge rivier-afvoeren - Opvijzelbare bruggen (bij V&R); - Meer beweegbare bruggen	Onder water staan van spoor, stations-tunnels, spoortunnels en overwegen; wateroverlast in stationsgebied; water-overlast technische installaties Een betere waterafvoer en water-opvang en het waterrobuust maken van de spoorbaan en installaties
	Stijging grond-waterstand (incl. zoute kwel door zeespiegel-stijging)	Erosie en afschuiving van wegtalud door afstromend regenwater in extreme bui - Verstevigen taluds d.m.v. vegetatiebeheer (maaieregime aanpassen), waterafvoer verbeteren, aanpassen grond naar minder schraal (zandig) mengsel (NB dit laatste geldt niet voor vlakke taluds) - Gewichtsbeperkende maatregelen door netwerkbeheerder (bijv. minder zware vrachtwagens)		Erosie en afschuiving van spoortalud door afstromend regenwater in extreme bui - Verstevigen taluds d.m.v. keerwanden, aanpassen baanconstructie, vegetatie-beheer (maaieregime aanpassen), water-afvoer verbeteren, aanpassen grond naar minder schraal (zandig) mengsel (NB dit laatste geldt niet voor vlakke taluds) - Gewichtsbeperkende maatregelen door netwerkbeheerder (bijv. kortere treinen)
		Opdrijven van tunnels, verdiepte liggingen, aquaducten en lichtgewichtconstructies Meer conservatieve²⁵ constructies van tunnels in gebieden waar opdrijven een rol kan spelen		Opdrijven van onderdoorgangen Meer conservatieve constructies van tunnels in gebieden waar opdrijven een rol kan spelen
Over-stromen	Overstromen weg als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren) - Dijkophoging langs rivieren (alle infrastructuur met kans op overstromen) - Onderhoud bruggen en duikers op orde t.b.v. doorstroming water - Weg hoger aanleggen (alleen in uitzonderlijke gevallen kosteneffectief) - Monitoren waterhoogtes in weglichaam om daarna tijdig geschikte maatregel te kunnen kiezen		Dijkophoging langs rivieren (alle infra-structuur met kans op overstromen)	Overstromen spoor als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren); extreme schade; uitval energievoorziening - Dijkophoging langs rivieren (alle infra-structuur met kans op overstromen) - Monitoren waterhoogtes in spoor-lichaam om daarna tijdig geschikte maatregel te kunnen kiezen - Spoorbaan aanpassen als waterkering - Assets hoger plaatsen of waterrobuust maken

²⁴ Bij extreme buien speelt slecht zicht door opspattend water (en neerslag rechtstreeks op de voorruit) zowel op dicht-asfaltbeton (DAB) als ZOAB; het ZOAB raakt dan immers al snel verzadigd (Bles et al., 2020). De meeste hoofdwegen hebben overigens al ZOAB.

²⁵ Een voorzichtige, opzettelijk behoudende constructie, die rekening houdt met eventualiteiten.

Klimaatthema	Negatieve effecten op de infrastructuur en een indicatie van mogelijke adaptatiemaatregelen (in rood)		
	Hoofdwegen	Hoofdvaarwegen	Spoorwegen
Hitte	Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen door uitzetting • (Tijdelijk) verbreden van voegovergangen van (beweeg)bare bruggen (wegvijlen) • Koelen van bruggen d.m.v. vaste koelingsinstallaties, of tijdelijke maatregelen • Regelinstallaties koelen (bijv. via airconditioning) • Monitoren uitzetten van brug voor meer gerichte acties	Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen door uitzetting • (Tijdelijk) verbreden van voegovergangen van (beweeg)bare bruggen • Koelen van bruggen d.m.v. vaste koelingsinstallaties, of tijdelijke maatregelen • Regelinstallaties koelen (bijv. via airconditioning) • Monitoren uitzetten van brug voor meer gerichte acties	Storingen in installaties, niet kunnen sluiten beweegbare spoorbruggen door uitzetting, stroomtekort door airco in treinen • (Tijdelijk) verbreden van voegovergangen van (beweeg)bare bruggen • Koelen van bruggen d.m.v. vaste koelingsinstallaties, of tijdelijke maatregelen • Treinbeveiliging, ICT en energievoorzieningsinstallaties koelen (bijv. via airconditioning of op een meer natuurlijke wijze door groene daken) • Stations voorzien van verf of coating die bescherming biedt tegen hoge temperaturen; creëren extra schaduwplekken • Monitoren uitzetten van brug voor meer gerichte acties • Energievraag voor treinen reguleren op kritische opstellocaties
Droogte	Ongelijke zakking door bodemdaling • Grondwaterstandbeheer (bijv. extra water vasthouden in de berm sloten in natte periodes via goed baggeren van sloten en het monitoren van de staat van de sloten) • Funderingsovergangen dimensioneren op grotere zettingsverschillen • Onderheien van de weg tot op de vaste laag	Onvoldoende vaardiepte door lage rivierafvoeren • Baggeren en uitdiepen; verwijderen van harde objecten/lagen • Stuwen en sluizen voor betere bevaarbaarheid • Aanleggen kanalen die water aanvoeren vanuit andere rivieren (bijv. Maas-Rijn verbinding)	Ongelijke zakking door bodemdaling; verminderde baanstabieleit • Grondwaterstandbeheer (bijv. extra water vasthouden in de berm sloten in natte periodes via goed baggeren van sloten); • Funderingsovergangen dimensioneren op grotere zettingsverschillen • Onderheien van het spoor tot op de vaste laag
	Bos- en bermbranden • Een intensiever maairegime van bermen (ter voorkoming van brand); maar dit heeft wel een mogelijk effect op biodiversiteit (zie bijlage D) • Bewustwordingscampagne over zwerfafval in berm	Onvoldoende vaardiepte door erosie rivierbodem • Stuwen en sluizen voor betere bevaarbaarheid	Bos- en bermbranden • Een intensiever maairegime van bermen (ter voorkoming van brand) • Bewustwordingscampagne over zwerfafval in berm • Installaties beter beschermen tegen brand
		Onvoldoende waterbeschikbaarheid bij sluizen • Stuwen van water en minder schutten	
Storm & onweer			Bomen op spoor; trajecten hebben last van storm (beperking treindienst); spoorelektronica gevoelig voor bliksem • Windgevoelige objecten bij infrastructuur preventief verwijderen

Tabel 4.5 De geselecteerde negatieve effecten per netwerk gekoppeld aan de 4 klimaatthema's uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) en 'storm & onweer' en verkenning van mogelijke adaptatiemaatregelen.

4.7 Gevoeligheid en adaptatiemaatregelen knooppuntinfrastructuur: havens en luchthavens

Hebben we ons tot nu toe vooral op de lijninfrastructuur gericht, in deze paragraaf staat de gevoeligheid van netwerkknooppunten, zoals zee- en luchthavens, voor het veranderend klimaat centraal. Er zijn veel overeenkomsten tussen lijn- en knooppuntinfrastructuur. Veel van de reeds in kaart gebrachte gevoeligheden en adaptatiemaatregelen zijn daarom in meer of mindere mate ook relevant voor zee- en luchthavens. We richten ons in deze paragraaf op de fysieke infrastructuur en niet op het gebruik daarvan (zie hiervoor hoofdstuk 5).

Zeehavens

Klimaatverandering is een belangrijke trend in de omgeving van zeehavens. In de academische literatuur groeit sinds 2008 de belangstelling voor klimaatverandering en zeehavens. Met name climate impact assessments en adaptatiestrategieën door havenbeheerders krijgen veel aandacht (Poo et al., 2018). De toename van het aantal studies op dit terrein is een indicatie van het belang van de gevolgen van klimaatverandering voor zeehavens.

Van de DPRA-klimaatthema's zijn vooral hitte en overstromen relevant voor de zeehaveninfrastructuur. Zo kunnen installaties bij op- en overslagbedrijven en industrie gevoelig zijn voor hitte. Nederlandse zeehavens van nationaal belang (Amsterdam, Groningen Seaports, Moerdijk, Rotterdam en North Sea ports) hebben echter de meeste aandacht voor overstromen door zeespiegelstijging (zie ook bijlage F). Wel zijn er daarbij verschillen; sommige havens denken al nadrukkelijk na over zeespiegelstijging terwijl andere het probleem nog niet agenderen. Het valt op dat veel visies of strategieën in de laatste jaren zijn geschreven.

Enkele adaptatiemaatregelen die we met een focus op de zeespiegelstijging kunnen onderscheiden, zijn:

- *Het ophogen van zeedijken, kademuuren en glooiingen;*
- *Het ophogen van weg- en spoorinfrastructuur in havens;*
- *Wet proofing:* Hierbij gaat het om het waterdicht of waterbestendig maken van installaties en gebouwen zodat deze beperkt worden aangetast door binnendringend water;
- *Het waterbergend vermogen* in een havengebied vergroten;
- *Crisisbeheersing:* Operationele plannen (crisisbeheersplan) in combinatie met fysieke maatregelen en noodvoorzieningen (bijvoorbeeld nooddijken/-keringen) kunnen helpen om een overstroming beheerst en gecontroleerd te laten plaatsvinden.

Luchthavens

De gevoeligheid van en adaptatiemaatregelen voor de landzijdige bereikbaarheid van de luchthavens, bijvoorbeeld voor de wegen en het spoor naar Schiphol toe, zijn meegenomen in de voorgaande paragrafen. In deze paragraaf kijken we naar de gevoeligheid van de infrastructuur van de luchthavens zelf, zoals landingsbanen. Die bestaan grotendeels uit asfalt of beton. Veel negatieve effecten van het klimaat op de infrastructuur van luchthavens zijn daardoor vergelijkbaar met die van de hoofdwegen (zie paragraaf 4.4). Hetzelfde geldt voor de mogelijke adaptatiemaatregelen (zie paragraaf 4.6). In aanvulling hierop onderscheiden we voor luchthavens enkele specifieke negatieve effecten van het klimaat.

Extreme neerslag

- Extreme neerslag zorgt niet alleen voor het gevaar van plasvorming op de landingsbanen, maar kan ook de digitale infrastructuur beïnvloeden (bijvoorbeeld het overstroomen van elektronische apparatuur/bekabeling) (KvK, 2014; Eurocontrol, 2013);
- Door extreme neerslag kunnen ruimtes onderlopen, zoals bagagekelders. Hagel kan daarnaast gebouwen en voorzieningen beschadigen.

Hoge temperatuur/hittegolf

- Door hitte kan spoorvorming optreden in het asfalt van start- en landingsbanen;
- Betonnen platformen op vliegvelden kunnen als hitte-eiland gaan fungeren, met gevolgen voor bijvoorbeeld het personeel dat in die hitte moet werken;
- De koelingskosten van terminals kunnen stijgen (KvK, 2014).

Overstromingen

Net als bij wegen en spoorwegen kunnen ook luchthavens gevoelig zijn voor het overstroomen van beken en rivieren en op de lange termijn voor een overstroming door zeespiegelstijging. Schiphol en belangrijke andere (regionale) luchthavens zoals Rotterdam-The Hague Airport en Lelystad Airport liggen onder NAP (ongeveer 4-5 m), waardoor ze gevoeliger zijn voor overstromingen dan een aantal andere regionale luchthavens, zoals Eindhoven Airport en Maastricht/Aachen Airport. Als de luchthaven zelf onder NAP ligt, geldt dit in de regel ook voor de spoorlijnen en de wegen die de luchthaven ontsluiten (landzijdige bereikbaarheid).

Schiphol ligt in de Haarlemmermeerpolder en heeft daardoor te maken met zoute kwel. Deze kwel kan toenemen door zeespiegelstijging. Zout is slecht voor de ruwheid van start- en landingsbanen (Flyland, 2001). Schiphol lijkt hier relatief minder last van te ondervinden dan de land- en tuinbouw in het gebied (Paridon et al., 2012). Wel kunnen onder bepaalde omstandigheden wellen ontstaan waar zoute kwel uitstroomt. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren in het geval dat heipalen en damwanden bij snelwegen, spoorlijnen en kunstwerken de deklaag perforeren. In welke mate Schiphol hier in de toekomst meer last van krijgt, is onduidelijk.

4.8 Conclusies: belangrijkste klimaatrisico's, adaptatiemaatregelen en discussievragen voor beleid

In dit hoofdstuk hebben we ons gericht op de mate waarin de hoofdwegen, hoofdvaarwegen en spoorwegen gevoelig zijn voor negatieve effecten die samenhangen met het klimaat, zoals hitte en neerslag. De belangrijkste negatieve effecten per netwerk zijn daarbij geselecteerd op basis van hun risico (kans van optreden x gevolg bij optreden) in het jaar 2050. In deze paragraaf vatten we de gevoeligheden samen. Daarnaast formuleren we 5 discussievragen als inspiratie voor beleidsmakers die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat en infrastructuur(netwerken).

Belangrijkste gevoeligheden en adaptatiemaatregelen infrastructuurnetwerken

Lijninfrastructuur, zoals hoofdweg-, hoofdvaar- en spoornetwerken, kan diverse negatieve effecten van het klimaat ondervinden; in een veranderend klimaat neemt ook de kans toe dat deze negatieve effecten optreden. Het gaat bijvoorbeeld om ongelijke verzakking van weg en spoor door bodemdaling, laagwater in de rivieren, veroorzaakt door droogte, of instabiliteit van weg- en spoortaluds, veroorzaakt door extreme neerslag. De belangrijkste gevoeligheden en adaptatiemaatregelen zijn:

- **Wegen:** Op het hoofdwegenet vormt ongelijke zakking door bodemdaling als gevolg van droogte een relatief groot risico. De gevoeligheid hiervoor komt het meest voor in het westen en in het noorden van het land.
- **Vaarwegen:** Het grootste risico voor het hoofdvaarwegenet is droogte, ofwel lage rivierafvoeren. Laagwater door droogte in combinatie met bodemerose in de rivieren heeft invloed op de bevaarbaarheid van de rivieren (onder andere minder vaardiepte). De Waal heeft, vooral rond Nijmegen, een grote gevoeligheid voor onvoldoende diepte en bodemerose. Ook voor de gehele IJssel en het meest bovenstroomse traject van de Nederrijn zijn dergelijke gevoelige locaties voor onvoldoende diepte en bodemerose te vinden.
- **Spoorwegen:** Voor spoorwegen is niet één type negatief effect op de infrastructuur te onderscheiden dat een duidelijk groter risico heeft dan de andere negatieve effecten. Grote delen van het spoor-netwerk zijn gevoelig voor negatieve effecten die samenhangen met wateroverlast en hitte. De gevoeligheid voor negatieve effecten die samenhangen met droogte, zoals verzakkingen, is in de kustgebieden minder groot dan in de rest van het land.
- **Knooppuntinfrastructuur:** Zee- en luchthavens hebben grotendeels te maken met dezelfde klimaat-gevoeligheden en risico's als de lijninfrastructuur, te meer omdat op deze plekken wegen, vaarwegen en spoorwegen bij elkaar komen. Een specifiek kenmerk van de zeehavens en van Schiphol als belangrijkste Nederlandse luchthaven is dat ze onder zeeniveau liggen en daardoor gevoeliger zijn voor het risico van overstrooming dan infrastructuren die meer landinwaarts en hoger liggen.
- De mogelijke *adaptatiemaatregelen* zijn divers en verschillen sterk per type negatief effect en per type infrastructuur. Soms kan intensief en vooraf gepland beheer en onderhoud (B&O) grote en dure herstelmaatregelen aan de infrastructuur voorkomen. Concrete voorbeelden hiervan zijn het goed onderhouden van het asfalt van wegen om schade te voorkomen en het frequent maaien van droge bermen om het risico van bermbranden te verkleinen. Vaak gaat het echter om grootschaliger maatregelen in het domein van vervanging en renovatie (V&R).

Vijf discussievragen voor beleid

In deze formuleren wij 5 discussievragen als inspiratie voor beleidsmakers die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat en infrastructuur(netwerken).

- 1 Informatie en criteria:** Per netwerk zijn klimaatstresstesten uitgevoerd die klimaatgerelateerde negatieve effecten in beeld brengen. Welke informatie moeten we de komende jaren systematisch bijhouden/monitoren om afwegingen te kunnen maken?
- 2 Risicodifferentiatie:** Hoe wegen we negatieve effecten met een lage kans maar met een groot gevolg af tegen negatieve effecten met grote kans en een relatief gering gevolg? In beide gevallen kan het risico (kans x gevolg) hetzelfde zijn.
- 3 Segment- versus corridoraanpak:** De gevoelheden voor hoofd- en spoorwegen zijn in dit hoofdstuk weergegeven per wegsegment, en niet voor hele corridors met verschillende wegsegmenten. In hoeverre is het effectief en efficiënt om een corridor in één keer klimaatbestendig te maken in plaats van losse, op zichzelf staande locaties aan te pakken? En in welke mate hangt dit af van verschillende kenmerken van een corridor?
- 4 Netwerk- en knooppuntdifferentiatie:** Wat zijn overwegingen om netwerken of knooppunten eerder of later in aanmerking te laten komen voor adaptatie en in welk beleidskader wordt deze afweging gemaakt (bijvoorbeeld beleidskeuzes in de Nationale Omgevingsvisie)? Welke bereikbaarheidsdoelen streven we na, en welke rol vervullen netwerkonderdelen daarin? In hoeverre weegt het belang van een corridor of knooppunt mee, gemeten in bijvoorbeeld economische termen, geleverde verkeers- of vervoersprestatie of de functie binnen het netwerk? Komen wegen rond de grote steden eerder in aanmerking voor adaptatiemaatregelen dan wegen in het landelijk gebied? Hoe zit het met schakels en knooppunten in het netwerk, zoals treinstations en lucht- en zeehavens? Als bijvoorbeeld Utrecht Centraal uitvalt door een bepaalde weersconditie, heeft dit een uitstraling op het treinverkeer in een groot gedeelte van het land.
- 5 Direct aanpakken of uitstellen:** Pakken we verstoringen direct aan of accepteren we periodieke vertraging? Wat heeft de voorkeur vanuit een (breder) welvaartspectief en vanuit opvattingen over wat verschillende actoren 'acceptabel' vinden? De wachttijden bij sluizen door droogte kunnen door technische maatregelen beperkt worden (denk aan hevelend schutten, installeren pompen, gebruik tijdelijke pompen). De keuze kan ook zijn om schutbeperkingen te accepteren. Hetzelfde geldt in principe voor (spoor)wegen. Als een bepaalde brug met enige regelmaat niet meer open of dicht kan, leidt dit tot vertraging voor het verkeer.

5 Invloed van een veranderend klimaat op het gebruik van infrastructuur en op activiteiten

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk bespreken we de effecten die klimaatverandering heeft op het gebruik van de infrastructuur, op activiteiten en op de locatie van die activiteiten ('landgebruik'). Op elke van deze elementen uit het conceptueel denkkader uit hoofdstuk 3 kan het klimaat ingrijpen (zie figuur 3.2). We richten ons vooral op (mogelijke) aanpassingen in het gedrag. Paragraaf 5.2 en 5.3 gaan over de mogelijke aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur binnen een netwerk (paragraaf 5.2) en tussen netwerken, waaronder modal shift (paragraaf 5.3). In paragraaf 5.4 staan de mogelijke aanpassingen in activiteiten centraal. Waar mogelijk zijn deze paragrafen gebaseerd op literatuur, maar voor een deel hebben we ook het pad van 'logisch beredeneren' gevolgd, bijvoorbeeld vanuit de huidige basiskennis over de logistiek en de personenmobiliteit. Paragraaf 5.5 sluit het hoofdstuk af met een samenvattend overzicht van de belangrijkste (mogelijke) aanpassingen. Ook geven we daar 5 discussievragen om beleidsmakers te inspireren die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat, het gebruik van de infrastructuur, activiteiten en de locaties waar infrastructuurgebruikers die activiteiten ondernemen.

5.2 Gebruik van de infrastructuur: aanpassingen binnen een netwerk

Als mogelijke aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur onderscheiden we aanpassingen in het mobiliteitsgedrag en aanpassingen in de keuze voor en het ontwerp van voer- en vaartuigen.

Aanpassingen in mobiliteitsgedrag

Uit de literatuurstudie van Jonkeren (2020) blijkt dat er relatief weinig onderzoek is gedaan naar de invloed van het weer op het mobiliteitsgedrag. We behandelen de volgende veranderingen in mobiliteitsgedrag:

- Andere routekeuze;
- Vaker reizen of vervoeren;
- Reis uitstellen;
- Niet meer reizen.

Andere routekeuze

Nederland beschikt over een fijnmazig wegennet. Hierdoor is het eenvoudig om (tijdelijk) uit te wijken naar alternatieve routes als klimaateffecten ertoe leiden dat delen van de oorspronkelijke route kort- of langdurig onbruikbaar zijn (bijvoorbeeld een stremming door een brug die door hitte niet meer wil sluiten of een stremming door erosie van een wegtalud als gevolg van hevige regenval). Een gedragsaanpassing is daarbij gemakkelijker wanneer het incident tijdig bekend is. Dit geldt zowel voor het personen- als voor het goederenvervoer over de weg. Als klimaatschade tot een stremming leidt in een gebied waar het al druk is op de weg, neemt de kans op files daar toe. Dit geldt ook voor omrijroutes die via het onderliggende wegennet lopen. Deze hebben langere reistijden (onbetrouwbaarheid), ongemak en hogere kosten tot gevolg.

Bij de trein is een andere routekeuze minder eenvoudig dan bij de auto of het vliegtuig (eenmaal in de lucht): er zijn gewoon minder uitwijkmogelijkheden. Een onderscheid tussen vervoerder (NS) en treinreiziger is relevant. De vervoerder kan een bepaalde trein niet zomaar via een andere route laten rijden; dat komt door de geldende dienstregeling. Een treinreiziger kan wel omrijden via een andere route (en met een andere trein). De omrijmogelijkheden per spoor verschillen per regio: tussen de 4 grote steden bestaan veel omrijroutes, terwijl in de noordelijke provincies minder alternatieven beschikbaar zijn. Omdat het Nederlandse spoor een van de drukstbereden spoortrajecten ter wereld is, kan omrijden snel tot capaciteitsproblemen leiden, met langere reistijden en hogere kosten tot gevolg.

Voor het spoorgoederenvervoer ligt een routewijziging minder voor hand dan voor het spoorpersonenvervoer. Er zijn namelijk minder alternatieve goederenroutes beschikbaar. Dit heeft onder meer te maken met beperkingen in de regelgeving (bijvoorbeeld bij het vervoer van gevaarlijke stoffen). Verreweg de dikste goederenstromen gaan via de Betuweroute en de Brabantroute (zie ProRail, 2021). Vallen die routes uit, dan kunnen alternatieve routes dit niet of nauwelijks opvangen.

Ook voor de binnenvaart is het niet eenvoudig een route aan te passen. Op de corridor Rotterdam-Duisburg kunnen schepen via de Lek of de Waal varen. Op andere trajecten (bijvoorbeeld Rotterdam-Tilburg) kost omvaren echter vaak veel tijd.

In de zeevaart kunnen rederijen (vaker) kiezen voor een route via andere buitenlandse zeehavens als zeekeringen structureel vaker moeten sluiten vanwege hoge waterstanden of storm. Hetzelfde geldt voor de luchtvaart, waar vliegtuigen door extreme regenval, mist of harde wind incidenteel uitwijken naar een andere luchthaven.

Vaker reizen of vervoeren

Bepaalde negatieve effecten op de infrastructuur kunnen ervoor zorgen dat een vervoerder minder goederen per keer kan meenemen, wat tot hogere kosten leidt (zie bijlage B, voorbeeld 3). Zo leidt een lagere waterstand tot minder aflaaddiepte, waardoor een schip minder lading per reis kan vervoeren. De beladingsgraad die dan mogelijk is, verschilt: de containervvaart is bijvoorbeeld ongevoeliger voor lagere waterstanden dan de droge en natte bulkvaart (zie bijlage G). Deze oplossing heeft mogelijk wel een fysieke begrenzing: zoals we zagen in hoofdstuk 4, kunnen sommige sluizen bij een lage waterstand minder schuttingen per dag uitvoeren. Meer schepen op het vaar netwerk, met elk minder goederen aan boord, betekent meer kans op congestie bij deze sluizen.

Ook bij het wegvervoer kunnen negatieve effecten op de infrastructuur invloed hebben op het toegestane gewicht van de lading. Een wegvervoerder kan er dan voor kiezen om minder goederen per keer mee te nemen, zodat er minder zware vrachtwagens over het aangetaste deel van de infrastructuur rijden. Hierdoor zijn wel meer ritten nodig om hetzelfde totale gewicht te vervoeren. Voor het personenvervoer over de weg zijn de gevolgen beperkter omdat het om minder zwaar vervoer gaat. Wanneer een spoortraject door verzakking beperkter gebruikt kan worden, kan een vervoerder kortere of lichtere treinen inzetten.

Reis uitstellen

Afhankelijk van de tijd die het kost om de effecten van het klimaat op de infrastructuur te herstellen, kan een reiziger of vervoerder besluiten de reis uit te stellen. Dit is afhankelijk van het reismotief. Bij woon-werk- of onderwijsverplaatsingen zal iemand de reis, vanwege de vaak grotere noodzaak, minder snel uitstellen. Voor recreatieve doeleinden komt een annulering van de reis relatief vaker voor (Jonkeren, 2020).

Het uitstellen van een reis over de weg is vooral een reële optie wanneer het weinig zin heeft om een andere route te kiezen (bijvoorbeeld bij mist). Voor het spoor (en deels ook de luchtvaart) zijn minder routealternatieven beschikbaar dan via de weg en kan uitstel een reëlere optie zijn.

In het goederenvervoer kan de keuze zijn om de vracht op een ander moment te vervoeren, wanneer de omstandigheden dit wel toelaten. Het uitstellen van een reis kan leiden tot vertragingen in de keten (bijvoorbeeld vertragingen in just in time-distributie- en -productieprocessen). Ook kunnen voorwaarts en achterwaarts meer voorraden worden aangelegd. Dit leidt tot extra voorraadkosten: extra opslagruimte, risico dat de waarde van de voorraad vermindert, risico op beschadiging.

De ervaring tijdens de COVID-19-pandemie is dat Nederlanders thuiswerken in het algemeen als positief ervaren (Hamersma et al., 2020). Thuiswerken kan daarmee een interessante optie zijn om extreme klimaatomstandigheden te ontwijken, door bijvoorbeeld eerder of pas later op pad te gaan.

Niet meer reizen

Wanneer de wachttijd te lang wordt, kan de reiziger of vervoerder besluiten de reis niet meer te maken. Deze aanpassing is traditioneel gezien minder waarschijnlijk voor verplaatsingen met een noodzakelijk karakter, zoals fysiek onderwijs en werk. Voor sommige beroepen is, met de ervaringen van de COVID-19-pandemie, thuiswerken echter een optie om extreem weer te ontwijken (zie paragraaf 5.4, Aanpassing in activiteiten). Voor onderwijs geldt mogelijk hetzelfde omdat tijdens de lockdownperiode veel ervaring is opgedaan met onlineonderwijs. In het goederenvervoer hebben aanpassingen vooral gevolgen voor de ontvangende partij. Hun productie- en distributieproces kan (deels) stil komen te liggen, met het gevolg dat producenten en distributeurs hogere voorraden aanhouden.

Aanpassingen aan voer- en vaartuigen

Een optie om om te gaan met negatieve effecten die de infrastructuur of het gebruik ervan kunnen treffen, is het aanpassen van voer- en vaartuigen om ze minder kwetsbaar te maken. De literatuur laat hier weinig concrete voorbeelden van zien. Studies gaan vooral over klimaatmitigerende aanpassingen, zoals elektrisch of op waterstof rijden (bijvoorbeeld Berveling et al., 2020; Hoen & Koetse, 2012). Ook de studie van Savelberg et al. (2016) naar innovaties in het openbaar vervoer wijst niet op radicale innovaties om treinen en bussen klimaatbestendiger te maken.²⁶ Dit komt ook omdat niet duidelijk is welke (extra) aanpassingen aan voer- en vaartuigen nodig kunnen zijn. Zo beschikken auto's bijvoorbeeld al over profielbanden die bij buien het water afvoeren. Als buien vaker voorkomen maar niet heviger worden, zijn geen extra aanpassingen nodig. Een ander voorbeeld is het uitrusten van treinen met voorzieningen waardoor reizigers tijdens hitte water kunnen drinken. Veel mogelijke voertuigaanpassingen zijn vooral theoretisch van aard of bevinden zich in een ontwerpfase.

²⁶ Innovaties zijn vooral gericht op het Europese treinbeveiligingssysteem ERTMS, de ontwikkeling van hogesnelheidslijnen, bussen met een eigen baan, de hyperloop, innovatieve magneetzwefbanen en de inzet van waterstof (Savelberg et al., 2016).

Voorbeelden zijn:

- *Aanpassing bij verzakkingen in wegen en spoor door droogte.* Vrachtauto's en treinen kunnen lichter worden gemaakt of ontworpen door het gebruik van andere materialen (kunststoffen bijvoorbeeld). Hierdoor wordt gevoelige infrastructuur minder belast.
- *Aanpassing bij hitte.* Andere materialen of verven (bijvoorbeeld wit) kunnen de hitte beter buiten het voertuig houden. Veel treinen zijn vanuit comfortoverwegingen uitgerust met airconditioning.
- *Aanpassing bij overstromingen.* In gebieden met veel wateroverlast kunnen auto's worden ingezet die hier beter mee om kunnen gaan. Denk aan terreinauto's of amfibievoertuigen. De kans op een overstroming van wegen is dermate klein dat (grootschalige) aanpassing in Nederland zeer onwaarschijnlijk is.
- *Aanpassingen bij alle klimaatgerelateerde stremmingen.* Navigatieapps en -systemen kunnen alternatieve routes geven in het geval van klimaatgerelateerde stremmingen. Huidige navigatiesystemen doen dit feitelijk al, via realtimerouteadvies. Evacuatieadviezen bij overstromingen kunnen wel een specifieke klimaatgerelateerde toevoeging zijn.
- *Aanpassing bij onvoldoende vaardiepte door droogte.* Binnenvaartschepen kunnen worden aangepast met het oog op laagwater door droogte. Het onderzoeksinstituut Marin onderzoekt of een andere gewichtsverdeling, gewichtsreductie en aanpassingen in de voortstuwing (schroef) met meer lading varen bij lage waterstanden mogelijk maken. Momenteel laat BASF-rederij Stolt Nielsen een laagwaterbestendig schip bouwen (figuur 5.2) met een lichtere bouwwijze.



Figuur 5.2 Voorbeeld ontwikkeling laagwaterbestendig schip. Bron: Scheepvaartkrant, 27 januari 2021.

5.3 Gebruik van de infrastructuur: aanpassingen tussen netwerken

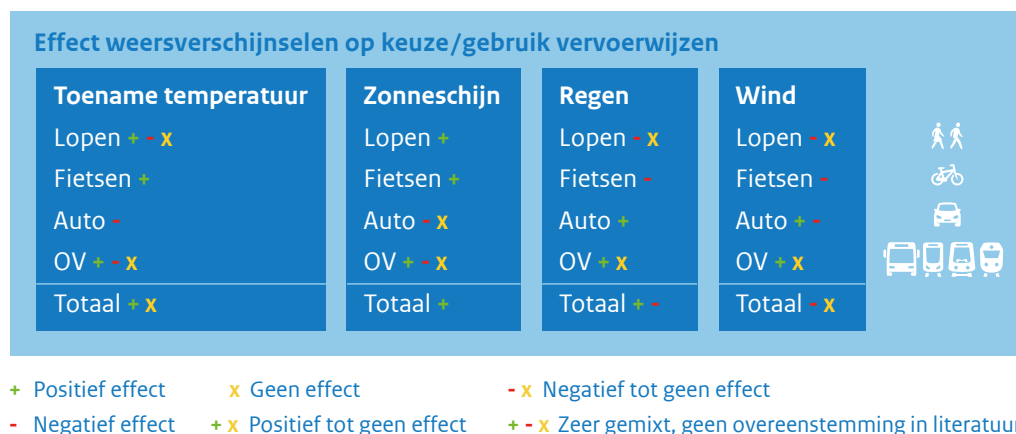
Als mogelijke aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur die tussen netwerken kunnen plaatsvinden, onderscheiden we modal shift (personen- en goederenvervoer) en integratie van netwerken/modaliteiten in een systeem.

Modal shift

Wanneer de condities in het ene netwerk verslechteren, kan een reiziger, vervoerder of verlader voor een ander netwerk kiezen. De literatuurstudie van Jonkeren (2020) laat zien dat de huidige literatuur hiervoor verschillende inzichten biedt (figuur 5.3). Soms is het effect van veel wind en regen positief op het gebruik van het openbaar vervoer, maar vaak wordt ook geen effect waargenomen. Het effect van een toename in temperatuur is tegengesteld aan dat van wind en regen: positief voor fietsen, negatief voor de auto en gemixt voor het openbaar vervoer.

Uitwisseling tussen vervoerwijzen kan alleen plaatsvinden als er goede alternatieven zijn. Verplaatsingsafstanden spelen hierbij een belangrijke rol. Een autoverplaatsing van 50 km zal niet snel worden vervangen door een verplaatsing per traditionele fiets, maar een autoverplaatsing van 3 km wel (Jonkeren, 2020). Daarnaast wordt de kans op een shift ook bepaald door het reismotief. Onderzoek in Nederland laat zien dat de vraag naar woon-werk- en zakelijke verplaatsingen niet of nauwelijks wordt beïnvloed door het weer, de vraag naar verplaatsingen voor vrijetijdsdoeleinden (recreatie en sport) daarentegen wel (Sabir, 2011).

Als een vliegtuig niet kan vertrekken als gevolg van negatieve effecten van het klimaat, dan ligt het voor de hand dat de reis wordt uitgesteld en de reiziger moet wachten. Als een vertraging lang gaat duren, kan een reiziger mogelijk de trein als alternatief voor korte vliegafstanden kiezen. Bij reisafstanden tot maximaal 800 km blijkt de trein nog met het vliegtuig te kunnen concurreren (Savelberg & De Lange, 2018).



Figuur 5.3 Inzichten literatuur over effect van weersverschijnselen op de keuze en het gebruik van vervoerwijzen.
Bron: Jonkeren (2020).

Of een modal shift in het goederenvervoer reëel is, hangt voor een groot deel af van de goederen-soort. Containers zijn flexibel en kunnen zowel via water en spoor als over de weg worden vervoerd. Voor bulkgoederen is dit een stuk lastiger, omdat deze goederen in grote volumes worden vervoerd en omdat veel bedrijven die bulkgoederen ontvangen, watergebonden zijn. Toch overwegen ook grote vervoerders en verladers in de binnenvaart voor het droge bulkvervoer een gedeeltelijke modal shift naar spoorvervoer. Een concreet voorbeeld hiervan is staalproducent ThyssenKrupp en zijn duwvaartrederij Thyssen KruppVeerhaven (figuur 5.4), die erts en kolen naar de staalindustrie in het Roergebied vervoert. Tijdens het extreem lage water in 2018 maakte het bedrijf meer gebruik van spoorvervoer. Dit bood echter maar een beperkte oplossing, omdat het laadvermogen van een erts-trein, ongeveer 2.800 ton, overeenkomt met dat van (slechts) één duwbak, terwijl het bedrijf groten-deels met 4 duwbakken vaart (Nieuwsblad Transport, 2018). Zo'n shift vergt dus veel spoorcapaciteit en mogelijk daaraan gerelateerde kosten. Aan de andere kant zijn ook kosten verbonden aan de inhuur van extra binnenvaartcapaciteit die met de lagere beladingsgraad gepaard gaat (Nieuwsblad Transport, 2018; zie ook bijlage G).



Figuur 5.4 Voorbeeld van grote duwvaartrederij die vaker spoorvervoer inzet tijdens laagwater. Bron: Nieuwsblad Transport, 17 oktober 2018.

Integratie van netwerken en modaliteiten

Een integratie van de mobiliteitssystemen kan als een adaptatiemaatregel worden aangemerkt. Hiermee bedoelen we dat de netwerken onderling als één systeem functioneren en zo uitwisseling van mobiliteit mogelijk maken. Als het ene netwerk (tijdelijk) minder goed bereikbaar is door een klimaat-gerelateerde gebeurtenis, dan kan moeiteloos het andere netwerk worden gebruikt. Zo'n mogelijkheid om te switchen tussen netwerken zou kunnen worden gefaciliteerd door een toekomstig systeem als 'Mobility-as-a-Service' (MaaS). Harms et al. (2018) definiëren MaaS als het aanbod van multimodale, vraaggestuurde mobiliteitsdiensten, waarbij op maat gemaakte reismogelijkheden via een digitaal platform met realtime-informatie aan klanten worden aangeboden. Nu al werken veel aanbieders van openbaar vervoer en deelsystemen (bijvoorbeeld deelauto's en deelfietsen) samen in een MaaS-platform. Mogelijk kan MaaS (bepaalde) reizigers in de toekomst meer flexibiliteit geven om hun reisgedrag aan te passen, bijvoorbeeld als de weersomstandigheden daar aanleiding toe geven. Voorbeelden zijn het sneller kiezen voor een deelfiets in de last mile als het mooi weer is of het juist gebruik maken van een bus bij slecht weer.

Ook in het goederenvervoer kunnen netwerken onderling meer worden geïntegreerd. Er zijn geen initiatieven bekend waar klimaatverandering de belangrijkste drijfveer is voor nieuwe samenwerkingen tussen vervoerders en verladers. Een binnenvaartondernemer kan meer samenwerken met weg- en spoorvervoerders om periodes van laagwater beter op te kunnen vangen. Hiermee verbetert de robuustheid van het transportsysteem (Van Dorsser, 2015). Integratie tussen transportnetwerken kan ook via synchromodale concepten. De Topsector Logistiek (2021) definieert synchromodaal transport als "het optimaal benutten van de verschillende modaliteiten in een geïntegreerde vervoersoplossing. Het is multimodaal vervoer waarbij de modaliteiten naast elkaar worden ingezet en de inzet afhangt van de beschikbaarheid van de infrastructuur en de eisen die aan de lading worden gesteld". Net als bij MaaS is synchromodaal vervoer ('Logistics-as-a-Service' of 'Freight-as-a-Service') vraaggestuurd, flexibel en gebeurt de inzet van vervoermiddelen op basis van beschikbaarheid.

5.4 Aanpassing in activiteiten

Als huidige activiteitenpatronen door de negatieve klimaateffecten moeilijker te realiseren zijn, dan kunnen reizigers en vervoerders/verladers deze aanpassen. Hierbij kunnen ze het gebruik van bestaande activiteitenlocaties, zoals winkels, aanpassen of ze kunnen nieuwe locaties gaan gebruiken, zoals een nieuwe bedrijfslocatie.

Reizigers/personenverkeer

Reizigers kunnen besluiten om bepaalde activiteiten rond werk en recreatie dichterbij huis te doen en op plekken die geen of minder nadelige negatieve effecten van het klimaat ondervinden. Vooralsnog zijn de mogelijke negatieve effecten die samenhangen met het klimaat, niet dusdanig groot dat veranderingen in activiteitenpatronen erg waarschijnlijk zijn. Weerseffecten kunnen natuurlijk wel een rol spelen. De ervaring tijdens de COVID-19-pandemie is dat mensen thuiswerken in het algemeen als positief ervaren (Hamersma et al., 2020). Thuiswerken kan daarmee een interessante optie zijn om extreme weersomstandigheden te ontwijken.

Of de negatieve effecten uiteindelijk ook leiden tot verhuisbeslissingen, is voor zover bekend niet onderzocht. Dit lijkt in Nederland echter vooral een theoretische en niet heel waarschijnlijke adaptatiemaatregel voor de komende decennia. Bij extreme zeespiegelstijging op de langere termijn zou dit kunnen veranderen (zie hoofdstuk 6).

Vervoerders/verladers/goederenvervoer

Voor het goederenvervoer lijkt een verandering van activiteitenpatronen als gevolg van negatieve effecten die samenhangen met het klimaat, meer voor de hand te liggen dan voor het personenvervoer. Zo'n verandering lijkt vooral relevant in relatie tot lage rivierstanden door droogte, waarmee de binnenvaart in de toekomst vaker te maken krijgt. Grofweg kunnen verladers en vervoerders het volgende doen:

- *Zich elders vestigen.* Een verlader die veel gebruik maakt van de binnenvaart, kan ervoor kiezen zich elders te vestigen wanneer toenemende droogte en te lage waterstanden ervoor zorgen dat het vervoer per binnenvaartschip steeds lastiger wordt. Zich elders vestigen is echter niet altijd een realistische maatregel en vaak ook pas de laatste optie. Bereikbaarheid is slechts een van de vestigingsplaatsfactoren, naast onder meer beschikbaarheid van personeel, personeelskosten, ligging ten opzichte van afzetmarkten en grondkosten. Daarnaast is een bedrijfslocatie vaak historisch bepaald en zijn de kosten van herlocatie hoog (Ecorys, 2018).
- *Voorraadbeheer aanpassen.* Het creëren van meer opslagcapaciteit bij verladers en vervoerders is een mogelijke adaptatiemaatregel, die verstoringen als gevolg van de effecten van klimaatverandering kan opvangen. Dit is niet voor alle goederensoorten goed mogelijk. Zo ligt het minder voor de hand om bederfelijke en tijdgevoelige goederen op voorraad te houden. Voor veel bulkgoederen lijkt dit wel een effectieve maatregel, al gaat deze gepaard met hoge kosten. Zowel verladers, spoorvervoerders, binnenvaartondernemers als ondernemers in het wegvervoer kunnen deze maatregel nemen. Voorspellende data kunnen helpen om goede keuzes te maken over de voorraadhoogte, de te nemen routes of om een reis wel of niet door te laten gaan. Een grote verlader voor erts en kolen zoals ThyssenKrupp maakt gebruik van waarschuwingssystemen (*Frühwarnsystem*) die de ontwikkeling van de waterstanden op de Rijn bijhouden (Lalkens, 2020). ThyssenKrupp kan op basis hiervan op tijd maatregelen nemen, zoals het eerder aanleggen van voorraden. Het systeem ondersteunt de vervoerder ook bij het optimaler beladen van schepen.

5.5 Conclusies: Belangrijkste aanpassingen in 'gebruik van de infrastructuur', 'activiteiten' en discussievragen voor beleid

In deze paragraaf geven we een samenvattend overzicht van de belangrijkste en meest voor de hand liggende aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur en in de activiteiten die kunnen optreden. Daarnaast formuleren we 5 discussievragen, als inspiratie voor beleidsmakers die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat, gebruik van de infrastructuur, activiteiten en de locaties waar infrastructuurgebruikers die activiteiten ondernemen.

Belangrijkste en meest voor de hand liggende aanpassingen

We doen de aanname dat reizigers en vervoerders/verladers eerst kiezen voor kortetermijnaanpassingen. Veranderingen in het gebruik van de infrastructuur liggen in die redenering meer voor de hand dan veranderingen in de activiteiten en in activiteitenlocaties, die vaak ingrijpender en structureler zijn. Zelfs met een worstcase-klimaatverandering (scenario WH) komen veel extreme weersomstandigheden in 2050 nog steeds zeer incidenteel voor. Op de langere termijn kan zeespiegelstijging wel een structurele invloed krijgen op de ruimtelijke inrichting, en daarmee op de locatiekeuzes (en de locaties voor infrastructuur). In hoofdstuk 6 gaan we dieper in op een grote zeespiegelstijging in relatie tot het mobiliteitssysteem.

De mogelijke en voor de hand liggende aanpassingen in mobiliteitskeuzes en in activiteiten staan **in rood** samengevat in tabel 5.3.

Aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur

- **Gebruik van de weg:** omrijden is, zeker als de schade aan en verminderde functionaliteit van de infrastructuur vooral lokaal is (bijvoorbeeld 1 weg of 1 brug), een voor de hand liggende adaptatiemaatregel. In veel andere gevallen ligt uitstellen of afstellen van een reis voor de hand; denk aan de situatie dat er hevige regen of storm wordt voorspeld of wanneer bekend is dat een weg tijdelijk is gestremd door een bermbrand of omgevallen boom op de weg. In plaats van te reizen kunnen mensen dan kiezen voor thuiswerken als dat mogelijk is. Als er beperkingen gelden aan het vervoerd gewicht, bijvoorbeeld bij een weg die verzakt, is het minder zwaar beladen van vrachtwagens ook een optie.
- **Gebruik van het spoor:** Bij het spoor is routekeuze ('omrijden') bij lokale schade of functiebeperking een optie, maar dan vooral voor reizigers en niet voor het spoorgoederenvervoer. Treinreizigers zullen vaak eerder kiezen voor een ander vervoermiddel (bijvoorbeeld bus, fiets, auto/taxi) dan voor een omrijroute per spoor. Omdat er via het spoor minder alternatieve routes zijn dan via de weg, zullen omrijroutes over het algemeen lang zijn. Vanuit de vervoerskant (bijvoorbeeld de NS) is het inzetten van vervangend busvervoer een mogelijke adaptatiemaatregel, maar dit werkt minder goed als een spoortraject onverwacht uitvalt. Het kost namelijk tijd en capaciteit om vervangend busvervoer te regelen.
- **Gebruik van vaarwegen:** Voor de binnenvaart is een verminderde bevaarbaarheid van rivieren door droogte (laagwater) het grootste negatieve effect dat de infrastructuur kan raken. Het kiezen van een andere vaarroute klinkt als een theoretisch interessante optie, maar voor vaarroutes over rivieren bestaat vaak geen goed alternatief. Het minder zwaar beladen van schepen is op de korte termijn de meest voor de hand liggende, en in de praktijk ook meest toegepaste, optie bij droogte. Als periodes met droogte frequenter gaan optreden, zouden ook structurelere wijzigingen kunnen optreden, zoals een modal shift naar het wegtransport. Voor de zeevaart kunnen rederijen (vaker) voor andere zeehavens kiezen als de keringen structureel vaker zouden moeten sluiten vanwege hoge waterstanden.
- **Gebruik van luchthavens:** Als een landingsbaan wordt getroffen door een negatief effect, zoals een verzakking door droogte of een overstroming, is de meest voor de hand liggende adaptatiemaatregel om, als dat mogelijk is, een andere baan te gebruiken voor het opstijgen en landen van vliegtuigen. Als de capaciteit hierdoor afneemt, kan dit leiden tot langere reistijden. Bij extreme weerscondities, zoals storm of mist, kunnen inkomende vliegtuigen uitwijken naar een andere luchthaven. Voor vertrekkende vliegtuigen is uitstel van de reis de meest geëigende optie vanuit het perspectief van de vervoerder (wat leidt tot bijvoorbeeld extra vertraging of uitval van een vlucht). Dit is voor de reiziger geen adaptatiemaatregel, omdat deze weinig keuzevrijheid heeft. Het overkomt de reiziger en leidt tot extra reistijd en ongemak. Als de vertraging lang gaat duren, kan een reiziger voor korte vliegafstanden (tot ongeveer 800 km) wel proberen de reis met de trein te maken.

Aanpassingen in activiteiten

Reizigers en vervoerders/verladers/producenten passen hun activiteiten (en de locaties daarvoor) waarschijnlijk pas aan als aanpassingen in het gebruik van infrastructuur niet goed mogelijk of te weinig effectief en efficiënt zijn. De belangrijkste opties zijn:

- **Thuiswerken:** Thuiswerken kan een interessante en relatief gemakkelijke keuze zijn voor een bepaalde groep werknemers om ongewenste weersomstandigheden (bijvoorbeeld code rood) te ontwijken.
- **Voorraadbeheer:** Het creëren van meer opslagcapaciteit is een mogelijke adaptatiemaatregel, waarmee voor bepaalde goederensoorten met het klimaat samenhangende verstoringen kunnen worden opgevangen. Dit speelt vooral een rol bij verladers en producenten die sterk afhankelijk zijn van de binnenvaart.

Klimaatthema		Negatieve effecten op de infrastructuur (uit hoofdstuk 4) en mogelijke adaptatiemaatregelen voor gebruik van de infrastructuur en activiteiten (in rood)			
		Wegverkeer- en vervoer	Binnen- en zeevaart	Treinverkeer en -vervoer	Luchtvaart
Water- overlast	Extreme neerslag (buien)	Plasvorming op de weg • Snelheid aanpassen	Onvoldoende doorvaarthoogte bij bruggen door hoge rivierafvoeren • Vaker brug openen • Andere route nemen	Onder water staan van spoor, stationstunnels, spoortunnels en overwegen; wateroverlast in stationsgebied; waterover- last technische installaties • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen • Uitstellen reis • Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	
		Erosie en afschuiving van weg- talud door afstromend regenwater in extreme bui • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen • Minder zwaar beladen van vracht- wagens preventief ter voorkoming extra schade (vervoerder)		Erosie en afschuiving van spoortalud door afstromend regenwater in extreme bui • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen • Uitstellen reis • Kortere, minder zware treinen preventief ter voorkoming extra schade (vervoerder) • Inzet alternatief bus vervoer (vervoerder)	
	Stijging grond- waterstand (incl. zoute kwel door zeespiegel- stijging)	Opdrijven van tunnels, verdiepte liggingen, aquaducten en licht- gewichtconstructies • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen		Opdrijven van onderdoorgangen • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen • Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	
Over- stromen		Overstromen weg als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren) • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen • Wachten/uitstellen reis	• Andere route nemen door vaarbeperking • Uitstellen (vervolg) reis • Vaker een andere zee- haven kiezen bij frequenter sluiten van zeekeringen	Overstromen spoor als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren); extreme schade; uitval energievoorziening • Andere route nemen • Andere vervoerwijze nemen • Uitstellen reis • Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	Overstromen landingsbanen als gevolg van inundatie van watersystemen (beken en rivieren) • Wachten/uitstellen (vooral bij vertrek) • Andere landingsbaan • Andere luchthaven

Klimaat-thema	Negatieve effecten op de infrastructuur (uit hoofdstuk 4) en mogelijke adaptatiemaatregelen voor gebruik van de infrastructuur en activiteiten (in rood)			
	Wegverkeer- en vervoer	Binnen- en zeevaart	Treinverkeer en -vervoer	Luchtvaart
Hitte	Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen door uitzetting - Andere route nemen - Andere vervoerwijze nemen	Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen door uitzetting - Uitstellen (vervolg) reis - Andere route nemen - Lading via andere vervoerwijze	Storingen in installaties, niet kunnen sluiten beweegbare spoorbruggen door uitzetting, stroomtekort door airco in treinen - Andere route nemen - Andere vervoerwijze nemen - Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	Reizigers minder lang laten wachten in vliegtuig voor vertrek
Droogte	Ongelijke zakking door bodemdaling - Andere route nemen - Andere vervoerwijze nemen	Onvoldoende vaardiepte door lage rivierafvoeren - Minder zwaar beladen - Andere route nemen - Uitstellen (vervolg) reis - Lading via andere vervoerwijze - Nieuwe schepen met minder diepgang - Ander voorraadbeheer (verlader/producent)	Ongelijke zakking door bodemdaling; verminderde baanstabieleit - Andere route nemen - Andere vervoerwijze nemen - Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	Ongelijke zakking door bodemdaling - Andere start-/landingsbaan - Andere luchthaven
	Bos- en bermbranden - Andere route nemen - Uitstellen reis - Andere vervoerwijze nemen	Onvoldoende vaardiepte door erosie rivierbodem - Minder zwaar beladen - Andere route nemen - Uitstellen (vervolg) reis - Lading via andere vervoerwijze - Nieuwe schepen met minder diepgang - Ander voorraadbeheer (verlader/producent)	Bos- en bermbranden - Andere route nemen - Uitstellen reis - Andere vervoerwijze nemen - Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	
		Onvoldoende waterbeschikbaarheid bij sluizen Wachten als defaultoptie tenzij het dagen duurt		
Storm & bliksem	- Reis uitstellen/thuiswerken - Andere vervoerwijze nemen	Uitstellen (vervolg) reis	Bomen op spoor; trajecten hebben last van storm (beperking treindienst); spoorelektronica gevoelig voor bliksem - Andere route nemen - Reis uitstellen/thuiswerken - Andere vervoerwijze nemen - Inzet alternatief busvervoer (vervoerder)	- Uitstellen (vooral bij vertrek) - Andere landingsbaan (windrichting) - Andere luchthaven

Tabel 5.3 Samenvattende tabel met mogelijke adaptatiemaatregelen voor het gebruik van de infrastructuur en activiteiten in relatie tot negatieve effecten op de infrastructuur.

Vijf discussievragen voor beleid

In dit kader formuleren wij 5 discussievragen om beleidsmakers te inspireren die zich bezighouden met de relatie tussen klimaat, gebruik van de infrastructuur, activiteiten en de locaties waar infrastructuurgebruiker die activiteiten ondernemen.

- 1 *Tijdelijk/incidenteel en permanent/structureel*: De aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur, beschreven in dit hoofdstuk, zijn vooral tijdelijke en incidentele keuzes als gevolg van (extreme) weersomstandigheden en de negatieve effecten die daardoor ontstaan (bijvoorbeeld slecht zicht door extreme regenval). De frequentie van extreme weersomstandigheden kan door klimaatverandering veranderen. Is er een kantelpunt waarbij het weer (door klimaatverandering) zo sterk is veranderd dat mensen en bedrijven structureel andere en permanentere, maar soms ook ongewenste²⁷ keuzes maken in het gebruik van de infrastructuur? Waar ligt dit kantelpunt voor de verschillende actoren?
- 2 *Verschillen tussen bedrijven en burgers*: Vervoerders/verladers denken mogelijk verder en rationeler vooruit met het oog op toekomstige groeikansen/business cases dan burgers/reizigers. Zijn permanentere/structurele veranderingen als gevolg van klimaatverandering inderdaad vaker en eerder aan de orde voor bedrijven dan voor burgers/reizigers? Wat zijn de overwegingen per (type) actor in termen van kosten en vestigingsplaatsfactoren?
- 3 *Afhankelijkheden binnen het mobiliteitssysteem*: Wat zijn criteria om aanpassingen aan de infrastructuur (hoofdstuk 4, paragraaf 4.6 en 4.7), zoals beheer en onderhoud of vernieuwing, af te wegen tegen aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur en activiteiten, en wie maakt deze afweging?
- 4 *Afweging tussen momenten van aanpassing*: Aanpassingskosten kunnen worden onderverdeeld naar directe kosten van het optredende negatieve effect, kosten ter preventie (vooraf) en herstelkosten (achteraf) (zie bijlage B). Hoe wordt de afweging gemaakt tussen preventie, herstel en het ondergaan/accepteren van effecten, en wie maakt deze afweging? Kiest de overheid bijvoorbeeld voor de reparatie van een verzakte weg of neemt zij maatregelen om de kans hierop bij voorbaat te verkleinen? Of: Wat is de willingness-to-pay van mensen en bedrijven voor adaptatiemaatregelen om zo (onzekere) negatieve effecten van klimaat te voorkomen? Een voorbeeld van zo'n preventieve adaptatiemaatregel is het verhuizen naar een regio waar negatieve effecten minder vaak zullen voorkomen.
- 5 *Rolverdeling actoren*: Treden er ook veranderingen op in de rolverdeling van actoren bij (mogelijk optredende) effecten van het klimaat op het gebruik van de infrastructuur: de overheid past de infrastructuur aan, bedrijven en mensen hun gebruik van de infrastructuur en activiteiten? Welke rol kan en wil de overheid spelen bij het beïnvloeden van het gebruik van de infrastructuur en van de activiteiten van mensen en bedrijven?

²⁷ Zoals in paragraaf 5.2 beschreven, kan klimaatverandering er in de komende decennia toe leiden dat langere periodes met laagwater vaker/structureel voorkomen. Tot welke afwegingen in de binnenvaartsector leidt dit? Kan deze ontwikkeling ervoor zorgen dat er een (niet-gewenste, maar noodzakelijke) reverse modal shift ontstaat van water naar weg en spoor? Wat is daarvoor het kantelpunt? Ontstaan er dan capaciteitsproblemen in andere netwerken? In hoeverre kunnen innovatie in laagwaterbestendige/kleinere schepen en het gebruik van voorspellende data een mogelijke modal shift voorkomen?

6 Betekenis grote zeespiegelstijging voor het mobiliteitssysteem

6.1 Inleiding

Het Deltaprogramma houdt vooralsnog rekening met een zeespiegelstijging van maximaal 1 m aan het eind van deze eeuw (IenW, 2019). Er zijn echter aanwijzingen dat de zeespiegel na 2050 versneld kan gaan stijgen en eind van deze eeuw een hoger niveau bereikt dan het Deltaprogramma veronderstelt, waarna hij nog verder doorstijgt (Haasnoot et al., 2018). Deltares (Haasnoot et al., 2019) heeft 4 adaptatiestrategieën beschreven om te reageren op een mogelijk grote zeespiegelstijging van 2-4 m in de komende 100 tot 200 jaar. De 4 strategieën die Deltares beschrijft, zijn vrij abstract en algemeen van aard. Ze gaan dan ook niet in op de gevolgen voor specifieke sectoren zoals industrie, landbouw, gebouwde omgeving of mobiliteit. Dit hoofdstuk is een eerste aanzet om de gevolgen van de 4 strategieën van Deltares voor het mobiliteitssysteem dieper te doordenken: hoe beïnvloeden ze het landgebruik en vervolgens ook de andere elementen van het mobiliteitssysteem: de activiteiten van mensen en bedrijven, de infrastructuur en het gebruik van die infrastructuur (zie het conceptueel denkkader in hoofdstuk 3, figuur 3.2)?

Paragraaf 6.2 beschrijft de belangrijkste algemene kenmerken van de 4 adaptatiestrategieën van Deltares. In paragraaf 6.3 gaan we per strategie in op de globale gevolgen voor het mobiliteitssysteem. In paragraaf 6.4 doordenken we dit dieper en werpen we per adaptatiestrategie ‘inhoudelijke kennisvragen’ op. Paragraaf 6.5 sluit af met conclusies en 5 discussievragen voor het beleid, als inspiratie voor beleidsmakers die zich bezighouden met de aanpassing van het mobiliteitssysteem aan de zeespiegelstijging.

6.2 De 4 adaptatiestrategieën

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definieert 4 adaptatiestrategieën om te reageren op de zeespiegelstijging: *protection*, *accommodation*, *advance* en *retreat* (IPCC, 2019a). Op basis hiervan heeft Deltares 4 oplossingsrichtingen²⁸ voor Nederland geconstrueerd (Haasnoot et al., 2019).²⁹

²⁸ We gebruiken afwisselend de termen oplossingsrichtingen, adaptatiestrategieën en adaptatiepaden, maar bedoelen daarmee hetzelfde.

²⁹ De strategieën van IPCC en van Deltares hangen als volgt samen:

- Protection is de huidige strategie die Nederland toepast. Een belangrijke vraag binnen deze strategie is of de rivieren in open verbinding met de zee moeten staan of niet. Daarom heeft Deltares protection gesplitst in 2 adaptatiepaden: ‘beschermen-open’ en ‘beschermen-gesloten’.
- Advance staat gelijk aan ‘zeewaarts’ en past in de Nederlandse traditie van landwinning ten opzichte van water.
- ‘Meebewegen’ staat voor het ruimte geven aan water en is een combinatie van accommodation en retreat. Omdat beide een breuk zijn met de huidige strategie en ze goed gecombineerd kunnen worden, heeft Deltares ze samengevoegd in 1 adaptatiepad.

Samen beschrijven deze in grote lijnen de oplossingsruimte voor de Nederlandse delta. Het gaat om:

- **Beschermen-gesloten:** Beschermen van de kust tegen overstromingen en erosie middels harde of zachte maatregelen, zoals keringen, zandsuppletie of wetlands. Rivierarmen worden bij zee afgesloten (met dammen of stormvloedkeringen). Rivierafvoeren worden door pompen en spuisluizen in zee geloosd.
- **Beschermen-open:** Idem als beschermen-gesloten, maar de rivieren blijven in open verbinding met de zee. Rivierdijken moeten daarom worden opgehoogd.
- **Zeewaarts:** Creëren van nieuw, hoger en zeewaarts gelegen land om de delta te beschermen tegen de gevolgen van overstroming.
- **Meebewegen:** Verkleinen van de kwetsbaarheid voor de gevolgen van een hogere zeespiegelstijging door water- of zouttolerant landgebruik (bijvoorbeeld gebouwen op palen), ophogen van land, ruimtelijke planning en/of migratie.

Naast de adaptatiestrategieën van Deltares, die centraal staan in dit hoofdstuk, heeft ook Wageningen University & Research een bekend toekomstbeeld ontwikkeld voor de situatie met zeespiegelstijging: 'Een natuurlijkere toekomst voor Nederland in 2120' (WUR, 2019). Met dit beeld schetst de WUR een toekomst waarin het leven met water en een natuurinclusieve samenleving centraal staan. In bijlage H gaan we hier kort verder op in en leggen we de relatie met het mobiliteitssysteem.

Hoe verhouden de 4 adaptatiestrategieën zich tot de huidige situatie?

De huidige status van de Rijn-Maasdelta is een combinatie van 'beschermen-open' (Eems-Dollard, Rijnmond, Oosterschelde en Westerschelde) en 'beschermen-gesloten' (IJsselmeer, Grevelingen, Haringvliet, IJmuiden, Afsluitdijk, Friese en Groningse kust).

Bij een stijgende zeespiegel zullen de afsluitbare stormvloedkeringen steeds vaker sluiten. Op enig moment komt voor Rijnmond en Oosterschelde, en wellicht ook Westerschelde, dan de keuze voor 'beschermen-gesloten' in beeld. Bijvoorbeeld wanneer de Oosterschelddam en de stormvloedkering zo vaak sluiten dat de keringen (deels) hun functionaliteit verliezen (Haasnoot et al., 2019).

Bij nog verdere stijging van de zeespiegel zijn nieuwe keringen en grotere jaarlijkse zandsuppleties nodig. Als we in die situatie blijven kiezen voor 'beschermen-gesloten', zijn steeds hogere en bredere dijken nodig; een combinatie met de aanleg van megaterpen, dus aanpassing van gebieden aan incidentele lokale overstromingen (uit het adaptatiepad 'meebewegen'), wordt dan logisch, aldus Deltares. Een andere keuze, in plaats van 'beschermen', is om over te stappen naar 'zeewaarts', waarbij de kustbescherming meer zeewaarts komt te liggen.

De 4 strategieën verschillen in de mate van zeespiegelstijging die ze aankunnen

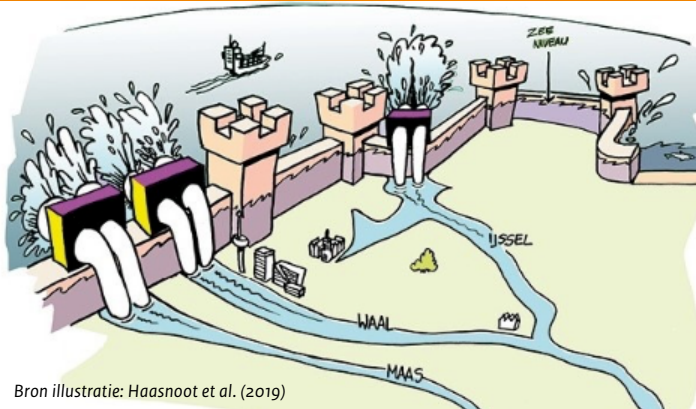
Alle 4 de richtingen kunnen een rol spelen bij de regionale invulling van de aanpassing aan een (hoge) zeespiegelstijging. In de praktijk zal waarschijnlijk eerder een combinatie gekozen worden. Hoeveel stijging een oplossingsrichting aan kan, hangt in sterke mate af van het ontwerp (zie tekstbox 6.1 'De 4 strategieën in meer detail'). Technisch is er veel mogelijk, maar in alle gevallen zullen grotere inspanningen nodig zijn naarmate de zeespiegel verder stijgt. Beperkingen van de oplossingsrichtingen komen vooral voort uit de beschikbaarheid van hulpmiddelen (bijvoorbeeld zand), ruimte, maatschappelijk draagvlak en kosten. Ook de benodigde tijd voor planning en implementatie van maatregelen legt beperkingen op, zowel voor de technische als voor de maatschappelijke haalbaarheid. Dit geldt met name voor grote infrastructurele werken. Kansen kunnen ontstaan door innovaties en meekoppeling met andere socio-economische ontwikkelingen (Haasnoot et al., 2019), zoals herstructurering van de landbouw, adaptief bouwen en energietransitie.

Bescherming gesloten



Beschermen-gesloten:

beschermen van de kust tegen overstromingen en erosie middels harde of zachte maatregelen, zoals keringen, zandsuppletie of wetlands. Rivierarmen worden afgesloten (met dammen of stormvloedkeringen).



Bron illustratie: Haasnoot et al. (2019)

Mate van zeespiegelstijging

- Tot enkele meters
- Stijgsnelheid kan beperking worden voor zandsuppletie
- Zoutindringing niet geheel te voorkomen -> mogelijk aanpassing landgebruik en zoetwatervoorziening in kustzone nodig

Technische haalbaarheid

- Beschikbaarheid zand en opschaalbaarheid zandsuppletie onbekend

Maatschappelijke haalbaarheid

- Afsluiten Rijnmond en Oosterscheldekering zal op weerstand stuiten
- Steeds hogere kosten en meer ruimtegebruik voor dijkverhoging

Adaptiviteit

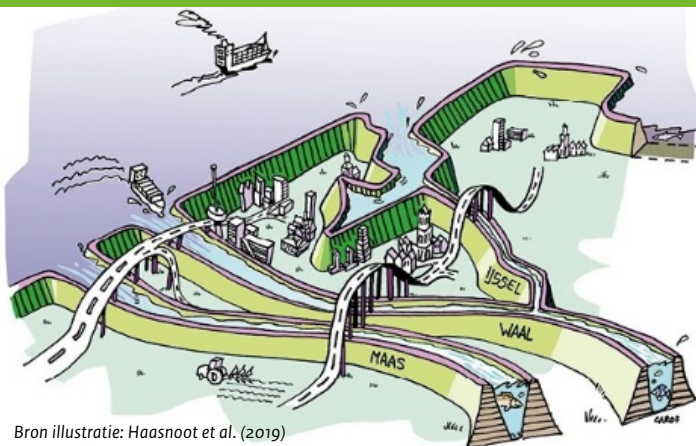
- Komende 20 jaar ruimte voor dijken of voor rivier nodig

Bescherming open



Beschermen-open:

als beschermen-open, maar de rivieren blijven in open verbinding met de zee.



Bron illustratie: Haasnoot et al. (2019)

Mate van zeespiegelstijging

- Beperkt (ca 1 m) voor huidige keringen, met aanpassing sluitpeil tot 1 a 2 m
- Stijgsnelheid kan beperking worden voor zandsuppletie
- Zoutindringing maakt aanpassing landgebruik kustzone en benedenrivierengebied nodig

Technische haalbaarheid

- Beschikbaarheid zand en opschaalbaarheid zandsuppletie onbekend

Maatschappelijke haalbaarheid

- Steeds hogere kosten en meer ruimtegebruik voor dijkverhoging

Adaptiviteit

- Komende 20 jaar ruimte voor dijken of voor rivier nodig

Zeewaarts



Zeewaarts:

creëren van nieuw, hoger en zeewaarts gelegen land om de delta tegen gevolgen van overstroming te beschermen.



Bron illustratie: Haasnoot et al. (2019)

Mate van zeespiegelstijging

- Beperkt (ca. 1 m) bij open variant met eilanden; enkele meters bij gesloten variant of landuitbreiding
- Stijgsnelheid kan te hoog worden voor zandsuppletie
- Bij eilanden-gesloten kans voor extra zoetwaterberging in randmeer

Technische haalbaarheid

- Zeer veel zand nodig voor land en onderhouden nieuwe kust
- Veel pompcapaciteit en bergingsruimte nodig voor rivieren
- Bij eilanden-gesloten zoutindringing in kustzone, maar wel kans voor beperken zoutindringing rivieren

Maatschappelijke haalbaarheid

- Het gaat om een mega-investering

Adaptiviteit

- Komende 20 jaar experimenteren met eilanden
- Kan in stappen uitgevoerd worden, maar dan beperkt effectief; daarna moeilijk aan te passen
- Behoeft aan sociaaleconomische ontwikkelingen kan trigger zijn, bijv. vliegveld in zee, haven richting zee, eilanden voor België

Meebewegen



Meebewegen:

verkleinen van de kwetsbaarheid voor de gevolgen van een hogere zeespiegelstijging door water- of zouttolerant landgebruik (zoals gebouwen op palen), ophogen van land, ruimtelijke planning en migratie.



Bron illustratie: Haasnoot et al. (2019)

Mate van zeespiegelstijging

- Beperkt in geval van palen of terpen
- Enkele cm/j bij natuurlijke landspiegelstijging
- Veel bij drijvende bebouwing of migratie naar hoger gelegen delen van Nederland

Technische haalbaarheid

- Innovatie nodig voor ophogen van bewoond gebied (terpen of palen)
- Natuurlijke landspiegelstijging is alleen lokaal mogelijk bij voldoende sedimentaanvoer, bijvoorbeeld in Zuidwest-Nederland
- Bij drijvende bebouwing en terpen is ruimte nodig om tijdelijk heen te gaan terwijl gebieden worden opgehoogd
- Bij migratie is ruimte nodig elders in Nederland of buitenland

Maatschappelijke haalbaarheid

- Vooral lokaal, bij nieuwbouw
- Palen of terpen zijn alleen acceptabel als overstromingen tijdelijk zijn
- Opgeven land zal op veel weerstand stuiten

Adaptiviteit

- Komende 20 jaar: overwegen bij nieuwbouw, experimenteren met ander landgebruik, landspiegelstijging
- Beperkt aanpasbaar: zodra er bebouwing is ontstaan is verder ophogen niet eenvoudig

Beschermen (zowel gesloten als open) ligt het dichtst bij de huidige strategie.

Zowel in **beschermen-open** als in **beschermen-gesloten** moet in ieder geval de kuststrook beschermd worden. Het verhogen en het verstevigen van de huidige dijken kost ruimte (tenzij wordt gekozen voor damwanden). In principe kunnen dijken gefaseerd worden opgehoogd, maar doorgaans is het efficiënter om dit in een keer te doen. Dijken hoeven niet alleen water te keren, maar kunnen meerdere functies hebben. Denk aan de aanleg van een extra brede en sterke (overslagbestendige) dijk waarop huizen gebouwd kunnen worden. Ook kan een dijk aantrekkelijk worden gemaakt door deze te combineren met een boulevard. En in combinatie met vegetatie die de dijk extra tegen golven beschermt, kan de natuurwaarde worden verhoogd (Haasnoot et al., 2019).

Bij een stijgende zeespiegel is bij 'beschermen-gesloten' en 'beschermen-open' steeds meer ruimte nodig voor de keringen en in 'beschermen-gesloten' ook voor het tijdelijk bergen van rivierwater in een periode van hoge afvoer. 'Beschermen-gesloten' kan meer zeespiegelstijging aan (enkele meters) dan 'beschermen-open' (slechts 1 tot maximaal 2 m (bij verhogen van het sluitpeil van afsluitbare keringen en ophogen van de achterliggende dijken) stijging). Bij 'beschermen-gesloten' is een combinatie van grote pompcapaciteit (ordegrootte 3.000 m³/s, vergelijkbaar met gemiddelde rivierafvoer) en ruimte voor berging met spuien nodig om hoge rivierafvoeren de delta uit te krijgen. De Maeslantkering gaat bij 1 m stijging 3 keer per jaar dicht, en bij 1,5 m 30 keer per jaar. Oosterscheldekering gaat bij 1 m stijging 45 keer per jaar dicht, en bij 1,3 m stijging gaat ze permanent dicht. 'Beschermen-open' leidt tot steeds hogere kosten om de rivierdijken te verhogen en te versterken.³⁰

Zeewaarts kan vooral veel zeespiegelstijging aan als dit een gesloten variant is waarbij keringen de eilanden voor de kust verbinden. Zonder verbinding (tussen de eilanden en met het vasteland) draagt 'zeewaarts' nauwelijks bij aan adaptatie aan de zeespiegelstijging. Voor de aanleg van de eilanden is extreem veel zand nodig (mogelijk in de orde van 100 keer het volume dat gebruikt is bij de aanleg van de tweede Maasvlakte) en deze komen te liggen in het gebied waar nu zand wordt gewonnen. Nieuw land en een kustrandmeer bieden kansen voor economische ontwikkeling en zoetwatervoorziening, maar hebben grote negatieve gevolgen voor natuur, scheepvaart en visserij.

Meebewegen in de vorm van water- en zouttolerant landgebruik kan een substantiële zeespiegelstijging aan. In combinatie met landspiegelstijging (ophoging) en migratie is aanpassing aan een (nog) hogere zeespiegelstijging mogelijk. Een eersteordeschatting van de maximale snelheid waarmee natuurlijke landspiegelstijging gerealiseerd kan worden, is enkele centimeters per jaar in watersystemen waarin veel zand en slib in beweging is; deze waarde is sterk locatieafhankelijk en met name kansrijk in gebieden met een hoog sedimentgehalte (Eems Dollard, Westerschelde). Meebewegen is in principe een flexibel scenario, maar als er eenmaal is gekozen voor ophogen, is er daarna minder flexibiliteit (het is lastig om steeds opnieuw op te hogen).

6.3 De adaptatiestrategieën en globale effecten op het mobiliteitssysteem

De 4 adaptatiepaden zullen, als ze werkelijkheid worden, elk hun specifieke effecten hebben op het mobiliteitssysteem. In deze paragraaf verkennen we deze effecten globaal.

Adaptatiepaden beschermen-open en beschermen-gesloten

De beide adaptatiepaden 'beschermen' hebben een kleiner effect op de ruimtelijke inrichting van Nederland dan de andere 2 adaptatiepaden. Wel worden bij 'beschermen' de dijken breder, wat vooral in het 'beschermen-open'-pad een zeer groot ruimtebeslag met zich mee kan brengen. Mogelijk kan de ruimte op de dijken gebruikt worden voor bebouwing, zodat daarmee ruimte wordt teruggewonnen (Haasnoot et al., 2019). Ten opzichte van 'zeewaarts' en 'meebewegen' is er in de 'beschermen'-opties minder noodzaak om landgebonden mobiliteit en activiteiten te veranderen. Voor de scheepvaart zullen er wel grote veranderingen optreden omdat hoogwaterkeringen (veel) vaker moeten sluiten naarmate de zeespiegel stijgt.

³⁰ Langs de IJssel is bijvoorbeeld 800 tot 4.700 ha nodig als het IJsselmeer een open verbinding met zee zou krijgen en daardoor mee stijgt met de zeespiegel; de range 800-4700 ha is gerelateerd aan een zeespiegelstijging van 1-6 m.

Adaptatiepad zeewaarts

Dit adaptatiepad betekent de aanleg van nieuw land zeewaarts vanaf de kust of de aanleg van eilanden voor de kust. Deze eilanden beschermen niet alleen de kust, maar bieden een kans voor nieuwe of verplaatste activiteiten, zoals recreëren (in het gevormde randmeer tussen de huidige kustlijn en de eilanden) en wonen en werken. De ruimtelijke ordening van het vasteland verandert waarschijnlijk niet veel, hoewel sommige infrastructuur en activiteiten, zoals zeehavens, wel van het vaste land naar de eilanden kunnen verschuiven. Maar in grote lijnen zullen de fysieke infrastructuur, het gebruik van de infrastructuur en de activiteiten op het vaste land naar verwachting weinig veranderen. Tussen de eilanden onderling en tussen de eilanden en de kust ontstaan nieuwe vervoersstromen waarvoor nieuwe infrastructuur (bruggen, dijken) nodig is (die ook huidige waardevolle duingebieden doorsnijdt), al is ook vervoer over water en door de lucht een mogelijkheid. Ook de aanleg van een zee- of luchthaven op een van de eilanden is een optie (zie ook bijlage I).

Veel ruimte op zee is al bezet, bijvoorbeeld voor visserij, scheepvaart en windparken. Dit ruimtebeslag kan nu en in de toekomst conflicteren met de aanleg van nieuwe eilanden. Bovendien komen de eilanden in de strategie van Deltares te liggen op de huidige zandwinlocaties, zodat zand (ook voor aanleg van de eilanden) elders gewonnen moet worden.

Adaptatiepad meebewegen

In het adaptatiepad 'meebewegen' wordt veel ruimte geboden aan de zee en de rivieren. Het pad leunt op het principe van 'leven met water'. Dit adaptatiepad bestaat uit verschillende opties. De eerste is de ontwikkeling van drijvende bebouwing (huizen, steden) op het water, zoals bijvoorbeeld in Zeeburg in Amsterdam, en bouwen op opgehoogde stukken land, zoals terpen. De tweede optie betreft verplaatsing ('migratie') naar de hogere delen van Nederland (het oosten).

'Meebewegen' brengt een grote wijziging van de ruimtelijke ordening van Nederland met zich mee, en daarmee ook van de activiteiten en (het gebruik van) de infrastructuur. Mogelijke veranderingen op het gebied van (het gebruik van) de infrastructuur zijn: meer verplaatsingen over water, en het met bruggen verbinden van (delen van) steden die op terpen zijn gebouwd. Verplaatsing van mensen en activiteiten naar hoger gelegen delen van Nederland leidt daar tot een grotere dichtheid van bebouwing, die op haar beurt de vraag naar infrastructuur verandert. Een dergelijke verplaatsing naar hoger gelegen gebieden (op de lange termijn) is tegengesteld aan de in paragraaf 3.3 geschetste trend waar het aantal inwoners in de Randstad, een lager gelegen gedeelte van Nederland, tot 2050 nog 1,5 keer zo snel groeit als de gehele Nederlandse bevolking.

6.4 De adaptatiestrategieën en concrete vragen over het effect op het mobiliteitssysteem

Haasnoot et al. (2019) zien geen reden om een van de 4 paden direct af te laten vallen als niet realistisch. Ook is er geen pad dat volgens hen nu al de voorkeur heeft. Kiezen is volgens Deltares bovendien nog niet nodig: er is tijd om de onzekerheid over de toekomstige zeespiegelstijging te verkleinen door monitoring en onderzoek en om de mogelijke gevolgen beter te kwantificeren en oplossingsrichtingen nader uit te werken. Deltares denkt dat de uiteindelijke keuze voor een bepaalde richting ook getriggerd kan worden door een toevallige gebeurtenis, zoals een onverwacht grote overstroming, een economische crisis of een pandemie. Ook keuzes op andere terreinen, zoals de energietransitie en woningbouw,³¹ kunnen volgens Deltares voorsorteren op een bepaalde oplossingsrichting. Dit geldt wellicht ook voor keuzes op het gebied van mobiliteit en infrastructuur, zoals de aanleg van nieuwe infrastructuur in de kustregio.

³¹ Bijvoorbeeld het plaatsen van niet-verwijderbare windmolens in zee op locaties waar in de toekomst mogelijk eilanden komen in de oplossingsrichting 'zeewaarts' of traditionele bouwprojecten in laaggelegen gebieden nabij waterkeringen, waardoor het niet mogelijk is keringen uit te breiden of ruimte te geven voor de rivier.

In de verkenning gaat Deltares niet in op de gevolgen van de adaptatiestrategieën voor het mobiliteitsdomein. Dat is ook logisch, want de strategieën zijn generiek van aard en hebben vooral als doel om de totale oplossingsruimte van een sterke zeespiegelstijging in beeld te brengen. Voor het toekomstige keuzeprocess kan het goed zijn om nu al wél de consequenties van de paden voor het mobiliteitssysteem (infrastructuur, gebruik van de infrastructuur en activiteiten van mensen en bedrijven) te doordenken. In deze paragraaf biedt het KiM hiervoor een eerste aanzet, in de vorm van inhoudelijke vragen per adaptatiepad. Zie de tekstboxen 6.2, 6.3 en 6.4.

Het onderscheid met de 5 discussievragen voor beleid aan het eind van de hoofdstukken 4, 5 en 6, is dat we hier kennisvragen presenteren, die dus niet specifiek gericht zijn op beleidsmakers. Het antwoord op de kennisvragen weten we niet. Wel geven ze naar het inzicht van het KiM een goed beeld van de thema's die op mobiliteitsgebied relevant zijn bij het kiezen en invullen van de adaptatiestrategieën voor een grote zeespiegelstijging.

Tekstbox 6.2

Kennisvragen bij 'beschermen-gesloten' en 'beschermen-open'

Effect van dijkophogingen

- Welke gebieden worden geraakt door de dijkophogingen en -verbredingen en welke vervoersstromen worden daardoor beïnvloed? Bijvoorbeeld welke spoorlijnen en wegen liggen op of nabij dijken en dammen? Hoe maken we de afweging om welke spoorlijnen en wegen te verhogen of te verleggen?
- Wat zijn de gevolgen voor de bereikbaarheid van gebieden als de dijken worden opgehoogd? Ontstaan er nieuwe barrières, bijvoorbeeld wanneer een aantal bruggen niet wordt opgehoogd maar wordt verwijderd om hoge aanpassingskosten te vermijden?

Effect van sluisen

- Hoe vaak komen er schutbeperkingen bij de zeeluisen bij IJmuiden en Terneuzen en de Stevin- en Lorentzsluisen om zoutindringing te voorkomen (zie hoofdstuk 4)? En in hoeverre hindert dat de scheepvaart?

Effect op binnenvaart

- Het getij komt verder landinwaarts. Wat betekent dit voor de betrouwbaarheid en punctualiteit van de binnenvaart? Veranderingen in de waterstanden kunnen slecht uitpakken voor de haventoeegang en de bevaarbaarheid van de vaarwegen.³²
- Hoe gaat de Nieuwe Waterweg ingericht worden in de situatie 'beschermen-gesloten' en wat is de impact hiervan op de scheepvaart: is de Nieuwe Waterweg nog wel bruikbaar voor de scheepvaart? De Maeslantkering gaat bij 1 m stijging 3 keer per jaar dicht, bij 1,5 m stijging 30 keer per jaar.
- Voor nieuwe of te renoveren bruggen gaat Rijkswaterstaat uit van een 25 cm hoger water-niveau in 2100.³³ Is dat voldoende?

Gevolgen voor havens

- Wat zijn de gevolgen voor zeehavens en binnenhavens? Hoe kunnen ze worden beschermd en hoe blijven ze toegankelijk? Zeespiegelstijging zorgt voor vakere en langere sluiting van keringen zoals de Maeslantkering. Kades van zeehavens zullen eerder onderlopen.³⁴ Niet direct aan zee gelegen havens moeten ervoor zorgen dat hun primaire waterkering bestand is tegen zowel zeespiegelstijging als hoge rivierstanden.

³² <https://klimaatadaptatienederland.nl/thema-sector/infrastructuur/zeehavens/>

³³ Informatie van Rijkswaterstaat.

³⁴ <https://klimaatadaptatienederland.nl/thema-sector/infrastructuur/zeehavens/>

Verbindingen tussen en naar de eilanden

- Hoeveel en welk type verbindingen zijn nodig om de eilanden onderling te verbinden en de eilanden met de kust? Krijgt elk eiland een eigen (binnen)haven voor vervoer van personen en goederen? Wordt vervoer over water dominant? Biedt dit adaptatiepad kansen voor vervoer met drones en luchttaxi's? Is het niet eenvoudiger om voor 1 groot eiland te kiezen dan voor een reeks kleinere eilanden die onderling verbonden moeten zijn?
- Hoe hard gaat het waaien op de nieuwe eilanden en wat betekent harde wind voor de aanleg en het gebruik van infrastructuur op de eilanden (zie ook bijlage H)?
- Welke nieuwe verkeersinfrastructuur is nodig op de eilanden?

Bereikbaarheid (huidige) havens

- Als de verbindingen tussen de eilanden gesloten zijn (met stormvloedkeringen), hoe blijven dan de huidige Nederlandse zeehavens bereikbaar? Is de aanleg van een zeesluis in een of meer van de verbindingen een optie? Of is het verstandiger een nieuwe zeehaven op een van de eilanden aan te leggen om zo de bereikbaarheid vanuit zee zeker te stellen?

Effecten op zeevaart en andere functies op de Noordzee en de kust

- Wat betekent deze optie voor de zeevaart op de Noordzee, aangezien hiervoor minder ruimte overblijft?
- Op de Noordzee worden al veel functies verenigd (visserij, energie, zandwinning, enzovoort). Past dit allemaal nog?
- Wat betekent dit adaptatiepad voor de huidige duinen en de Waddeneilanden? Worden hier andere activiteiten mogelijk, is een andere infrastructuur nodig om ze bereikbaar te houden, en dergelijke?

Maatschappelijk draagvlak

- Wat is het maatschappelijk draagvlak voor dit adaptatiepad? Er zijn hoge kosten aan verbonden. Helpt het voor het draagvlak dat de ruimtelijke ordening en het mobiliteitssysteem op het vasteland nauwelijks hoeven te veranderen?

Aanpassingen aan infrastructuur

- Dit adaptatiepad vraagt om veel flexibiliteit om mee te bewegen met het water. Is dat technisch haalbaar? Deltares zelf zegt hierover dat voor dit adaptatiepad veel innovatie nodig is. Zowel het bouwen op het water als de ophoging van grote gebieden voor de bouw van steden en om deze onderling te verbinden zijn technisch lastig.
- Hoe is de infrastructuur flexibel te maken: wordt die ook drijvend gemaakt en hoe gaat dat in zijn werk? Wat zijn de verbindingen tussen de terpen: is hier sprake van vervoer over water?
- Wat is vanuit het oogpunt van mobiliteit de beste keuze: het bouwen op water (drijven) of het ophogen van land?

Waar nog wel beschermen

- Welke gebieden worden verlaten (opgeofferd aan het water) en welke gebieden worden extra beschermd? Welke argumenten spelen een rol bij deze afweging, zoals economisch zwaartepunt, bebouwingsdichtheid, aanwezigheid van infrastructuur en preventiekosten van een overstroming (zie ook bijlage B, voorbeeld 3)? Gaat bijvoorbeeld de bescherming van de Randstad voor de bescherming van andere gebieden?

Effecten van migratie

- Welke gevolgen voor de infrastructuur en de mobiliteit heeft de migratie van de bevolking naar de hoger gelegen delen van Nederland: voldoet de bestaande infrastructuur (als we die efficiënter benutten) of is er meer infrastructuur nodig?
- Wat is het draagvlak voor dit adaptatiepad? Het draagvlak om naar hoger gelegen gedeelten van Nederland te (moeten) verhuizen zal niet altijd groot zijn.
- Wanneer Nederland zich terugtrekt naar hoger gelegen gebieden en het westen vanuit zee overstroomt, wat gebeurt er dan met de bestaande steden in het westen zoals Rotterdam, Delft en Leiden?
- Als we ervan uitgaan dat de Nederlandse bevolking in deze eeuw in omvang gaat krimpen, is dit adaptatiepad dan wel de grote inspanning waard? Straks zijn er sowieso minder woningen nodig. Welke rol kan verhuizen naar het buitenland in dit adaptatiepad spelen in plaats van binnenlandse migratie?

6.5 Conclusies: adaptatiestrategieën en discussievragen voor beleid

In dit hoofdstuk hebben we ons gericht op de gevolgen van een sterke zeespiegelstijging en de mogelijke adaptatiestrategieën hiervoor, op het mobiliteitssysteem. We hebben de 4 oplossingsrichtingen van Deltares – beschermen-gesloten, beschermen-open, zeewaarts en meebewegen – als uitgangspunt genomen. Hier vatten we de adaptatiestrategieën en hun gevolgen samen en formuleren we, net als in de hoofdstukken 4 en 5, 5 discussievragen om beleidsmakers te inspireren die zich bezighouden met de relatie tussen de zeespiegelstijging en het mobiliteitssysteem.

Belangrijkste gevolgen voor infrastructuur, gebruik van infrastructuur en activiteiten

De 4 paden hebben elk hun specifieke effect op de activiteiten van mensen en bedrijven, op het gebruik van de infrastructuur en op de fysieke infrastructuur. Daarbij verandert er in de beide ‘beschermen’-paden minder aan de ruimtelijke inrichting van Nederland dan bij de paden ‘zeewaarts’ en ‘meebewegen’. De scheepvaart ondervindt bij ‘beschermen’ grote veranderingen omdat hoogwaterkeringen (veel) vaker moeten sluiten naarmate de zeespiegel meer stijgt. Ook zullen, zeker bij ‘beschermen-open’, de vele en hoge dijken veel ruimte kosten. Die ruimte kan mogelijk deels worden teruggewonnen door waar mogelijk dijken te combineren met andere functies.

Bij een keuze voor ‘zeewaarts’ ontwikkelen is tussen de nieuwe eilanden onderling en tussen de eilanden en de kust nieuwe infrastructuur (bruggen, dijken) nodig, al is ook vervoer over water en door de lucht een mogelijkheid. Ook de aanleg van een zee- of een luchthaven op een van de eilanden is een optie. Mogelijk conflicterend met de aanleg van nieuwe eilanden is dat veel ruimte op zee al bezet is, bijvoorbeeld voor visserij, scheepvaart en windparken. De aanleg van de eilanden vergt bovendien extreem veel zand.

Het adaptatiepad ‘meebewegen’ vereist nog veel innovatie, bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van drijvende bebouwing (huizen, steden) op het water en voor het bouwen van megaterpen (opgehoogde stukken land). Onduidelijk is wat dit meebewegen betekent voor de infrastructuur: beweegt die ook mee of wordt vaste infrastructuur (weg, spoor) ingeruild voor vervoer over water? ‘Meebewegen’ leidt mogelijk tot veel verplaatsingen over water en de aanleg van bruggen tussen (delen van) steden die op terpen zijn gebouwd. Ook de migratie van de bevolking naar de hogere delen van Nederland (het oosten) is een zeer ingrijpend element in dit adaptatiepad. Het zal in die gebieden leiden tot een grotere dichtheid van de bebouwing en zorgen voor meer infrastructuur en vervoersstromen.

Vijf discussievragen voor beleid

In dit kader formuleren we, net als in de hoofdstukken 4 en 5, 5 discussievragen die als inspiratie dienen voor beleidsmakers die zich bezighouden met de aanpassing van het mobiliteitssysteem aan zeespiegelstijging.

- 1 Rol/belang/gewicht van mobiliteitssysteem in keuzeproces.** Is bij de keuze tussen de 4 adaptatiestrategieën de rol van het mobiliteitssysteem sturend of volgend? Wegen bijvoorbeeld afschrijvingskosten van bestaande en investeringen in nieuwe infrastructuur zo zwaar dat ze de keuze voor een van de 4 adaptatierichtingen beïnvloeden? Of zijn aanpassingen aan de infrastructuur (afschrijven/investeren) van ondergeschikt belang ten opzichte van andere grote keuzes over landinrichting en -gebruik in de 4 paden, zoals de hoge en vele dijken bij 'beschermen', de aanleg van terpen bij 'meebewegen' en de eilanden voor de kust bij 'zeewaarts'?
- 2 Informatie en criteria.** Hoe kunnen we de transportinfrastructuur het beste voorbereiden op een grote zeespiegelstijging? Welke criteria zijn vanuit het oogpunt van de transportinfrastructuur aan de orde voor keuzes tussen beschermen-gesloten, beschermen-open, zeewaarts en meebewegen? Denk aan maatschappelijk draagvlak, kosten, toekomstrobuustheid. En welke informatie/monitoring is nodig om hierbij keuzes te kunnen maken? Hoe houden we de ontwikkelingen bij en wat zijn waarschuwingssignalen? Zijn er kantelpunten waarbij we zeker in actie moeten komen, zoals de snelheid van de zeespiegelstijging of de frequentie waarin extreme klimaatgebeurtenissen voorkomen?
- 3 Direct aanpakken of uitstellen/adaptiviteit.** Wanneer is vanuit de transportinfrastructuur beziens de overgang van de ene naar de andere adaptatiestrategie – of combinatie van strategieën – logisch of voor de hand liggend? Wachten we tot een aanpassing urgent is, of handelen we preventief? Wat zijn de voor- en nadelen van wachten versus preventief handelen? Wat kunnen triggers en synergiekansen zijn vanuit andere maatschappelijke terreinen, zoals woningbouw, landbouw en de energietransitie (zoals de aanleg van windparken in zee of getijde-energie)?
- 4 Regionale differentiatie.** Hanteren we overal dezelfde strategie of is er een regionale differentiatie en, zo ja, welke rol spelen verschillen in de transportnetwerkdichtheid en andere onderdelen van het mobiliteitssysteem in deze regionale differentiatie (naast economisch belang, bebouwingsdichtheid, geografische kenmerken en dergelijke)?
- 5 Risicodifferentiatie.** Wat zijn de veiligheidsrisico's (kans x gevolg) voor de infrastructuur per adaptatierichting en hoe veranderen deze risico's (en de acceptatie ervan) in de tijd? Bij 'meebewegen' komen er bijvoorbeeld megaterpen met bebouwing erop. Wat betekent het voor het veiligheidsrisico dat tussen de megaterpen lagere gebieden liggen met infrastructuur die een grote(re) kans heeft om te overstromen? Dekken de hogere dijken in 'beschermen-gesloten' het risico op overstromen van de infrastructuur net zo goed af als in de huidige situatie, of neemt het veiligheidsrisico toe? Wat is het veiligheidsrisico van 'zeewaarts', met de nieuwe eilanden voor de kust als vooruitgeschoven kustverdediging? Hoe wegen we veiligheidsrisico's met een lage kans en met een groot gevolg af tegen risico's met grote kans en een gering gevolg? In beide gevallen kan het risico (kans x gevolg) hetzelfde zijn.

7 Conclusies

In deze studie heeft het KiM verkend wat een veranderend klimaat betekent voor het mobiliteitsstelsel. Klimaat is het weer over een periode van 30 jaar, met indicatoren zoals temperatuur, neerslag, verdamping, wind(richting), bewolking en zonnestraling. Het mobiliteitssysteem duiden we aan als de combinatie van de infrastructuur(netwerken), het gebruik van de infrastructuur en de activiteiten. De volgende hoofdonderzoeksvraag staat centraal:

Hoe beïnvloedt het veranderend klimaat het integrale mobiliteitssysteem en welke mogelijke adaptatiemaatregelen zijn er om de negatieve gevolgen van het veranderend klimaat te beperken?

In paragraaf 7.1 beantwoorden we de 3 deelvragen die centraal stonden in deze studie, waarna we in paragraaf 7.2 ook de hoofdvraag in zijn totaliteit beantwoorden. Tot slot verwijzen we per deelvraag naar de 5 discussievragen als inspiratie voor beleidsmakers.

7.1 Beantwoording deelvragen

In deze paragraaf beantwoorden we de volgende deelvragen die centraal stonden:

- Hoe gevoelig zijn de hoofdnetwerken van wegen, spoorwegen en vaarwegen, met de havens en luchthavens als knooppunten hierin, voor het veranderend klimaat? En wat zijn mogelijke adaptatiemaatregelen?
- Welke invloed heeft het veranderend klimaat op het gebruik van de infrastructuur, de activiteiten en op de locaties waar infrastructuurgebruikers die activiteiten ondernemen? En wat zijn mogelijke adaptatiemaatregelen?
- Wat betekenen een mogelijke zeespiegelstijging van op termijn 2-4 m en adaptatiestrategieën die Nederland dan kan volgen om niet te overstromen, voor het mobiliteitssysteem?

De deelvragen hebben betrekking op verschillende elementen van het mobiliteitssysteem: infrastructuur (deelvraag 1 en 3), gebruik van infrastructuur (deelvraag 2 en 3) en op activiteiten en landgebruik (deelvraag 2 en 3). Via een conceptueel denkkader hebben we in hoofdstuk 3 inzichtelijk gemaakt hoe de verschillende elementen van het mobiliteitssysteem elkaar beïnvloeden en hoe (een veranderend) klimaat ingrijpt op dat mobiliteitssysteem. Het kader geeft daarmee houvast om op een systematische wijze te ontleden en te doordenken welke effecten het klimaat heeft op het mobiliteitssysteem en wat daarbij de onderlinge afhankelijkheden zijn.

Deelvraag 1: Gevoeligheid hoofdinfrastructuurnetwerken en adaptatiemaatregelen?

In hoofdstuk 4 hebben we de gevoeligheid³⁵ in kaart gebracht van de verschillende infrastructuurnetwerken voor negatieve effecten die samenhangen met de 4 DPRA-klimaatthema's wateroverlast, droogte, hitte, overstromingen, aangevuld met storm & onweer. We onderscheiden 3 netwerken: hoofdwegen, hoofdvaarwegen en hoofdspoorwegen. De analyses zijn grotendeels uitgevoerd ten behoeve van de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA) van het ministerie van IenW. Om de kaarten voor de IMA overzichtelijk te houden hebben we alleen de gevoeligheden getoond voor negatieve effecten die in 2050 de grootste risico's vormen. Bij risico gaat het om de kans dat een negatief effect op de infrastructuur daadwerkelijk optreedt maal het gevolg dat dit negatieve effect heeft.

³⁵ De gevoeligheid van infrastructuurnetwerken voor verschillende negatieve effecten. Deze wordt bepaald door kenmerken van de infrastructuur en de omgeving en verandert in principe niet bij klimaatverandering.

Bij wegen en spoorwegen is voor deze kans van voorkomen uitgegaan van het worstcase-klimaat-scenario WH³⁶ en bij vaarwegen van het scenario WHdry.³⁷ Deze selectie op basis van risico hebben we tijdens een speciaal daarvoor gehouden toetsingssessie geverifieerd bij experts van Rijkswaterstaat, ProRail en Deltares.

Lijninfrastructuur, zoals hoofdweg-, hoofdvaar- en spoornetwerken, kan diverse negatieve effecten ondervinden die samenhangen met het klimaat. De kans dat deze negatieve effecten optreden, neemt toe in de tijd. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om de ongelijke verzakking van weg en spoor door bodemdaling, laagwater in de rivieren, veroorzaakt door droogte, of instabiliteit van weg- en spoortaluds, veroorzaakt door extreme neerslag. Een aantal belangrijke bevindingen voor de 3 netwerken is:

- **Wegen:** Op het hoofdwegennet vormt ongelijke zakking door bodemdaling als gevolg van droogte een relatief groot risico. De gevoeligheid hiervoor komt het meest voor in het westen en in het noorden van het land.
- **Vaarwegen:** Het grootste risico voor het hoofdvaarwegennet is droogte, ofwel lage rivierafvoeren. Laagwater door droogte in combinatie met bodemerrosie in de rivieren heeft invloed op de bevaarbaarheid van de rivieren (onder andere minder vaardiepte). De Waal heeft, vooral rond Nijmegen, een grote gevoeligheid voor onvoldoende diepte en bodemerrosie. Ook voor de gehele IJssel en het meest bovenstroomse traject van de Nederrijn zijn dergelijke gevoelige locaties voor onvoldoende diepte en bodemerrosie te vinden.
- **Spoorwegen:** Voor spoorwegen is niet één type negatief effect op de infrastructuur te onderscheiden dat een duidelijk groter risico heeft dan andere negatieve effecten. Grote delen van het spoornetwerk zijn gevoelig voor negatieve effecten die samenhangen met wateroverlast en hitte. De gevoeligheid voor negatieve effecten die samenhangen met droogte, zoals verzakkingen, is in de kustgebieden minder groot dan in de rest van het land.

In aanvulling op de lijninfrastructuur hebben we gekeken naar de gevoeligheid van de knooppuntinfrastructuur, specifiek de zee- en luchthavens. Zee- en luchthavens hebben met dezelfde klimaatgevoeligheden en risico's van negatieve effecten te maken als de lijninfrastructuur, omdat wegen, vaarwegen en spoorwegen er bij elkaar komen. Een specifiek kenmerk van de zeehavens, en van Schiphol als belangrijkste Nederlandse luchthaven, is dat ze onder zeeniveau liggen en daardoor gevoeliger zijn voor het risico van overstrooming dan infrastructuren die meer landinwaarts en dus hoger liggen.

Naast gevoeligheden hebben we ook mogelijke adaptatiemaatregelen in kaart gebracht. Deze zijn divers en verschillen per type negatief effect en per type infrastructuur. Soms kan intensief en vooraf gepland beheer en onderhoud (B&O) grote en dure herstelmaatregelen aan de infrastructuur voorkomen. Concrete voorbeelden hiervan zijn het goed onderhouden van het asfalt van wegen om schade te voorkomen en het frequent maaien van droge bermen om het risico van bermbranden langs de weg en het spoor te verkleinen (waarbij er wel rekening mee moet worden gehouden dat vegetatie ook zorgt voor stevigheid van taluds en dergelijke). Vaak gaat het echter om grootschaliger maatregelen in het domein van vervanging en renovatie (V&R).

³⁶ WH is een scenario van het KNMI (KNMI, 2015). KNMI heeft 4 klimaatscenario's ontwikkeld: GL, GH, WL en WH (KNMI, 2015). De scenario's verschillen in de mate van wereldwijde temperatuurstijging (G voor een gematigde stijging en W, warm, voor een grotere stijging) en in verandering van luchtstromingspatroon (L voor een lage invloed van deze verandering en H voor een hoge invloed hiervan). In de G-scenario's is de temperatuur in 2050 wereldwijd 1°C en in de W-scenario's 2°C hoger dan in 1981-2010. In de H-scenario's waait het 's winters vaker uit het westen, wat een zachter en natter weertype oplevert, en hebben 's zomers hogedrukgebieden een grotere invloed op het weer, met als gevolg meer oostenwinden, die warmer en droger weer met zich meebrengen.

³⁷ Het scenario WHdry is een extreem droog scenario als uitbreiding van de 4 KNMI-scenario's. Het wordt beschreven in Klijn et al., 2015 ('Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?').

Deelvraag 2: Gebruik van de infrastructuur en activiteiten?

In hoofdstuk 5 hebben we de gevolgen verkend van klimaatverandering op het gebruik van de infrastructuur en activiteiten, ook weer met 2050 als richtjaar. Bij aanpassingen in het gebruik hebben we onderscheid gemaakt tussen aanpassingen binnen een netwerk en aanpassingen tussen netwerken onderling. Bij het eerste gaat het over aanpassingen in mobiliteitsgedrag (zoals een andere routekeuze ('omrijden'); een andere vervoerwijze kiezen; vaker reizen of vervoeren als voer- of vaartuigen door de beperkingen aan de infrastructuur minder zwaar beladen mogen zijn; de reis uitstellen of niet meer reizen) en aanpassingen aan voer- en vaartuigen; bij het laatste gaat het over modal shift en (meer) integratie tussen netwerken. Daarnaast hebben we verkend hoe reizigers en vervoerders/verladers hun activiteiten kunnen aanpassen. Hierbij kunnen ze het gebruik van bestaande activiteitenlocaties, zoals winkels, aanpassen maar ze kunnen ook nieuwe locaties gaan gebruiken, zoals een geheel nieuwe bedrijfslocatie.

Welke aanpassingen mensen en bedrijven op dit vlak maken, hangt sterk af van de mogelijkheden die ze hebben. Reizigers en vervoerders/verladers zullen vaak eerst kiezen voor kortetermijnaanpassingen, dus eerder aanpassingen in het gebruik van de infrastructuur dan in de activiteiten, wat vaak meer ingrijpende en structurele aanpassingen zullen zijn. Zelfs met een worstcase-klimaatverandering (scenario WH) komen veel extreme weersomstandigheden in 2050 nog steeds incidenteel voor (met andere woorden, ze zijn ook dan nog extreem). Wel kan zeespiegelstijging op termijn een structurele invloed krijgen op de ruimtelijke inrichting en daarmee op de locaties voor activiteiten (en op de locaties waar de infrastructuur ligt).

De meest voor de hand liggende aanpassingen op het gebied van het gebruik van de infrastructuur hebben we per modaliteit/netwerk verkend:

- *Gebruik van de weg:* omrijden is, zeker als de schade aan en verminderde functionaliteit van de infrastructuur vooral lokaal is (bijvoorbeeld 1 weg of 1 brug), een voor de hand liggende adaptatiemaatregel. In veel andere gevallen ligt uitstellen of afstellen van een reis voor de hand; denk aan de situatie dat er hevige regen of storm wordt voorspeld of wanneer bekend is dat een weg tijdelijk is gestremd door een bermbrand of omgevallen boom op de weg. In plaats van te reizen kunnen mensen dan kiezen voor thuiswerken als dat mogelijk is. Als er beperkingen gelden aan het vervoerd gewicht, bijvoorbeeld bij een weg die verzakt, is het minder zwaar beladen van vrachtwagens ook een optie.
- *Gebruik van het spoor:* bij spoor is routekeuze ('omrijden') bij veel (lokale) negatieve effecten op de spoorinfrastructuur (schade en beperkte functionaliteit) een mogelijke adaptatiemaatregel, maar dan vooral voor reizigers en niet voor het spoorgoederenvervoer. Omdat er via het spoor minder alternatieve routes zijn dan via de weg, zullen ook treinreizigers vaak eerder kiezen voor een ander vervoermiddel (bijvoorbeeld bus, fiets, auto/taxi) dan voor een lange omrijroute met de trein. Vanuit de vervoerskant (bijvoorbeeld NS) is het inzetten van vervangend busvervoer een adaptatiemaatregel wanneer een trein niet over een bepaald traject kan rijden. Deze maatregel werkt minder goed als een spoortraject onverwacht uitvalt. Het kost namelijk tijd en capaciteit om vervangend busvervoer te regelen.
- *Gebruik van vaarwegen:* Voor de binnenvaart is een verminderde bevaarbaarheid door droogte het grootste negatieve effect op de infrastructuur dat kan optreden. Het kiezen van een andere vaarroute klinkt als een theoretisch interessante optie, maar in veel situaties is er geen goed routealternatief voor de binnenvaart. Het minder zwaar beladen van schepen is de meest toegepaste en voor de hand liggende optie bij droogte. Als periodes met droogte veel frequenter gaan optreden, kunnen ook structurelere wijzigingen optreden, zoals een modal shift. Voor de zeevaart kunnen rederijen (vaker) voor andere zeehavens kiezen als keringen structureel vaker zouden moeten sluiten vanwege hoge waterstanden.

- **Gebruik van luchthavens:** Als een landingsbaan wordt getroffen door een negatief effect zoals een verzakking door droogte of een overstroming, is de meest voor de hand liggende adaptatiemaatregel om, als dat mogelijk is, een andere baan te gebruiken voor het opstijgen en landen van de vliegtuigen. Als de capaciteit hierdoor afneemt, kan dit leiden tot langere reistijden. Bij extreme weerscondities, zoals storm of mist, kunnen inkomende vliegtuigen uitwijken naar een andere luchthaven. Voor vertrekkende vliegtuigen is uitstel van de reis de meest geëigende optie vanuit het perspectief van de vervoerder (bijvoorbeeld extra vertraging of uitval van een vlucht). Dit is voor de reiziger geen adaptatiemaatregel, omdat deze weinig keuzevrijheid heeft. Het overkomt de reiziger en leidt tot extra reistijd en ongemak. Als de vertraging lang gaat duren, kan een reiziger voor korte vliegafstanden (tot ongeveer 800 km) wel proberen via de trein te reizen.

Deelvraag 3: Effecten van grote zeespiegelstijging op het mobiliteitssysteem?

Na 2050 nemen overstromingsrisico's door de zeespiegelstijging naar verwachting versneld toe. In hoofdstuk 6 hebben we verkend wat de effecten op het mobiliteitssysteem zijn van een mogelijk grote zeespiegelstijging van +2 tot +4 m in de komende 100 tot 200 jaar. We hebben daarbij de 4 adaptatiestrategieën van Deltares (Haasnoot et al., 2019) als uitgangspunt genomen. Samen beschrijven deze strategieën volgens Deltares de oplossingsruimte voor de Nederlandse delta. Het gaat om:

- 'Beschermen-gesloten': Beschermen van de kust tegen overstromingen en erosie middels harde of zachte maatregelen, zoals keringen, zandsuppletie of wetlands. Rivierarmen worden bij zee afgesloten (met dammen of stormvloedkeringen). Rivierafvoeren worden door pompen en spuisluizen in zee geloosd.
- 'Beschermen-open': Idem als beschermen-gesloten, maar de rivieren blijven in open verbinding met de zee. Rivierdijken moeten daarom worden opgehoogd.
- 'Zeewaarts': Creëren van nieuw, hoger en zeewaarts gelegen land om de delta te beschermen tegen de gevolgen van overstroming.
- 'Meebewegen': Verkleinen van de kwetsbaarheid voor de gevolgen van een hogere zeespiegelstijging door water- of zouttolerant landgebruik (e.g. gebouwen op palen), ophogen van land, ruimtelijke planning en/of migratie.

De strategieën hebben elk hun specifieke effect op de activiteiten van mensen en bedrijven, op het gebruik van de infrastructuur en op de fysieke infrastructuur. Daarbij verandert er in de beide 'beschermen'-paden minder aan de ruimtelijke inrichting van Nederland dan bij de paden 'zeewaarts' en 'meebewegen'. De scheepvaart ondervindt bij 'beschermen' grote veranderingen omdat hoogwaterkeringen (veel) vaker moeten sluiten naarmate de zeespiegel stijgt. Ook zullen, zeker bij 'beschermen-open', de hoge dijken veel ruimte kosten, maar deze bieden tegelijkertijd nieuwe mogelijkheden tot multifunctioneel ruimtegebruik.

Bij een keuze voor 'zeewaarts' is tussen de nieuwe eilanden onderling en tussen de eilanden en de kust nieuwe infrastructuur (bruggen, dijken) nodig. Ook kunnen eilanden nieuwe ruimte bieden voor de aanleg van zee- of luchthavens. Ook op zee is de ruimte echter schaars. Zo maken andere activiteiten, zoals visserij, scheepvaart en windparken, aanspraak op dezelfde ruimte. De aanleg van de eilanden vergt bovendien extreem veel zand, wat de praktische haalbaarheid sterk bemoeilijkt.

De strategie 'meebewegen' vereist veel innovatie en hoge investeringskosten, bijvoorbeeld rondom de ontwikkeling van drijvende bebouwing (huizen, steden) en het aanleggen van en bouwen op megaterpen (opgehoogde stukken land). Het leidt mogelijk tot meer verplaatsingen over water en tot de aanleg van bruggen tussen (delen van) steden die op terpen zijn gebouwd. Ook de migratie naar de hogere delen van Nederland (het oosten) is een zeer ingrijpende maatregel. Als veel meer Nederlanders verhuizen naar de hoger gelegen delen van het land, leidt dat in die gebieden tot een grote dichtheid van bebouwing en een grotere en andere vraag naar infrastructuur.

7.2 Beantwoording hoofdonderzoeksvraag

Nu we hierboven de 3 deelvragen hebben beantwoord, komen we in deze paragraaf specifiek terug op de hoofdonderzoeksvraag:

Hoe beïnvloedt het veranderend klimaat het integrale mobiliteitssysteem en welke mogelijke adaptatiemaatregelen zijn er om de negatieve gevolgen van die klimaatverandering te beperken?

In deze studie hebben we verkend hoe het veranderend klimaat het integrale mobiliteitssysteem beïnvloedt en wat mogelijke adaptatiemaatregelen zijn om de negatieve gevolgen van de klimaatverandering te beperken. Daarbij hebben we systematisch onderscheid gemaakt naar de invloed op de fysieke infrastructuur, op het gebruik van de infrastructuur, op de activiteiten en de activiteitenlocaties, ofwel het mobiliteitssysteem. In de studie gaan we diep in op de conceptuele relatie tussen en mechanismen achter het klimaat (en de veranderingen daarin) en het mobiliteitssysteem. Hoe deze relaties in de praktijk precies zullen uitwerken, is met veel onzekerheid omgeven. Dit komt omdat er vele onzekerheden zijn die bovendien op meerdere niveaus spelen:

- Ten eerste is onzeker hoe het klimaat zich in de komende decennia ontwikkelt: hoeveel en hoe snel de gemiddelde temperatuur stijgt en welk luchtstromingspatroon overheersend wordt,³⁸ is nog onzeker. En hoe dit zich vervolgens vertaalt in wateroverlast, droogte, hitte, overstromingen en storm & onweer, is nog onzekerder.
- Ten tweede is onzeker hoe de infrastructuur, het gebruik daarvan en de activiteiten door deze klimaatontwikkelingen worden beïnvloed. Dit hangt samen met zowel de gevoeligheid voor de klimaatverandering als de mate van blootstelling aan het klimaateffect waar die gevoeligheid mee samenhangt. Zo leidt een gevoeligheid voor het wegspoelen van het talud in een extreme bui vaker tot problemen als extreme buien vaker gaan voorkomen. Hoe vaak vinden in een toekomstig klimaat extreme buien of droogte plaats? En hoe groot is de gevoeligheid van de infrastructuur voor het betreffende negatieve effect? De gevoeligheid is met name afhankelijk van kenmerken van de infrastructuur en de omgeving, zoals berm en ondergrond, morfologische omstandigheden (als het gaat om rivieren) en het specifieke ontwerp van de infrastructuur.
- Ten derde zijn de kosten en baten van de verschillende adaptatiemaatregelen en de relaties daartussen onzeker.

Gegeven al deze onzekerheden levert deze studie wel belangrijke eerste inzichten in hoe een veranderend klimaat het integrale mobiliteitssysteem kan beïnvloeden. Daarbij onderscheiden we naar wegen, spoorwegen, vaarwegen, zee- en luchthavens en naar zowel de fysieke infrastructuur als het gebruik van die infrastructuur, de activiteiten en de activiteitenlocaties. Dit onderscheidt deze studie van andere bij ons bekende studies, die niet de afhankelijkheden en complexiteit doordenken op een dergelijk integraal niveau van het mobiliteitssysteem.

Tot 2050 heeft klimaatverandering waarschijnlijk een groter effect op de infrastructuur dan op het gebruik daarvan (inclusief mobiliteitskeuzes zoals route en vervoermiddel) en op de activiteiten. Dit komt omdat op de weg, en in iets mindere mate ook op het spoor, reizigers en vervoerders relatief makkelijk kunnen uitwijken naar een andere route. Dit is een eenvoudige adaptatiemaatregel bij negatieve effecten op de infrastructuur die lokaal van aard zijn (bijvoorbeeld een specifieke brug die niet meer sluit door hitte). Bij de binnenvaart is dit lastiger. Daar speelt droogte een steeds grotere rol, waardoor de bevaarbaarheid van vaarwegen vaker en langduriger negatief wordt beïnvloed. Bij droogte is de meest voor de hand liggende en in de praktijk meest toegepaste optie om te kiezen voor een lagere beladingsgraad. Maar in de toekomst kunnen ook structurele veranderingen optreden, zoals een gedeeltelijke modal shift.

³⁸ Temperatuurstijging en luchtstromingspatroon zijn de 2 hoofdkenmerken waarlangs de 4 KNMI-scenario's WL, WH, GL en GH zijn opgebouwd.

De adaptatiestrategieën die Deltares heeft ontwikkeld voor een mogelijk grote zeespiegelstijging van 2-4 m in de komende 100 à 200 jaar zullen bij uitvoering elk hun specifieke effect op het mobiliteits-systeem hebben. Bij de 2 ‘beschermen’-strategieën verandert er minder aan de ruimtelijke inrichting van Nederland dan bij de strategieën ‘zeewaarts’ en ‘meebewegen’. De scheepvaart ondervindt bij ‘beschermen’ grote veranderingen omdat hoogwaterkeringen (veel) vaker moeten sluiten naarmate de zeespiegel stijgt. Ook zullen, zeker bij ‘beschermen-open’, de vele en hoge dijken veel ruimte kosten (die deels is terug te winnen door combinatie met andere functies). Bij ‘zeewaarts’ is tussen de nieuwe eilanden onderling en tussen de eilanden en de kust nieuwe infrastructuur (bruggen, dijken) nodig, al is ook vervoer over water en door de lucht een mogelijkheid. Mogelijk conflicterend met de aanleg van nieuwe eilanden is dat veel ruimte op zee al bezet is, bijvoorbeeld voor visserij, scheepvaart en wind-parken. De aanleg van de eilanden vergt bovendien extreem veel zand. ‘Meebewegen’ vereist nog veel innovatie voor de ontwikkeling van drijvende bebouwing (huizen, steden) op het water en voor de aanleg van en het bouwen op megaterpen (opgehoogde stukken land). Onduidelijk is wat dit meebewegen betekent voor de infrastructuur: beweegt die ook mee of wordt vaste infrastructuur (weg, spoor) ingeruild voor vervoer over water? ‘Meebewegen’ leidt mogelijk tot veel verplaatsingen over water en aanleg van bruggen tussen (delen van) steden die op terpen zijn gebouwd. Ook de migratie van de bevolking naar de hoger gelegen delen van Nederland (het oosten) is een zeer ingrijpend element in dit adaptatiepad. Migratie zal in die gebieden leiden tot een grotere dichtheid van bebouwing, meer infrastructuur en vervoersstromen.

Ondanks de onzekerheden, biedt deze studie belangrijke basisinzichten die bruikbaar zijn voor strategische beleidsdiscussies en voor het identificeren van nadere kennisbehoefte. Als inspiratie en startpunt hiervoor hebben we een aantal discussievragen voor beleid geformuleerd. Dit zijn vragen die in de (beleids)praktijk kunnen spelen rondom de relatie tussen klimaatverandering en zeespiegelstijging voor de infrastructuur, het gebruik van de infrastructuur, de activiteiten en de ruimtelijke inrichting. Een voorbeeld van zo’n discussievraag is: in hoeverre is het effectief en efficiënt om een corridor in één keer klimaatbestendig te maken in plaats van losse, op zichzelf staande locaties aan te pakken? Andere voorbeelden zijn vragen rond afwegingen tussen direct aanpakken van verstoringen of het uitstellen daarvan en afwegingen om al dan niet te differentiëren naar het belang van netwerken. Voor een overzicht van de vragen verwijzen we naar de paragrafen 4.8, 5.5 en 6.5.

Summary

Infrastructure networks are susceptible to physical damage and reduced functionality, caused by drought, heat, heavy precipitation and other climatic events. The probability of negative impacts occurring increases in future climate scenarios. Intensive and planned management and maintenance (M&M) can sometimes prevent large and expensive repairs to infrastructure; however, larger-scale renewal and renovation (R&R) are often required. Climate change also impacts infrastructure use and activities, with the most obvious adjustments being the choosing of different routes ('detours') if possible; more frequent travel or transport (if, owing to infrastructure restrictions, vehicles or vessels must carry lighter loads); and postponing trips or no longer traveling (working from home instead, for example). Other options include adaptations to vehicles and vessels, and a modal shift among modalities. In practice, those using the various types of infrastructure will make considered choices among the various options.

At the request of the Ministry of Infrastructure and Water Management (IenW), the KiM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis examined what climate change means for the mobility system. We regard the mobility system as a combination of the infrastructure (networks), its use ('mobility'), activities, such as living, working and recreation, and the locations where infrastructure users engage in those activities.

Climate is weather over an extended period of time, such as 30 years for example. Climate cannot be encapsulated in one variable, but it can be expressed in a series of indicators, such as precipitation, solar radiation, wind direction, temperature and evaporation, as well as per year, season, month, day and so forth. Climate includes both average weather patterns and extreme weather events.

The climate is changing. Today's climate differs from that of 1950-1980 or 1980-2010, and will also differ from the climate in 2030 and later this century. The climate's averages and its extremes are changing due to concentrations of greenhouse gases in the atmosphere, which has steadily increased since the industrialisation of society. The primary driver of climate change is the burning of fossil fuels that accompanies industrialisation. Some of these developments are already irreversible, and even if greenhouse gas emissions are swiftly eradicated, we must nevertheless prepare for climate change.

This study's main research question is:

How does climate change impact the integrated mobility system and what potential adaptive measures are available to limit the negative consequences of climate change?



The main question is divided into 3 sub-questions:

- 1 How susceptible are the main road, rail and waterway networks to climate change, with ports and airports as their hubs? And what are potential adaptative measures?
- 2 What impact does climate change have on infrastructure use, on activities and on the locations where infrastructure users engage in those activities? And what are the associated potential adaptative measures?
- 3 How will the mobility system be impacted by a potential sea level rise of 2-4 metres and the adaptative strategies the Netherlands can subsequently implement to prevent flooding?

We summarise the changing climate in five themes: drought, excess water, heat, flooding, storms & thunderstorms. The first four are core themes in the Delta Plan Spatial Adaptation (DPRA - *Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie*), and we added a fifth because of its potentially major impact on rail infrastructure.

IenW used insights gained about infrastructure (sub-question 1) in the Integral Mobility Analysis (IMA-2021), which, as the successor to the National Market and Capacity Analysis (NMCA), has a broader scope than the NMCA's 'traditional' mobility bottleneck analysis; for example, the IMA also includes analyses of subjects relating to climate adaptation, road safety, and emissions of greenhouse gases, particulate matter and nitrogen compounds.

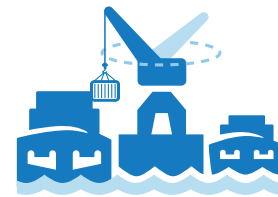
Susceptibility of main infrastructure networks and adaptative measures

Line infrastructure – such as main roads, main waterways and railways – is susceptible to the negative impacts associated with the five core climate themes: drought, excess water, heat, flooding and storms & thunderstorms. Negative effects include for example the uneven sinkage of roads or rail due to land subsidence and low water levels in rivers – both caused by drought – or the instability of road and rail embankments due to extreme precipitation, all of which physically damages infrastructure or limits the infrastructure's functionality. The likelihood of infrastructure experiencing such negative impacts increases in future climate scenarios. As based on stress tests conducted by management (particularly Rijkswaterstaat and ProRail), key findings for the three networks include:

- **Roads:** The main road network faces a relatively high risk of uneven sinkage due to drought-induced land subsidence. By this we mean that there is a high probability of uneven subsidence occurring multiplied by the consequences thereof (in terms of refurbishment costs for management and costs for users if the network becomes blocked or malfunctions). Susceptibility to drought-induced uneven subsidence is most likely to occur in the west and north of the country.
- **Waterways:** Drought, or low river discharges, poses the greatest danger to the main inland waterway network. Low water levels due to drought, combined with soil erosion in rivers, impacts the navigability of rivers (including reduced sailing depth). The Waal, particularly around Nijmegen, is highly susceptible to insufficient water depths and soil erosion. Locations along the entire IJssel and much of Lower Rhine's upstream section are also susceptible to insufficient water depths and soil erosion.
- **Railways:** For railways, no single type of negative impact on infrastructure is riskier than other negative impacts. Large parts of the rail network are susceptible to the negative effects associated with excess water or heat, including flooding of railway tunnels or the inability to close bridges that expanded due to extreme heat. Rail infrastructure is less susceptible to negative effects associated with drought (including subsidence) in coastal areas than in the rest of the country.



As hub infrastructure, *sea ports and airports* face the same climate susceptibilities and risks as line infrastructure, and all the more so because roads, waterways and railways converge at these hubs.



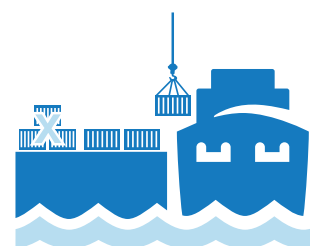
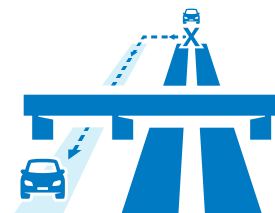
Potential *adaptive measures* are diverse and differ per type of negative impact and per type of infrastructure. Intensive and pre-planned management and maintenance (M&M), including properly maintaining asphalt to prevent damage, can sometimes prevent infrastructure from needing major and expensive repairs. Often, however, larger-scale replacement and refurbishment (R&R) actions are needed.

Use of infrastructure and activities

Many of the climate's negative impacts on infrastructure use and activities (locations) are temporary. Changes in how infrastructure is used are more likely to occur than changes in activities and activity locations.

Generally, it is easier to adjust behaviour if incidents are known well in advance. Logically, it therefore follows that the most obvious examples of behavioural adjustment include choosing an alternate route ('detour') or different transport mode; traveling or transporting more frequently (if restrictions mean vehicles or vessels must carry lighter loads); and postponing trips or no longer traveling. In practice, those using the various types of infrastructure will make considered choices among the various options.

- *Use of roads:* detours are an obvious adaptive measure, particularly if the damage to, and reduced functionality of, the infrastructure is primarily local (one road or one bridge, for instance). In many other cases the obvious choice is to postpone or alter a trip in situations where heavy rain or storms are forecast or when it is known that a certain road is temporarily inaccessible due to a roadside fire or fallen tree, for example. Instead of traveling, people could subsequently opt to work from home if possible. If, because of road subsidence for example, restrictions are placed on transported weights, one option is to load trucks with lighter loads.
- *Use of railways:* For rail, alternate route choice ('detour') is an option if the damage is local or functional limitations occur, but primarily for passenger transport, not for freight transport. Train passengers are often more likely to opt for alternate transport modes (e.g. bus, bicycle, car/taxi) than for alternate routes by rail. Rail offers fewer alternate routes than road, and consequently train detour routes are generally longer. For transport companies (e.g. NS Dutch Railways), replacing trains with bus transport is a possible adaptive measure, but is a less effective option when railway sections become unexpectedly inoperable, as time and capacity are needed to organise replacement bus transport.
- *Use of waterways:* For inland waterway shipping, reduced navigability of rivers due to drought (low water levels) is the most severe negative impact. Theoretically, choosing an alternate sailing route sounds like an interesting option, but often no suitable alternate routes are available on rivers. In the short term, the most obvious option is to have ships sail with lighter loads; when drought occurs, this is also the most widely used option in practice. Should droughts become more frequent, additional structural changes could be implemented, including modal shifts to road transport. For maritime shipping, if flood defences are closed more frequently due to high water levels, shipping companies can opt to use other seaports (more frequently).



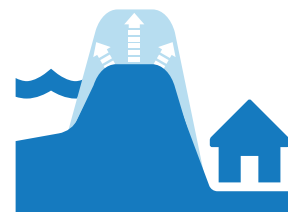
- *Use of airports:* If runways are negatively impacted by drought or flooding induced subsidence, the most obvious adaptive measure is to use different runways for take-offs and landings if possible. If this causes capacity to decrease, longer trip times can result. During extreme weather conditions, like storms or fog, incoming aircraft can be diverted to another airport. For departing aircraft, the most appropriate option from the carrier's perspective is to delay the trip (resulting in additional delays or flight cancellations, for example). From the passengers' perspective, this is not an adaptive measure, because they have little freedom of choice; it simply happens to the passenger, resulting in longer trip times and inconvenience. If it is to be a long delay, passengers taking short flights (up to about 800 km) can endeavour to make the trip by train.



The effects of rising sea levels on the mobility system

The risk of flooding due to rising sea levels is expected to increase rapidly after 2050. In this study we examined the impact of severe sea level rise on the mobility system. Our starting point is a potential sea level rise of +2 to +4 metres over the next 100 to 200 years, and the four adaptive strategies Deltares developed for this future scenario (Haasnoot et al., 2019). These strategies collectively describe the range of solutions for the Dutch delta, as pertaining to:

- *'Protection-closed':* Protecting the coastline from flooding and erosion by means of hard or soft measures, including flood defences, sand replenishment or wetlands. River arms are closed off at the sea (using dams or storm surge barriers). Pumps and sluices discharge river discharge into the sea.
- *'Protection-open':* The same as 'protection-closed', but rivers maintain open connections to the sea. River dykes must therefore be raised.
- *'Seaward':* Creation of new, higher and seaward islands protecting the delta from the effects of flooding.
- *'Going with the flow':* Reducing vulnerability to the impacts of higher sea level rises due to water- or salt-tolerant land use (e.g. structures on stilts), raising land levels, spatial planning and population migration.



Each of these strategies have their own specific impact on the activities (locations) of people and companies, on the infrastructure and on its use. In addition, the two 'protection' paths alter the Netherlands' spatial planning less than the 'seaward' and 'going with the flow' strategies. 'Protection' will mean that shipping experiences major changes, because flood defences must be closed (much) more frequently as sea levels rise.

The higher, and thus wider, dykes will also claim much more space, especially in the 'protection-open' scenario, but they also offer new opportunities for multifunctional uses of space, for new activities or the construction of new infrastructure, for example.

The 'seaward' strategy will require new infrastructure (bridges, dikes) between the new islands and between these islands and the coast. Islands can also offer new space for constructing seaports or airports, but space at sea is also scarce, as other activities, like fishing, shipping and wind farms, make claims on the same space. Moreover, constructing islands requires extremely large amounts of sand, which greatly complicates this option's practical feasibility.

The 'going with the flow' strategy demands a great deal of innovation and high investment costs, as pertaining to for example the development of floating structures (houses, cities) and the installation and construction of artificial 'mega mounds' (elevated areas of land). It is unclear what going with the flow will mean for infrastructure: does it go with the flow or is fixed infrastructure (road, rail) exchanged for transport via water? 'Going with the flow' may result in more trips via water and the construction of bridges between (parts of) cities built on artificial mounds. Migration to higher elevated areas of the Netherlands (the east) is also an extreme development; should large numbers of Dutch people migrate to higher areas of the country, the result will be high density settlements and greater demand for infrastructure and mobility.

Discussion questions

Finally, in this study we formulated various discussion questions for policy makers: these are questions that can arise in (policy) practice, as pertaining to the relationship between climate change and rising sea levels, the use of the infrastructure, activities and spatial planning. One example of such a discussion question is: to what extent is it effective and efficient to make a corridor climate-proof in one go, rather than tackling separate, stand-alone locations? Other examples pertain to questions about immediately tackling disruptions or postponing them, and consideration about whether to differentiate based on the importance of the networks.



Referenties

- Abcouwer, M, Erasmus, L. & Phlippen, S. (2019). *Economische impact van toekomstige overstromingen in Nederland*. Amsterdam: ABN-AMRO.
- Algemene Rekenkamer (2014). *Instandhouding hoofdwegennet*. Den Haag: Algemene Rekenkamer.
- Baart, F., Rongen, G., Hijma, M., Kooi, H., Winter, R. de & Nicolai, R. (2019). *Zeespiegelmonitor 2018 De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust*. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. Delft/Lelystad: Deltares en HKV lijn in water bv.
- Bertolini, L. (2009). *De planologie van mobiliteit*. Amsterdam: Vossiuspers UvA.
- Berveling, J., Knoope, M. & Moorman, S. (2020). *Met de stroom mee: het stimuleren van elektrisch rijden*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- Bles, T. et al. (2020). *Gevoeligheid van het hoofdwegennet voor klimaatverandering – Uitkomst landelijke klimaatstresstest HWN*. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. Delft: Deltares.
- Bles, T., Jong, J. de, Marle, M. van & Buren, R. van (2021). *Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet, hoofdvaarwegennet en spoor ten behoeve van de NMCA*. Delft: Deltares.
- Contargo (2017). *Laagwatertoeslagen*. Duisburg: Contargo.
- CPB & PBL (2015). *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving*. Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.
- Dankert, B. (2019). Geo brief 7/2019. Het grote smelten van Antarctica. Staringlezing Roderik van de Wal.
- Dorsser, J.C.M. van (2015). *Very long term development of the Dutch Inland Waterway Transport System: Policy analysis, transport projections, shipping scenarios, and a new perspective on economic growth and future discounting*. Proefschrift. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Ecorys (2018). *Kosten en effecten van droogte voor de scheepvaart*. Rotterdam: Ecorys.
- Eurocontrol (2013). *Challenges of Growth 2013. Task 8: Climate Change Risk and Resilience*. Brussel: European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL).
- Erasmus-UPT (2020). *Economische Impact Laagwater*. Rotterdam: Erasmus-UPT.
- Flyland (2001). *Notitie Quickscan Operationele integriteit*. Den Haag: Programmabureau Flyland.
- Flyland (2003). *Eindrapportage, Conclusies bij het voortijdig einde van het onderzoek naar een luchthaveneiland*. Den Haag: Flyland.

FD (2021). *Rijn bij Keulen dicht voor scheepvaart vanwege hoogwater*. Artikel 2 februari 2021. Geraadpleegd via <https://fd.nl/economie-politiek/1372612/rijn-bij-keulen-dicht-voor-scheepvaart-vanwege-hoogwater>

Groningen Seaports (2020). *Vestigingsbeleid Eemshaven Delfzijl*. Via www.groningen-seaports.com

Haasnoot, M., Bouwer, L. & Diermanse, F. (2018). *Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma*. Delft: Deltares.

Haasnoot, M., Diermanse, F., Kwadijk, J., Winter, R. de & Winter, G. (2019). *Strategieën voor adaptatie aan hoge en versnelde zeespiegelstijging – Een verkenning*. Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat – staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. Delft: Deltares.

Hamersma, M., Haas, M. de & Faber, R. (2020). *Thuiswerken en de coronacrisis*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Harms, L., Durand, A., Hoogendoorn-Lanser, S. & Zijlstra T. (2018). *Meer zicht op Mobility-as-a-Service (MaaS)*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Havenbedrijf Rotterdam (2020). *Waterveiligheid*.
Via www.portofrotterdam.com/nl/onze-haven/onze-themas/een-veilige-haven/waterveiligheid

Hoën, A. & Koetse, M.J. (2012). *Rijden op elektriciteit, waterstof of biobrandstoffen, wat wil de automobilist?* Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Huibregtse, O., Moorman, S. & Savelberg, F. (2019). *Op reis met vliegtuig, trein, auto of bus*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

IenW (2018). *Klimaatneutrale & klimaatbestendige netwerken/projecten. Handreiking Verduurzaming MIRT - thema's Energie/CO₂ en Klimaatadaptatie*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

IenW (2019). *Kennisprogramma Zeespiegelstijging*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Deltacommissaris, KNMI, Rijkswaterstaat, Unie van Waterschappen en diversie kennisinstellingen.

IenW (2020). *Handreiking Verduurzaming MIRT*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

IPCC (2019a). *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*. Chapter 4 in: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*.

IPCC (2019b). *Summary for Policymakers*. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*. In press.

Jonkeren, O.E., van Ommeren, J.N., & Rietveld, P. (2007). *Klimaatverandering en Binnenvaart*. *Economisch Statistische Berichten*, 558-559.

Jonkeren, O. (2020). *De invloed van het weer op de personenmobiliteit*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2008). *Effecten van klimaatverandering op verkeer en vervoer – Implicaties voor beleid*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Klijn, F., Hegnauer, M., Beersma, J. & Sperna Weiland, F. (2015). *Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?* 1220042-000-ZWS-0004. Delft/De Bilt: Deltares en KNMI.

Klimaatadaptatie Strategie Zeeland (2020). *Klimaatverandering. Zeeuwse risico's in beeld*. Notitie 20 januari 2020.

KNMI (2015). *KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland*. De Bilt: KNMI.

Knoope, M. & Francke, J. (2020). *Trendprognose wegverkeer 2020-2025 met daarbij de mogelijke gevolgen van de coronacrisis*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KvK (2014). *Hotspot Mainport Schiphol. Visieontwikkeling Regionale Adaptatiestrategie*. Hoofdrapport. Utrecht: Programmabureau Kennis voor Klimaat p/a Universiteit Utrecht.

Lalkens, P. (2020, 2 juni). Binnenvaart en industrie binden strijd aan tegen laagwater van de Rijn. *Financieel Dagblad*. Geraadpleegd via <https://fd.nl/achtergrond/1346332/binnenvaart-en-industrie-binden-strijd-aan-tegen-laagwater-rijn>

McInnes, K., White, C. & Haigh, I. (2016). Natural hazards in Australia: sea level and coastal extremes. *Climatic Change*, 139(1), 69-83.

Must Stedebouw (2017). *Adaptatiestrategie Waterbestendig Westpoort*. Amsterdam: Must stedebouw.

Nieuwsblad Transport (2018, 17 oktober). Thyssenkrupp: spoor vaker alternatief voor 'droogvallende' Rijn. *Nieuwsblad Transport*.

Paridon, R., Groot, K. de & Wijnakker, R. (2012). *Water in de Structuurvisie Haarlemmermeer 2030*. Van Paridon x de Groot landschapsarchitecten in opdracht van de gemeente Haarlemmermeer en Hoogheemraadschap van Rijnland.

PBL (2013). *Aanpassen met beleid. Bouwstenen voor een integrale visie op klimaatadaptatie*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Poo, M.C.-P., Yang, Z., Dimitriu, D. & Qu, Z. (2018). Review on Seaport and Airport Adaptation to Climate Change: A Case on Sea Level Rise and Flooding. *Marine Technology Society Journal*, 52 (2), 23-33.

PosadMaxwan (2019). *Quickscan luchthaven in zee*. Den Haag: PosadMaxwan.

Port of Moerdijk (2014). *Port of Moerdijk 2030. Havenstrategie Moerdijk 2030*. Moerdijk: Port of Moerdijk.

Port of Moerdijk (2017). *Excellent veilig: Veiligheidsvisie 2030*. Moerdijk: Port of Moerdijk.

ProRail (2021). *Ontwikkeling spoorgoederenverkeer in Nederland – 2020 vergeleken met 2019*. Utrecht: ProRail.

Royal Haskoning DHV (2017). *Botlek Waterveiligheid: een veilige haven – nu en in de toekomst*. Nijmegen: Royal Haskoning DHV.

Royal Haskoning DHV (2018). *Waal-Eemhavengebied Waterveiligheid: een veilige haven – nu en in de toekomst*. Nijmegen: Royal Haskoning DHV.

Royal Haskoning DHV (2020). *Europoort Waterveiligheid: een veilige haven – nu en in de toekomst*. Nijmegen: Royal Haskoning DHV.

RWS (2016). *Evacueren, als het tóch gebeurt. Advies inzet hoofdinfrastructuur in de fasen voor, tijdens en na een overstroming*. Project Module Evacuatie Grote Overstromingen (MEGO). Den Haag: Rijkswaterstaat.

RWS-WVL (2016). *Normering primaire waterkeringen + factsheets*. Geraadpleegd via www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/normen/

RWS (2020). *Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet - Deelrapport Droogte. Risico's van klimaateffecten voor de scheepvaart*. Concept 28 oktober 2020. Den Haag: Rijkswaterstaat.

Sabir, M. (2011). *Weather and Travel Behaviour*. Amsterdam: Vrije Universiteit.

Savelberg, F., Moorman, S. & Derriks, H. (2016). *Innovaties in het openbaar vervoer*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Savelberg, F. & De Lange, M. (2018). *Substitutiemogelijkheden van luchtvaart naar spoor*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Scheepvaartkrant (2021, 27 januari). *BASF ontwikkelt innovatieve laagwatertanker*. Scheepvaartkrant.

Schroten, A. et al. (2019). *De prijs van een vliegticket – Een onderzoek naar de kosten van en voor de luchtvaart in Nederland*. Delft: CE Delft.

SWOV (2020). *Kosten van verkeersongevallen*. SWOV-factsheet, maart 2020. Den Haag: SWOV.

Tillema, T., Gelauff, G., Waard, J. van der, Berveling, J. & Moorman, S. (2017). *Paden naar een zelfrijdende toekomst – Vijf transitiestappen in beeld*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Tillema, T., Moorman, S. & Kansen, M. (2020). *Monitoren van de transitie naar autonoom vervoer*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Topsector Logistiek (2021). *Synchromodaal Transport*. Geraadpleegd via <https://www.topsectorlogistiek.nl/synchromodaal-transport/>

Tretjakova, D. (2012). *Eindrapport Overstromingsrisico's in de haven*. Rotterdam: Gemeente Rotterdam.

Van Wee, B. (2013). Chapter 5: Land use and transport. In: Van Wee, B., J.A. Annema, D. Banister eds. *The Transport system and transport policy – An introduction*. Edward Elgar, Cheltenham, UK – Northampton, MA, USA, p. 78-100.

Wegener, M. & Fürst, F. (1999). *Land-use Transport Interaction: State of the Art*. Dortmund: IRPU.

Witteveen & Bos (2020). *Infoblad droogte hoofdwegennet; Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling*. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.

WUR (2019). *Een natuurlijkere toekomst voor Nederland in 2120*. Wageningen: Wageningen University & Research (WUR).

Bijlage A

Klimaatverandering en scenario's in 2050

Deze bijlage heeft het jaar 2050 als zichtjaar.

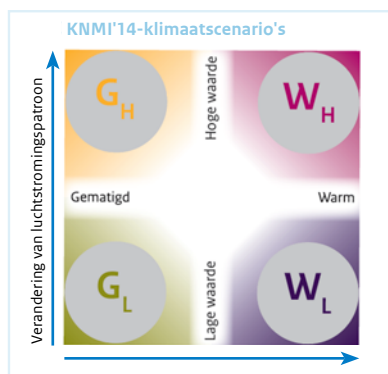
Definitie klimaat en weer

Het klimaat is het weer over een langere periode. Meestal wordt hiervoor 30 jaar gehanteerd. Het klimaat³⁹ verandert. Wereldwijd stijgt momenteel de gemiddelde temperatuur doordat de concentratie broeikasgassen (zoals CO₂, methaan en waterdamp) in de atmosfeer toeneemt. Andere uitingen van een veranderend klimaat zijn veranderingen in neerslag en droogte (het verschil tussen neerslag en verdamping) en luchtstromingspatronen. Behalve dat de gemiddelde weersomstandigheden veranderen, verandert ook de kans dat sommige extreme weersituaties zich voordoen. Juist deze extremen zijn het meest zichtbaar en onvoorspelbaar. Denk aan periodes van extreme droogte met lage rivierwaterstanden tot gevolg, maar ook aan hevige regenbuien, hagel en onweer. Zware vorst daarentegen zal juist minder vaak gaan voorkomen. Mist komt ook minder vaak voor en er is meer zonnestraling, al komt dit niet zozeer door opwarming maar door het schoner worden van de lucht. Droogte en neerslag hebben invloed op de grondwaterstand. In kustgebieden kan het grondwater zouter worden door de toenemende druk van een hogere zeespiegel.

Vier toekomstscenario's voor 2050 (periode 2036-2065)

Het KNMI heeft 4 scenario's ontwikkeld, GH, GL, WH en WL, die samen de hoekpunten van het mogelijke klimaat in 2036-2065 beschrijven (KNMI, 2015); zie figuur A.1. Het klimaat zal zich waarschijnlijk binnen de hoekpunten bevinden. Het KNMI heeft alleen gebruik gemaakt van aannamen waarvoor een robuuste wetenschappelijke onderbouwing bestaat. Waar deze onderbouwing ontbreekt, zoals bij het volledig tot stilstand komen van de Golfstroom al in deze eeuw, is dit niet meegenomen in de scenario's. Extreme scenario's zijn niet opgesteld.

Figuur A.1 De 4 KNMI-klimaatscenario's GH, GL, WH en WL. Bron: KNMI (2015).

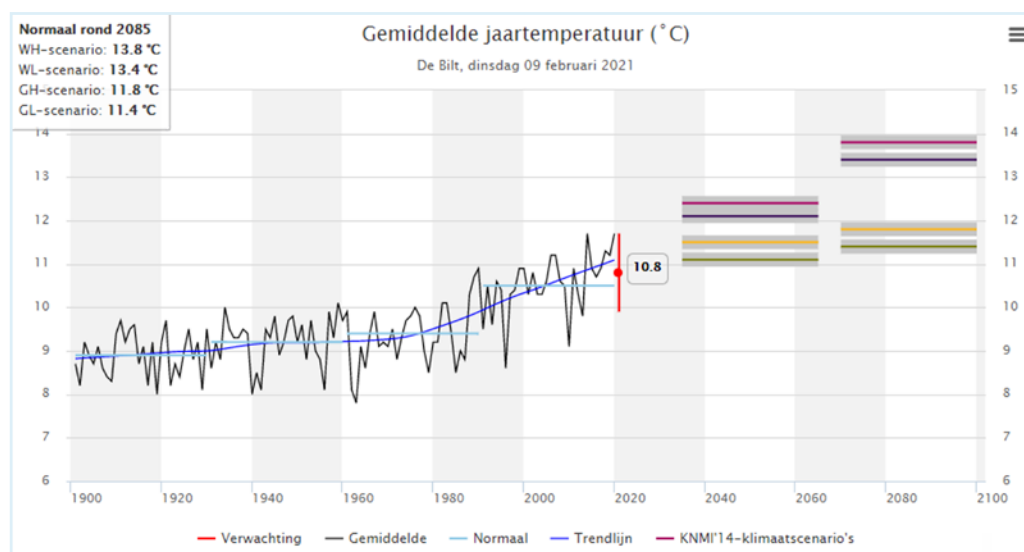


De scenario's verschillen in de mate van wereldwijde temperatuurstijging (G voor een gematigde stijging en W, warm, voor een grotere stijging) en in verandering van luchtstromingspatroon (L voor een lage invloed van deze verandering en H voor een hoge invloed hiervan). In de G-scenario's is de temperatuur in 2050 wereldwijd 1°C en in de W-scenario's 2°C hoger dan in klimaatperiode 1981-2010. In de H-scenario's waait het 's winters vaker uit het westen, wat een zachter en natter weertype oplevert, en hebben 's zomers hogedrukgebieden een grotere invloed op het weer, met als gevolg meer oostenwinden, die warmer en droger weer met zich meebrengen.

³⁹ KNMI (2015) hanteert bijna 50 variabelen en indicatoren om het klimaat te beschrijven, zoals neerslag, zonnestraling, temperatuur en verdamping, gemeten per jaar, per afzonderlijk seizoen en dergelijke. Tot het klimaat behoren zowel gemiddelde weerpatronen als extreme weersituaties, zoals de temperatuur op de koudste winterdag of de temperatuur op de heetste zomerdag.

Temperatuurverandering Nederland sinds 1900

Tussen 1901 en 2020 nam de gemiddelde temperatuur in De Bilt toe met 2,3°C (KNMI, klimaatdashboard⁴⁰). Het grootste deel van deze toename vond plaats sinds de jaren 50; zie figuur A.2. Sinds 1951 is de toename in Nederland ongeveer 2 keer zo groot als de wereldwijde toename van de gemiddelde temperatuur over land- en zeeoppervlak (KNMI, 2015). De opwarming in onze buurlanden was vergelijkbaar. Over het algemeen warmt land sneller op dan de oceaan. De winters (december, januari en februari) waren in Nederland zachter doordat de wind vaker uit het westen kwam. De zomers (juni, juli en augustus) waren extra warm door een toename van de zonnestraling, vooral als gevolg van de afgenomen luchtverontreiniging.



Figuur A.2 Temperatuurverloop in De Bilt sinds 1900 en 4 toekomstprojecties (WH, WL, GH, GL).

Veranderingen in neerslag, wind, zonnestraling, droogte, mist, ijs (sinds 1951)

De gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid neerslag, zonnestraling en droogte (neerslagtekort) nemen sinds 1951 toe. De toename van neerslag is vooral sterk in de winter, lente en herfst; in de zomer is de hoeveelheid gelijk gebleven. De hoogste daggemiddelde windsnelheid neemt ook niet toe. Het aantal uren en dagen met mist en vorst/ijs neemt af; zie tabel A.1 die is gebaseerd op KNMI (2015).

⁴⁰ <https://www.knmi.nl/klimaatdashboard>

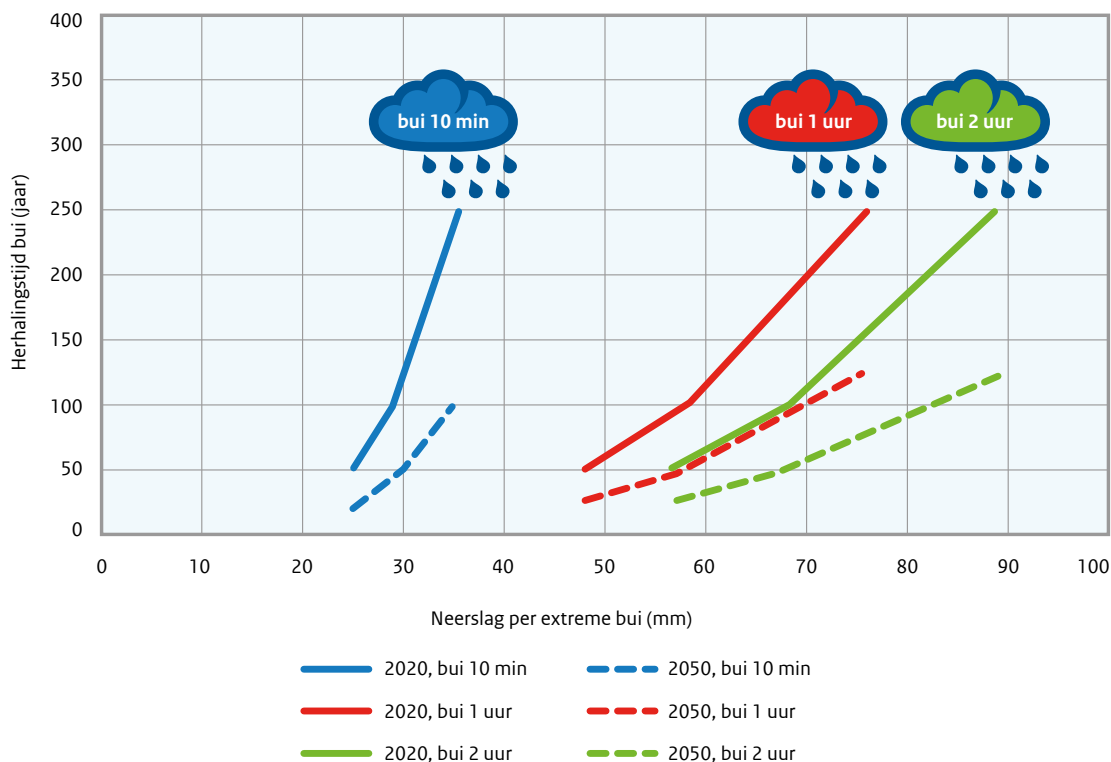
Tabel A.1 Enkele klimaatvariabelen en -indicatoren voor 4 klimaatperiodes van 30 jaar: 1951-1980, 1981-2010, 2016-2045 en 2036-2065 (KNMI, 2015); wit = historisch, blauw = toekomstig.

Variabele	Indicator	1951-1980	1981-2010	2016-2045 (Δ t.o.v. 1981-2010)	2036-2065 (Δ t.o.v.1981-2010)			
					GL	GH	WL	WH
Temperatuur	Gemiddelde De Bilt, per jaar (°C)	9,2	10,1	+1,0	+1,0	+1,4	+2,0%	+2,3%
Neerslag gemiddeld	Jaar (mm)	774	851	+5%	+4%	+2,5%	+5,5%	+5%
	Winter (mm)	188	211	+8,5%	+3%	+8%	+8%	+17%
	Lente (mm)	148	173	+5,5%	+4,5%	+2,3%	+11%	+9%
	Zomer (mm)	224	224	+0,2%	+1,2%	-8%	+1,4%	-13%
	Herfst (mm)	214	245	+5,5%	+7%	+8%	+3%	+7,5%
Neerslag extreem	Dagelijkse hoeveelheid die zomers eens in de 10 jaar wordt overschreden (mm)	44	44	+1,7 tot +10%	+1,7 tot +10%	+2,0 tot +13%	+3,0 tot +21%	+2,5 tot +22%
Wind extreem	Hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar (m/s)	-	15	-1,0%	-3%	-1,4%	-3%	0,0%
Zonnestraling	Zonnestraling (kJ/cm ²)	346	354	+0,2%	+0,6%	+1,6%	-0,8%	+1,2%
Droogte	Gemiddeld hoogste neerslagtekort ⁴¹ tijdens het groeiseizoen (mm)	140	144	+4%	+4,5%	+20%	+0,7%	+30%
Mist	Aantal uren met zicht < 1 km	412	300	-100	-110	-110	-110	-110
Vorst dagen (min temp < 0°C)	Aantal	42	38		30%	-45%	-50%	-50%
Ijsdagen (max temp < 0°C)	Aantal	11	7,2		-50%	-70%	-70%	-90%
Zomerse dagen (max temp < 25°C)	Aantal	13	21		+22%	+35%	+40%	+70%

⁴¹ Het verschil tussen de hoeveelheid neerslag en de potentiële verdamping bij een referentiegewas (een grasveld) in het groeiseizoen (april-september); de potentiële verdamping is de verdamping die plaatsvindt als de bodem voldoende water bevat, dus zonder vermindering van de verdamping door vochttekort. De mate van verdamping hangt af van zowel de temperatuur als de zonnestraling.

Extreme neerslag in 2050

De kans op extreme buien neemt tussen nu en 2050 in het maximale KNMI'14-scenario (WH) toe met gemiddeld een factor 2 à 2,5 (Bles et al., 2020); zie figuur A.3. Bijvoorbeeld, een extreme bui met 25 mm neerslag in 10 minuten komt nu eens per 50 jaar voor; een dergelijke bui komt in 2050 mogelijk eens per 20 jaar voor (de herhalings tijd voor deze bui stijgt tussen nu en 2050 van 50 naar 20 jaar). Een bui met 35 mm neerslag in 10 minuten komt nu hooguit eens per 250 jaar voor, maar kan in 2050 eens per eeuw voorkomen.



Figuur A.3 De herhalings tijd (in jaren) van buien van 10 minuten, 1 uur en 2 uur met een bepaalde hoeveelheid neerslag (in mm), in 2020 en 2050 (gebaseerd op Bles et al., 2020).

Het is niet bekend hoe de herhalings tijden van buien veranderen bij meer gematigde klimaatscenario's. KNMI (2015) geeft voor alle scenario's de dagelijkse hoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden. Deze neemt in 2050 ten opzichte van het huidige klimaat toe met 1,7% in het GL-scenario tot 22% in het WH-scenario (zie ook tabel A.1). 1,7% is erg laag en betekent vrijwel geen verandering. Daaruit leiden Bles et al. (2020) af dat de herhalings tijd van buien in een matig klimaatscenario vrijwel niet zal veranderen ten opzichte van de huidige situatie.

Wind, stormen, onweer, hagel

Of stormen in Nederland door klimaatverandering vaker gaan voorkomen en ook zwaarder worden is onduidelijk. Het wind- en stormklimaat vertoont grote natuurlijke variaties. Een aantal KNMI-klimaat-scenario's duidt op het vaker voorkomen van westenwind, maar de verwachte veranderingen in windsnelheid zijn in alle scenario's klein (zie tabel A.1). Nederland krijgt in de toekomst vaker te maken met hevige hagelbuien en onweer. Niet alleen het aantal hagelbuien neemt toe, ook de grootte van de hagelstenen. Het aantal bliksemslagen neemt toe met ongeveer 10-15% per graad opwarming. De achtergrond van deze ontwikkelingen is dat warmere lucht meer waterdamp kan bevatten (KNMI, 2015).

Verandering in waterstanden 2050

Hoog- en laagwater rivieren (inclusief erosie)

Zowel hoogwater als laagwater in de rivieren gaan in de toekomst naar verwachting vaker voorkomen. De Rijn, die nu een regen- en smelttrivier is, krijgt door de klimaatverandering geleidelijk meer het karakter van een regenrivier en gaat daarin meer op de Maas lijken. Door klimaatverandering zal in de toekomst in de winter in Zwitserland minder sneeuw en meer regen vallen en wordt er in de zomer minder smeltwater afgevoerd (Klijn et al., 2015).

Het afvoerregime van de Rijn en de Maas door het jaar heen wordt grilliger. De winterafvoeren nemen toe, de zomerafvoeren nemen af. In de Rijn is dat laatste echter beperkt het geval, doordat het Rijnstroomgebied heel groot is, met veel demping door onder andere de grote meren. De laagwaterafvoer (maandgemiddelden) in de nazomer bij Lobith kan in 2050 zowel 20% afnemen als 10% toenemen ten opzichte van 1981-2010, al naar gelang het klimaatscenario. Voor de Maas, die een veel variabelere afvoerregime kent met zeer lage afvoeren in de (na)zomer, wordt in de meeste scenario's verwacht dat die lage afvoeren verder afnemen; tot wel met 45% in 2050 in het droogste scenario (Klijn et al., 2015). In de Maas wordt het verschil tussen winter- en zomerafvoeren dus veel groter.

Een indirect gevolg van droogte is meer bodemerosie in de vaarwegen (Van Dorsser, 2015; RWS, 2020). De bodem van het zomerbed van de vaarwegen in Nederland is zanderig. Hierdoor zijn de vaarwegen gevoelig voor zogenoemde hydromorfologische processen: stromend water pakt het zand (sediment) op de ene plek op en deponeert het elders. Als er minder sediment het systeem binnenkomt dan eruit gaat, is er sprake van erosie en snijdt de rivier uiteindelijk steeds dieper de bodem in (RWS, 2020).

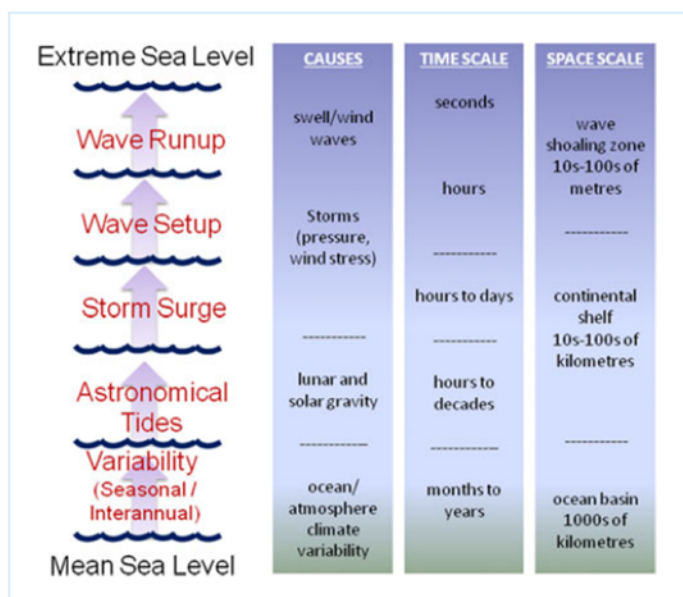
Verandering in niveau zeespiegel

Het niveau van de zeespiegel is geen echte klimaatvariabele, maar is een afgeleid effect van het klimaat. In Nederland stijgt de zeespiegel nu in een tempo van ongeveer 2 mm per jaar. Naar verwachting neemt dit tegen 2050 toe tot 3 à 8 mm per jaar (KNMI, 2015). Omdat in Nederland de bodem op sommige locaties daalt, vooral in veengebieden, wordt het hoogteverschil met de zeespiegel daar groter dan op andere locaties.

De stijging van de zeespiegel midden op de oceaan vormt voor Nederland geen direct overstromingsgevaar vanuit zee (Dankert, 2019).⁴² Overstromingen ontstaan namelijk niet rechtstreeks door de trend van een stijgende zeespiegel, maar door de variaties bovenop die trend. Vooral relevant is wat er aan de kusten gebeurt: de processen die optreden wanneer de waterdiepte minder groot wordt, en die op een kleine tijdschaal spelen. De zeespiegel aan de kust is een optelsom van het gemiddelde zeespiegelniveau met daarbovenop variaties zoals het getij, stormen en golfoploop (wave run-up); zie figuur A.4. Voor de nabije toekomst in Nederland laten de meeste klimaatmodellen een kleine toename van stormen uit het zuidwesten zien, en geen toename van de, gevaarlijker, noordwesterstormen. Wel is het de vraag hoe goed de modellen zijn: stormen zouden ook kunnen veranderen in een veranderend klimaat, een onderwerp waar wetenschappers nog niet veel van weten (Dankert, 2019).

De gevolgen van zeespiegelstijging voor Nederland zijn op de korte termijn overzichtelijk en hanteerbaar. Nederland kent aan de kust nu al veel variabiliteit: waterstanden van 5 m boven NAP en getijdeverschillen van meerdere meters zijn niet ongewoon en zorgen niet voor problemen. Een zeespiegelstijging van 0,5 m maakt voor Nederland daarom niet veel uit. In veel andere landen ligt dit anders. Bijvoorbeeld in de tropen is de variabiliteit van de zeespiegel veel kleiner. Als daar de zeespiegel 0,5 m stijgt, is dat wel direct desastreus (Dankert, 2019).

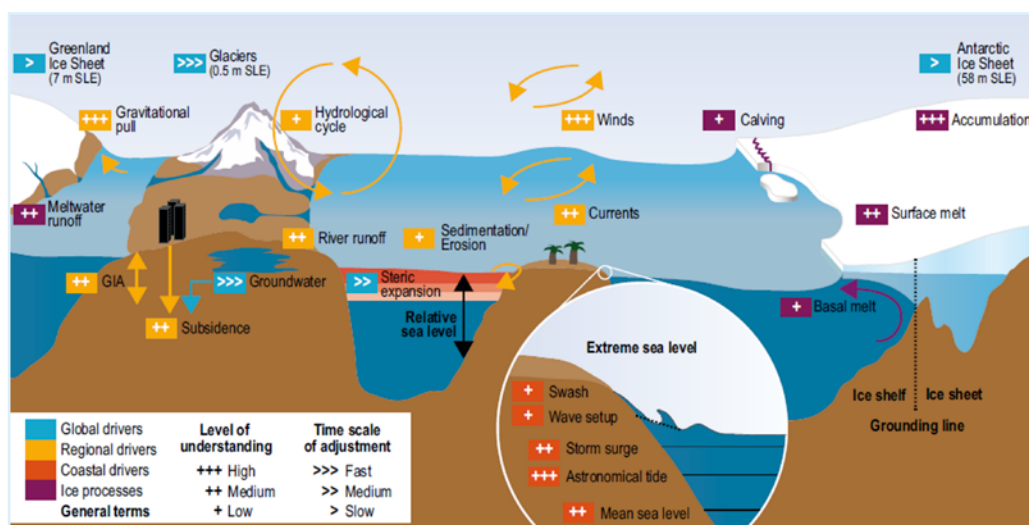
⁴² Dit is een interview met Roderik van de Wal, hoogleraar Sea level change and coastal impacts aan de Universiteit Utrecht, en medeauteur van het IPCC Special Report on Oceans and the Cryosphere in a Changing Climate (SROCC).



Figuur A.4 Extreem niveau van de zeespiegel als optelsom van afzonderlijke variaties.
Bron: McInnes et al. (2016).

Op de langere termijn kunnen de variaties bovenop de gemiddelde zeespiegel gaan veranderen als gevolg van de zeespiegelstijging, maar bijvoorbeeld ook als het zeeijsoppervlak verandert of als er ijsplaten bij Antarctica verdwijnen. Hierover is nog niet veel bekend, want de wetenschap besteedt pas sinds kort meer aandacht aan deze variaties (Dankert, 2019).

Figuur A.5 geeft de verschillende drijvende krachten in de stijging van de mondiale zeespiegel, met de staat van de kennis hierover (IPCC, 2019a).



Figuur A.5 Een schematische illustratie van processen, al dan niet klimaatgedreven, die invloed hebben op het mondiale, regionale, relatieve (ten opzichte van bodemdaling) en extreme zeespiegelniveau. SML staat voor Sea Level Equivalent, en geeft de toename van de mondiale zeespiegel weer wanneer de genoemde ijsmassa in zijn geheel is gesmolten en toegevoegd aan de oceaan. Bron: IPCC (2019a).

Hoogwater en kusterosie

Deltares verwacht dat bij een stijgende zeespiegel hoogwater frequenter gaat voorkomen (Haasnoot et al., 2018). Deltares illustreert dit met het voorbeeld van West-Terschelling: bij een stijging van het gemiddeld hoogwater met 1 m zou de frequentie van hoogwater van 3 m boven NAP (stormvloed) toenemen van eens per 10 jaar naar 5 keer per jaar (Haasnoot et al., 2018).

Het vaker voorkomen van hoogwater bij een hoger gemiddeld zeeniveau leidt tot sterkere erosie van strand en duin. Deze erosie kan bovendien structureel worden omdat ook de hersteltijd tussen 2 periodes van hoogwater afneemt. Om de kustlijn op zijn plaats te houden bij een stijging van de zeespiegel is aanvulling met zand nodig, waarbij het aan te brengen volume zand bepaald wordt door de snelheid van stijging (Haasnoot et al., 2018).

Bijlage B

Maatschappelijke kosten door negatieve effecten op de infrastructuur

Maatschappelijke kosten: 2 perspectieven

Effecten van klimaat op het mobiliteitssysteem en de aanpassingen als gevolg daarvan zorgen voor maatschappelijke kosten. Dit zijn alle kosten voor de maatschappij, inclusief private kosten. In deze bijlage onderscheiden we 2 perspectieven.

- *Perspectief 1:* Voor wiens rekening zijn de kosten (private personen en bedrijven, de overheid of zijn het externe kosten)?
- *Perspectief 2:* Wanneer worden de kosten gemaakt (directe aanpassing, ter preventie, bij herstel achteraf)?

	Privaat	Overheid	Extern
Direct aanpassing			
Herstelkosten achteraf			
Preventie vooraf			

Tabel B.1 Onderverdeling naar type maatschappelijke kosten in 2 dimensies (horizontaal en verticaal).

Perspectief 1: Wie draagt de kosten?

Het eerste perspectief is dat van de private kosten, infrastructuurkosten van de overheid en de externe kosten (zie tabel B.1). Deze driedeling is mede gebaseerd op de studie van Huibregtse et al. (2019), waarin een vergelijking is gemaakt van de infrastructuurkosten voor de overheid en de externe kosten voor het reizen met trein, auto, bus en vliegtuig.

- *Private kosten:* Private kosten zijn kosten die de reiziger, verlader of vervoerder direct in zijn portemonnee voelt. Ze bestaan onder meer uit uitgaven aan brandstof, tickets, kosten voor het bezit van een voer- of vaartuig en een monetaire waardering voor reistijd, betrouwbaarheid en comfort. Wanneer door hitte bos- en bermbranden ontstaan, moeten veel reizigers, verladers en vervoerder omrijden. Voorbeelden van de gerelateerde private kosten voor reizigers, verladers en vervoerders zijn extra brandstofkosten vanwege omrijden en kosten vanwege extra reistijd.
- *Kosten voor de overheid:* De overheid maakt ook kosten. In het voorbeeld van bermbranden zijn er kosten voor brandweerinzet en voor het maaibeheer. Dit zijn respectievelijk herstel- en preventiekosten.

- **Externe kosten:** Tot slot zijn er externe kosten. In het algemeen nemen reizigers, verladers en vervoerders de externe kosten niet mee in hun beslissing of, en op welke wijze, zij aan het verkeer deelnemen (Schroten et al., 2019). Omrijden als gevolg van een bermbrand leidt bijvoorbeeld tot extra CO₂-uitstoot of tot congestie op andere plaatsen in het netwerk. Verder kunnen bermbranden tot onveilige verkeerssituaties en mogelijk tot meer ongevallen leiden. Ook hieraan zijn kosten verbonden zoals medische kosten, afhandelingskosten, materiële kosten, kosten van productie-verlies en immateriële kosten (SWOV, 2020). Als reizigers, verladers en vervoerders de kosten wel meenemen door bijvoorbeeld andere prijsprikkels ('het internaliseren van externe kosten'), dan vallen deze kosten weer onder private kosten.

Perspectief 2: Wanneer worden kosten gemaakt?

Binnen dit tweede perspectief onderscheiden we de volgende kosten:

- **Directe kosten:** Directe kosten worden gemaakt tijdens een klimaatgerelateerde gebeurtenis. Voorbeelden zijn het gemonetariseerde tijdverlies van een reiziger of vervoerder door een stremming of de kosten voor het bestrijden van een bermbrand.
- **Preventiekosten:** Dit zijn kosten van maatregelen die negatieve effecten op de infrastructuur kunnen voorkomen, zoals het voorkomen van plasvorming op de weg door goed beheer en onderhoud. Preventieve maatregelen kunnen betrekking hebben op het aanpassen van de infrastructuur, maar ook op het aanpassen in het gebruik van de infrastructuur en in activiteiten.
- **Herstelkosten:** Dit zijn kosten die gemaakt worden om schade als gevolg van een opgetreden negatief effect op de infrastructuur te herstellen, bijvoorbeeld het herstellen van een dijk na een overstroming of het opnieuw asfalteren van een beschadigde weg na verzakking.

Voorbeelden van relatieve maatschappelijke kosten van negatieve effecten op de infrastructuur

De effecten van negatieve effecten op de fysieke infrastructuur op de rest van het mobiliteitssysteem zijn onzeker en lastig om te bepalen. Dit betekent ook dat het moeilijk is om de maatschappelijke kosten ervan in te schatten. In deze paragraaf beschrijven we 3 voorbeelden waarin onderdelen van de maatschappelijke kosten zijn berekend. In tabel B.2 verbinden we deze voorbeelden aan het type maatschappelijke kosten waar ze zich op richten.

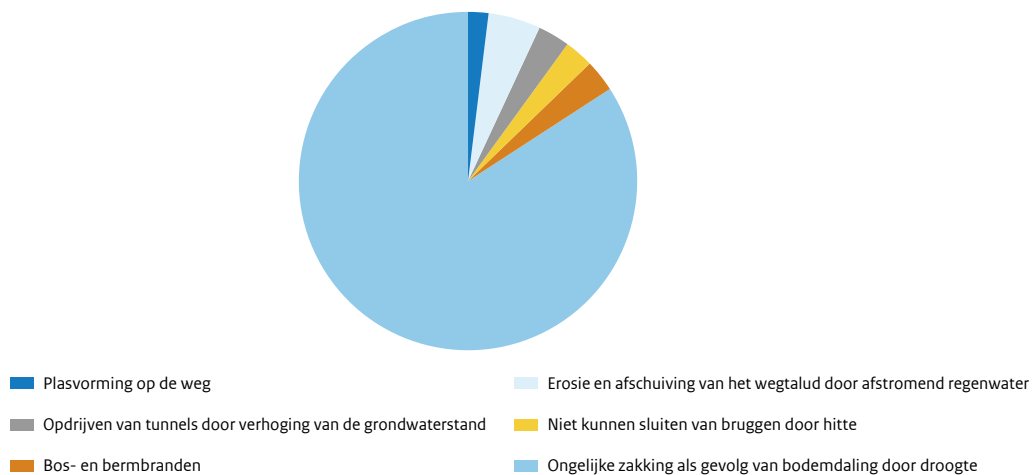
	Privaat	Overheid	Extern
Direct aanpassing	Laagwater binnenvaart (voorbeeld 2)	Klimaat effecten HWN (voorbeeld 1)	
Herstelkosten achteraf			
Preventie vooraf		Hoger beschermingsniveau zeekeringen (voorbeeld 3)	

Tabel B.2 Voorbeelden van maatschappelijke kosten en link met type maatschappelijke kosten.

Voorbeeld 1: Verkenning van de relatieve kosten van negatieve effecten op het hoofdwegennet

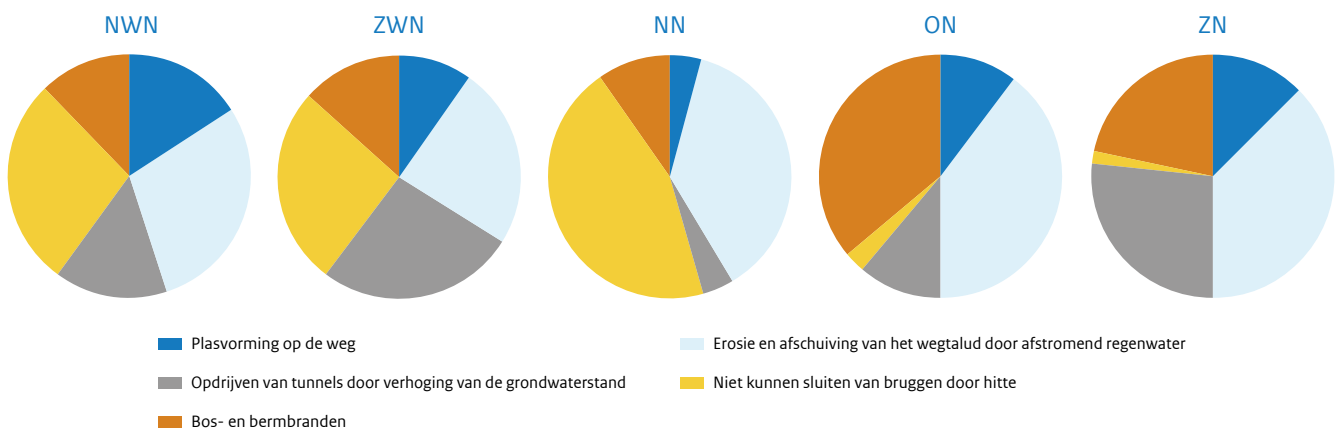
Deltares (Bles et al., 2021) heeft in opdracht van het KiM voor het hoofdwegennet risico's (de kans van optreden van negatieve effecten vermenigvuldigd met de gevolgen bij optreden) van 6 negatieve effecten in 2050 op relatieve wijze weergegeven. Het gaat om de risico's van de 7 negatieve effecten die zijn geselecteerd voor de klimaatgevoeligheidskaarten in hoofdstuk 4, met uitzondering van overstromen. Die selectie heeft, zoals daar is beschreven, plaatsgevonden op basis van de omvang van het risico: alleen de negatieve effecten met de grootste risico's in 2050 zijn geselecteerd.

De relatieve verdeling van de 6 grootste risico's in figuur D.1 levert inzicht op in de onderlinge kosten-verhouding van deze 6 negatieve effecten. Er komt uit naar voren dat in 2050 de risico's (kans van optreden x kosten bij optreden) die verbonden zijn met ongelijke zakking van hoofdwegen als gevolg van bodemdaling door droogte in Nederland het hoogst zijn.



Figuur B.1 Bijdrage van 6 negatieve effecten aan het totale risico (kans x gevolg, met gevolg uitgedrukt in herstel- en stremmingskosten) in het jaar 2050 van deze 6 negatieve effecten. Bron: Bles et al. (2021).

Figuur B.2 geeft nader inzicht in de risicoverdeling van dezelfde negatieve effecten op de infrastructuur per MIRT-regio. Omdat ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling zo'n dominante kostenpost is, is deze in de figuur weggelaten om de risicoverdeling voor de andere negatieve effecten beter in beeld te kunnen brengen. De figuur geeft als eerste inzicht dat er grote regionale verschillen zijn. Risico's gerelateerd aan bos- en bermbranden zijn relatief hoog in Oost-Nederland (ON) en Zuid-Nederland (ZN), terwijl risico's van het niet kunnen sluiten van bruggen (door hitte) groter zijn in de 3 andere MIRT-regio's. Risico's als gevolg van het mogelijk opdrijven van tunnels manifesteren zich relatief gezien vooral in Zuidwest-Nederland (ZWN), Zuid-Nederland (ZN) en iets mindere mate ook in Noordwest-Nederland (NWN).



Figuur B.2 Bijdrage van 5 negatieve effecten aan het totale risico (kans x gevolg uitgedrukt in herstel- en stremmingskosten) in het jaar 2050 van deze 5 negatieve effecten in de verschillende MIRT-regio's. Bron: Bles et al. (2021).

Voorbeeld 2: Schatting van de private aanpassingskosten voor de binnenvaart van laagwater

Dit voorbeeld heeft betrekking op de private kosten voor de binnenvaart als gevolg van een lange periode met lage waterstanden in de Rijn in 2018. Erasmus-UPT (2020) heeft de kosten voor verladers en binnenvaartondernemers in Nederland en Duitsland ingeschat (zie tabel B.3). Om de financiële impact van laagwater te bepalen kijken we in deze studie naar:

- De extra omzet voor binnenvaartondernemers door hogere tarieven en laagwatertoeslagen;
- De kosten voor verladers als gevolg van extra transportkosten, kosten van productievermindering en extra voorraadkosten.

Tabel B.3 laat zien dat laagwater, dat door klimaatverandering vaker kan optreden, tot een aanzienlijke maatschappelijke schadepost kan leiden.

		Nederland	Duitsland	Totaal
Financiële impact sector binnenvaart	Netto omzetstijging:	+378 miljoen euro	+95 miljoen euro	+473 miljoen euro
	Extra kosten:	-302 miljoen euro	-76 miljoen euro	-378 miljoen euro
	Nettowinst:	+76 miljoen euro	+19 miljoen euro	+95 miljoen euro
Financiële impact verladers	Transportkosten:	-245 miljoen euro	-243 miljoen euro	-488 miljoen euro
	Productievermindering	-60 miljoen euro	-2,1 miljard euro	-2,2 miljard euro
	Voorraadaanvulling	-66 miljoen euro	-65 miljoen euro	-131 miljoen euro
	Totale negatieve impact	-371 miljoen euro	-2,4 miljard euro	-2,8 miljard euro
Totale financiële impact		-295 miljoen euro	-2,4 miljard euro	-2,7 miljard euro

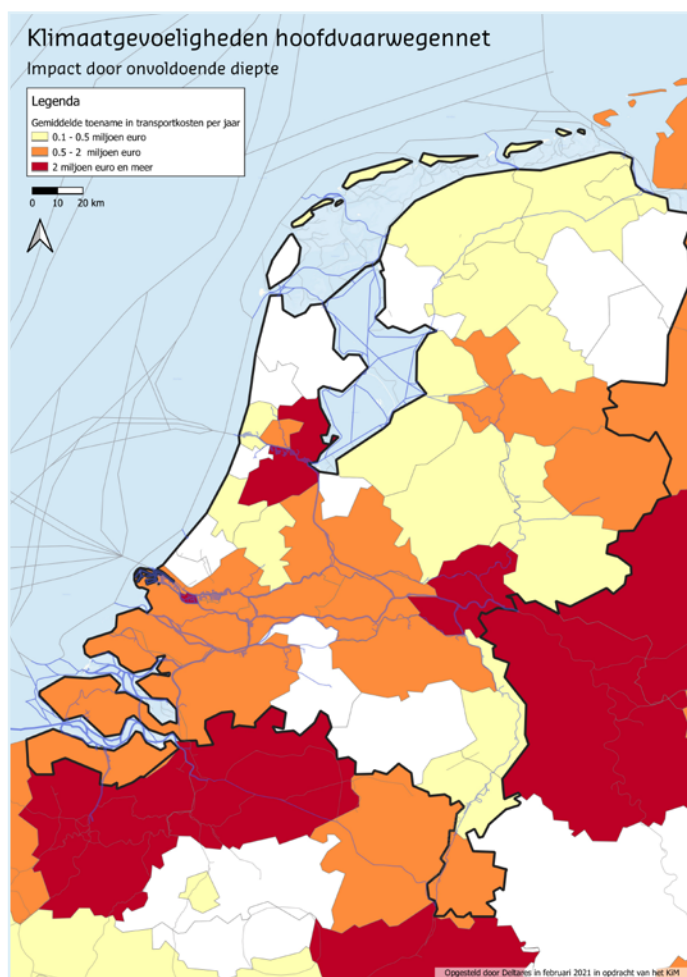
Tabel B.3 Private kosten voor binnenvaartondernemers en verladers als gevolg van laagwater in de Rijn in 2028 (Bron: Erasmus-UPT, 2020).

Bles et al. (2021) beschrijft in aanvulling de gemiddelde toename in transportkosten per jaar door een lagere waterdiepte als gevolg van droogte. Deltares gaat hierbij uit van het KNMI-klimaatsscenario WH 2050.⁴³ Figuur B.3 laat deze toename in transportkosten zien, gegroepeerd per bestemming (indeling naar NUTS3-regio's). In de berekening is de aanname gedaan dat de vervoerde vracht gelijk blijft.⁴⁴ Een lagere waterdiepte leidt tot een lagere beladingsgraad, waardoor meer reizen nodig zijn om dezelfde vracht te vervoeren. Dit resulteert in hogere (totale) transportkosten voor de verladers. Bij de interpretatie van figuur B.3 dient rekening te worden gehouden met de verschillen in omvang van de gebieden. De resultaten zijn niet 'genormaliseerd', waardoor grotere regio's automatisch hogere kosten kennen. De regio's in het buitenland zijn groot, terwijl in de haven van Rotterdam gebruik is gemaakt van meerdere deelregio's. Belangrijke regionale inzichten zijn:

- In Nederland is de grootste impact terug te vinden in Rotterdam (met name de Botlek), in de regio Groot-Amsterdam en in de agglomeratie Arnhem-Nijmegen.
- Een groot deel van de problemen door droogte in Nederland komen terecht op bestemmingen in het buitenland. Direct over de grens in Duitsland zijn de regio's Düsseldorf en Münster zichtbaar. In België komen de regio's Liège, Antwerpen en Oost-Vlaanderen naar voren. Ook verder stroomopwaarts op de Rijn is er nog grote schade door droogte: regio's Darmstadt, Freiburg, Rheinhaess-Pfalz, Alsace (Frankrijk).

⁴³ WH is een scenario van het KNMI (KNMI, 2015). KNMI heeft 4 klimaatscenario's ontwikkeld: GL, GH, WL en WH (KNMI, 2015). De scenario's verschillen in de mate van wereldwijde temperatuurstijging (G voor een gematigde stijging en W, warm, voor een grotere stijging) en in verandering van luchtstromingspatroon (L voor een lage invloed van deze verandering en H voor een hoge invloed hiervan). In de G-scenario's is de temperatuur in 2050 wereldwijd 1°C en in de W-scenario's 2°C hoger dan in 1981-2010. In de H-scenario's waait het 's winters vaker uit het westen, wat een zachter en natter weertype oplevert, en hebben 's zomers hogedrukgebieden een grotere invloed op het weer, met als gevolg meer oostenwinden, die warmer en droger weer met zich meebrengen.

⁴⁴ De gebruikte reizen in de referentie (zonder droogte) zijn afkomstig uit de scheepvaartregistratie IVS90 van 2014: een jaar dat vaak als referentie dient. De totale vervoerde vracht bedraagt ruim 300 miljoen ton, waarvan ongeveer 40% over de Waal vervoerd wordt.



Figuur B.3 Gemiddelde toename in transportkosten per jaar (klimaatsscenario WH 2050), gegroepeerd per bestemming (indeling naar NUTS3-regio's). Regio's zonder kleur (dus wit) hebben geen kostentoename door droogte. Bron: Bles et al. (2021).

Voorbeeld 3: Preventiekosten van overstromingen voor de overheid

Het derde voorbeeld heeft betrekking op preventieve kosten die nodig zijn om overstromingen te voorkomen. Om Nederland te beschermen zijn normen voor de primaire waterkeringen vastgelegd. In 2050 moeten de keringen voldoen aan de normen die sinds 1 januari 2017 van kracht zijn en zijn vastgelegd in de Waterwet. Hierin staat dat de kans op overlijden door een overstroming in 2050 voor iedereen achter de dijken niet groter is dan 1 op 100.000 per jaar (oftewel 0,001%). Dit is het zogeheten basisbeschermingsniveau. Het beschermingsniveau kan daarbij hoger zijn op plaatsen waar sprake kan zijn van grote groepen slachtoffers, grote economische schade en/of ernstige schade door uitval van vitale en kwetsbare infrastructuur van nationaal belang. RWS-WVL (2016) werkt dit basisveiligheidsniveau verder uit aan de hand van:

- *Lokaal Individueel Risico (LIR)*. LIR is de kans per jaar dat een persoon op een bepaalde locatie overlijdt door een overstroming, rekening houdend met de mogelijkheid tot evacuatie.
- *Economisch optimale beschermingsniveau*. Het economisch optimale beschermingsniveau is afhankelijk van: 1) de economische schade bij een overstroming; en 2) de kosten om de kans op een overstroming te verkleinen.

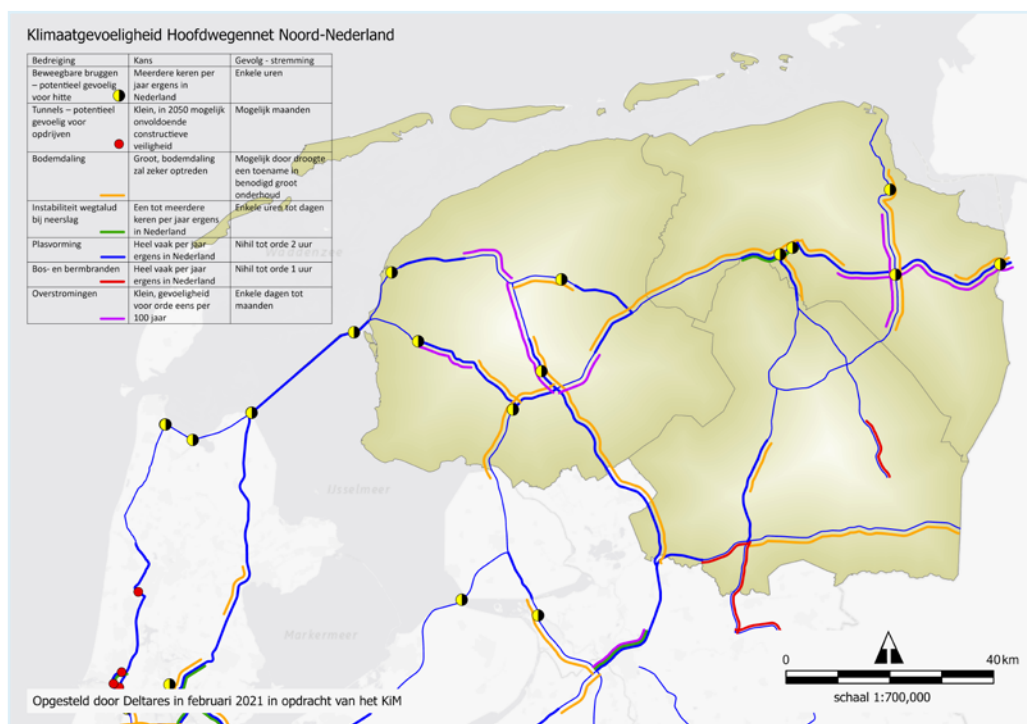
In totaal zijn er 243 normtrajecten, waarvan 207 dijk- en/of duintrajecten en 27 keringen. Voor deze trajecten is informatie beschikbaar over onder meer de gevolgen van een overstroming in termen van schade en slachtoffers en over de investeringskosten die nodig zijn om een 10 keer hoger beschermingsniveau te realiseren voor een normtraject. Deze beschermingskosten variëren tussen de 0,5 en 22 miljoen euro per km, met een gemiddelde van 5 miljoen euro per km. De hoogste verwachte kosten gelden voor trajecten waar veel bebouwing langs de dijk ligt. Figuur B.4 geeft ter illustratie een concrete uitwerking weer voor een van de normtrajecten. De tabel laat ook zien dat de preventiekosten die nodig zijn voor een hoger beschermingsniveau relatief laag zijn ten opzichte van de totale schadekosten van een overstroming.

Normtraject		15-3 Hollandse IJssel - oost	
Norm			
Ondergrenswaarde in de wet:	(kans per jaar)	1/3 000	
Signaleringswaarde in de wet:	(kans per jaar)	1/10 000	
Norm wordt bepaald door:		LIR en MKBA	
Eisen vanuit LIR 10.5, MKBA en Groepsrisico			
Eis LIR - ondergrenswaarde klasse	(kans per jaar)	1 / 3 000	
Eis LIR - signaleringswaarde klasse	(kans per jaar)	1 / 3 000	
Eis LIR - ondergrenswaarde	(kans per jaar)	1 / 1 800	
Eis LIR - signaleringswaarde	(kans per jaar)	1 / 3 600	
Eis MKBA - ondergrenswaarde klasse	(kans per jaar)	1 / 3 000	
Eis MKBA - signaleringswaarde klasse	(kans per jaar)	1 / 10 000	
Eis MKBA - signaleringswaarde	(kans per jaar)	1 / 7 500	
Hotspottraject Groepsrisico		Nee	
Normtraject			
Lengte	(km)	19.0	
Type			Dijk
Opbouw		km	%
	Zachte kering	0.0	0
	Harde kering	19.0	100
Kosten			
Kosten 10x hoger beschermingsniveau per km	(mln euro/km)	4.4	
Kosten 10x hoger beschermingsniveau voor normtraject	(mln euro)	85.0	
Gevolgen van overstroming			
Evacuatiefractie (onderkant bandbreedte)	(-)	0.08	
Mortaliteit bij overstroming vanuit dit traject	(%)	0.5	
Mortaliteit bij overstroming vanuit andere traject (overlap)	(%)	2	
Getroffenen (jaar 2011)	(aantal)	80 000	
Slachtoffers (jaar 2011)	(aantal)	270	
Economische schade (jaar 2011)	(mln euro)	5 300	
Getroffenen gemonitariseerd (jaar 2050)	(mln euro)	2 000	
Slachtoffers gemonitariseerd (jaar 2050)	(mln euro)	4 000	
Economische schade (jaar 2050)	(mln euro)	11 000	
Totale schade (jaar 2050)	(mln euro)	17 000	

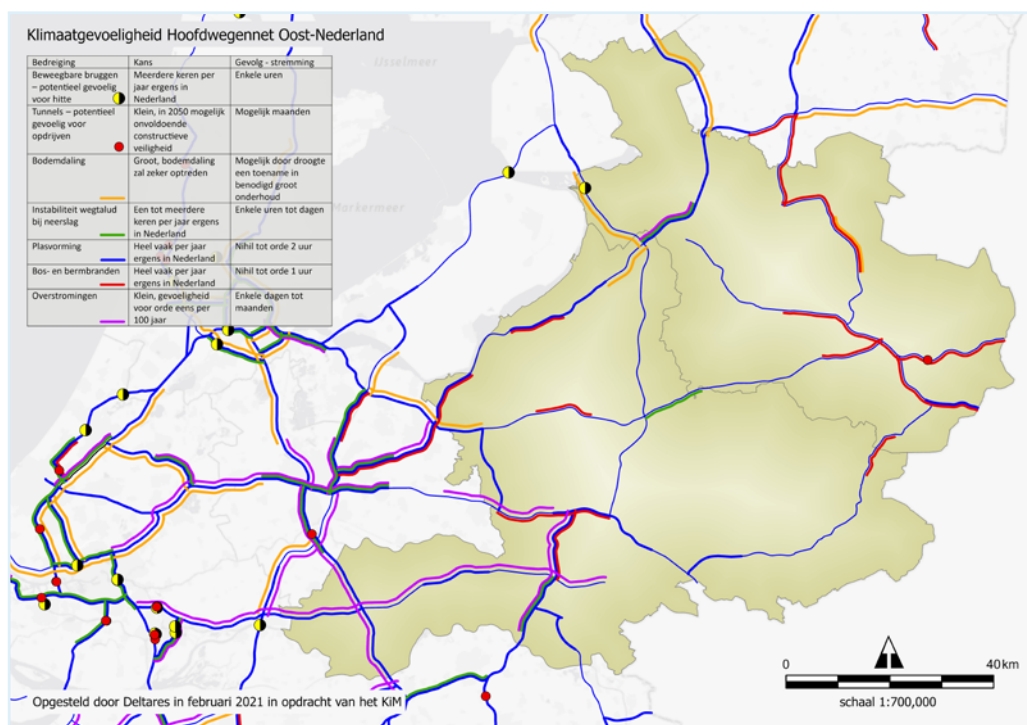
Figuur B.4 Een voorbeeld van kosteninformatie per waterkering (normtraject Hollandse IJssel-Oost).

Bijlage C

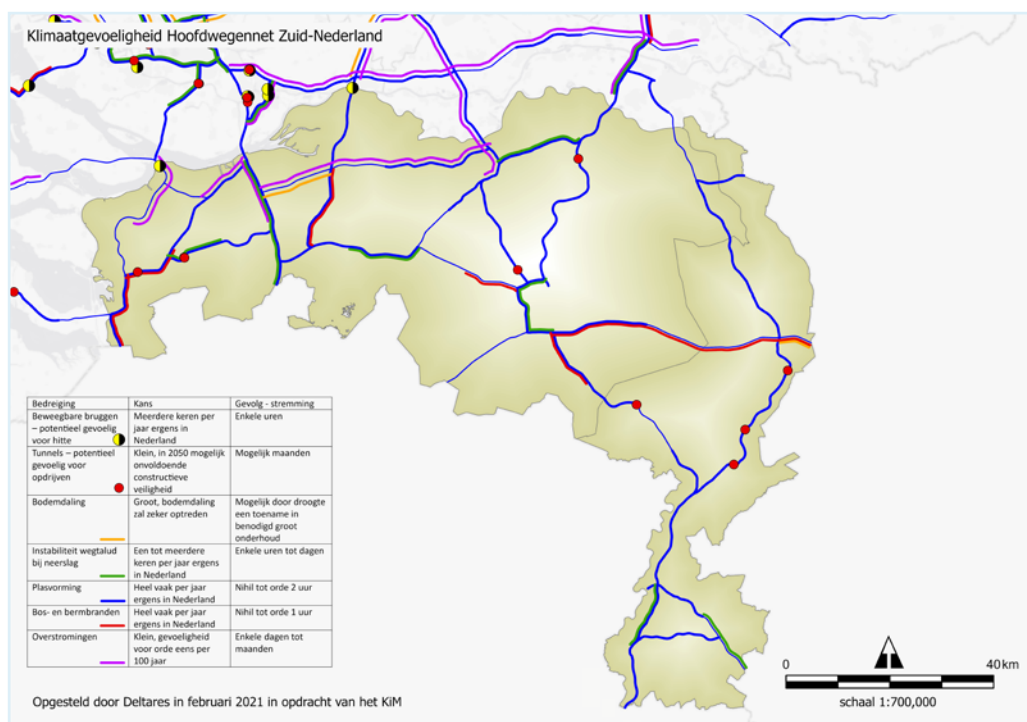
Gevoeligheden hoofd- wegennet MIRT-regio's



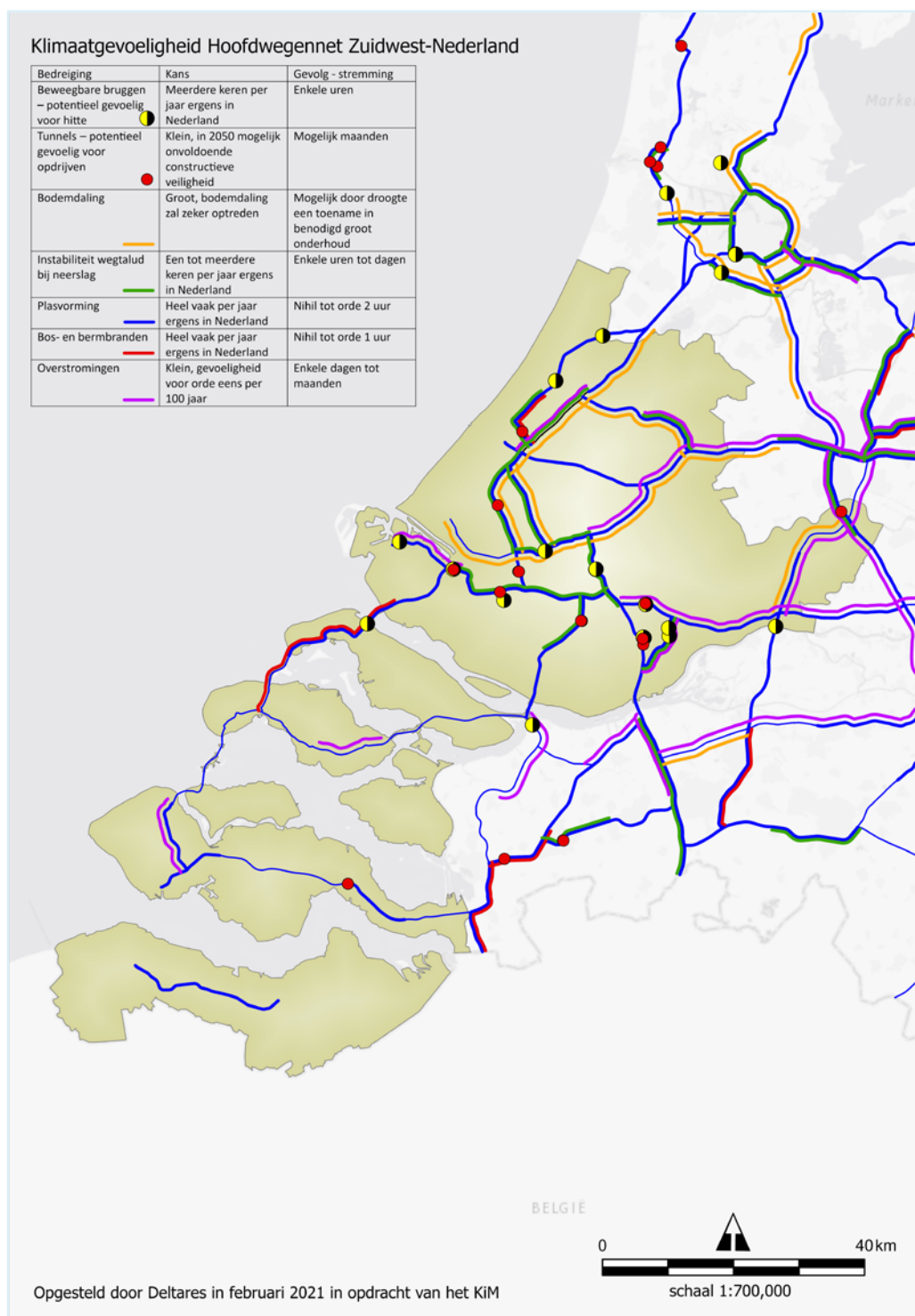
Figuur C.1 Gevoeligheid hoofdwegennet MIRT-regio Noord-Nederland



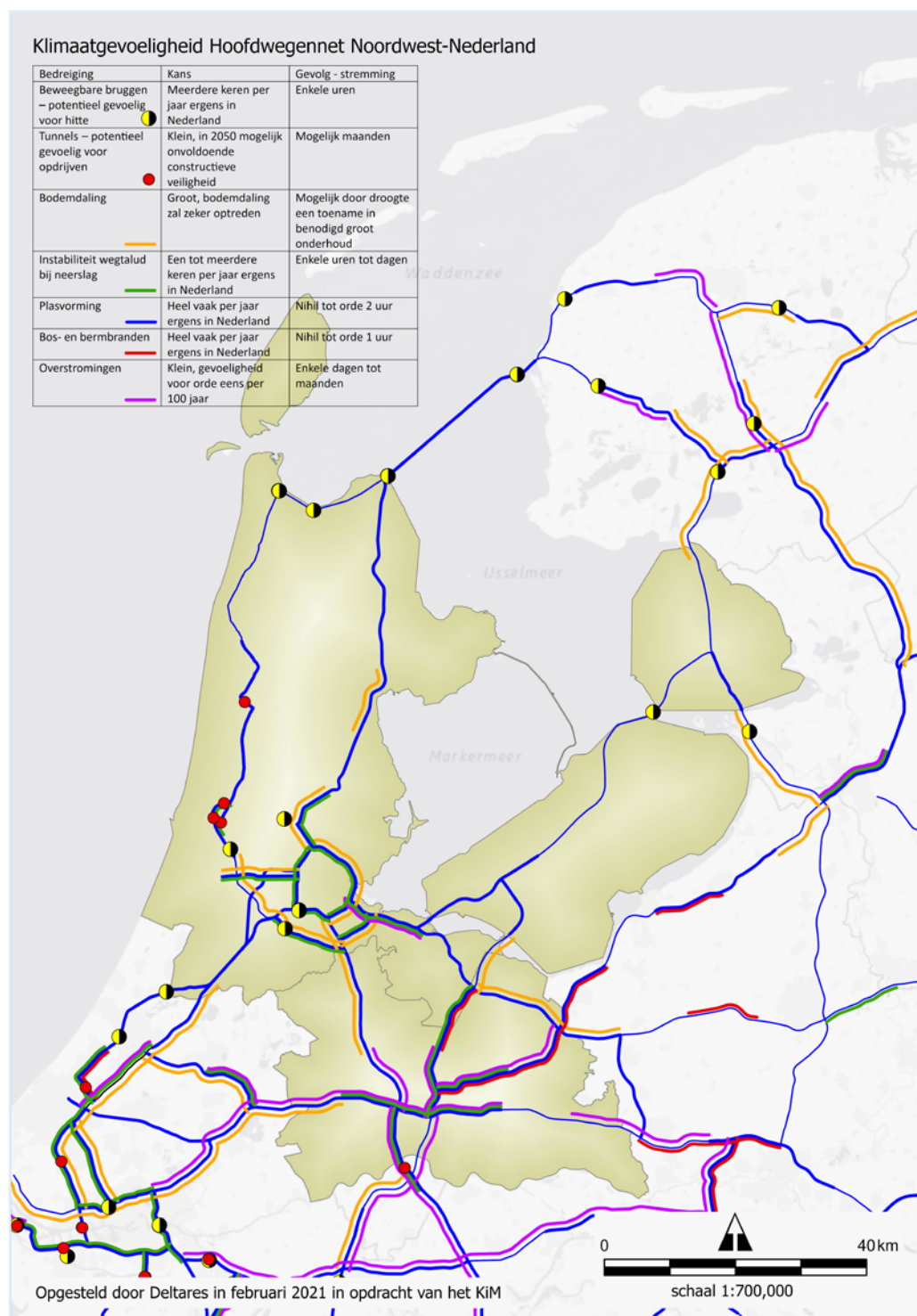
Figuur C.2 Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet MIRT-regio Oost-Nederland



Figuur C.3 Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet MIRT-regio Zuid-Nederland



Figuur C.4 Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet MIRT-regio Zuidwest-Nederland



Figuur C.5 Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet MIRT-regio Noordwest-Nederland

Bijlage D

Gevoeligheid: relatie met kenmerken van infrastructuur & omgeving

In deze bijlage gaan we voor wegen en, in mindere mate, spoorwegen nader in op de fysieke kenmerken van ondergrond, (spoor)wegtype en berm die samenhangen met de gevoeligheden voor klimaatverandering. Ook beschrijven we enkele fysieke aanpassingsmogelijkheden. Deze bijlage is grotendeels gebaseerd op Bles et al. (2020), de stresstest voor het hoofdwegenet. Omdat wegtaluds en kunstwerken in wegen, zoals tunnels en bruggen, veel gemeen hebben met de spoortaluds en kunstwerken in het spoor, gaan we ervan uit dat veel bevindingen van Bles et al. (2020) ook van toepassing zijn op spoorwegen.

D.1 Kenmerken van ondergrond, (spoor)weg en berm en hun samenhang met gevoeligheden

Hoe gevoelig een weg is voor het optreden van een specifiek negatief effect uit tabel 4.2 hangt af de fysieke eigenschappen van de weg en zijn omgeving. Zo spelen bij plasvorming op de weg (in een hevige bui) onder andere de bermhoogte, de capaciteit van de hemelwaterafvoer en de staat van onderhoud daarvan (met het oog op verstopping), het soort asfalt (zoals ZOAB) en de dwarshelling van de weg (de zogenaamde verkanting) een rol.

Drie typen gevoeligheidsfactoren

De fysieke kenmerken die de gevoeligheid van een weg (of spoorweg) bepalen, zijn te verdelen in 3 categorieën:

- 1 Ondergrond;
- 2 Fysieke (spoor)wegkenmerken;
- 3 Berm.

Tabel D.1 geeft per categorie enkele kenmerken ('gevoeligheidsfactoren') die de gevoeligheid voor een bepaald negatief effect (mede) bepalen. Deze tabel is gebaseerd op Bles et al. (2020). Onder de tabel staat een toelichting.

Categorie	Gevoeligheidsfactoren		Negatieve effecten op het infrastructuur (uit tabel 4.2 van deze studie)
Ondergrond	Grondsoort	Veen	Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling: hoe zandiger hoe minder gevoelig Afschuiving talud: hoe zandiger hoe gevoeliger
		Klei organisch	
		Klei anorganisch	
		Silt	
		Zand	
	Grondwater	Grondwaterstand	Opdrijven tunnels, verdiepte wegen, aquaducten en lichtgewichtconstructies
		Waterdruk	
		Verzilting	Afschuiving talud: bij infiltratie gevoeliger
		Kwel of infiltratie	
		Neerslagtekort in bodem	Bos- en bermbrand
Drooglegging (peilverschil weg en grondwaterpeil)	Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling		
(Spoor) weg	Weg: soort asfalt		Plasvorming op de weg
	Weg: verkanting weg (dwarshelling)		
	Soort funderingsmateriaal		Spatten van verhardingen 30 à 40 cm onder wegdek
	Bouwjaar kunstwerken		Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling
	Verkeersintensiteit/filevorming		Opdrijven lichtgewichtconstructies
	Hoogteligging		Bermbranden veroorzaakt door weggooien afval in de berm
	Ligging binnen- en buitendijks		
Berm	Bermhoogte		Plasvorming bij extreme buien
	Aanwezigheid geluidsscherm (Capaciteit) hemelwaterafvoer		
	Steilheid talud		Afschuiven talud bij extreme buien
	Aanwezigheid kunstwerk		
	Vegetatie berm		Bos- en bermbranden
	Weg: aanwezigheid vluchtstrook		
	Aanwezigheid ecoduct		
	Afstand bermsloot tot weg		Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling

Tabel D.1 Kenmerken van (spoor)wegen die de gevoeligheid voor bepaalde negatieve effecten bepalen, gebaseerd op Bles et al. (2020).

Ondergrond

Bles et al. (2020) onderscheiden 5 grondsoorten:

- 1 Veen;
- 2 Klei organisch;
- 3 Klei anorganisch;
- 4 Silt;
- 5 Zand.

Van boven naar beneden wordt een talud met deze grondsoort steeds gevoeliger voor uitspoeling bij extreme buien, waardoor het **talud kan afschuiven**. De gevoeligheid voor afschuiven hangt daarnaast af van de steilheid van het talud, de kans op plasvorming en de aanwezigheid van kunstwerken, zoals viaducten en bruggen.

Bij de 5 grondsoorten neemt van boven naar beneden de gevoeligheid voor **ongelijke verzakkingen** als gevolg van bodemdaling door droogte juist af. Naast de grondsoort speelt bij ongelijke verzakkingen ook de fundering een rol (zie tekstbox 'ongelijke zakking door droogte'). Deze laat zien welke effecten ongelijke verzakkingen kunnen hebben, afhankelijk van zaken als betonnen of houten funderingen en het al dan niet gefundeerd zijn van kunstwerken.

Het grondwater (en veranderingen daarin) is de tweede belangrijke factor bij de ondergrond. Deze factor kan zorgen voor **opdrijven van kunstwerken** en **ongelijke zakking door bodemdaling**. Een toename van de grondwaterstand kan plotseling leiden tot opdrijven als het verticaal evenwicht is overschreden; er is dus een non-lineair verband. De kans op opdrijven van kunstwerken is klein, maar treedt het op, dan kan dit leiden tot zeer hoge kosten. Vanuit het grondwater kan er daarnaast sprake zijn van **verzilting**. Hierdoor neemt de dichtheid van water en daarmee de **opwaartse druk** toe en het zout kan de constructies aantasten (Bles et al., 2020).

Weg

Bij deze categorie gaat het over het soort asfalt, de verkanting (de dwarshelling van de weg), het funderingsmateriaal onder de weg en het bouwjaar van het kunstwerk (brug, tunnel, aquaduct of lichtgewichtconstructie) waar de weg overheen loopt. Deze kenmerken hangen samen met de gevoeligheid voor onder andere **plasvorming, afschuiven** van taluds, **ongelijke zakking** en **opdrijven van kunstwerken**.

Het bouwjaar van kunstwerken is van belang omdat vanaf 2007 in het ontwerp van tunnels, verdiepte wegen en aquaducten rekening moet worden gehouden met de gevolgen van klimaatverandering. Dit betekent dat objecten die in 2010 of later zijn voltooid, als klimaatbestendig worden beschouwd (Bles et al., 2020).

De spatgevoeligheid van wegen bij hogere temperaturen is nog niet goed onderzocht en daarom erg onzeker (Bles et al., 2020). **Spatten** gebeurt wanneer funderingsmaterialen onder de weg die zwelgevoelig zijn, zodanig uitzetten dat er plaatselijk bloemkoolvormige uitstulpingen ontstaan op het oppervlak. Het uitzetten van funderingsmaterialen gebeurt door chemische processen die altijd al plaatsvinden, maar die versnellen onder invloed van hoge temperaturen. Dit is theoretisch en in lab-opstellingen aangetoond, maar er is weinig bekend over praktijkomstandigheden. De gevoeligheid lijkt niet heel groot te zijn, maar meer onderzoek is nodig om dit definitief uit te wijzen (Bles et al., 2020).

Berm van de weg

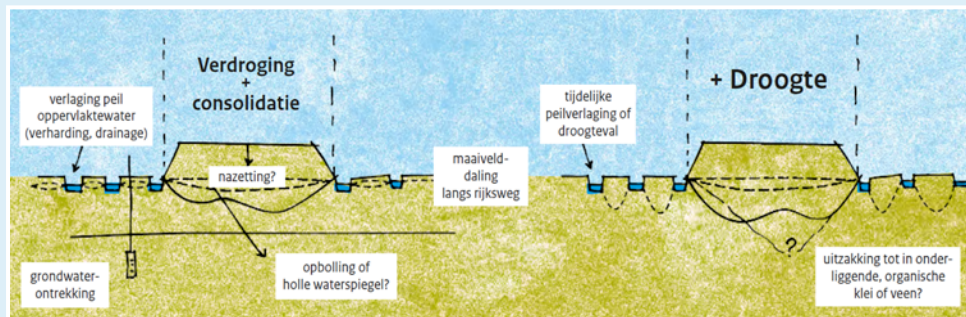
Bij de berm spelen verschillende factoren een rol in de kans dat een negatief effect optreedt. Het gaat specifiek om **plasvorming, afschuiving** van het talud in een extreme bui, **bermbranden** en **ongelijke zakking**. De bepalende factoren zijn:

- Is er een bermsloot aanwezig en, zo ja, op welke afstand? Hoe verder weg, hoe groter de gevoeligheid voor **ongelijke zakking** door bodemdaling door droogte.
- Wat is de hoogte van de berm: ligt deze hoger of lager dan de weg? Als de berm hoger is, dan kan hemelwater vanaf de berm op de weg stromen en kan neerslag die op de weg valt niet afstromen. Dit kan leiden tot **plasvorming** en **afschuiving van het talud**.
- Wat is de steilheid van het talud en is er een kunstwerk aanwezig? Een kunstwerk is meestal verhoogd en soms verdiept aangelegd. Dit hoogteverschil moet door een talud worden overbrugd. Daarmee is er een kans dat het **talud verschuift**. Daarnaast moeten kunstwerken vaak ingepast worden in kleine ruimtes, waardoor het talud schuiner wordt.
- Is er een geluidsscherm? Dat kan namelijk betekenen dat water moeilijker van de weg kan wegstromen of dat het **talud sneller afschuift** door het grote gewicht dat erop rust.

- Is er een vluchtstrook die zorgt voor een langere afstand van de weg tot de berm dan in de situatie zonder vluchtstrook? Zo ja, dan is er minder kans dat sigaretten en ander afval dat uit auto's wordt gegooid in de berm terecht komt en daar een bermbrand veroorzaakt. De afstand tot de berm bepaalt ook hoeveel rijstroken door een bermbrand worden gehinderd (Bles et al., 2020). Ook het soort vegetatie in de berm speelt hierbij overigens een rol.
- Is er hemelwaterafvoer aanwezig en met welke capaciteit? Verder speelt ook onderhoud een belangrijke rol, bijvoorbeeld om verstoppingen in de hemelwaterafvoer te voorkomen.

Ongelijke zakking door droogte

Droogte kan leiden tot bodemdaling of kan bestaande bodemdaling versnellen. Bodemdaling kan leiden tot ongelijke zakking; zie figuur D.1.



Figuur D.1 Ongelijke zakking (mede) veroorzaakt door droogte. Bron: Witteveen en Bos (2020).

Ongelijke zakking kan zorgen voor een gevaarlijke situaties op de weg. Witteveen en Bos (2020) onderscheidt 4 mogelijke effecten.

- 1 Door zetting van het maaiveld kan de asfaltconstructie losscheuren van het maaiveld. Dit speelt bij de overgang tussen aardebanen en kunstwerken.
- 2 Door zetting rondom (betonnen) landhoofden kan er ruimte en schade ontstaan tussen de onderkant van het beton en het maaiveld. In geval van houten damwanden kan de gecreëerde ruimte ook uitspoeling naar het oppervlaktewater veroorzaken. Daarnaast kan zetting rondom landhoofden leiden tot problemen voor vaste bruggen en viaducten. Toenemende verzakking kan leiden tot problemen met voegovergangen, waardoor verkeershinder ontstaat.
- 3 Door zetting van het maaiveld kan schade aan houten funderingen ontstaan, zoals paalrot en negatieve kleeft (inklinkende grond die aan de paal gaat trekken). Er zijn nog maar enkele objecten in het hoofdwegennet met een houten paalfundering. Betonnen paalfunderingen zijn over het algemeen weerbaarder tegen daling doordat zij een aangepast ontwerp hebben en op een stabiele zandlaag liggen. Het is niet bekend wat het effect van droogte op betonnen paalfunderingen is.
- 4 Door ongelijke zakkingen als gevolg van zettingsverschillen kunnen wegen en ongefundeerde kunstwerken, afhankelijk van de omstandigheden en het type kunstwerk, gaan hobbelen of schade oplopen. Ook kan op hellende wegdelen de zichtafstand voor weggebruikers afnemen.

Vervanging van een object dat door zakkingen in het wegdek is beschadigd, is een ingrijpende herstelwerkzaamheid die weken tot maanden kan duren en waarbij de kosten voor onderhoud en verkeersmanagement hoog oplopen. Om in de aardebanen het bestaande alignement weer terug te krijgen moet het maaiveld (of zandpakket) worden opgehoogd (eventueel met overhoogtes en een langere zettingperiode) en moeten de fundering, riolering en rijbanen worden verwijderd en na de zettingperiode weer worden teruggebracht (Witteveen & Bos, 2020).

D.2 Aanpassingsmogelijkheden

Wateroverlast

Extreme buien: Een grotere capaciteit van de waterafvoer en beter onderhoud (ter voorkoming van verstoppingen) zijn bij wateroverlast de belangrijkste adaptatiemogelijkheden. Ook het type asfalt dat wordt gebruikt, is een aanpassingsmogelijkheid. Bij DAB (dicht asfaltbeton) is bij regen eerder sprake van slecht zicht dan bij ZOAB (zeer open asfaltbeton). Bij extreme buien speelt slecht zicht door opspattend water (en neerslag rechtstreeks op de voorruit) zowel op DAB als ZOAB; het ZOAB raakt dan immers al snel verzadigd (Bles et al., 2020).

Grondwater: Voorkomen van opdrijven van tunnels is vooral een ontwerp vraag. Te denken valt aan toepassing van conservatieve constructies in gebieden waar de grondwaterstand toeneemt.

Droogte

Verzakking: Adaptatiemogelijkheden voor verzakkingen door bodemdaling vanwege droogte zijn er beperkt. De enige manier om een weg volledig bestendig te maken tegen bodemdaling is de weg volledig te onderheien tot op de vaste laag. Dit leidt al snel tot enorme kosten (miljarden euro's). Toch zijn er enkele ontwerp- en beheersmaatregelen mogelijk om ongelijke zakking door bodemdaling te voorkomen (Witteveen & Bos, 2020):

- *Extra aandacht voor onderhoud afwateringsvoorzieningen na droogte.* Juist in een periode van droogte is aandacht nodig voor de staat van de afwatering en is er een noodzaak deze goed te onderhouden. Na een lange droogte infiltreert regenwater niet goed in de bodem zodat het lastig is het grondwaterpeil weer snel aan te vullen. Een goede afwatering zorgt voor vertraagde infiltratie. Een slechte afwatering doet regenwater juist versneld afstromen waardoor het de bodem niet bereikt. Hierdoor kan de grondwaterstand nog verder dalen omdat het grondwater niet of nauwelijks wordt aangevuld.
- *Extra water vasthouden in de berm sloten in natte periodes.* Door de berm sloten goed te onderhouden en te baggeren wordt de capaciteit vergroot en kan meer water worden vastgehouden. Daarnaast valt te denken aan kleine stuwconstructies om het waterpeil op sommige locaties te regelen en zo water vast te houden. Dit verkleint de kans dat de grondwaterstand onder en rond de weg snel daalt ten tijde van droogte.
- *Goed peilbeheer om bodemdaling door droogte te voorkomen.* Ook dit kan helpen om verzakking te voorkomen. Het peilbeheer valt onder de verantwoordelijkheid van de waterschappen.

Bermbranden: Een adaptatiemaatregel om bermbranden door droogte te voorkomen is aanpassing van het maai regime. Door vaker te maaien is er minder brandstof in de berm aanwezig. Bij toepassing van deze maatregel moet wel rekening worden gehouden met andere doelstellingen zoals biodiversiteit en stevigheid van het talud. Andere mogelijke maatregelen zijn bewustwordingscampagnes over zwerfafval en ander grondwaterbeleid.

Overstromen

Omdat het beschermingsniveau van de Nederlandse dijken hoog is en wegen zeer veel moeten worden opgehoogd om overstromingsbestendig te zijn, lijkt dit voorlopig geen zinvolle maatregel om wegen overstromingsbestendig te maken. Voor kleinere overstromingen met een korte herhalingstijd kan het wel de moeite waard zijn om maatregelen te nemen. Dit soort overstromingen vindt met name plaats in het rivierengebied.

Bijlage E

Nieuwsberichten



Tabel E.1 Opdrijven Vlaketunnel (2010). Bron: NOS, 15 november 2010
<https://nos.nl/artikel/198374-vlaketunnel-blijft-nog-week-dicht.html>

Het Parool

Grondverschuiving onder asfalt spitsstrook A10

De spitsstrook op de snelweg A10-Zuid bij Amsterdam tussen de knooppunten Nieuwe Meer en Amstel is donderdagochtend buiten gebruik door een grondverschuiving.

Het Parool/ANP 6 juni 2019, 10:47



Het zand is onder het asfalt van de spitsstrook richting Utrecht vandaan geslagen op een plaats waar eerder werkzaamheden plaatsvonden. BEELD RIJKSWATERSTAAT VERKEERSINFORMATIE

Tabel E.2 Afschuiven talud A10 Amsterdam (2019). Bron: het Parool, 6 juni 2019
<https://www.parool.nl/nieuws/grondverschuiving-onder-asfalt-spitsstrook-a10~b1813b0d/>



▲ Een bermbrand tussen Deventer en Apeldoorn langs het spoor. © Pim Velthuisen

Gelderland haalt alle naaldbomen langs wegen en sporen weg in strijd tegen bosbranden

Provincie Gelderland haalt de komende jaren alle naaldbomen langs alle provinciale wegen en vervangt ze voor minder 'ontvlambare' begroeiing zoals loofbomen en loofstruiken. Het moet voorkomen dat een bermbrand ontaardt in een bosbrand. Door de droogte nam vorig jaar het aantal bermbranden met 70 procent toe.

Sjoerd Hartholt 13-05-19, 08:57 Laatste update: 08:59

Tabel E.3 Bermbranden langs het spoor. Bron: de Gelderlander, 13 mei 2019 <https://www.gelderlander.nl/home/gelderland-haalt-alle-naaldbomen-langs-wegen-en-sporen-weg-in-strijd-tegen-bosbranden~a995877f/>



▲ foto ter illustratie. © Sem van der Wal

Boom waait op spoor: geen treinverkeer tussen Driebergen en Ede-Wageningen

VEENENDAAL - Tussen Veenendaal en Driebergen-Zeist rijden tot zeker 20.30 uur geen treinen. Dat meldt ProRail donderdagochtend. Oorzaak van de problemen is een defecte bovenleiding; er viel eerder een boom op het spoor.

Redactie 11-03-21, 10:37 Laatste update: 11-03-21, 14:11

Tabel E.4 Bomen op het spoor. Bron: de Gelderlander, 11 maart 2021 <https://www.gelderlander.nl/veenendaal/boom-waait-op-spoor-geen-treinverkeer-tussen-driebergen-en-edo-wageningen-a29dd9e8/>

BUITENLAND

Rijn bij Keulen dicht voor scheepvaart vanwege hoogwater

Van onze redacteur 2 feb



Het waterpeil van de Rijn komt door de overvloedige neerslag in het stroomgebied van de rivier zo hoog dat vanaf woensdag bij Keulen geen schepen meer mogen varen. De maatregel, die vaker wordt genomen bij hoogwater, treft ook Nederlandse binnenvaartschippers, voor wie de Rijn een belangrijke doorvoerder is naar het Duitse achterland.

Volgens de [waterschapsdienst](#) van de Duitse miljoenenstad stond de Rijn dinsdagmiddag nog maar zeven centimeter onder de stand waarbij het scheepvaartverkeer verboden wordt. Woensdagochtend om zes uur staat de rivier waarschijnlijk 3 centimeter boven die stand. De stad verwacht dat het waterpeil in de Rijn pas begin volgende week weer zal zakken, wat betekent dat het vaarverbod waarschijnlijk tot na het weekeinde van kracht zal blijven.

Volgens [Duitse media](#) daalt de Rijn stroomopwaarts alweer en is er voorlopig geen sprake van dat het waterpeil van de Rijn bij Duisburg, niet ver van de grens met Nederland, zo hoog wordt dat ook daar het scheepvaartverkeer moet worden stilgelegd.

De scheepvaart wordt verboden als het water in een rivier zo hoog staat dat de doorgang onder viaducten te klein wordt of dat het gevaar bestaat dat de golven van de vaartuigen dijken beschadigen.

Tabel E.5 Hoogwatermaatregelen voor de scheepvaart. Bron: FD, 2 februari 2021
<https://fd.nl/economie-politiek/1372612/rijn-bij-keulen-dicht-voor-scheepvaart-vanwege-hoogwater>

Bijlage F

Klimaatadaptatie van Nederlandse havenbeheerders

Aan de negatieve effecten die de zeespiegelstijging heeft op zeehavens, wordt in de Nederlandse havens veel aandacht besteed. Deze bijlage geeft een overzicht van of, en hoe, in de 5 Nederlandse havens van nationaal belang de effecten van zeespiegelstijging worden ingeschat en welke maatregelen worden genomen danwel welke onderzoeksprogramma's lopen. De Nederlandse havens van nationaal belang zijn Amsterdam, Groningen, Moerdijk, Rotterdam en North Sea ports (tot 2017 Zeeland Seaports (Vlissingen en Terneuzen)).

Vooraf merken wij het volgende op:

- De aandacht voor klimaatverandering bij zeehavens is er in verschillende mate: nog niet geagendeerd, een visie of een concrete adaptatiestrategie.
- Veel visies of strategieën zijn in de laatste 4 jaar geschreven. Het lijkt erop dat havens de laatste jaren actief zijn gaan nadenken over klimaatverandering.
- Niet alleen havenbeheerders nemen het initiatief voor visies en strategieën rond zeespiegelstijging. Soms zijn ook gemeente, provincie of waterschappen betrokken. Dit is deels te verklaren doordat gemeente en/of provincie via aandeelhouderschap gelieerd zijn aan de havenbeheerder (zo is de gemeente Amsterdam de enige aandeelhouder van de havenbeheerder van Amsterdam, en Moerdijk heeft de gemeente en provincie Noord-Brabant als aandeelhouder).

F.1 Amsterdam

Het Havenbedrijf Amsterdam heeft geen studies of visie gepubliceerd rond klimaatadaptatie. Op initiatief van de Gemeente Amsterdam (de enige aandeelhouder van het Havenbedrijf Amsterdam), Waternet en het ministerie van IemM is in 2017 de Klimaatstresstest Waterbestendig Westpoort uitgevoerd. In Westpoort in het Amsterdamse havengebied zijn op- en overslagbedrijven gevestigd. Amsterdam is de grootste benzine- en cacaohaven ter wereld. Ook herbergt het gebied veel vitale functies voor Amsterdam en omgeving, zoals elektriciteit, stadswarmte, telecommunicatie en een afvalwaterzuivering. Vanuit de haven wordt Schiphol via een pijpleiding van kerosine voorzien.

De kans op een overstroming in Westpoort is klein: ongeveer 1/5.000 per jaar (Must Stedebouw, 2017), maar als die overstroming optreedt zijn er grote gevolgen. Als Westpoort overstroomt, zal door een aaneenschakeling van effecten (elektriciteit, telecommunicatie, stadsverwarming, aanvoer Schiphol, enzovoort) het totale maatschappelijk effect groot zijn. De adaptatiestrategie van Amsterdam bestaat uit 3 sporen:

- 1 *Aware*: Richt zich op een adequate informatievoorziening en het creëren van bewustwording van de risico's en gevolgen van een overstroming;
- 2 *Bottom line*: Richt zich op het beperken van de omvang van een ramp. Het spoor bestaat zowel uit operationele afspraken als uit fysieke maatregelen, met name voor crisisbeheersing;
- 3 *Resilient projects*: Dit spoor signaleert en stimuleert slimme oplossingen voor een weerbare inrichting van het havengebied. Gezocht wordt naar waterbestendige oplossingen, zowel in de fysieke inrichting als in de locatiekeuze.

F.2 Groningen

Klimaatadaptatie wordt niet expliciet genoemd in de strategiedocumenten van Groningen Seaports. In het vestigingsbeleid van Eemshaven en Delfzijl (Groningen Seaports, 2020) wordt het risico op hoogwater wel benoemd, maar de kans erop en impact ervan worden niet ingeschat. In de buitendijkse gebieden van het havengebied zijn eigenaren en gebruikers zelf verantwoordelijk voor het treffen van maatregelen. Zij dragen zelf het risico bij wateroverlast. De havenbeheerder neemt maatregelen om overstromingsgevaar te beperken. Binnendijks wordt extra aandacht besteed aan inrichting en technische oplossingen.

F.3 Moerdijk

De havenbeheerder van Moerdijk erkent in zijn visie 2030 (Port of Moerdijk, 2014) dat de haven van Moerdijk zich moet voorbereiden op een toekomst waarin de zeespiegel stijgt en pieken met hoge neerslag afgewisseld met periodes van langdurige droogte moeten worden opgevangen. In zijn Veiligheidsvisie 2030 (Port of Moerdijk, 2017) stelt de havenbeheerder dat op basis van de door het KNMI opgestelde klimaatscenario's voor 2100 (KNMI'14) zich tot 2030 weinig tot geen risico's zullen voordoen. De overstromingskansen voor Moerdijk zijn nihil. Het motto is 'vinger aan de pols houden': voortdurend monitoren en een rol nemen in bestaande initiatieven passend binnen de klimaatadaptatie.

F.4 Rotterdam

In zijn herijkte Havenvisie (Havenbedrijf Rotterdam 2019) geeft de havenbeheerder aan klimaatverandering nadrukkelijk mee te nemen in zijn plannen voor de aanleg, het onderhoud en de renovatie van natte en droge infrastructuur. Al in 2017 is het Havenbedrijf Rotterdam in samenwerking met de gemeente Rotterdam, andere overheden, (nuts)bedrijven en werkgeversvereniging Deltalinqs het programma Adaptatiestrategie waterveiligheid gestart. In een periode van 6 jaren worden verschillende deelgebieden van het havengebied onderzocht: Botlek en Vondelingenplaat (gereed 2017), Waal-Eemhavengebied (gereed 2018), Merwevierhavengebied (gereed 2019), Europoort (gereed 2019), Maasvlakte (in voorbereiding 2020) en Dordrecht en overige gebieden (volgt 2021). De resultaten van de onderzoeken leveren ook een bijdrage aan de 'Strategische adaptatie agenda Buitendijks' van het Deltaprogramma (Havenbedrijf Rotterdam, 2020).

Uit de tot nu toe afgeronde onderzoeken (Royal Haskoning, 2017, 2018, 2020) blijkt dat zich bij het W+-klimaatsscenario (KNMI'06-scenario's) een overstroming voordoet met een frequentie van 1/300 per jaar in 2050 en 1/1.000 per jaar in 2100. De studie van Tretjakova (2012) heeft op globaal niveau een vergelijking gemaakt tussen overstromingskansen in diverse internationale grote zeehavens (Hamburg, Londen, Melbourne, New York, Ho Chi Minh, Rotterdam enzovoort). De overstromingskans van de internationale zeehavens in Engeland, Duitsland, de Verenigde Staten ligt in een brede range van 1/100-1/1.000 jaar. De studie stelt dat de Rotterdamse haven in vergelijking met andere internationale havens relatief veilig is. De overstromingskansen zijn gemiddeld een factor 1 tot 100 lager.

Uit de analyses van de economische schade, milieuschade en het aantal slachtoffers blijkt dat een overstroming in het Rotterdamse havengebied vooral tot economische schade leidt. Deze omvat de directe schade (gebouwen, installaties en andere voorzieningen) en de indirecte schade (omzetverlies omdat een bedrijf stil komt te liggen of niet optimaal wordt gebruikt). Overstromingen geven een kleine kans op milieuschade en (dodelijke) slachtoffers. De adaptatiestrategie richt zich op preventieve maatregelen, ruimtelijke adaptatie en crisisbeheersing.

F.5 North Sea Ports: Vlissingen en Terneuzen (samen met Gent)

In 2017 is Zeeland Seaports (Vlissingen en Terneuzen) gefuseerd met het Havenbedrijf Gent. Het fusiebedrijf North Sea Ports heeft geen strategiedocument of een visie rond klimaatadaptatie. In 2020 krijgt wel de Zeeuwse Klimaatadaptatiestrategie verder vorm, nadat gemeenten waterschap en de provincie in 2018 en 2019 al klimaatstress testen hebben uitgevoerd. Aansluitend is er eind 2019 een regionale risicodialoog geweest. Kwetsbaarheden en maatregelen met betrekking tot klimaatverandering zijn besproken. De havengebieden worden hier genoemd als een clustering van BRZO-bedrijven (Besluit Risico's Zware Ongevallen). Dit zijn met name de Buitenhaven Vlissingen en het Sloegebied, waar veel chemie- en oliebedrijven gevestigd zijn. Erkend wordt dat versnelde zeespiegelstijging een gevaar is voor economie, milieu en gezondheid. De kans en het effect zijn niet verder gekwantificeerd. Maatregelen kunnen zijn: toekomstige dijkversterkingen, maaiveld verhogen voor nieuwe BRZO-bedrijven, bij herstructurering of bij sloop van bedrijven in de havengebieden, individuele klimaatstress-test per bedrijf uitvoeren om te verkennen of aanvullende maatregelen, zoals aangepast bouwen of inrichten, noodzakelijk zijn en essentiële nutsvoorzieningen niet in overstromingsgevoelige gebieden ontwikkelen (Klimaatadaptatie Strategie Zeeland, 2020).

Bijlage G

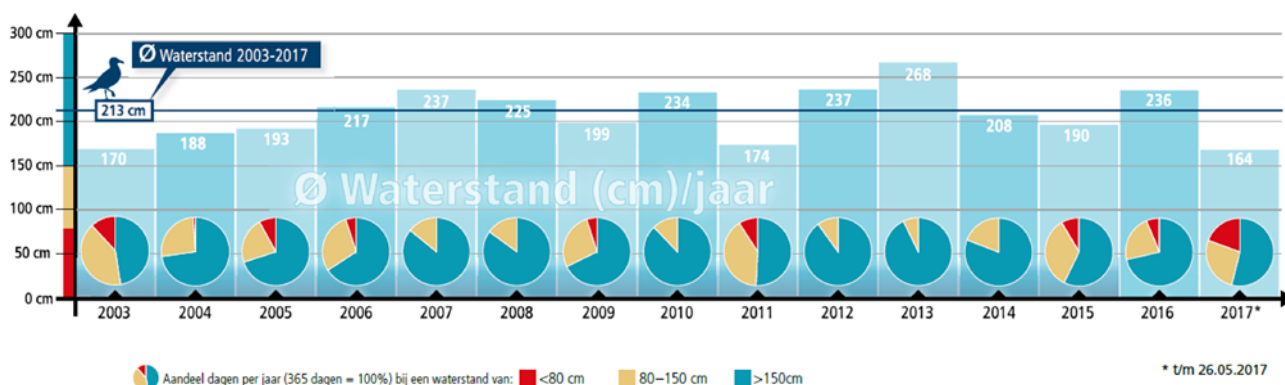
Effecten van droogte op de vaarweginfrastructuur en binnenvaart

Deze bijlage beschrijft in meer detail de gevolgen van droogte op de vaarweginfrastructuur en de binnenvaart. De informatie uit deze bijlage is in grote mate gebaseerd op het conceptrapport; Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet - Deelrapport Droogte' van Rijkswaterstaat (2020), dat ingaat op de effecten van droogte op de scheepvaart. We kijken naar:

- 1 Droogte en het effect daarvan op de aflaaddiepte van binnenvaartschepen: wat is het probleem en hoe vaak komt het voor?
- 2 Effect van droogte op het aantal vaarbewegingen, de vaarkosten, de hoeveelheid vracht en de reistijd;
- 3 Effect van droogte op de vrachtprijs;
- 4 Effect van droogte op het aantal vaarbewegingen per waterweg (kaartbeeld);
- 5 Vaarkosten per herkomst-bestemmingsrelatie.

G.1 Droogte en effect op aflaaddiepte binnenvaartschip

Door periodes van droogte in Nederland en in de ons omringende landen ontstaat laagwater in de vaarwegen. Figuur G.1 geeft de ontwikkeling in 2003-2017 van de waterstand bij Kaub, een belangrijk peilpunt voor de Boven- en Midden-Rijn. Per jaar is ook de verdeling aangegeven van het aantal dagen dat de waterstand minder was dan 80 cm, lag tussen 80 en 150 cm of meer dan 150 cm was. Vaak wordt een waterstand van minder dan 150 meter aangeduid als laagwater (zie ook Erasmus-UPT, 2020). Minder dan 80 cm geldt als extreem laagwater.



Figuur G.1 Ontwikkeling van de gemiddelde waterstanden bij Kaub, 2003-2017. Bron: Contargo (2017).

Voor het waterpeil bij Kaub was bijvoorbeeld 2016 een gemiddeld jaar. Op 81 dagen (22%) lag de waterstand tussen de 80 en 150 cm en was er dus laagwater. Op 23 dagen (6%) was er met een waterpeil van minder dan 80 cm sprake van extreem laagwater. Recordjaren waren 2003 en 2011, met 190 dagen (52%) respectievelijk 180 dagen (48%) met laagwater of extreem laagwater (Contargo, 2017). Buiten de periode die de figuur bestrijkt, was er ook in 2018 sprake van een extreme periode van droogte. Er waren in totaal 159 dagen van (extreem) laagwater (Erasmus-UPT, 2020).

Een lagere waterstand leidt tot minder aflaaddiepte voor binnenvaartschepen, dat wil zeggen dat het binnenvaartschip minder lading per reis kan vervoeren. De beladingsgraad die mogelijk is bij laagwater verschilt per sector:

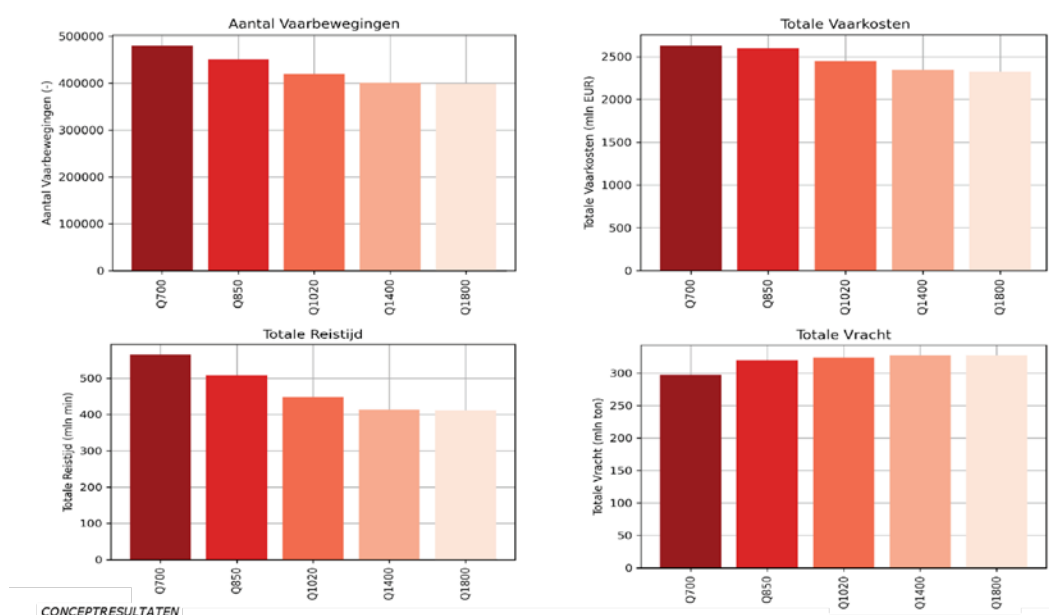
- De *containervaart* is ongevoeliger voor lagere waterstanden dan de droge en natte bulkvaart. Containerschepen laden zelden volledig op waterstand af. De beladingsgraad in de containervaart daalt van 30% naar 15%.
- De binnenscheepvaart van droge en natte bulk, zoals kolen, erts en aardolieproducten is gevoeliger voor laagwater. Voor *droge bulk* daalt de beladingsgraad van 90% naar 30%. Elke centimeter lagere waterstand vertaalt zich in tientallen tonnen afname van de laadcapaciteit. Voor *natte bulk* daalt de beladingsgraad bij laagwater van 70% naar 30% (RWS, 2020).

G.2 Effect droogte op aantal vaarbewegingen, vaarkosten, hoeveelheid vracht en reistijd

Naast een lagere beladingsgraad heeft laagwater ook effect op het aantal vaarbewegingen, de vaarkosten, de reistijd en het vervoerde ladingvolume.

Figuur G.2 geeft conceptresultaten van BIVAS-simulaties die zijn gemaakt door RWS (2020). Het gaat om reizen in Nederland bij de huidige situatie met de bodem en de economie. Op de horizontale as staan 5 scenario's/afvoeren voor de afvoer op de Rijn bij Lobith:

- 1.800 m³/s (geen scheepvaartproblemen voorzien);
- 1.400 m³/s;
- 1.020 m³/s (de huidige internationaal Overeengekomen Lage Afvoer, OLA);
- 850 m³/s (vergelijkbaar met de in 2018 bereikte langdurige lage afvoer);
- 700 m³/s (extreem laag water).



Figuur G.2 Enkele globale conceptresultaten per jaar van effecten voor de scheepvaart bij verschillende afvoeren (bij de huidige situatie met de bodem en economie). Bron: RWS (2020).

Figuur G.2 (linksboven) laat zien dat bij afnemende rivierwaterafvoer (van een situatie zonder scheepvaartproblemen naar een situatie met extreem laagwater) het aantal vaarbewegingen per jaar toeneemt van 400.000 naar 500.000 (+25%). De toename kan bij sluizen zorgen voor een toename in de wachttijden. In een normale situatie bestaat ongeveer 20% van de vaartijd uit wachttijd bij sluizen. Dit percentage is aanzienlijk hoger voor binnenlandse (met name regionale) reizen dan voor reizen van en naar Duitsland, omdat de Rijn geen sluizen kent.

Figuur G.2 (linksonder) laat de ontwikkeling van de reistijd zien bij afnemende rivierwaterafvoer. De reistijd stijgt van 400 miljoen minuten in een normale situatie naar ruim 600 miljoen minuten per jaar bij extreem laagwater (+50%).

De vaarkosten stijgen bij afnemende rivierwaterafvoer van 2,3 miljard euro naar 2,8 miljard euro per jaar (figuur G.2 rechtsboven).

Figuur G.2 rechtsonder laat zien dat bij afnemende afvoer niet alle lading kan worden vervoerd. Het vervoerde ladingvolume neemt af van 320 miljoen ton naar 300 miljoen ton per jaar

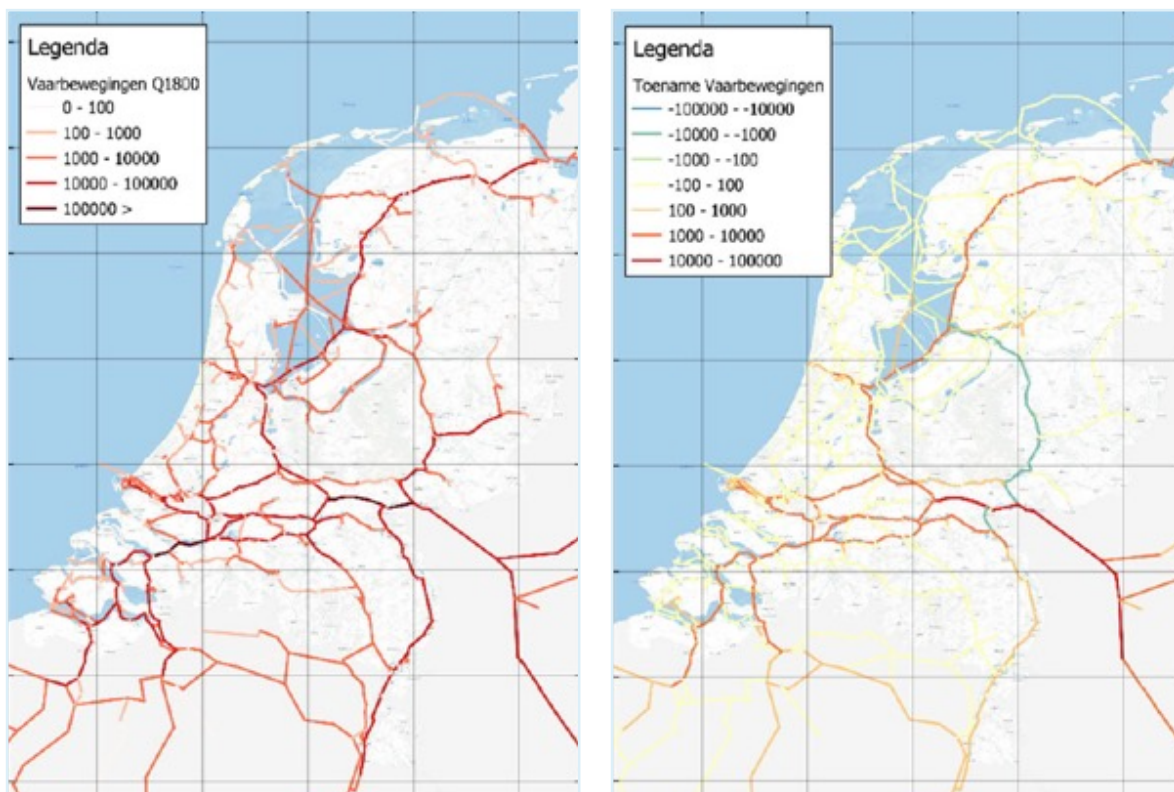
G.3 Effect droogte op vrachtprijs

De binnenvaartondernemer heeft vaak de mogelijkheid om de vrachtprijs te verhogen met een laagwatertoeslag. Dit is een procentuele verhoging van de vrachtprijs of een verhoging met een vast bedrag. De hoogte van de toeslag varieert voor de verschillende goederensoorten. In bijvoorbeeld de zand- en grondvaart geldt momenteel een laagwatertoeslag van € 0,50 per ton per 10 cm waterstanddaling vanaf een bepaalde waterstand. In de kolenvaart, zoals hierboven aangegeven een sector die heel gevoelig is voor lage waterstanden, is de toeslag nu ongeveer € 6,- per ton (Ecorys, 2018).

In een periode van laagwater kunnen binnenvaartondernemers vanwege de bovengenoemde laagwatertoeslag meer verdienen. Ecorys (2018) benadrukt dat de binnenvaart gedurende een droogteperiode een goede onderhandelingspositie heeft. Binnenvaartondernemers kunnen hogere tarieven vragen van verladers, omdat de vraag naar binnenvaart inelastisch is, ongevoelig voor prijsverandering (Jonkeren et al., 2007).

G.4 Effect droogte op vaarbewegingen per waterweg

Figuur G.3 geeft in een kaartbeeld het aantal vaarbewegingen per waterweg bij 2 verschillende waterafvoeren: Q1800 (geen scheepvaartproblemen voorzien) en de toename bij Q1020 (de huidige internationaal Overeengekomen Lage Afvoer, OLA).



Figuur G.3 Kaart met het aantal vaarbewegingen per jaar bij een afvoer van 1.800 m³/s (Q1800) (links) en de toename bij een afvoer van 1.020 m³/s (Q1020).

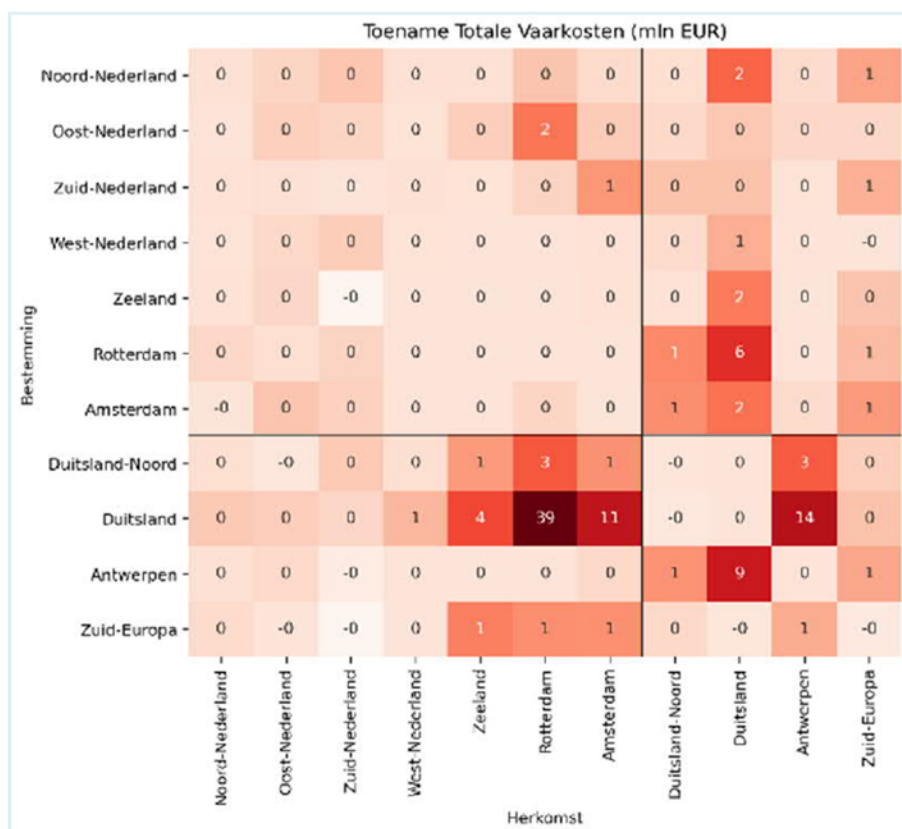
RWS (2020) concludeert op basis van de figuur het volgende:

- De grootste toename van het aantal vaarbewegingen is op de Waal en de Bovenrijn. Daarna volgen de routes die het meest gebruikt worden door schepen op de Waal, zoals het Amsterdam-Rijnkanaal, en de routes naar Zeeland. Op deze routes zal het aantal vaarbewegingen toenemen om (bij gelijke vracht) het transport naar met name Duitsland te kunnen realiseren.
- De modelresultaten geven een toename aan in het aantal vaarbewegingen op de vaarweg Lemmer-Delfzijl.
- Op de Maas neemt het aantal vaarbewegingen met name toe op het traject ten westen van het Maas-Waalkanaal.
- Tijdens droge periodes neemt het gebruik van het Maas-Waalkanaal af doordat de diepgang in de voorhavens niet voldoende is; schepen nemen dan de route via het kanaal van St. Andries of via Moerdijk (Amer/Bergsche Maas).
- Het aantal vaarbewegingen op het Pannerdens Kanaal en op de IJssel neemt af. Dit komt doordat bestemmingen in de IJsseldelta en noordelijker bij droogte beter bereikbaar zijn via het Amsterdam-Rijnkanaal en het IJsselmeer.
- Het aantal vaarbewegingen in het stuwpand Driel neemt relatief veel toe. Schepen naar Arnhem nemen eerder deze route dan via de Waal.

G.5 Vaarkosten ruimtelijk per herkomst-bestemmingsrelatie

De toename in de vaarkosten heeft vaak effect op zowel de herkomst- als de bestemmingslocatie. RWS (2020) geeft inzicht in de vaarkosten op coridorniveau. Een corridor is hier een combinatie van een regio van herkomst en een regio van bestemming. Zie figuur G.4 met vaarkosten van 7 binnenlandse en 4 buitenlandse regio's in een 'nat' jaar met een afvoer van 1.800 m³/s en bij de internationaal Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) van 1.020 m³/s.

Bestemming \ Herkomst	Noord-Nederland	Oost-Nederland	Zuid-Nederland	West-Nederland	Zeeland	Rotterdam	Amsterdam	Duitsland-Noord	Duitsland	Antwerpen	Zuid-Europa
Noord-Nederland	22	4	6	10	4	33	22	8	20	7	11
Oost-Nederland	2	4	5	2	3	17	4	2	5	7	8
Zuid-Nederland	3	4	16	5	9	33	13	5	9	12	17
West-Nederland	10	3	10	5	2	11	5	2	8	8	3
Zeeland	3	3	11	2	13	21	9	4	20	23	12
Rotterdam	51	11	37	18	22	1	41	15	152	81	17
Amsterdam	19	6	8	4	10	37	6	10	27	30	11
Duitsland-Noord	4	1	3	2	10	23	15	1	2	18	4
Duitsland	13	2	4	5	27	293	64	2	1	121	8
Antwerpen	5	8	22	12	29	99	24	21	173	23	33
Zuid-Europa	4	2	10	3	19	31	15	3	10	24	6



Figuur G.4 Totale vaarkosten per jaar voor een aantal corridors; boven: totale vaarkosten bij een afvoer van 1.800 m³/s (Q1800), onder: toename van de vaarkosten bij een afvoer van 1.020 m³/s (Q1020). Bron: RWS (2020).

RWS (2020) concludeert dat in het natste jaar (figuur G.4 links) het grootste deel van de vaarkosten wordt gemaakt op de corridors Rotterdam-Duitsland, Duitsland-Antwerpen, Duitsland-Rotterdam, Antwerpen-Duitsland, Rotterdam-Antwerpen en Antwerpen-Rotterdam.

Ook in Nederland worden in een aantal regio's, zoals Noord-Nederland of Zuid-Nederland, veel vaarkosten gemaakt. Voor een droog jaar (met een afvoer van 1.020 m³/s) (figuur G.4 rechts) nemen de vaarkosten voor vaarbewegingen op de Rijntakken toe. Dit betreft vooral de grote corridors van en naar Duitsland. Het geldt in veel minder mate voor vaarbewegingen naar Oost- en Zuid-Nederland. Dit is logisch omdat de diepte in de kanalen naar Oost- en Zuid-Nederland niet verandert. Voor schepen met Duitsland als bestemming zijn de kosten veel groter dan voor schepen met Duitsland als herkomst. Dit komt doordat de schepen op de terugweg uit Duitsland veelal minder beladen zijn dan op de heenweg (ze gaan vol heen en leeg terug).

Bijlage H

Een natuurlijkere toekomst voor Nederland in 2120

In hoofdstuk 6 staan de 4 adaptatiestrategieën van Deltares (Haasnoot et al., 2019) centraal die zich richten op een zeespiegelstijging van 2-4 m in de komende 100 tot 200 jaar. Ook Wageningen University & Research (WUR) heeft een toekomstbeeld ontwikkeld voor de situatie met zeespiegelstijging: 'Een natuurlijkere toekomst voor Nederland in 2120' (WUR, 2019). Deze visie is bedoeld om te inspireren. Ze schetst een toekomst waarin leven met water en een natuurinclusieve samenleving centraal staan (zie tekstbox H.1).

Het WUR-toekomstbeeld richt zich op het jaar 2120 en is te omschrijven als een combinatie van meerdere adaptatiestrategieën van zeewaarts, meebewegen en gesloten, al naar gelang de locatie in het land (WUR, 2019). In de WUR-studie wordt niet uitgebreid ingegaan op het mobiliteitssysteem. Twee concrete voorbeelden waarin vervoersinfrastructuur naar voren komt, zijn:

- *Havens op drijvende eilanden:* Op de Noordzee worden drijvende eilanden voor duurzame energie (opslag van waterstof en CO₂ in oude gasvelden) aangelegd op de fundamenten van de installaties die voor olie- en gaswinning zijn/werden gebruikt. Op deze drijvende eilanden worden ook 'havens' aangelegd.
- *Infrastructuur op poten:* In de visie komt nieuwe infrastructuur op poten te staan, waardoor het geen barrière meer vormt in de natuurlijke systemen en waterstromen. Daarnaast kan deze infrastructuur in tijden van nood als evacuatiernetwerk functioneren.

**Tekstbox
H.1**

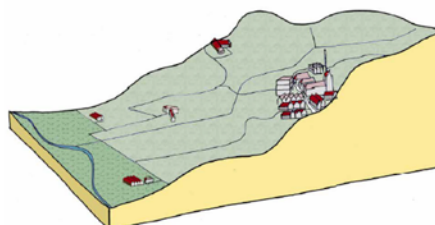
Samenvatting: de WUR-visie voor 2120 per gebiedsdeel

Noord-zee	Natuurgebieden op zee, aquacultuur, energie-transitie (windturbines, drijvende zonnepanelen), scheepvaart-routes (inclusief nieuwe routes naar het noorden), drijvende servicehubs en voorzieningen.	Nederland in 2020 
Kust	Zandwinning voor voorwaartse kustverdediging, zachte voorwaartse kustverdediging, gedifferentieerde kustgradiënt, kustnatuur en -recreatie.	
Wadden-zee	Zachte voorwaartse kustverdediging, nieuwe brede waterkerende landschappen (kwelders, slikken, brede dijken en moeras), nieuwe balans in de Waddenzee (verdrongen westelijke wadden, actief beheer oostelijke wadden).	
IJsselmeer	Strategische zoetwaterreserve, ontwikkeling zachte dubbele oevers, ontwikkeling zoetwatermonding IJsseldelta.	
Zuid-westelijke delta	Zachte kustverdediging in combinatie met harde infrastructuur, dubbele dijksystemen (wisselpolders), kringlooplandbouw zoet en zout met gescheiden watersystemen, nieuwe kering en nieuwe dynamiek (strategisch sedimentmanagement).	Nederland in 2021 
Noordelijke kleipolders	Nieuwe brede waterkerende landschappen, ontwikkeling zoetwaterbuffers, kringlooplandbouw zoet en zout.	
Veenweidegebieden	Transformatie naar natte teelten en natuur, transformatie droogmakerijen naar aquacultuur en visserij, groene linten (zandige banen met multifunctioneel gebruik).	
Riviergebieden	Versterking IJsselafvoer en -vallei, ruimte voor de rivier buiten- en binnendijks (moeraszones), vergroting getijdegebied Biesbosch, versterking gradiënten Maasdal. Het rivierengebied biedt – naast ruimte voor water en natuur – ook plaats aan drijvende woningen. Op de klimaat-dijken langs de rivieren, die veel breder zijn dan de dijken die we nu kennen, kunnen woningen worden gebouwd en kan energie worden opgewekt.	

**Hogere
zand-
gronden**

Versterken beekdalen,
klimaatadaptieve
stedelijke ontwikkeling.

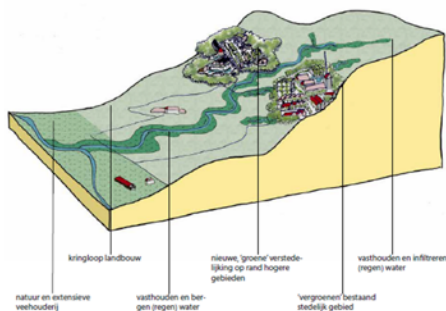
Verstedelijking hoge zandgronden:
huidige situatie



**Stedelijke
omgeving**

Versterking groenblauwe dooradering (zoals groenbuffers langs rivierstromen en stedelijke bossen), verbeteren groen om de stad (recreatief en klimaatadaptief), bestendigen bestaande centra en geleidelijk aan afbouwen tot kern, ontwikkeling nieuwe centra op de rand en het zand. Steden produceren meer energie en water dan ze verbruiken. Ze fungeren als spons en zijn maximaal groen en blauw voor optimale leefbaarheid en verkoeling. Ook de gebouwen zijn natuurinclusief en houtbouw is gemeengoed. Gezuiverd afvalwater uit steden wordt gebruikt voor drinkwater, proceswater voor industrie en irrigatie voor de landbouw. Regenwater wordt optimaal benut.

Verstedelijking hoge zandgronden:
toekomstige situatie



Bijlage I

Luchthavens in zee

De aanleg van eilanden voor de kust, in het adaptatiepad ‘zeewaarts’ uit hoofdstuk 6, kan ook mogelijkheden bieden om daar een luchthaven aan te leggen. Een luchthaven in zee is niet uniek in de wereld. In de jaren 90 van de vorige eeuw zijn in Japan en Hong Kong luchthavens in zee gebouwd. Beide liggen in een relatief beschutte baai en niet op open zee. Het Japanse Kansai heeft te maken met inklinking van de grond waardoor de luchthaven jaarlijks opgehoogd moet worden. Overstromingen door stormen maken de luchthaven daarbij soms onbruikbaar. Het vliegveld Chek Lap Kok bij Hong Kong begint aan een uitbreiding. Deze luchthavens in zee behoren tot de duurste ter wereld, maar waren tegelijkertijd pionierprojecten (PosadMaxwan, 2019).

De grootste baten van een luchthaven in zee liggen op het gebied van verbetering van de leefomgeving op het vaste land: minder geluidsoverlast, betere luchtkwaliteit en een betere veiligheid voor de omwonenden. Daarnaast biedt een luchthaven in zee meer mogelijkheden voor ruimtelijke ontwikkeling en groei. De belangrijkste kosten zijn de aanlegkosten (€ 33-46 miljard) en de CO₂-uitstoot als gevolg van de groeipotenties. Mogelijk neemt de toeristische attractiviteit van de kust af vanwege de overlast door vliegbewegingen. Ten slotte neemt de reistijd naar een luchthaven in zee toe ten opzichte van die naar Schiphol (PosadMaxwan, 2019).

Ook heeft het klimaat mogelijk negatieve effecten op (het gebruik van) de luchthaveninfrastructuur op zee. Op zee waait het gemiddeld harder dan op land en bij hoge dwarswinden (op vaker natte landingsbanen) komt de veiligheid in het geding; daarnaast zou zout vliegtuigen via corrosie aantasten (Flyland, 2003). Zout kan ook invloed hebben op de ruwheid van de start- en landingsbanen, waardoor de toegestane maximale dwarswind mogelijk negatief beïnvloed wordt. Verder kan er op een eiland in zee vaker dan op Schiphol (1,1 % in plaats van 0,7-1,1 % van de tijd) slecht zicht zijn door mist (Flyland, 2001). Met goede apparatuur en procedures hoeft dit echter geen problemen op te leveren. Een ander aspect waar rekening mee moet worden gehouden, is de mogelijke inklinking van de grond in combinatie met een stijgende zeespiegel waardoor de overstromingskansen kan toenemen.

Colofon

Dit is een uitgave van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)

Juli 2021

ISBN/EAN: 978-90-8902-248-6
KiM-21-A008

Auteurs

Taede Tillema; Saeda Moorman; Martijn van der Horst; Hidde Boonstra en Maarten Kansen

Vormgeving

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)

*De verantwoordelijkheid voor de inhoud en de conclusies van deze publicatie
ligt volledig bij het KiM.*

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)
Postbus 20901
2500 EX Den Haag
Telefoon: 070 456 19 65

Website: www.kimnet.nl
E-mail: info@kimnet.nl

Publicaties van het KiM zijn als PDF te downloaden van onze website www.kimnet.nl
U kunt natuurlijk ook altijd contact opnemen met één van onze medewerkers.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen onder vermelding van het KiM als bron.

Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) maakt analyses van mobiliteit die doorwerken in het beleid en in de samenleving. Als zelfstandig instituut binnen het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) maakt het KiM strategische verkenningen en beleidsanalyses. De inhoud van de publicaties van het KiM behoeft niet het standpunt van de minister en de staatssecretaris van IenW weer te geven.



Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid

Dit is een uitgave van het

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Postbus 20901 | 2500 EX Den Haag
www.rijksoverheid.nl/ienw

www.kimnet.nl

ISBN 978-90-8902-248-6
Juli 2021 | KiM-21-A008

