

Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet, hoofdvaarwegennet en spoor

ten behoeve van de NMCA



Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet, hoofdvaarwegennet en spoor
ten behoeve van de NMCA

Auteur(s)

Thomas Bles

Jurjen de Jong

Margreet van Marle

Rolf van Buren

Klimaatgevoeligheid hoofdwegennet, hoofdvaarwegennet en spoor
ten behoeve van de NMCA




Opdrachtgever	Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid
Contactpersoon	Taede Tillema
Trefwoorden	Klimaatgevoeligheid transportinfrastructuur

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	10-03-2021
Projectnummer	11206681-002
Document ID	11206681-002-GEO-0001
Pagina's	32
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Thomas Bles Jurjen de Jong Margreet van Marle Rolf van Buren	
---	--

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Thomas Bles	Mike Woning	Remon Pot	
				

Samenvatting

In het kader van het opstellen van de Nationale Markt- en Capaciteitsanalyse (NMCA) is het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (het KiM) gevraagd een doorkijk te geven naar de gevoeligheid van de opwarming van de aarde op wegen, vaarwegen en spoorwegen op netwerkniveau tot aan 2050.

Dit rapport geeft specifiek antwoord op deze vraag, door de klimaatgevoeligheid van het hoofdwegennet, de hoofdvaarwegen en het spoor tot het jaar 2050 ruimtelijk in kaart te brengen. De kaarten bieden de basis aan het KiM en de makers van de NMCA om een eerste handelingsperspectief op te stellen omtrent de benodigde verdere ontwikkeling van de transportinfrastructuur in Nederland.

Bijzonder aan deze aanpak is dat met dit werk vele tientallen kaarten en analyses nu zijn samengevat om de gevoeligheden voor infrastructuurnetwerken op 1 kaart weer te geven.

De belangrijkste aanbevelingen zijn om:

- Informatie uit de stresstests te betrekken om de bedreigingen te duiden en beslissingen te nemen ten aanzien van bijvoorbeeld prioritering of investeringen
- De kaarten te delen met de infrastructuurbeheerders om ze te kunnen gebruiken bij de risicodialogen die door hen gaan worden gevoerd
- De kaarten te gebruiken als een aanzet om een analyse te doen van de klimaatrisico's voor het gehele mobiliteitssysteem, zijnde een combinatie van de drie modaliteiten;
- De kaarten en deze rapportage te updaten zodra de stresstesten bij de beheerders definitief zijn geworden en/of als ze zijn geüpdatet
- Een doorkijk te maken naar de effecten van klimaatverandering richting 2100, aangezien de levensduur van infrastructuur met bijbehorende investeringen van tientallen tot honderden miljarden vaak ook verder gaat dan 2050 en juist ook richting het einde van de eeuw grotere extremen door klimaatverandering worden verwacht.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Hoofdwegennet	7
2.1	Klimaatbedreigingen voor het hoofdwegennet	7
2.2	Kaartweergave gevoeligheid	8
2.2.1	Weergave hoofdwegennet en segmentering	8
2.2.2	Weergave van bedreigingen op segmenten	9
2.2.3	Kaarten	10
2.3	Impact van de bedreigingen	12
2.4	Kanttekeningen bij de kaarten	14
2.5	Bronmateriaal	15
3	Hoofdvaarwegennet	16
3.1	Kaartweergave klimaatgevoeligheden	16
3.1.1	Onvoldoende diepte vaarweg	16
3.1.2	Onvoldoende waterbeschikbaarheid sluizen	17
3.1.3	Onvoldoende doorvaarthoogte bruggen	17
3.2	Toelichting en interpretatie van de kaarten	18
3.2.1	Onvoldoende diepte vaarwegen	18
3.2.2	Onvoldoende waterbeschikbaarheid sluizen	19
3.2.3	Onvoldoende doorvaarthoogte bruggen	20
3.3	Impact van onvoldoende diepte vaarweg	20
3.4	Referenties	23
4	Spoor	25
4.1	Klimaatbedreigingen van het spoor	25
4.2	Kaartweergave gevoeligheid	27
4.2.1	Weergave spoorwegennet en segmentering	27
4.2.2	Weergave van bedreigingen op segmenten	27
4.2.3	Kaart	28
4.3	Kanttekeningen bij de kaarten	29
4.4	Bronmateriaal	29
5	Aanbevelingen	30

1 Inleiding

In het kader van het opstellen van de Nationale Markt- en Capaciteitsanalyse (NMCA) is het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (het KiM) gevraagd een doorkijk te geven naar de gevoeligheid van de opwarming van de aarde op wegen, vaarwegen en spoorwegen op netwerkniveau tot aan 2050.

Deltares is door het KiM gevraagd om haar bij te staan om de gevoeligheid van infrastructuur voor klimaatdreigingen in landelijke en regionale kaartbeelden te vatten. Primair doel is om met het ontwikkelen van kaarten en tabellen de gevolgen van klimaatverandering te duiden voor het hoofdwegennet, de hoofdvaarwegen en het spoor gekeken naar de periode tot het jaar 2050. Deze kaarten kunnen vervolgens in de NMCA gebruikt worden voor plannen omtrent de benodigde verdere ontwikkeling van de transportinfrastructuur in Nederland.

In deze rapportage worden in drie achtereenvolgende hoofdstukken de resultaten gepresenteerd voor respectievelijk het hoofdwegennet, het hoofdvaarwegennet en het spoor. Kaarten staan in de tekst weergegeven en zijn daarnaast separaat geleverd in een hoge resolutie.

In het onderstaande kader worden belangrijke definities toegelicht.

Gevoeligheid en kwetsbaarheid:

Dit is de verwachte mate waarin een deel van het transportnetwerk negatieve gevolgen ondervindt van een bedreiging. Zowel de term 'gevoeligheid' als 'kwetsbaarheid' wordt gebruikt. In deze rapportage worden beide begrippen door elkaar heen gebruikt, overeenkomstig het gebruik in de respectievelijke stresstesten voor hoofdwegennet, hoofdvaarwegennet en spoor. De mate van gevoeligheid/kwetsbaarheid is het resultaat van een combinatie van de blootstelling aan de bedreiging en de kenmerken van infrastructuur en omgeving.

Gevolg en impact:

De termen gevolg en impact zijn door elkaar heen gebruikt in deze rapportage. De gevolgen van een bedreiging zijn een maat om in beeld te brengen wat er gebeurt als het transportnetwerk wordt blootgesteld aan een bedreigingsniveau waar deze niet voor is ontworpen. Er worden in deze rapportage twee typen gevolgen onderkend: (1) voor de beheerder van het netwerk in de vorm van herstelkosten als het netwerk beschadigd is en (2) voor de gebruikers als het netwerk gestremd raakt en hierdoor kosten ontstaan.

Risico:

Met risico wordt in deze studie de combinatie van de kans van voorkomen (op basis van de gevoeligheid) en de gevolgen bedoeld. Het risico kan bijvoorbeeld worden uitgedrukt in jaarlijks te verwachten kosten per bedreiging voor zowel de huidige als toekomstige situatie.

2 Hoofdwegennet

Voor het hoofdwegennet is door Rijkswaterstaat een stresstest (Deltares, 2020) uitgevoerd om een beeld te krijgen van de klimaatbestendigheid in 2050. Voor verschillende bedreigingen is de gevoeligheid van het hoofdwegennet in kaart gebracht en is ook de economische impact berekend voor Rijkswaterstaat (herstellen van schades) en voor de gebruikers van de weg (stremmingen, omrijden). Deze informatie is gebruikt om voor het KiM de klimaatgevoeligheid van het hoofdwegennet in kaart te brengen.

2.1 Klimaatbedreigingen voor het hoofdwegennet

In de stresstest zijn voor 10 klimaatbedreigingen (als een uitwerking van de 4 hoofdbedreigingen die genoemd worden in het Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie) de gevoeligheden in kaart gebracht. Dat heeft kaartbeelden opgeleverd per bedreiging, waaruit is af te leiden in welke mate de weg gevoelig is en wat de impact is als de bedreiging zich voordoet. Voor de kaarten die nu opgeleverd worden moesten alle bedreigingen op 1 kaart worden geprojecteerd. Als alle bedreigingen geprojecteerd zouden worden leidt dit tot een onleesbare kaart. Om de belangrijkste bedreigingen te selecteren zijn risicogestuurd keuzes gemaakt in de te presenteren bedreigingen: de bedreigingen met de grootste bijbehorende risico's zijn geselecteerd. Daarnaast is ook meegenomen in hoeverre de bedreigingen door de werkregio's van Rijkswaterstaat worden herkend. Met deze aanpak zijn de 7 bedreigingen in de onderstaande tabel geselecteerd om op te nemen op de kaarten. Deze selectie is bij experts van zowel RWS als Deltares geverifieerd tijdens een speciaal daarvoor ingeplande toetsingssessie.

Tabel 1 – Opgenomen bedreigingen hoofdwegennet in de gevoeligheidskaart

Bedreiging	Toelichting selectie gevoeligheid t.o.v. stresstest
Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen	Alle beweegbare bruggen worden weergegeven als gevoelig voor hitte. In de praktijk zijn bruggen meer- of minder gevoelig.
Opdrijven tunnels door stijgende grondwaterstanden	Alle prioritair gevoelige locaties uit de stresstest worden weergegeven (stijging van 20 cm van de freatische grondwaterstand en/of stijghoogte in het eerste watervoerende pakket)
Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling	De klassen kwetsbaar, zeer kwetsbaar en extreem kwetsbaar zijn geselecteerd om als gevoelige locaties weer te geven. Dat bodemdaling een rol speelt in Nederland is een feit. Maar de invloed van klimaatverandering op bodemdaling en de effecten die dit heeft op het hoofdwegennet is nog onderwerp van onderzoek. Bodemdaling geeft voornamelijk problemen bij funderingsovergangen van aardenbaan naar kunstwerken.
Instabiliteit wegtalud bij neerslag	Alle als gevoelig weergegeven locaties zijn geselecteerd
Plasvorming	In de stresstest is gevoeligheid voor plasvorming uitgedrukt in verschillende kenmerken. Voor de kaarten voor de NMCA zijn alle kenmerken bij elkaar opgeteld per wegsegment.
Bos- en bermbranden	Alleen zeer gevoelige weggedeelten zijn geselecteerd als gevoelig voor de NMCA

De volgende 3 bedreigingen uit de stresstest zijn niet meegenomen in deze studie voor de NMCA:

- Instabiliteit talud naast de weg: Deze bedreiging heeft een heel kleine kans en wordt in de regio's ook niet herkend als een relevante bedreiging. Voor zover bekend heeft deze bedreiging zich pas 1 keer voorgedaan op het Nederlandse hoofdwegennet
- Opdrijven lichtgewicht constructies: Deze bedreiging heeft een heel kleine kans van voorkomen en wordt ook niet herkend in de regio's
- Thermische expansie van funderingsmaterialen onder de weg: Hier speelt grote onduidelijkheid over het faalmechanisme en de relatie met klimaatverandering. Daarnaast wordt het faalmechanisme niet herkend in de regio's.

De geselecteerde en weergegeven bedreigingen zijn allemaal van een heel verschillend karakter. Sommige bedreigingen doen zich jaarlijks voor op het hoofdwegennet, maar de impact is klein. Andere bedreigingen doen zich zelden tot nooit voor, maar als ze optreden zijn de gevolgen groot. Daarom is op de kaarten in de legenda een korte beschrijving opgenomen die het karakter van de bedreigingen duidt in de termen kans en gevolg.

2.2 Kaartweergave gevoeligheid

2.2.1 Weergave hoofdwegennet en segmentering

De kaart van het HWN is gebaseerd op het huidige HWN, hierbij zijn rijstroken in beide richtingen als één onderdeel samengenomen, evenals knooppunten en verzorgingsplaatsen. Van alle bedreigingen is in de stresstest per hectometer of specifieke puntlocatie informatie bekend over de gevoeligheid. Die informatie is te gedetailleerd voor de weergave ten behoeve van de NMCA. Daarom is een segmentering van het hoofdwegennet gemaakt die verschillend is voor een landelijke weergave en voor een regionale weergave. Voor de landelijke kaart is de volgende methode gebruikt om segmenten te maken:

- Segmenten worden in principe gecreëerd van knooppunt tot knooppunt van de hoofdwegen
- Als een segment van knooppunt tot knooppunt langer wordt dan orde 40 km wordt dit segment opgeknipt in kortere segmenten van vergelijkbare lengte. Bij langere segmenten dan 40 km wordt de resulterende kaart namelijk slecht leesbaar. Bijvoorbeeld bleek dat bodemdaling of overstromingen geprojecteerd te worden op de wegen door de Veluwe, doordat een ander deel van de lange segmenten dan in een gevoelig gebied lagen voor overstromen of bodemdaling
- Als er met de bovenstaande aanpak segmenten zouden ontstaan die korter zijn dan 5 km (doordat knooppunten dicht bij elkaar zijn gelegen), dan zijn deze samengenomen met een ander segment van dezelfde weg (bijvoorbeeld: niet ineens van de A2 naar de A1). Dit speelt met name bij de ringwegen rond de steden. Hier zijn segmenten gemaakt door korte segmenten samen te voegen op de ringwegen, en niet door een combinatie te maken van ringweg en uitgaande snelweg.

Voor de regionale segmentering zijn dezelfde uitgangspunten gehanteerd, maar heeft een segment een maximale lengte van orde 15 kilometer, om zo meer detail weer te kunnen geven.

2.2.2 Weergave van bedreigingen op segmenten

Op de kaarten voor de NMCA moeten alleen de meer gevoelige segmenten worden weergegeven. Niet alle gevoelige locaties kunnen daarom worden weergegeven. Dat zou bovendien ook een onleesbare kaart opleveren met te veel detail. Daarom is de volgende aanpak gehanteerd:

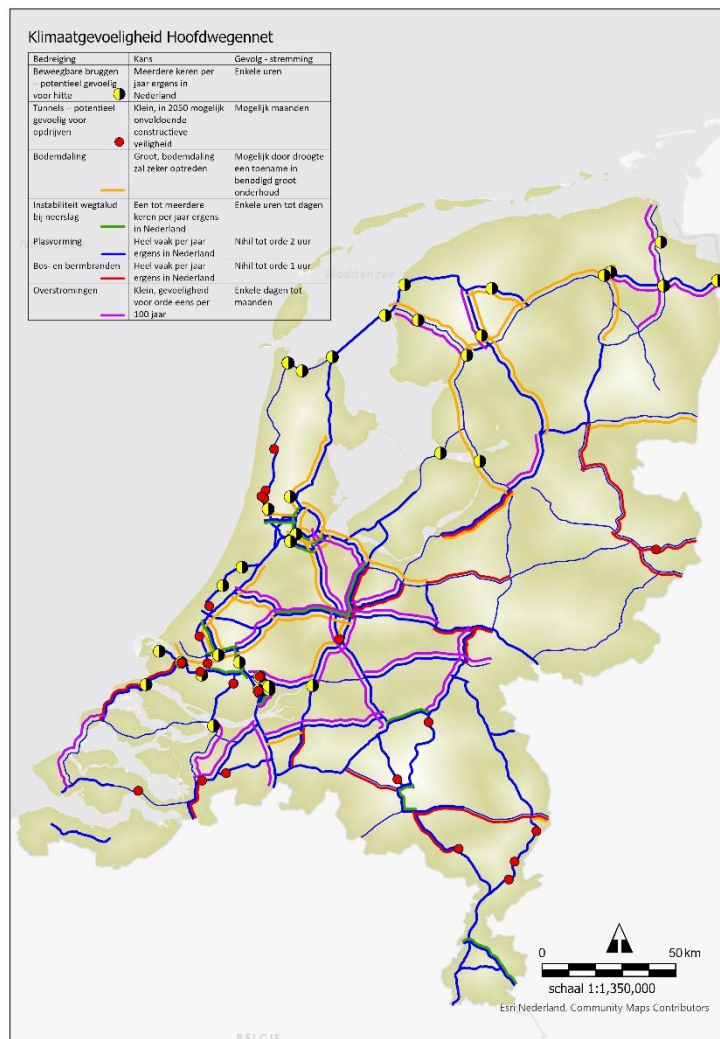
- Van alle bedreigingen, waarvan de gevoeligheid per hectometer bekend is, is berekend hoeveel kilometer van een segment gevoelig is voor deze bedreiging. Dit is vervolgens uitgedrukt als een percentage door dit te delen door de lengte van het segment. Op die manier is een 'percentage gevoeligheid' berekend per segment per bedreiging
- Voor bedreigingen die zich uiten in puntlocaties (bruggen, tunnels) is geen versimpeling aangebracht. Deze zijn allemaal individueel weergegeven op de kaarten
- Voor weergave op de kaart is vervolgens een threshold gebruikt die is vastgesteld per bedreiging. Als op een segment het 'percentage gevoeligheid' van een bedreiging hoger is dan de threshold van die bedreiging wordt de bedreiging zichtbaar gemaakt op de kaart. De thresholds zijn vastgesteld op basis van expert judgement (experts van Deltares, KiM, Rijkswaterstaat) door de kaarten te analyseren. Doel hiervan was om de meest gevoelige segmenten daadwerkelijk zichtbaar te maken op de kaarten en toch een zoveel mogelijk fact based approach te hanteren (door de berekening van het 'percentage gevoeligheid') op basis van de resultaten van de stresstest. De thresholds en een toelichting op de keuze voor een threshold zijn zichtbaar in de onderstaande tabel die samen gelezen moet worden met Tabel 1.

Tabel 2 – Toegepaste thresholds bij kaartweergave hoofdwegennet

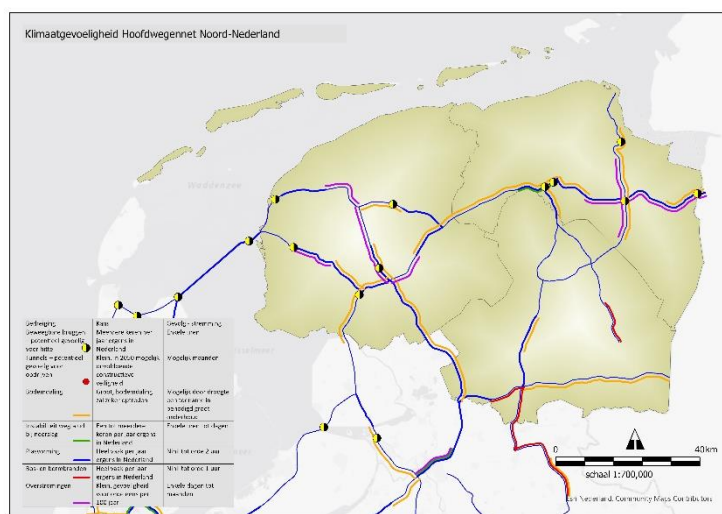
Bedreiging	Threshold	Toelichting keuze voor de waarde van de threshold
Niet kunnen sluiten beweegbare bruggen	0%	Dit zijn puntlocaties, dus een threshold is niet toepasbaar. Alle locaties zijn weergegeven op de kaart.
Opdrijven tunnels	0%	Dit zijn puntlocaties, dus een threshold is niet toepasbaar. Alle gevoelige locaties zijn weergegeven op de kaart.
Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling	40%	Met toepassing van deze threshold zijn de meest gevoelige wegsegmenten zichtbaar op de kaart.
Instabiliteit wegtalud bij neerslag	25%	Gebleken is dat deze bedreiging vooral speelt op wegen met veel kunstwerken en taluds. Dat zijn met name de ringen rond de grote steden en enkele andere segmenten. Met de threshold van 25% worden de ringen rond grote steden goed zichtbaar, alsmede andere relevante gevoelige segmenten
Plasvorming	10%	Vrijwel het gehele wegennet is gevoelig voor plasvorming. Een dunne lijn geeft aan als het wegsegment voor 1 kenmerk (van de 4 kenmerken die maken of een weg gevoelig is voor plasvorming) gevoelig is. Met dikke lijnen wordt focus aangebracht door weer te geven of 10% van de weg kenmerken heeft die een gevoeligheid voor plasvorming weergegeven.
Bos- en bermbranden	10%	De gevoeligheid voor bermbranden is heel selectief meegenomen door alleen de zeer gevoelige locaties te selecteren (matig gevoelig voor bermbranden is niet geselecteerd). Om er vervolgens voor te zorgen dat daadwerkelijk deze zeer gevoelige locaties zichtbaar worden op de kaart is een lage threshold gekozen. Op die manier worden de zeer gevoelige segmenten, die ook in de regio's werden herkend, weergegeven op de kaart.
Overstromingen	20%	Bij 20% komen de wegsegmenten, die kunnen overstromen bij een orde 1:100 kans, goed naar voren.

2.2.3 Kaarten

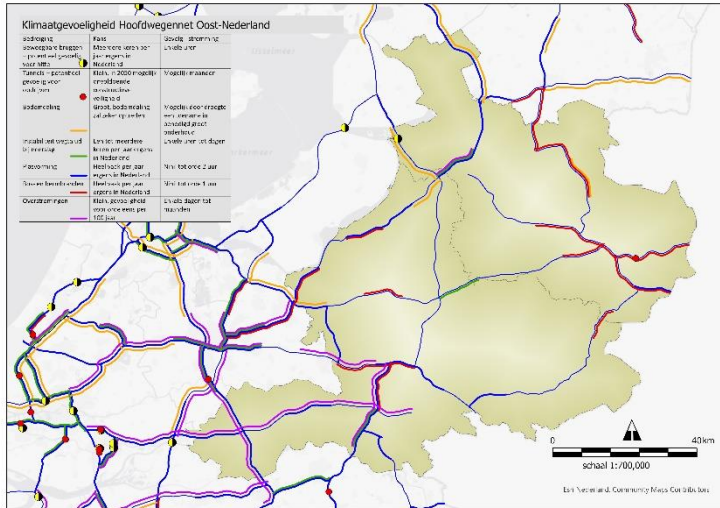
Met de hiervoor beschreven aanpak is een landelijke gevoeligheidskaart ontwikkeld evenals voor de 5 MIRT regio's. Deze zijn in de onderstaande figuren weergegeven. Alle kaarten zijn separaat in hoge resolutie aangeleverd.



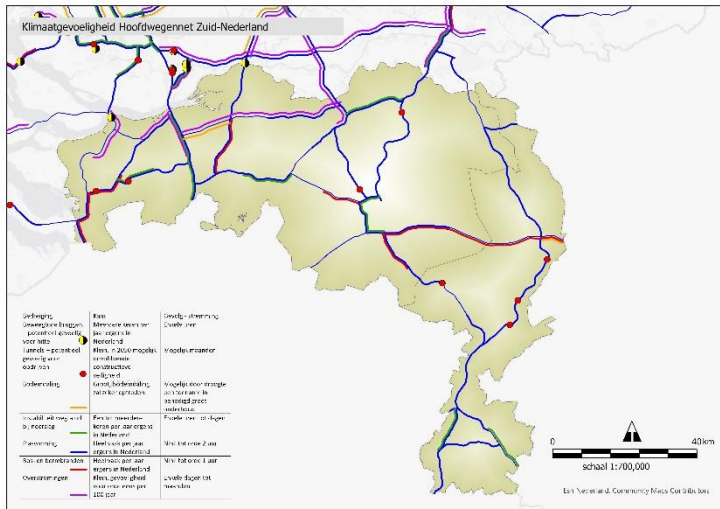
Figuur 1 – Landelijke gevoeligheidskaart klimaatbedreigingen hoofdwegennet



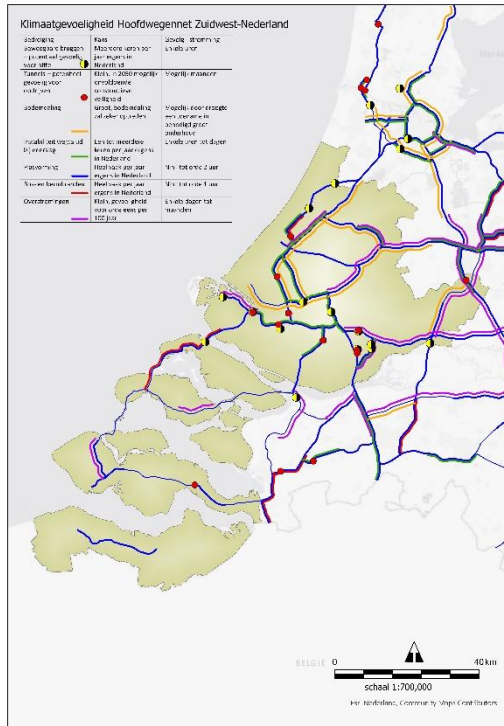
Figuur 2 – klimaatgevoeligheid MIRT regio Noord Nederland



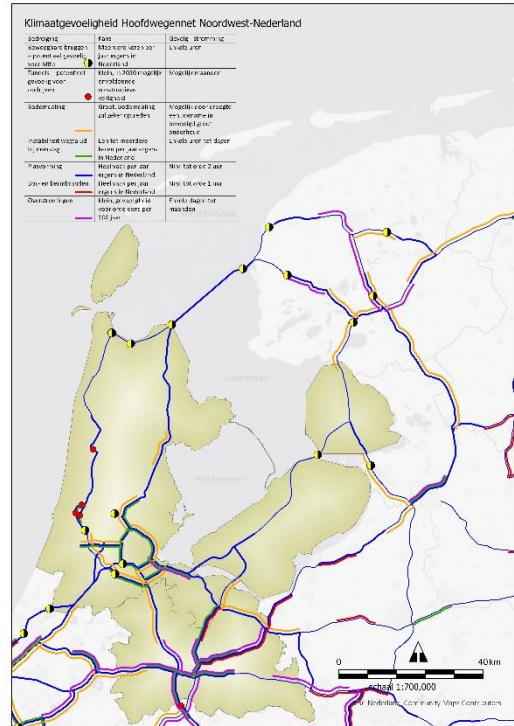
Figuur 3 – klimaatgevoeligheid MIRT regio Oost Nederland



Figuur 4 – klimaatgevoeligheid MIRT regio Zuid Nederland



Figuur 5 – Klimaatgevoeligheid MIRT regio Zuidwest Nederland



Figuur 6 – Klimaatgevoeligheid MIRT regio Noordwest Nederland

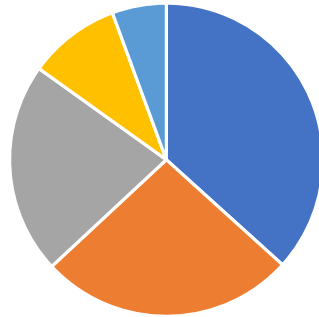
2.3 Impact van de bedreigingen

De gevoeligheidskaarten laten zien waar het hoofdwegennet gevoelig is voor de verschillende bedreigingen. De aard van de bedreigingen is echter zeer verschillend in termen van kans en gevolg. In de stresstest is hier aandacht voor geweest en is een inschatting gemaakt van de kans van voorkomen en de gevolgen. De gevolgen zijn daarbij opgebouwd in de termen herstelkosten (benodigde reparaties aan de weg) en stremmingskosten (impact voor de weggebruikers; voertuigverliesuren). Door informatie over kans en gevolg met elkaar te combineren ontstaat een beeld van de jaarlijks te verwachten kosten door de verschillende bedreigingen.

In deze paragraaf worden de jaarlijks te verwachten kosten (optelling herstel- en stremmingskosten) voor 2050 in enkele taartdiagrammen relatief weergegeven. Zo kunnen de verschillen tussen de bedreigingen worden geduid en ook kunnen regionale verschillen worden herkend. Bij deze analyse is het niet mogelijk geweest om de gevolgen van overstromen mee te nemen en de taartdiagrammen laten dus alleen de impact van andere bedreigingen zien.

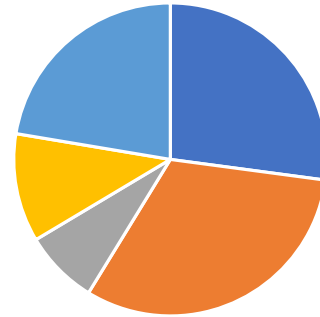
Allereerst is een verdeling van de jaarlijks te verwachten kosten van alle bedreigingen over de verschillende werkregio's gemaakt. Omdat bodemdaling een heel dominante plek in neemt bij de bepaling van de impact is deze verdeling gemaakt zowel inclusief als exclusief bodemdaling.

Verdeling impact over MIRT regio's inclusief bodemdaling



■ NWN ■ ZWN ■ NN ■ ON ■ ZN

Verdeling impact over MIRT regio's exclusief bodemdaling

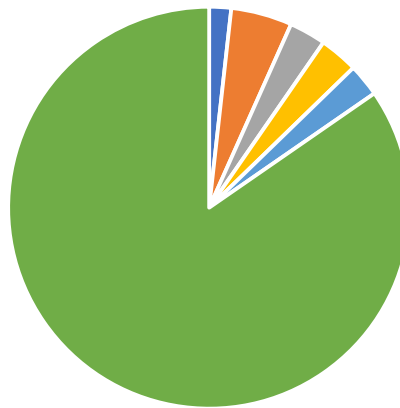


■ NWN ■ ZWN ■ NN ■ ON ■ ZN

Figuur 7 – Relatieve verdeling van impact van klimaatdreigingen over de MIRT regio's

Het onderstaande taartdiagram laat de landelijke verdeling zien van de jaarlijks te verwachten kosten over de verschillende bedreigingen. In de figuur daaronder staat per MIRT regio in taartdiagrammen weergegeven hoe de jaarlijks te verwachten kosten verschillen over de verschillende bedreigingen. In die regionale taartdiagrammen is bodemdaling niet meegenomen omdat bodemdaling zo dominant is en nu de verhouding over de andere bedreigingen goed te zien is. Hieruit blijken grote regionale verschillen. Bijvoorbeeld bos- en bermbranden manifesteren zich relatief veel in oost en zuid Nederland, terwijl het effect van hitte op bruggen zich juist meer in de andere drie MIRT regio's laat gelden. Oprijven van tunnels manifesteert zich relatief gezien voornamelijk in Zuidwest Nederland en Zuid Nederland en iets mindere mate ook in Noordwest Nederland.

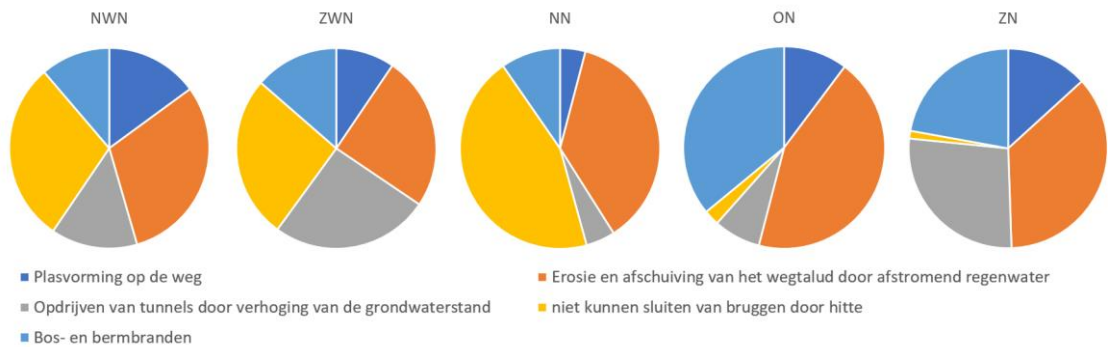
Verdeling landelijke impact over de verschillende bedreigingen



■ Plasvorming op de weg
 ■ Erosie en afschuiving van het wegtalud door afstromend regenwater
 ■ Oprijven van tunnels door verhoging van de grondwaterstand
 ■ niet kunnen sluiten van bruggen door hitte
 ■ Bos- en bermbranden
 ■ Ongelijke zakking als gevolg van bodemdaling door droogte

Figuur 8 – Relatief aandeel van de verschillende klimaatdreigingen op impact in termen van herstel- en stremmingskosten

Verdeling regionale impact over de verschillende bedreigingen, exclusief bodemdaling



Figuur 9 – Relatief aandeel van de verschillende klimaatdreigingen op de impact in de verschillende MIRT regio's

2.4 Kanttekeningen bij de kaarten

De volgende kanttekeningen worden gemaakt bij de kaarten:

- De geproduceerde gevoeligheidskaarten geven de gevoeligheden van het huidige hoofdwegennet weer. Dit betekent dat fysieke aanpassingen die tot 2050 aan het hoofdwegennet gedaan worden maar ook de verandering van de verkeersintensiteit door sociaal economische ontwikkelingen niet zijn meegenomen
- De kaarten zijn bedoeld om gevoeligheden aan te wijzen. Het is niet zo dat de getoonde gevoeligheden van de verschillende bedreigingen gelijkwaardig zijn. De kans en gevolgen zijn substantieel anders voor de verschillende bedreigingen. Een discussie over toelaatbaarheid dan wel noodzaak tot aanpassingen moet nog worden gevoerd. In onder andere risicodialogen wordt het (relatieve) belang van klimaatadaptatie en mogelijke adaptatiemaatregelen verder afgewogen
- De kaarten geven de gevoeligheid weer voor (extremen van) het klimaat. Alleen bij opdrijven van tunnels is specifiek de gevoeligheid voor het klimaat in 2050 weergegeven. Bij de andere bedreigingen geldt dat de kans van optreden alsmede de intensiteit van de gebeurtenis zullen toenemen door klimaatverandering. In de stresstest (Deltares, 2020) is aangenomen en onderbouwd dat er geen nieuwe gevoelige locaties ontstaan door klimaatverandering. Met andere woorden: de getoonde gevoeligheidskaarten laten de gevoelige locaties zien voor zowel het huidige als toekomstige klimaat (met uitzondering dus voor opdrijven van tunnels waar specifiek de gevoeligheid voor 2050 is getoond); de kans van optreden zal echter wel toe kunnen nemen door klimaatverandering, waardoor de risico's ook toenemen en er eerder een noodzaak ontstaat voor adaptatie
- De kaarten geven de resultaten weer van de stresstest die is uitgevoerd op het hoofdwegennet. In 2020 hebben in alle werkregio's validatiesessies plaatsgevonden. Tijdens deze sessies zijn vanuit de werkregio's kanttekeningen geplaatst bij de stresstest op basis van areaalkennis en ervaringen. In het algemeen werden de stresstestresultaten herkend, maar op specifieke locaties niet altijd. Deze opmerkingen zijn niet verwerkt in de kaarten die nu voor de NMCA zijn ontwikkeld
- In lopend onderzoek worden de berekende herstel- en stremmingskosten gevalideerd. De resultaten van deze studie zijn nog niet opgenomen in deze rapportage voor de NMCA.

2.5 Bronmateriaal

De volgende data en informatie zijn gebruikt:

- De uitgevoerde stresstest voor het hoofdwegennet, inclusief de bijgevoegde GIS data:
 - Gevoeligheid van het hoofdwegennet voor klimaatverandering; uitkomst landelijke klimaatstresstest HWN, Thomas Bles en anderen, Deltares, 11203738-003-BGS-0005, Versie 2.0, 21 februari 2020, definitief
 - Impact van klimaatverandering op wegherstel en verkeersstremming; Uitkomst landelijke klimaatstresstest HWN, Thomas Bles en anderen, Deltares, 11203738-003-BGS-0001, Versie 1.1, 12 juli 2019, definitief
- De opgestelde informatiepakketten met informatie uit de landelijke stresstest voor de werkregio's van Rijkswaterstaat:
 - West Nederland Zuid en West Nederland Noord, zoals opgesteld door Deltares in augustus 2020
 - Noord Nederland, Oost Nederland, Midden Nederland, Zuid Nederland en Zee&Delta, zoals opgesteld door Witteveen en Bos

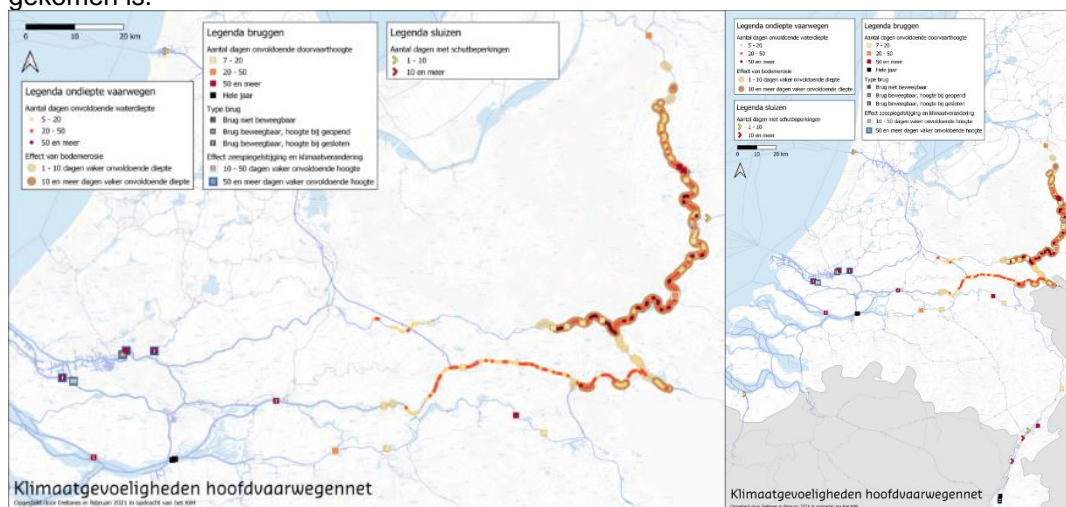
3 Hoofdvaarwegennet

Voor het hoofdvaarwegennet is door Rijkswaterstaat een stresstest uitgevoerd om een beeld te krijgen van de klimaatbestendigheid in 2050. Deze informatie is gebruikt om voor het KIM de klimaatgevoeligheid van het hoofdvaarwegennet in kaart te brengen.

3.1 Kaartweergave klimaatgevoeligheden

Het hoofdvaarwegennet is het meest kwetsbaar voor onvoldoende diepte in de vaarweg, onvoldoende waterbeschikbaarheid bij sluisen en onvoldoende doorvaarthoogte bij bruggen. Dit zal in de toekomst vaker optreden door klimaatverandering (vaker lage rivierafvoeren en vaker hoge rivierafvoeren) en daarvan afgeleide zeespiegelstijging (hogere waterstanden).

Voor iedere kwetsbaarheid wordt hieronder toegelicht hoe de data in de kaart tot stand gekomen is.



Figuur 10 – Kwetsbaarheid hoofdvaarwegennet voor klimaatverandering. Kaarten zijn in volledige resolutie meegeleverd als PDF.

3.1.1 Onvoldoende diepte vaarweg

Gevisualiseerd zijn het aantal dagen per jaar dat bij snelle klimaatverandering (scenario WH2050) de diepte in de vaarwegen niet voldoet aan de gewenste waterdiepte¹ (zie tabel 3.1 in De Jong, 2020a):

- Een waterdiepte van 2,8 meter op de Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek², en aansluitingen van (RWS-)kanalen op deze rivieren
- Een waterdiepte van 2,5 meter op de IJssel, en aansluitingen van (RWS-)kanalen op deze rivier.

Bij ondiepte-knelpunten van een alluviale rivier (met een zachte bodem die kan eroderen) is er de wisselwerking met het onderhoud van de rivier: de baggerwerkzaamheden. Een lokaal

¹ Opgemerkt wordt dat conform de aanpak in het project klimaatbestendige netwerken wordt gewerkt met een waterdiepte. Door de variatie in inzinking van een schip (bijv. ter hoogte van de in het verleden aangelegde 'vaste lagen' in de rivierbodem) kan voor een varend schip een ander punt als beperkend worden ervaren. Dit is niet opgenomen in de huidige criteria.

² Een diepgang van 3,5 m is ook mogelijk op de Nederrijn, maar niet onderzocht.

knelpunt kan opgelost worden met extra baggerinspanning (mits dit niet een niet-bagger locatie is). Hiermee moet in de interpretatie van de kaart rekening worden gehouden.

Enkel locaties die vaker dan 5 dagen per jaar onvoldoende diepte bevatten zijn weergegeven.

In de kaart zijn alleen de ondieptes van de Rijntakken opgenomen. Ondieptes op andere riviertakken zijn beargumenteerd buiten beschouwing gelaten:

- Maas: door de aanwezigheid van stuwen is de Maas niet kwetsbaar voor klimaatverandering in de vorm van ondieptes en daarom buiten beschouwing gelaten.
- Rijn-maasmonding: Voor de binnenvaart is voldoende diepgang beschikbaar door de opstuwende werking van de zee
- Overige vaarwegen: Binnen het huidige beleid worden waterstand en bodemhoogte door klimaatverandering niet (direct) beïnvloed, waardoor er geen effect is op de diepte.

3.1.2 **Onvoldoende waterbeschikbaarheid sluizen**

Sommige sluizen zijn bij droogte gelimiteerd in het aantal schuttingen dat per dag uitgevoerd kan worden. In de hoge delen van Nederland is dit ingegeven door de hoeveelheid afvoer die beschikbaar is voor het schutregime. In de lagen delen van het land is er een risico op te veel zoutindringing als er onvoldoende tegendruk geleverd kan worden met zoet water.

Er is hiervoor geen algemeen geaccepteerd criterium beschikbaar. Gekozen is om het aantal dagen per jaar weer te geven dat waterbesparende maatregelen genomen moeten worden (maatregelen als minder schuttingen, of meer pompen) en de uitkomsten te toetsen aan het verwachte beeld.

Enkel de sluizen met beperkingen door klimaatverandering zijn weergegeven:

- Maas: Onvoldoende water bij lage rivierafvoer voor het schutbedrijf bij Born, Maasbracht en Heel uit Van der Mark (2020) (verder onderzocht in De Jong & Boschetti, 2021)
- Overige vaarwegen: op basis van inschattingen en ervaringen uit 2018:
 - IJmuiden en Terneuzen: bij droogte kan er weinig geschut worden i.v.m. risico op verzilting
 - Eefde: net als bij de Maas ontstaan er problemen tijdens droogte doordat er onvoldoende water beschikbaar is voor het schutbedrijf.

Als door ondiepte op een riviertak meer scheepvaart een alternatieve route neemt, dan kan door deze hogere intensiteit de sluiscapaciteit onvoldoende worden op deze alternatieve route (bijvoorbeeld bij Grave). Dit indirecte effect van klimaatverandering is in de kaart niet meegenomen.

3.1.3 **Onvoldoende doorvaarthoogte bruggen**

Gevisualiseerd is het aantal dagen per jaar dat er onvoldoende doorvaarthoogte beschikbaar is op de vaarwegen om alle scheepvaart mogelijk te maken zonder beperkingen. Dit criterium is opgesteld in samenspraak met RWS (Van der Wijk & De Jong, 2021). De hoogte is afhankelijk van het aantal containerlagen op basis van het aantal containerlagen per vaarweg:

- 4-laags: 11,35m; op de Waal, Nederrijn-Lek, Rijnmaasmonding
- 3-laags: 8,65m; op de IJssel, Maasroute, Oost-westcorridor Maas, Hollandsche IJssel.

Op de overige vaarwegen wordt de waterstand niet direct beïnvloed door klimaatverandering, waardoor ook de doorvaarthoogte niet kwetsbaar is voor klimaatverandering.

Op de kaart is de volgende informatie weergegeven:

- Het aantal dagen per jaar dat onvoldoende hoogte beschikbaar is voor alle schepen met het aantal gewenste containerlagen binnen het huidige klimaat
- Het effect van klimaatverandering op het aantal dagen per jaar dat er onvoldoende hoogte beschikbaar is. Op de Rijn-Maasmonding wordt rekening gehouden met een scenario met 1 m zeespiegelstijging. Op de rivieren betreft dit het effect van de hogere afvoeren in het klimaatscenario WH 2085. Beiden aannames zijn conform KBN
- De doorvaarthoogte is berekend voor drie typen bruggen: (1) niet-beweegbare brug, (2) beweegbare brug (brug gaat regelmatig open, en is geëvalueerd op geopende conditie), (3) beweegbare brug (brug gaat zelden open, en is geëvalueerd op gesloten conditie).

De bruggen die 7 dagen of meer per jaar niet voldoen aan de gestelde eisen worden op de kaart weergegeven. Een periode van 7 dagen is voor de rivieren meestal gelijk aan een enkele afvoergolf. In de Rijn-Maasmonding betreft dit vooral de korte perioden³ van onvoldoende hoogte bij ieder getij. Bruggen die minder dan 7 dagen onvoldoende hoogte hebben, zijn niet weergegeven.

In de berekeningen is het effect van opwaaiing op de Beneden-IJssel is niet meegenomen.

Tijdens het maken van de kaarten zijn enkele aanpassingen doorgevoerd ten opzichte van resultaten van der Wijk & De Jong, 2021:

- De doorvaarthoogte bij Lith is nu beoordeeld op waterstand benedenstrooms van de stuw (dit was bovenstrooms)
- Onderscheid tussen beweegbare bruggen: beoordeling gesloten of open toestand.
- Bij drie bruggen in de Rijn Maasmonding gecorrigeerd omdat deze vaak open gaan en in dat geval niet kwetsbaar zijn voor klimaatverandering
- Hartelbrug is beweegbaar.

3.2 Toelichting en interpretatie van de kaarten

Zie Figuur 10.

3.2.1 Onvoldoende diepte vaarwegen

- De Waal is de belangrijkste transportas van het vaarwegennet. Er zijn internationale afspraken om het waterdieptecriterium (2,8 m) maximaal (bij benadering) 5% van het jaar te laten overschrijden.
 - In het huidige klimaat (niet weergegeven) wordt dit criterium niet gehaald op enkele locaties. Bij snelle klimaatverandering (wel weergegeven) zijn er zeer veel locaties op de Waal die oranje kleuren en daarbij niet aan dit criterium voldoen. Ook is er een enkele locatie die donkerrood kleurt (net benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen). Aangezien een vaarweg zo kwetsbaar is als het meest ondiepe punt, is dit punt maatgevend in de Waal voor de bedreiging onvoldoende waterdiepte
 - Als vaarweg kan de Waal gesplitst worden bij het Maas-Waalkanaal, bij het Amsterdam-Rijnkanaal en bij het Kanaal van St. Andries. Het meest bovenstroomse traject (bovenstrooms van het Maas-Waalkanaal) is het meest kwetsbaar, maar ook de trajecten benedenstrooms hiervan (tussen Maas-Waalkanaal en Amsterdam-Rijnkanaal en tot St. Andries) zijn over lange trajecten kwetsbaar voor lage afvoeren. Benedenstrooms van het Kanaal van St. Andries is enkel de lokale ondiepte benedenstrooms van de vaste laag een significant knelpunt. Door de sedimentatie

³ 50 dagen per jaar is ongeveer gelijk aan 3 uur per dag.

- neemt de waterdiepte bij Zaltbommel af, maar zorgt dit in dit scenario niet tot een significant knelpunt
- Door de verwachte bodemerrosie op de Boven-Waal neemt de afvoer op de Waal toe, wat een positief effect heeft op de waterdiepte bij de alluviale trajecten. Daarentegen zorgt de dalende bodem voor een dalende waterstand, waardoor bij vaste lagen in de vaarweg (Nijmegen, Erlecom, sluis Weurt) de waterdiepte afneemt, waardoor deze als knelpunt significanter worden.
- De IJssel is een zeer kwetsbare rivier, zoals af te lezen uit de donkere kleuren. Problemen zijn vaak niet enkel lokaal, maar zijn verspreid over achtereenvolgende bochten. Daardoor zijn deze problemen niet zomaar op te lossen.
 - Door de bodemerrosie op de Waal, daalt de afvoer naar de IJssel waardoor de gevoeligheid voor onvoldoende diepte toeneemt
 - De IJssel bovenstrooms van het Twentekanaal is steil en smal en daardoor het meest kwetsbaar. Benedenstrooms zijn er nog enkele problematische bochten maar neemt de kwetsbaarheid af
 - De aansluiting naar het Twentekanaal (nabij sluis Eefde) is een beperkende ondiepte. Door bodemerrosie (en afvoerreductie) neemt de waterdiepte in 2050 nog verder af.
- De waterstand op de Nederrijn in het stuwpand Driel staat in vrije verbinding met de IJssel. Onvoldoende waterdiepte op de IJssel staat daarom vaak gelijk aan onvoldoende waterdiepte op dit traject. Dit heeft met name invloed op de bereikbaarheid van Arnhem.
 - De daling in waterstanden door bodemerrosie (en de daarbij komende afvoerreductie) op de IJssel zorgen ook voor lagere waterstanden en waterdiepten in stuwpand Driel
 - De diepte benedenstrooms in stuwpand Hagestein wordt zonder maatregelen enigszins beperkend, maar kan vermoedelijk worden opgelost met baggeronderhoud.

3.2.2 Onvoldoende waterbeschikbaarheid sluisen

Omdat iedere sluis zijn eigen afhandeling vergt, is de weergegeven kwetsbaarheid voor een groot deel gebaseerd op het expert judgement bij het samenstellen van de kaart:

- Voor de sluisen Born, Maasbracht en Heel op kanalen langs de Maas (Julianakanaal en Lateraalkanaal) geldt tijdens droogte (of op de rivier eigenlijk: laagwater) dat er onvoldoende afvoer is voor het schutbedrijf. Hierdoor zijn waterbesparende maatregel nodig zoals het terugpompen van schutdebiet of het instellen van zuinig schutten. Bij zuinig schutten wordt gewacht tot de sluis kolk verder gevuld is, voordat er geslut wordt, waardoor de wachttijd voor de scheepvaart toe neemt. Door klimaatveranderingen zullen periode van laagwater vaker in 2050 vaker optreden
- Bij de zeesluisen bij IJmuiden en Terneuzen kunnen schutbeperkingen getroffen worden als er risico ontstaat op verzilting. Dit kan tijdens droogtes optreden als er onvoldoende zoetwater beschikbaar is om tegendruk te leveren en het kanaal door te spoelen
- Voor sluis Eefde geldt net als bij de Maas, dat er in 2050 regelmatig onvoldoende water beschikbaar is voor het schutbedrijf en waterbesparende maatregelen vaker getroffen moeten worden.

3.2.3 Onvoldoende doorvaarthoogte bruggen

Diverse bruggen zijn in het huidige klimaat onvoldoende hoog om alle containervaart ongehinderd mogelijk te maken. Door klimaatverandering stijgt de zeespiegel en zijn er vaker hoge afvoeren, waardoor het aantal dagen toe neemt dat bruggen onvoldoende hoog zijn. Per regio zijn hieronder de meest kwetsbare bruggen uitgelicht. Deze toelichting geldt in alle gevallen al voor het huidige klimaat en wordt erger door klimaatverandering:

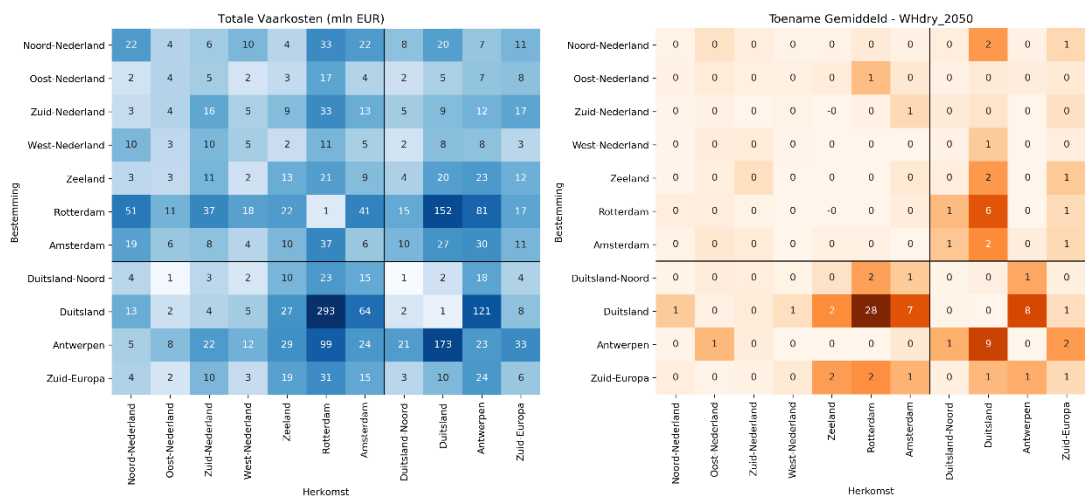
- Rijnmaasmonding:
 - Bij de Moerdijkbruggen over het Hollands Diep is het hele jaar onvoldoende hoogte beschikbaar
 - In Rotterdam zijn de Willemsbrug en Erasmusbrug kwetsbaar. Beide kunnen echter geopend worden om zodoende toch de hoge containervaart door te laten
 - De Algerabrug bij de Hollandse IJssel (bij de (Algera)kering) is vaak onvoldoende hoog, maar kan ook geopend worden
 - Bij de aansluiting op het Hartelkanaal is de Spijkenissebrug beperkt kwetsbaar maar kan ook geopend worden. De Hartelbrug is veel kwetsbaarder, en kan ook geopend worden.
- Maas:
 - Op de Bergsche Maas zijn de grootste beperkingen bij Heusden. Bij Keizersveer en Hedel zijn de beperkingen kleiner en daardoor voor de scheepvaart niet maatgevend
 - Op het traject tussen St. Andries en Mook (Bedijkte Maas) is de brug bij Ravenstein het meest beperkend. Bij stuw Grave (John S. Thompson-brug) is meer hoogte beschikbaar en daardoor voor de scheepvaart niet maatgevend
 - Op de Zandmaas is enkel de doorvaarthoogte van de Stadsbrug bij Venlo kwetsbaar
 - De beperkende brug bij Roermond (Louis Raemaekersbrug) ligt niet op een belangrijke vaarroute vanwege het parallelle Lateraalkanaal en is daarom niet ernstig
 - De Maas bovenstrooms van het Julianakanaal is het hele jaar beperkend bij meerdere bruggen. De gehanteerde eisen (alle 3-laags high cube containervaart moet mogelijk zijn) zijn hier mogelijk te streng.
- Bovenrijn-Waal
 - De Prins Willem-Alexanderbrug voldoet 8 dagen per jaar niet. Door snelle klimaatverandering (2050) neemt dit toe met 6 dagen (niet in de figuur, want kleiner dan 10)
 - De Merwedebrug is echter veel vaker onvoldoende hoog (64 dagen per jaar), maar kan geopend worden.
- Nederrijn:
 - Vier bruggen in stuwpand Driel zijn ongeveer 10 dagen per jaar onvoldoende hoog.
- IJssel:
 - Bij Doesburg is er regelmatig onvoldoende hoogte en kan de brug niet geopend worden
 - Bij Zutphen zijn de spoorbrug en wegbrug zelfs in geopende toestand maatgevend in doorvaarthoogte. Meer dan nabijgelegen brug bij Cortenoever
 - De wegbrug en spoorbrug bij Deventer zijn de laagste bruggen op de IJssel
 - Bij Zwolle de brug Katerveer.

3.3 Impact van onvoldoende diepte vaarweg

De kaarten van de gevoeligheid geven nog niet weer wat de impact is op de binnenvaart. Hiervoor dient dit gecombineerd te worden met informatie over de scheepvaartintensiteit op deze vaarwegen. Berekeningen hiervoor zijn uitgevoerd in KBN-HVWN en resultaten uit deze studie worden hier herhaald (De Jong 2020a; 2020b). In deze berekening is de aanname

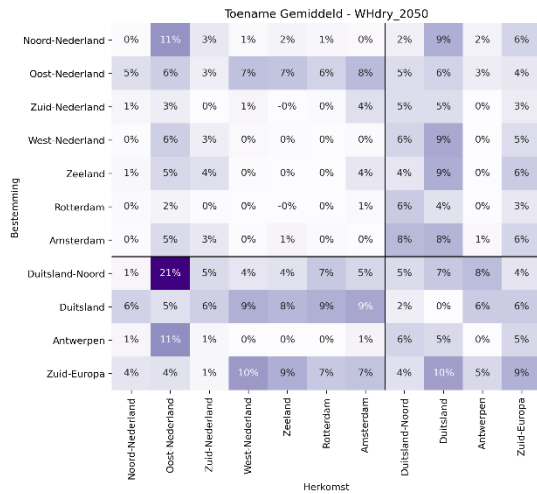
gedaan dat de vervoerde vracht gelijk blijft⁴. Een lagere waterdiepte zal leiden tot een lagere beladingsgraad, waardoor meer reizen nodig zijn om dezelfde vracht te vervoeren. Dit resulteert in hogere (totale) transportkosten voor de verladers. In Figuur 11 en Figuur 12 is de toename in transportkosten in een gemiddeld jaar gegeven per corridor (combinatie van herkomst-bestemming):

- De grootste impact is voor de opvaart van transport van Rotterdam naar Duitsland. De afvaart heeft gemiddeld een veel kleinere diepgang (onbeladen transport), waardoor de impact voor de afvaart van Duitsland naar Rotterdam minder is.
- De absolute impact op de meeste andere corridors is minder hoog door de veel lagere intensiteit. De relatieve impact kan echter aanzienlijk zijn:
 - Met name transport van en naar Oost-Nederland blijkt relatief grote consequenties te hebben van de droogte
 - Voor corridors met maar heel weinig reizen kan daardoor een relatief grote impact (Figuur 12) in absolute zin toch een kleine impact zijn. Als relatief effect komt de corridor van Oost-Nederland naar Duitsland-Noord als meest gevoelige naar voren, maar is dit in absolute zin niet.



Figuur 11 – Vaarkosten per corridor per jaar (links), toename in een gemiddeld droog jaar in miljoenen euro's (rechts)

⁴ 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.



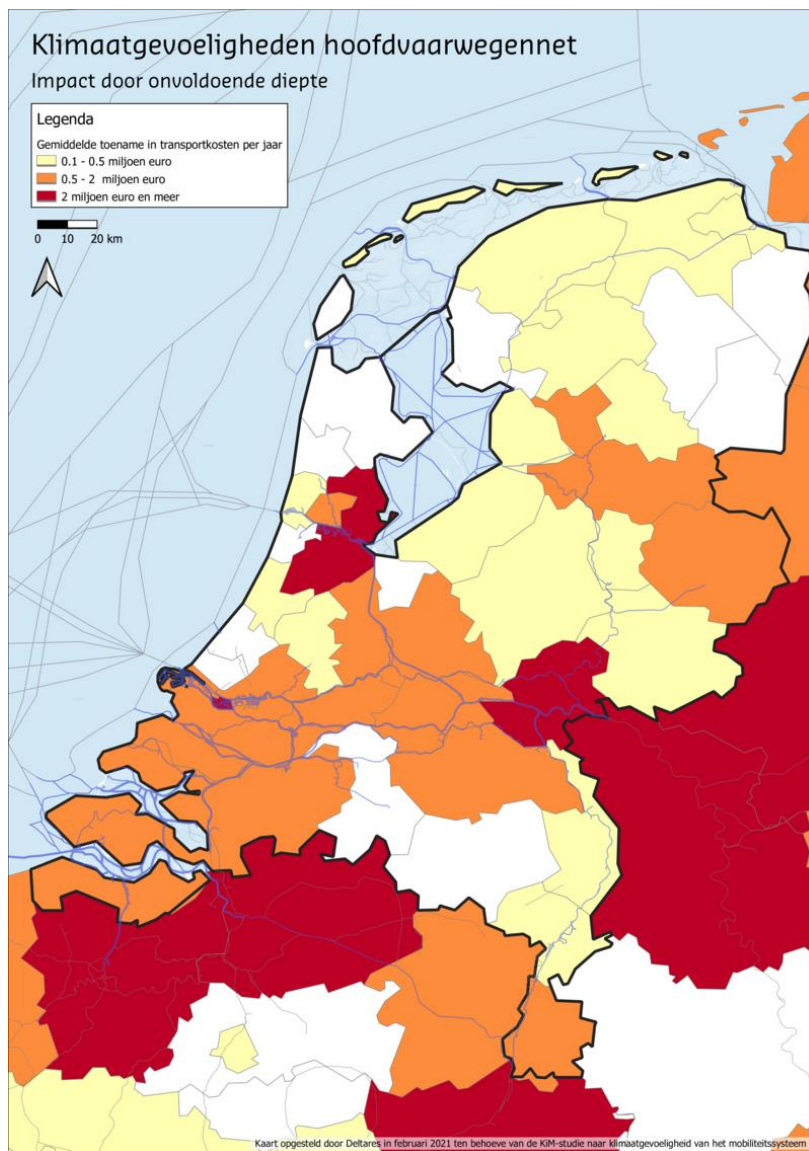
Figuur 12 – Relatieve verandering in vaarkosten per corridor per jaar

Een indeling naar bestemming is weergegeven in Figuur 13. Het geeft dezelfde data als in voorgaande figuur weer, maar voor een fijnere ruimtelijke indeling⁵.

Bij de interpretatie dient rekening te worden gehouden met de verschillende grootten van de gebieden. Doordat er niet genormaliseerd is, hebben grotere regio's ook automatisch hogere kosten. Zo zijn de regio's in het buitenland groot, terwijl in de haven van Rotterdam gebruik is gemaakt van meerdere deelregio's:

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

⁵ Conform andere projecten van RWS is gebruik gemaakt van regionale indeling "BasGoed". Dit is gelijk aan NUTS3 met een extra opdeling in Rotterdam.



Figuur 13 – Gemiddelde toename in vaarkosten per jaar (klimaatscenario WH 2050) gegroepeerd per bestemming (indeling naar NUTS3-regio's). Regio's zonder kleur (dus wit) hebben geen kostentoename door droogte. Het buitenland is gearceerd.

3.4 Referenties

Jong, J.S. de (2020a). Stresstest Droogte Rijntakken – Impact op de scheepvaart
Klimaatbestendige Netwerken Hoofdvaarwegennet. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0009 v1.1

Jong, J.S. de (2020b). Regionale effect van droogte. Deltares memo 11205274-004-BGS-0018, d.d. 4 december 2018

Jong, J.S. de & T. Boschetti (2021). Kwetsbaarheid sluizen Maas voor Klimaatverandering
Onderzoek naar de sluizen Born, Maasbracht en Heel in klimaatbestendige netwerken.
Deltares rapport 11205274-004-BGS-0017 v0.8

Jong, J.S. de & R. van der Mark (2020). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken:
Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022 v1.0

Mark, C.M. van der, en J.S. De Jong (2020) Stresstest Droogte Maas – Blootstelling en kwetsbaarheid bij de sluiscomplexen. Deltares memo 11205274-004-BGS-0010 v1.0

Wijk, R. van der & J.S. de Jong (2021). Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet Zeespiegelstijging en rivierafvoeren. Deltares memo 11205274-004-BGS-0021 v6.0

4 Spoor

Voor het spoornetwerk heeft ProRail een klimaatstresstest uitgevoerd om een beeld te krijgen van de klimaatbestendigheid in 2050. ProRail heeft deze resultaten beschikbaar gesteld via een eigen klimaateffectatlas die het mogelijk maakt om van alle 5 hoofdbedreigingen en ongeveer 40 sub-bedreigingen de klimaatgevoeligheid te bekijken. Deze informatie is gebruikt om voor het KiM de klimaatgevoeligheid van het spoor in kaart te brengen.

4.1 Klimaatbedreigingen van het spoor

De hoofdbedreigingen die door ProRail worden gehanteerd zijn afgeleid van de DPRA en aangevuld met storm/onweer. Dit resulteert in de volgende hoofdbedreigingen die zijn onderkend in deze studie: wateroverlast, hitte, droogte, overstromingen en storm- en onweer. Van alle sub-bedreigingen is kaartmateriaal beschikbaar die aangeeft waar de bedreigingen zich voordoen op het spoor. Omdat alle klimaatgevoeligheden op 1 kaart geprojecteerd moeten worden is het echter niet meer mogelijk om deze sub-bedreigingen te tonen en moeten deze worden samengenomen. Daartoe is de volgende aanpak gehanteerd.

Door ProRail wordt gewerkt aan een classificering van de sub-bedreigingen in termen van kans en gevolg. Deze analyse is nog niet definitief. Met de nu beschikbare informatie over kans en gevolg is risicogestuurd een selectie gemaakt van de sub-bedreigingen, om op te nemen in de analyse voor de NMCA. Op hoofdlijnen bestaat deze selectie uit de volgende aanpak:

- Sub-bedreigingen zijn meegenomen die leiden tot een risico met een combinatie van een grote kans en groot gevolg. (zoals ingeschat door ProRail)
- Sub-bedreigingen die niet vaak voorkomen, maar wel potentieel zeer grote impact hebben (zoals ingeschat door ProRail) zijn ook meegenomen.

Daarnaast heeft een nadere selectie op bovenstaande sub-bedreigingen plaatsgevonden op basis van de vraag of bedreigingen invloed uitoefenen op de mobiliteitsvraagstukken die in de NMCA aan bod komen. Deze invloed kan zich uiten in een incident met een langdurige stremming van het treinverkeer, maar ook in vele incidenten van korte duur.

Met deze selectiecriteria zijn de volgende sub-bedreigingen opgenomen (zie onderstaande tabel):

Tabel 3 – Dik gedrukt de hoofdbedreigingen en de gerelateerde opgenomen sub-bedreigingen voor het spoor zoals weergegeven in de gevoeligheidskaart

Klimaatgevoeligheid	Duiding
Wateroverlast	
Extreme regenval leidt tot onder water staan spoor, verweking van de spoorbaan, of modder op/erosie van de spoorbaan	Grote kans, grote impact
Stationstunnels onder water	Grote kans, kortdurende impact
Spoortunnels onder water	Kleine kans, grote impact
Overwegen onder water	Grote kans, kortdurende impact
Opdriving onderdoorgangen	Kleine kans, grote impact
Wateroverlast technische installaties (o.a. kasten)	Grote kans, gemiddelde impact
Wateroverlast stationsgebied	Grote kans, kleine impact op treindienst, grote impact op stationsfunctie
Hitte	
Storingen technische installaties (o.a. in relaiskasten)	Grote kans, grote impact
Uitzetten beweegbare spoorbruggen	Grote kans, grote impact
Extreem gebruik stroom voor airco's in treinen	Grote kans, grote impact
Droogte	
Bodemdaling in o.a. veengebieden verzakking spoorbaan	Grote kans, grote impact
Verminderde baanstabieliteit door baanlichaam dat verzwakt, verzakt of afbrokkelt	Grote kans, grote impact
Natuur- en bermbranden leiden tot slecht zicht	Grote kans, gemiddelde impact
Overstromingen	
Spoorinfra buitendijks krijgt vaker last van overstromingen	Kleine kans, grote impact
Bij overstromingen extreme schade aan spoorinfra (kans tot orde 1:1000)	Kleine kans, zeer grote impact
Kwetsbaarheid spoortunnels (onderdeel dijkkring)	Kleine kans, zeer grote impact
Uitvallen energievoorziening bij overstromingen	Kleine kans, grote impact
Storm en onweer	
Bomen op het spoor	Grote kans, gemiddelde impact
Trajecten hebben last van storm (beperking treindienst)	Kleine kans, grote impact
Spoorelektronica gevoelig voor bliksem	Grote kans, grote impact

4.2 Kaartweergave gevoeligheid

4.2.1 Weergave spoorwegennet en segmentering

Binnen het kader van deze studie is van de sub-bedreigingen alleen per geocode van het spoor bekend waar de sub-bedreiging zich voordoet. Een geocode is een lijnsegment variërend van enkele hectometers (bijvoorbeeld een opstelrein) tot tientallen kilometers lengte en wordt door ProRail gebruikt als een unieke code om een bepaald stuk spoor aan te duiden. Hieronder geven we aan hoe we deze informatie hebben gebruikt:

- Bij sub-bedreigingen die zich op een specifieke locatie voordoen (bijvoorbeeld een tunnel of overweg) is bekend hoe veel locaties gevoelig zijn van alle locaties op die geocode. Dit is omgerekend naar een percentage gevoeligheid door het aantal gevoelige objecten te delen door het totaal aantal objecten van die geocode. Aanname hierachter is dat hoe hoger het berekende percentage is, hoe gevoeliger de geocode is voor die bedreiging
- Bij sub-bedreigingen die zich voordoen over een langere strekking (bijvoorbeeld water op het spoor) is het aantal hm bekend dat gevoelig is per totale lengte van de geocode. Dit is omgerekend naar een percentage gevoeligheid door het aantal gevoelige hm te delen door de totale lengte van de geocode. Aanname hierachter is wederom dat hoe hoger het berekende percentage is, hoe gevoeliger de geocode is voor die bedreiging.

4.2.2 Weergave van bedreigingen op segmenten

Voor de landelijke gevoeligheidskaart waarop alleen de hoofdbedreigingen staan weergegeven moet de informatie van de sub-bedreigingen worden gecombineerd tot 1 waarde per hoofdbedreiging. Daarvoor is een aanpak ontwikkeld die recht doet aan de individuele sub-bedreigingen en daarnaast een optelling per hoofdbedreiging mogelijk maakt:

- Aangezien een geocode in lengte varieert van 1 hm tot tientallen kilometers hebben we de geocodes samengevoegd tot langere segmenten, op basis van de baanvakken kaart van ProRail. Uitgangspunt is om zoveel mogelijk een segment te definiëren van grote stad naar grote stad of belangrijk station. Bijvoorbeeld Utrecht - Amersfoort is 1 segment. Een segment is weergegeven als 1 lijn; meerdere parallelle sporen of bijvoorbeeld opstelreinen zijn samengenomen tot 1 lijnstuk
- Per segment van het spoor is per sub-bedreiging het percentage gevoeligheid berekend
- Per segment zijn vervolgens per hoofd-bedreiging de percentages gevoeligheid van de sub-bedreigingen (zie vorige paragraaf) bij elkaar opgeteld en genormaliseerd naar een percentage tussen 0 en 100 procent
- Vervolgens is bepaald of het segment als gevoelig weergegeven moet worden op de landelijke kaart. Boven een bepaald genormaliseerd 'percentage gevoeligheid' (de threshold) worden de segmenten getoond op de kaart. De thresholds zijn vastgesteld op basis van expert judgement (experts van Deltares, KiM, ProRail) door de kaarten te analyseren. Doel hiervan was om de meest gevoelige segmenten daadwerkelijk zichtbaar te maken op de kaarten en toch een zoveel mogelijk fact based approach te hanteren (door de berekening van het 'percentage gevoeligheid') op basis van de resultaten van de stresstest. De gebruikte thresholds zijn zichtbaar in de onderstaande tabel
- Van drie sub bedreigingen zijn ook de puntlocaties weergegeven op de kaart, omdat deze 3 sub-bedreigingen tot grote verstoringen kunnen leiden en heel specifiek zijn te duiden qua locatie.

Tabel 4 - Toegepaste thresholds bij kaartweergave spoor

Bedreiging	Threshold
Hitte	30%
Wateroverlast	40%
Storm en onweer	30%
Overstromingen	20%
Droogte	30%

4.2.3

Kaart

Met de hiervoor beschreven aanpak is een landelijke gevoeligheidskaart ontwikkeld Deze is in de onderstaande figuur weergegeven. De kaart is separaat in hoge resolutie aangeleverd. Met de beschikbare gegevens is het niet mogelijk geweest kaarten te realiseren met meer detail, waardoor ook geen kaarten ontwikkeld zijn voor de 5 MIRT regio's.



Figuur 14 – klimaatgevoeligheid spoor

4.3 Kanttekeningen bij de kaarten

De kaarten zijn bedoeld om gevoeligheden aan te wijzen. De kaart geeft niet weer waar prioriteiten zouden moeten liggen. De klimaateffectatlas van ProRail moet worden geraadpleegd voor de details en de aard van de verschillende sub-bedreigingen die ten grondslag liggen van de hier getoonde landelijke gevoeligheidskaart. Ook is het niet zo dat de getoonde gevoeligheden van de verschillende bedreigingen gelijkwaardig zijn. De kans en gevolgen zijn substantieel anders voor de verschillende bedreigingen. Een discussie over toelaatbaarheid dan wel noodzaak tot aanpassingen moet nog worden gevoerd. In onder andere risicodialogen wordt het (relatieve) belang van klimaatadaptatie en mogelijke adaptatiemaatregelen verder afgewogen.

De ontwikkelde gevoeligheidskaart is gebaseerd op de stresstest die door ProRail is uitgevoerd. Deze stresstest is beschikbaar gesteld via een klimaateffectatlas die met een account van ProRail te benaderen is. Bij het opstellen van de gepresenteerde gevoeligheidskaart heeft Deltares zelf geen toegang gehad tot de klimaateffectatlas. Klimaatgevoeligheid van het spoor is voor Deltares alleen bekend per geocode en voor enkele puntlocaties. De data beschikbaarheid per geocode betekent een groot verlies van detail. Dat is op zich niet erg, omdat juist ook het doel van de opdracht was om een geaggregeerd beeld van de klimaatgevoeligheid weer te geven. Maar een goede validatie met de detail-informatie in de stresstest heeft niet door Deltares kunnen plaatsvinden. Door ProRail zelf is wel feedback gegeven op de kaarten.

Daarnaast wordt nog opgemerkt dat de gevoeligheden in de stresstest van ProRail zijn berekend voor 2050 met het klimaatscenario KNMI'14 2050 W_H. Deze gevoeligheid is bepaald van het huidige spoorstelsel; ontwikkelingen van het spoorstelsel richting 2050 zijn niet meegenomen. De kans van optreden en de impact van optreden van de verschillende gevoeligheden zijn weliswaar geduid in de risicomatrix van ProRail, maar nog niet volledig in kaart gebracht.

4.4 Bronmateriaal

De volgende data en informatie zijn gebruikt:

- ProRail basiskaart: ProRail_basiskaart.shp
- Klimaatgevoeligheden per geocode: 'Kopie van 20210127_samenvatting_excel.xlsx' zoals ontvangen op 28 januari 2021 van Onno Hazelaar
- Klimaatrisico's geduid in risicomatrix ProRail: 'klimaat risico's d.d. Q42020oh.xls' zoals ontvangen op 18 januari 2021 van Onno Hazelaar
- GIS data van gevoeligheid puntlocaties, zoals ontvangen van Jasper Keij op 29 januari 2021 en 1 februari 2021
- Lijnvoering NMCA 2021.

5 Aanbevelingen

We doen de volgende aanbevelingen om optimaal gebruik te kunnen maken van de kaarten in deze rapportage en er een vervolg aan te kunnen geven.

De kaarten zijn bedoeld om gevoeligheden in het mobiliteitssysteem aan te wijzen. De kaarten geven niet weer waar prioriteiten zouden moeten liggen, omdat hiervoor informatie over onzekerheid, kans en potentiële impact (duur en mate van stremming) mee moet worden genomen. Daarnaast is het belangrijk om te beseffen dat de getoonde gevoeligheden van de verschillende bedreigingen niet gelijkwaardig zijn en soms zijn gebundeld om de informatie op 1 kaart te kunnen presenteren. Ook geldt dat dezelfde bedreigingen voor verschillende netwerken niet gelijkwaardig zijn. Wij bevelen daarom aan om, bij discussie over investeringen in de infrastructuur netwerken, meer gedetailleerde informatie uit de stresstests te betrekken en detail studies uit te voeren. Specifiek houdt deze aanbeveling in om onzekerheid, kans en impact van bedreigingen op de segmenten die in de NMCA worden beschouwd, expliciet mee te nemen en in kaart te brengen voor juiste afwegingen binnen de NMCA. Zo kan de orde grootte van risico's van klimaatverandering op ons infrastructuur systeem worden afgeschat.

Op dit moment moet de discussie over toelaatbaarheid dan wel noodzaak tot aanpassingen nog worden gevoerd door de verschillende beheerders. In onder andere risicodialogen moet het (relatieve) belang van klimaatadaptatie en mogelijke adaptatiemaatregelen verder worden afgewogen. Het afwegingskader dat op dit moment wordt ontwikkeld binnen IenW zal hier waarschijnlijk goede input voor leveren. Aanbevolen wordt om de nu ontwikkelde kaarten ook bij deze risicodialogen te gebruiken voor een goede start van de discussie, omdat veel informatie gebundeld staat op 1 kaart.

De klimaatgevoeligheden van de drie modaliteiten zijn tot dusverre los van elkaar beschouwd. Ook in de analyses die door de beheerders worden gedaan om de risico's te duiden, wordt voornamelijk alleen binnen het eigen mobiliteitsnetwerk geanalyseerd. We bevelen aan om ook de risico's te beschouwen over de verschillende modaliteiten heen. Op die manier kunnen bijvoorbeeld de volgende vragen worden beantwoord: Hoe kan uitval van de ene modaliteit worden opgevangen door de andere modaliteiten? Verandert daardoor de mate van acceptatie van risico's? Moeten de risico's voor alle drie de modaliteiten gelijkwaardig worden gewogen? Waar voegen investeringen in de robuustheid en veerkracht van het mobiliteitsstelsel de meeste waarde toe voor de maatschappij als geheel? Tevens kan daarmee het beleid om een meer robuuste infrastructuur te realiseren worden aangescherpt.

De brongegevens voor de kaarten zijn afkomstig van stresstesten die zijn uitgevoerd door de beheerders van de modaliteiten. Deze onderzoeken zijn in sommige gevallen nog lopend. De gevoeligheden worden de komende maanden nog verder onderzocht en gevalideerd voor deze als definitief beschouwd worden. Aanbevolen wordt om de in deze rapportage gepresenteerde kaarten te updaten als de stresstesten verder zijn verbeterd. Sowieso wordt aanbevolen de kaarten te updaten na de periodieke update van de stresstest die iedere 6 jaar zal plaatsvinden.

De kaartbeelden die op dit moment gerealiseerd zijn, geven een beeld tot 2050. De levensduur van infrastructuur is doorgaans een stuk langer. Bij een tijdshorizon tot 2100 geldt bovendien dat extremen significant groter worden (t.o.v. de tijdshorizon 2050) door een nog verder toenemende kans en intensiteit. Mogelijk zal de inrichting van het land er dan geheel

anders uitzien wat grote implicaties heeft voor de transportinfrastructuur. Gelet op deze toename van klimaatextremen en de grote infrastructurele opgave (inschatting van investeringen tot 2050 in de orde van enkele honderden miljarden), rechtvaardigt het een doorkijk te maken tot 2100 en meer extremen te betrekken.

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

Deltares

www.deltares.nl