

Cascade-effecten van vitale functies onder extreme neerslag

Een methodiek voor het kwantificeren van elektriciteitsuitval en bereikbaarheid



Cascade-effecten van vitale functies onder extreme neerslag

Een methodiek voor het kwantificeren van elektriciteitsuitval en bereikbaarheid

Auteur(s)

Lieke Meijer

Margreet van Marle

Thomas Bles

Cascade-effecten van vitale functies onder extreme neerslag

Een methodiek voor het kwantificeren van elektriciteitsuitval en bereikbaarheid

Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Contactpersoon	Jasper Luiten
Projectreferenties	
Trefwoorden	Cascade-effecten, vitale infrastructuur, extreme neerslag, elektriciteitsuitval, bereikbaarheid

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	10-02-2026
Projectnummer	11211522-003
Document ID	11211522-003-ZWS-0001
Pagina's	39
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Lieke Meijer Margreet van Marle Thomas Bles	

Samenvatting

Dit rapport onderzoekt hoe vitale infrastructuur in Nederland kwetsbaar is bij grootschalige wateroverlast, met nadruk op elektriciteitsvoorziening en wegennet. Het doel is om de gevolgen van stroomuitval te kwantificeren en inzicht te krijgen in hoe verminderde bereikbaarheid het herstel beïnvloedt. De studie richt zich op de Noordwestelijke Delta en maakt gebruik van waterdiepte- en duurkaarten om blootstelling en impact te analyseren. Het klimaatrisico dat in deze studie centraal staat, is grootschalige extreme regen. Deze zogeheten *Limburgbui*, is de neerslagsituatie die zich heeft voorgedaan in Limburg in 2021. Dit is een uitzonderlijke neerslaggebeurtenis: 200 mm regen in 48 uur, verspreid over een groot bovenregionaal gebied. De regenval is daarmee significant anders dan een piekbui in korte tijd. Daarbij wordt benadrukt dat niet alleen waterdiepte bepalend is, maar ook de duur van overlast en lokale omstandigheden.

Voor de elektriciteitsanalyse is gekeken naar midden-laagspanningsstations, die weinig redundantie hebben. Stations met waterdieptes boven 45 cm lopen groot risico op uitval. Op basis van een generieke methode is berekend dat circa 16.000 inwoners getroffen kunnen worden, waarvan 12.000 in gebieden met langdurige wateroverlast. Dit leidt tot meer dan een miljoen persoonsverliesuren. De analyse toont dat herstel niet alleen afhankelijk is van het kunnen repareren van de schade, maar ook van of het nog mogelijk is om bij een elektriciteitsstation te komen om de reparatie uit te voeren: de bereikbaarheid van het elektriciteitsstation.

Daarnaast is een methode ontwikkeld om inzicht te krijgen in lokale connectiviteit. Hieruit blijkt dat wateroverlast ten gevolge van extreme neerslag kan leiden tot langdurige uitval van wegen en onbereikbaarheid van gebieden. Dit leidt vooral tot impact in gebieden met weinig alternatieve routes zoals de Krimpenerwaard en vergroot de kans op isolatie van gebieden en vertraagt herstel van vitale functies. Voor 29 elektriciteitsstations blijkt dat wegen rondom de stations langer ontoegankelijk blijven dan de periode waarin het station zelf overstroomd is, wat de hersteltijd aanzienlijk verlengt.

De studie concludeert dat robuustheid niet alleen vraagt om redundantie binnen afzonderlijke netwerken, maar vooral om inzicht en bewustzijn van onderlinge afhankelijkheden. Zeker bij grootschalige klimaatdreigingen, die op meerdere plaatsen tegelijk tot problemen leiden, is een netwerkbenadering noodzakelijk, waarbij meerdere vitale functies tegelijk worden beschouwd. Herstel moet daarom niet uitsluitend gericht zijn op individuele assets, maar op het behouden van functionaliteit voor het gehele netwerk. Daarnaast is samenwerking tussen netwerken belangrijk, omdat uitval kan leiden tot cascade-effecten. Aanbevolen wordt ook om adaptieve strategieën te ontwerpen vanuit een systeembenadering waarbij meerdere netwerken tegelijk worden beschouwd.

Aanbevolen wordt om de ontwikkelde methoden toe te passen in andere gebieden en uit te breiden naar andere vitale infrastructuur. Daarnaast is het belangrijk om sociale kwetsbaarheid mee te nemen in vervolgstudies, zodat prioritering van herstel beter afgestemd kan worden op maatschappelijke impact. De resultaten bieden waardevolle inzichten voor stresstesten, klimaatadaptatie en crisisplanning.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	5
1	Inleiding	6
1.1	Klimaatrisico's en cascade-effecten	6
1.2	Doel van deze studie	7
1.3	Leeswijzer	9
2	Methode	10
2.1	Studiegebied Noordwestelijke Delta	10
2.2	De dreiging: grootschalige extreme regen	11
2.3	Bepalen impact van uitval elektriciteit	14
2.3.1	Opbouw elektriciteitsnet	15
2.3.2	Blootstelling	15
2.3.3	Impact	16
2.3.3.1	Bepaling aantal mensen getroffen	16
2.3.3.2	Bepaling hersteltijd	17
2.4	Kwantificeren keten-afhankelijkheid elektriciteit van bereikbaarheid	17
2.4.1	Blootstellingsanalyse	17
2.4.2	Bereikbaarheidsanalyse	18
2.4.3	Effecten bereikbaarheid op elektriciteit	19
2.4.4	Hotspotanalyse elektriciteit en bereikbaarheid gecombineerd	20
3	Resultaten	21
3.1	Impact uitval elektriciteit	21
3.1.1	Blootstelling- & uitval elektriciteit	21
3.1.2	Impact uitval elektriciteit	22
3.2	Effecten van extreme neerslag op wegen	25
3.2.1	Blootstelling	25
3.2.2	Bereikbaarheid	25
3.3	Effecten bereikbaarheid op elektriciteit	28
3.3.1	Duur overstroming elektriciteitsstations in vergelijking tot duur overstroming wegen	29
3.3.2	Impact per wijk	30
4	Conclusies	32
4.1	Schaalbaarheid gebruikte methoden	32
4.1.1	Belangrijkste aannames en beperkingen	33
4.2	Andere geleerde lessen en aanbevelingen	36
5	Referenties	38

1 Inleiding

1.1 Klimaatrisico's en cascade-effecten

Klimaatrisico's zijn de risico's die voortkomen uit (extreme) weersomstandigheden, zoals hittegolven, overstromingen, droogte, wateroverlast en natuurbranden. Door klimaatverandering zullen deze dreigingen naar verwachting vaker optreden en in intensiteit toenemen. Effecten van klimaatdreigingen kunnen beperkt invloed hebben en leiden tot lokale effecten, maar mogelijk ook tot maatschappelijke ontwrichting.

Klimaatdreigingen veroorzaken niet alleen directe schade, zoals schade aan gebouwen door een overstroming, maar kunnen ook indirecte effecten hebben, zoals uitval van diensten door de schade aan infrastructurele assets. Daarnaast kan een initiële verstoring ook doorwerken via kettingreacties die op hun beurt nieuwe problemen veroorzaken, bijvoorbeeld wanneer een overstroming leidt tot stroomuitval, waardoor vitale infrastructuur en zorgketens ontregeld raken. Deze opeenvolgende effecten worden aangeduid als *cascade-effecten*. Uit eerdere studies is gebleken dat met name elektriciteit, telecommunicatie, bereikbaarheid en het watersysteem belangrijke schakels zijn: uitval in deze vitale infrastructuur leidt vrijwel automatisch tot cascade-effecten in andere vitale functies.

Bereikbaarheid van locaties via het wegennet speelt hierin een bijzondere rol, omdat deze van groot belang is maar vaak onvoldoende wordt meegenomen. Wateroverlast kan de bereikbaarheid sterk beperken, bijvoorbeeld door ondergelopen wegen en tunnels. Daardoor kunnen de aanrijdtijden van ambulances, politie en brandweer aanzienlijk toenemen. Verminderde bereikbaarheid maakt ook het verhelpen van storingen aan kritieke infrastructuur zoals het elektriciteitsnet of waterpompen lastiger.

Het risico op grote impact neemt verder toe doordat klimaatdreigingen gecombineerd voorkomen, elkaar versterken en langdurig aanhouden. Bovendien hebben veel van deze dreigingen een bovenregionaal en soms zelfs landelijk karakter, bijvoorbeeld bij hitte en droogte en kunnen er keteneffecten plaatsvinden. Om deze risico's te beheersen, is het noodzakelijk om inzicht te krijgen in zowel de directe gevolgen van storingen als in de onderliggende mechanismen die keteneffecten veroorzaken.

Het klimaatrisico dat in deze studie centraal staat, is grootschalige extreme regen. Deze zogeheten *Limburgbui*, is de neerslagsituatie die zich heeft voorgedaan in Limburg in 2021. Dit is een uitzonderlijke neerslaggebeurtenis: 200 mm regen in 48 uur, verspreid over een groot bovenregionaal gebied. De regenval is daarmee significant anders dan een piekbui in korte tijd. Meer informatie over de bui is te vinden in [het kaartverhaal 'grootschalige extreme regen' van de klimaateffectatlas](#) dat speciaal ingericht is met informatie over dit type extreme regen. Een dergelijke grootschalige bui leidt ertoe dat op veel plaatsen tegelijkertijd wateroverlast optreedt, met bijbehorende gevolgen voor de omgeving en vitale infrastructuur.

1.2 Doel van deze studie

Het doel van deze studie is om nieuw ontwikkelde methodes te demonstreren en te verkennen hoe cascade-effecten van vitale functies kunnen worden gekwantificeerd bij grootschalige regenoverstroming ('wateroverlast'). Het onderzoek is een eerste toepassing van de ontwikkelde methodes en toetst hoe de methodes in de praktijk werken en welke inzichten zij kunnen opleveren.

In dit onderzoek is gekozen om de gevolgen van elektriciteitsuitval door wateroverlast te kwantificeren. Elektriciteit vormt een van de meest vitale functies in onze samenleving. Uitval van het elektriciteitsnet kan grote gevolgen hebben voor huishoudens, bedrijven en kritieke voorzieningen.

Daarnaast is ook onderzocht wat de rol van bereikbaarheid is bij het herstel van de elektriciteitslocaties. Verminderde bereikbaarheid, bijvoorbeeld door overstromingen, kan ertoe leiden dat kritieke assets niet tijdig worden bereikt of dat herstel vertraagt doordat wegen langere tijd onbegaanbaar blijven. Deze interacties laten zien dat kwetsbaarheden niet beperkt blijven tot afzonderlijke netwerken, maar juist ontstaan in de verbindingen daartussen.

De studie richt zich op de volgende hoofdaspecten:

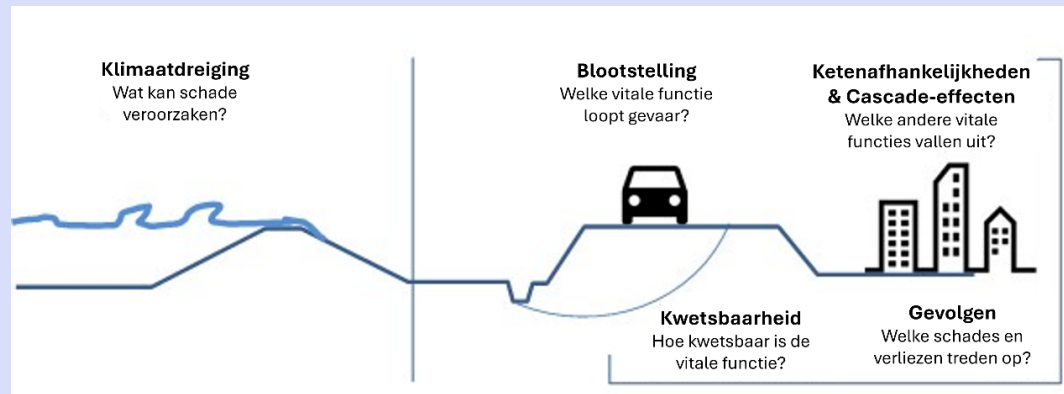
1. Welke gebieden worden getroffen door stroomstoringen bij grootschalige wateroverlast, hoelang duren deze storingen en hoeveel mensen worden hierdoor getroffen?
2. Hoe kan de omvang en duur van stroomuitval worden gekwantificeerd, inclusief de maatschappelijke impact uitgedrukt in persoonsverliesuren?
3. Hoe beïnvloedt verminderde bereikbaarheid van wegen het herstel van elektriciteitsvoorzieningen en in welke mate verlengt dit de uitvalduur?
4. Hoe kan een generieke methode worden ontwikkeld om ketenafhankelijkheden tussen elektriciteit en bereikbaarheid systematisch te modelleren en toepasbaar te maken voor andere regio's?

Dit is gedaan voor een van de regio's waar ook resultaten beschikbaar zijn van de bovenregionale stresstest. Met de ontwikkelde methode kunnen maatschappelijke gevolgen van elektriciteitsuitval door wateroverlast worden gekwantificeerd in aantal getroffen personen en wordt daarnaast inzichtelijk gemaakt wat het effect is van grootschalige uitval van meerdere vitale functies tegelijkertijd. De ontwikkelde methode moeten ook toepasbaar zijn op andere locaties in Nederland.

Door de dynamiek tussen bereikbaarheid, elektriciteitsuitval en de maatschappelijke impact hiervan systematisch te verkennen, draagt dit rapport bij aan de ontwikkeling van een methodiek die inzicht biedt in kwetsbaarheden en keteneffecten binnen vitale infrastructuur. Dit vormt een belangrijke stap richting weerbaarheid tegen toekomstige verstoringen. De resultaten zijn bruikbaar voor uiteenlopende toepassingen, zoals crisisplanning, noodsituaties, klimaatadaptatie, investeringsplannen en ruimtelijk beheer.

Kernbegrippen klimaatrisico's

Klimaatdreigingen leiden niet per definitie tot risico's, maar worden problematisch wanneer kwetsbare systemen eraan worden blootgesteld. Om de risico's en gevolgen beter te begrijpen is het belangrijk om de onderlinge samenhang van een aantal kernbegrippen te begrijpen.



Figuur 1.1 Schematische weergave van de samenhang van de belangrijkste begrippen omtrent het bepalen van klimaatrisico's. Aangepast op basis van figuur 2 in (Juch, Meijer, Bles, van Marle, & Noijons, 2025)

De **klimaatdreiging** vormt het startpunt: dit is de externe gebeurtenis die mogelijk schade kan veroorzaken. Denk aan een zware storm of een hittegolf. Of deze klimaatdreiging daadwerkelijk leidt tot schade, hangt af van twee factoren:

- **Blootstelling** verwijst naar de aanwezigheid van assets of infrastructuur op een locatie waar de klimaatdreiging zich voordoet. Bijvoorbeeld een elektriciteitskastje in een gebied waar 10 centimeter water staat door hevige regenval, is deze asset 'blootgesteld' aan de klimaatdreiging wateroverlast.
- **Kwetsbaarheid** beschrijft vervolgens hoe gevoelig de assets of systemen zijn voor schade en functieverlies en in hoeverre het systeem in staat is om de uitval op te vangen (bijvoorbeeld door redundantie) of te herstellen. Zo is bijvoorbeeld een goed onderhouden gemaal met noodvoorzieningen minder kwetsbaar dan een verouderd systeem zonder die voorzieningen.

Het is de wisselwerking tussen de mate van de dreiging, blootstelling en kwetsbaarheid die bepaalt of een gebeurtenis daadwerkelijk leidt tot **gevolgen**. Er kunnen enerzijds fysieke of economische **schade aan de infrastructuur** ontstaan en anderzijds **maatschappelijke verliezen** door uitval van vitale functies.

Bij maatschappelijke verliezen wordt ook rekening gehouden met verwevenheden van vitale functies. Wanneer de eigen functie afhankelijk is van andere vitale functies voor het functioneren, noemen we dit een **ketenafhankelijkheid**. Als de uitval van de eigen functie leidt tot verstoringen van andere functies noemen we dat een **cascade-effect**. Het geheel van deze effecten noemen we **keteneffecten**.

Het **risico** dat ontstaat door een klimaatdreiging is een product van de kans op een gebeurtenis maal de ernst van de gevolgen ervan (*kans x gevolg*). Sommige dreigingen doen zich regelmatig voor, maar hebben zulke beperkte gevolgen dat het risico als acceptabel wordt beschouwd. In andere gevallen kan het mogelijke gevolg zo ernstig zijn, dat men het koste wat kost wil voorkomen, zelfs als de kans op optreden klein is. Of een risico acceptabel is, hangt af van de bedrijfscontext van vitale aanbieders en van de eisen die (vanuit de overheid) worden gesteld.

Wanneer een risico - voor de huidige of toekomstige situatie - als onacceptabel wordt beoordeeld, kan **adaptatie** nodig zijn: een pakket aan maatregelen gericht op het beperken van het risico. Dit kan door maatregelen die de intensiteit van de dreiging verminderen, de blootstelling beperken, de kwetsbaarheid verminderen, of de gevolgen

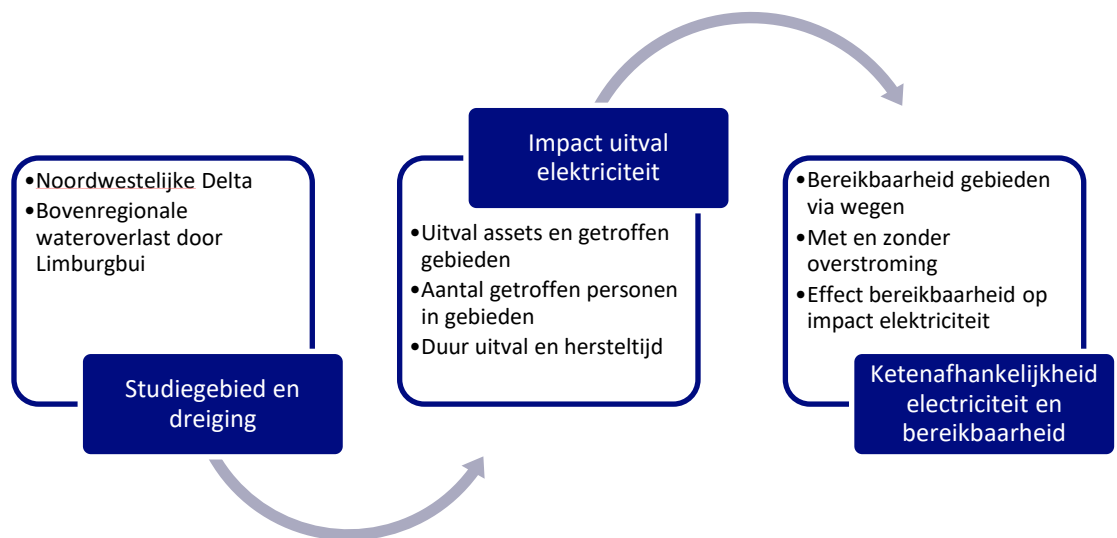
1.3 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd in vijf hoofdstukken:

- **Hoofdstuk 2** introduceert het elektriciteitsnet en beschrijft hoe wateroverlast kan leiden tot uitval. We laten zien hoe de gevolgen van stroomstoringen worden gekwantificeerd, inclusief het aantal getroffen mensen en de ruimtelijke spreiding van de impact.
- **Hoofdstuk 3** gaat in op de bereikbaarheid van locaties via het wegennet. Hier wordt uitgelegd hoe verminderde bereikbaarheid kan worden gemodelleerd en vertaald naar een systematische methode om bereikbaarheid te kwantificeren.
- **Hoofdstuk 4** koppelt deze inzichten en laat zien dat de interactie tussen bereikbaarheid en stroomuitval essentieel is om het volledige beeld van cascade-effecten te begrijpen.
- **Hoofdstuk 5** sluit af met de belangrijkste lessen en aanbevelingen.

2 Methode

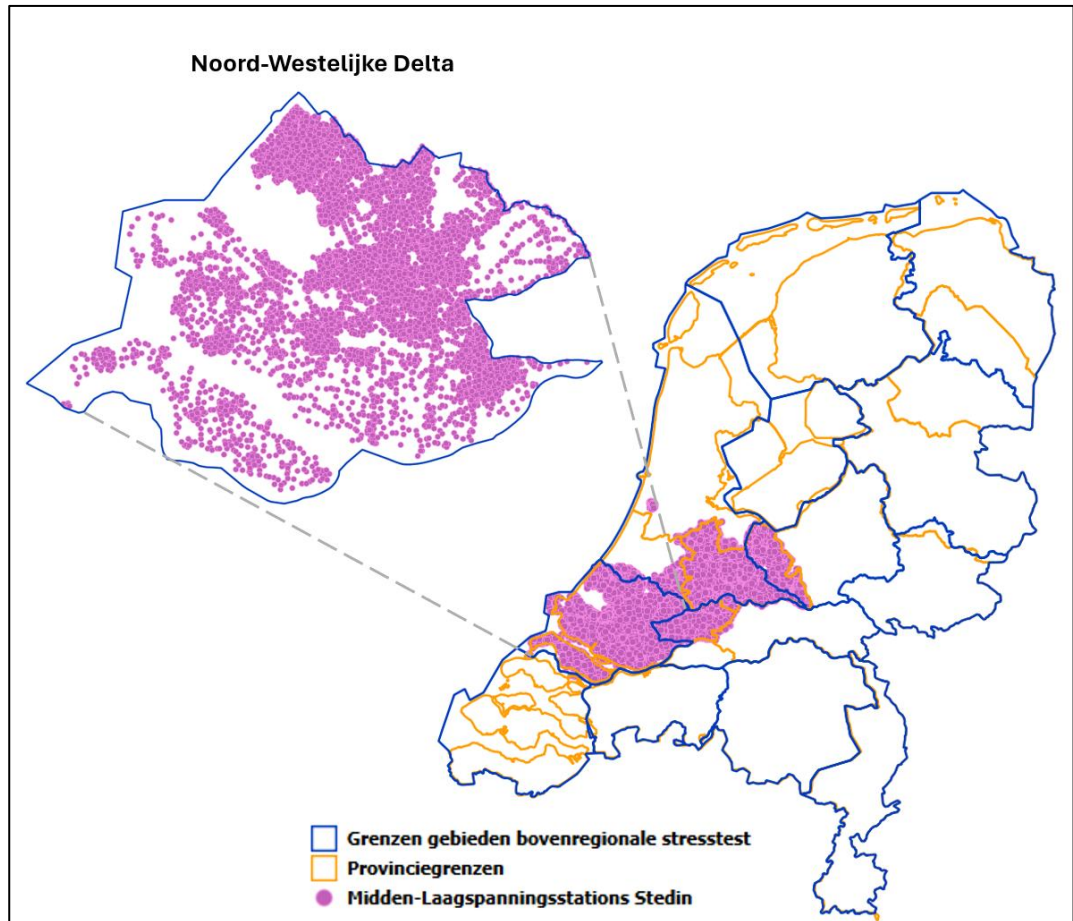
Voor de uitwerking van de hoofdvragen werken we aan de hand van een casus in de Noordwestelijke Delta in combinatie met studieresultaten van de bovenregionale wateroverlast (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2025). Voor dit gebied is eerst de impact door uitval van elektriciteit bepaald, vervolgens zijn de ketenafhankelijkheden met weginfrastructuur gekwantificeerd door eerst een bereikbaarheidsanalyse uit te voeren en vervolgens de impact van verstoorde bereikbaarheid te analyseren (Zie Figuur 2.1). Hieronder worden de verschillende onderdelen stap voor stap uitgelegd.



Figuur 2.1 Schematisch stappenplan voor de uitvoering van de casus in deze studie.

2.1 Studieggebied Noordwestelijke Delta

In dit rapport staat de Noordwestelijke Delta als studiegebied centraal (Figuur 2.2). Het gebied is een van de dertien deelgebieden waarvoor ook dreigingsbeelden van grootschalige wateroverlast beschikbaar zijn gemaakt binnen de bovenregionale stresstest. In dit gebied is Stedin de hoofdaanbieder van elektriciteit. De ontwikkelde methodieken worden getoetst in dit deelgebied, maar kunnen op elk van de dertien deelgebieden in Nederland worden toegepast.



Figuur 2.2 Noordwestelijke Delta en de ligging van de Midden-Laagspanningsstations van Stedin.

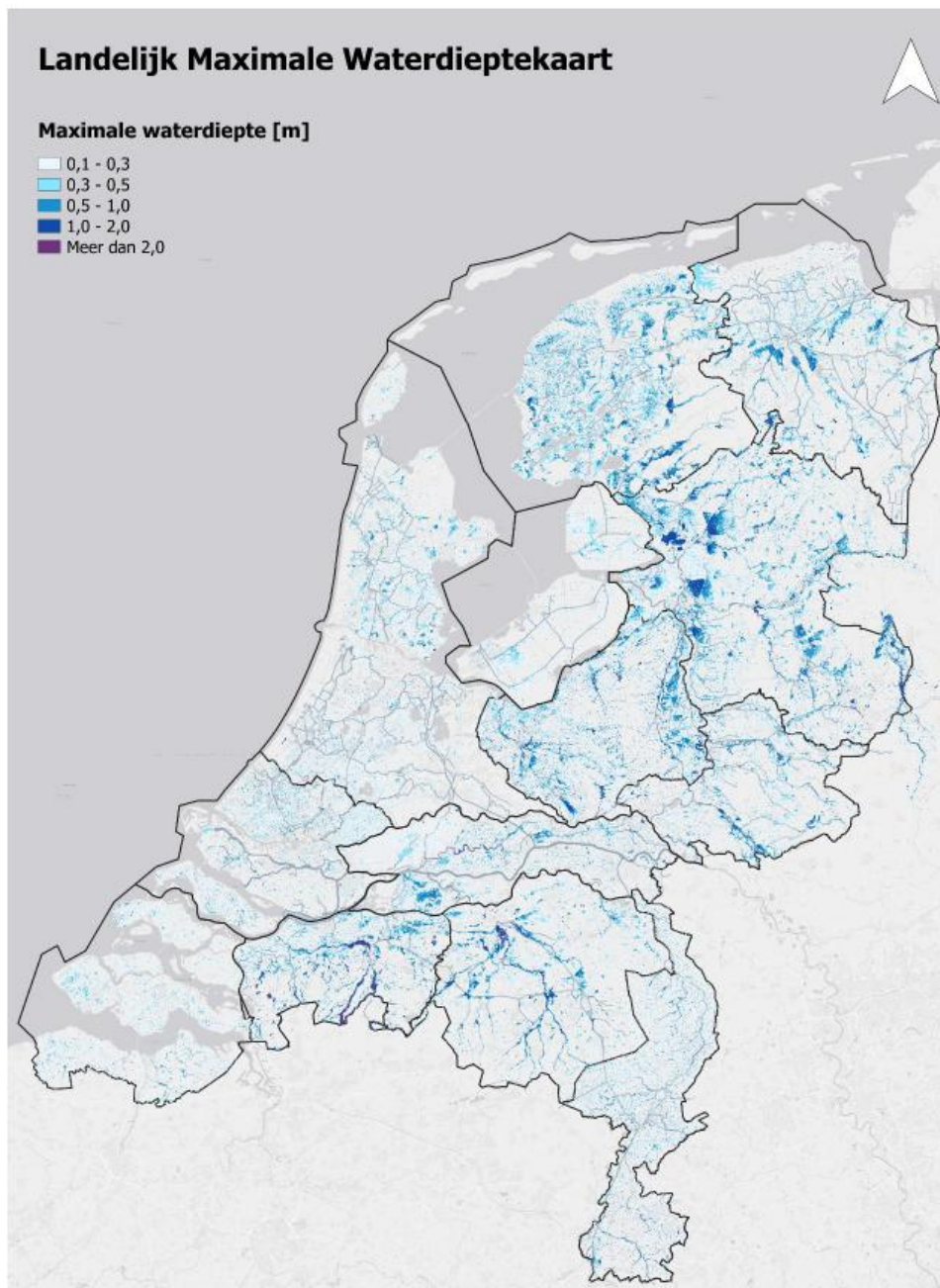
2.2 De dreiging: grootschalige extreme regen

De 'Limburgbui' die ten grondslag ligt aan de bovenregionale stresstest wateroverlast gaat uit van een extreme neerslaggebeurtenis: 200 mm regen in 48 uur, verspreid over een groot, bovenregionaal gebied. De regenval is daarmee significant anders dan een piekbui in korte tijd. Meer informatie over de bui is te vinden in [het kaartverhaal 'grootschalige extreme regen' van de klimaateffectatlas](#) dat speciaal ingericht is met informatie over dit type extreme regen.

Een dergelijke grootschalige bui leidt ertoe dat op veel plaatsen tegelijkertijd wateroverlast optreedt, met bijbehorende gevolgen voor de omgeving en vitale infrastructuur. Uitval van vitale infrastructuur kan leiden tot maatschappelijke verliezen, bijvoorbeeld door uitval van stroom of telecommunicatie.

Voor elk van de dertien deelgebieden van de bovenregionale stresstest hebben de waterschappen een vertaling gemaakt van extreme neerslag naar waterbeelden (of waterkaarten). De waterbeelden laten zien wat de maximale waterdieptes (Figuur 2.3) en ook de overstromingsduur (Figuur 2.4) zijn die op specifieke locaties kunnen optreden bij een extreme regenbui. Daarbij zijn zowel de kaart met maximale waterdiepte als het duurbeeld gebruikt. Het duurbeeld geeft een indicatie van hoelang water op specifieke locaties aanwezig blijft. Dit moet worden geïnterpreteerd in samenhang: wanneer een locatie op de maximale waterdieptekaart als overstroomd wordt weergegeven, kan met behulp van het duurbeeld worden bepaald hoe lang die situatie aanhoudt. De waterkaarten zijn ontwikkeld als signaleringsinstrument en dienen primair om inzicht te bieden in mogelijke knelpunten bij wateroverlast. In deze studie is gebruikgemaakt van het wateroverlastbeeld dat is opgesteld voor de bovenregionale stresstesten wateroverlast 2025 voor de Noordwestelijke Delta

(Figuur 2.3). De waterkaart voor de Noordwestelijke Delta laat op veel verschillende plaatsen waterdieptes zien, hoewel de waterdieptes overwegend lager zijn. Tegelijkertijd blijft in dit gebied het water voor langere duur staan; in sommige gebieden, met name de Krimpenerwaard en een deel van Goeree-Overflakkee wordt meer dan een week wateroverlast verwacht.

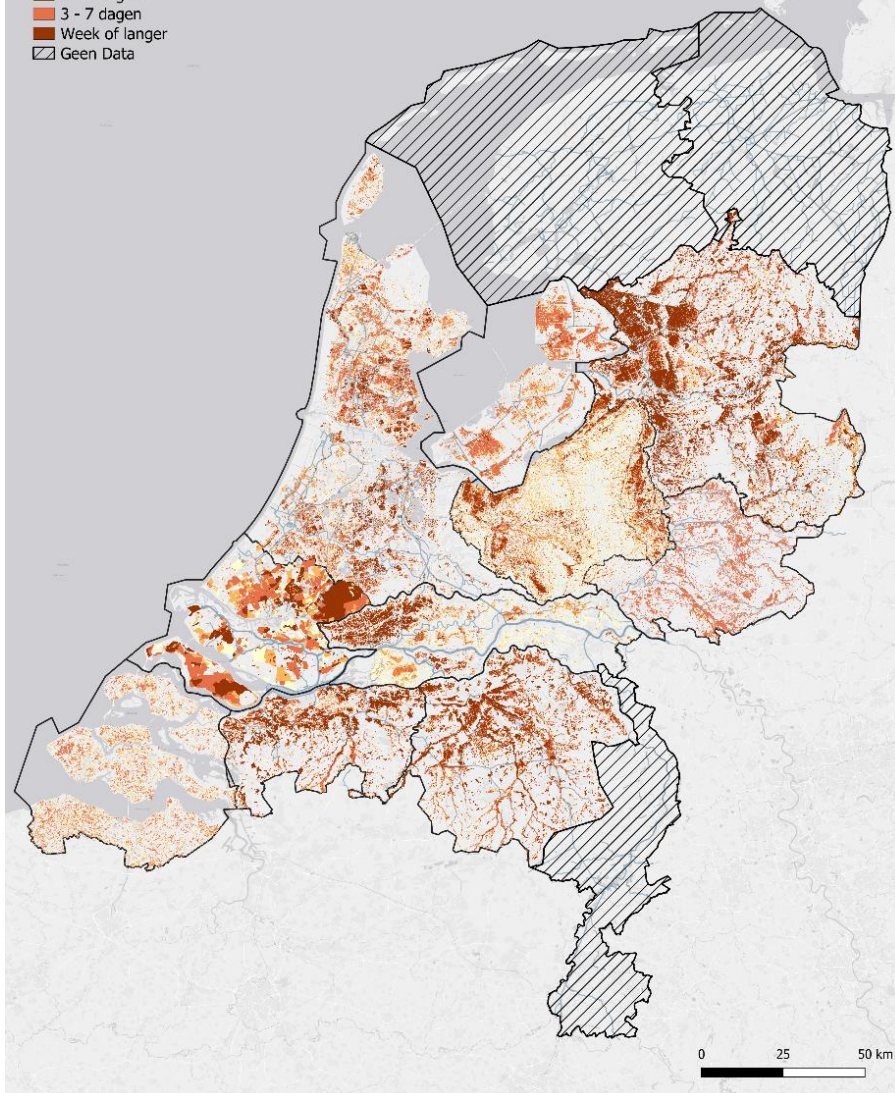


Figuur 2.3 De maximale waterdiepte op maaiveld die ontstaat bij grootschalige extreme neerslag (200 mm in 48 uur). De kaart is gemaakt op basis van de aangeleverde informatie door de bovenregionale stresstest regio's. Deze gecombineerde kaart hoort niet bij 1 gebeurtenis: in werkelijkheid zal een of twee van de hier bekeken regio's tegelijkertijd getroffen worden door extreme neerslag en niet het hele land (Deltares, 2025).

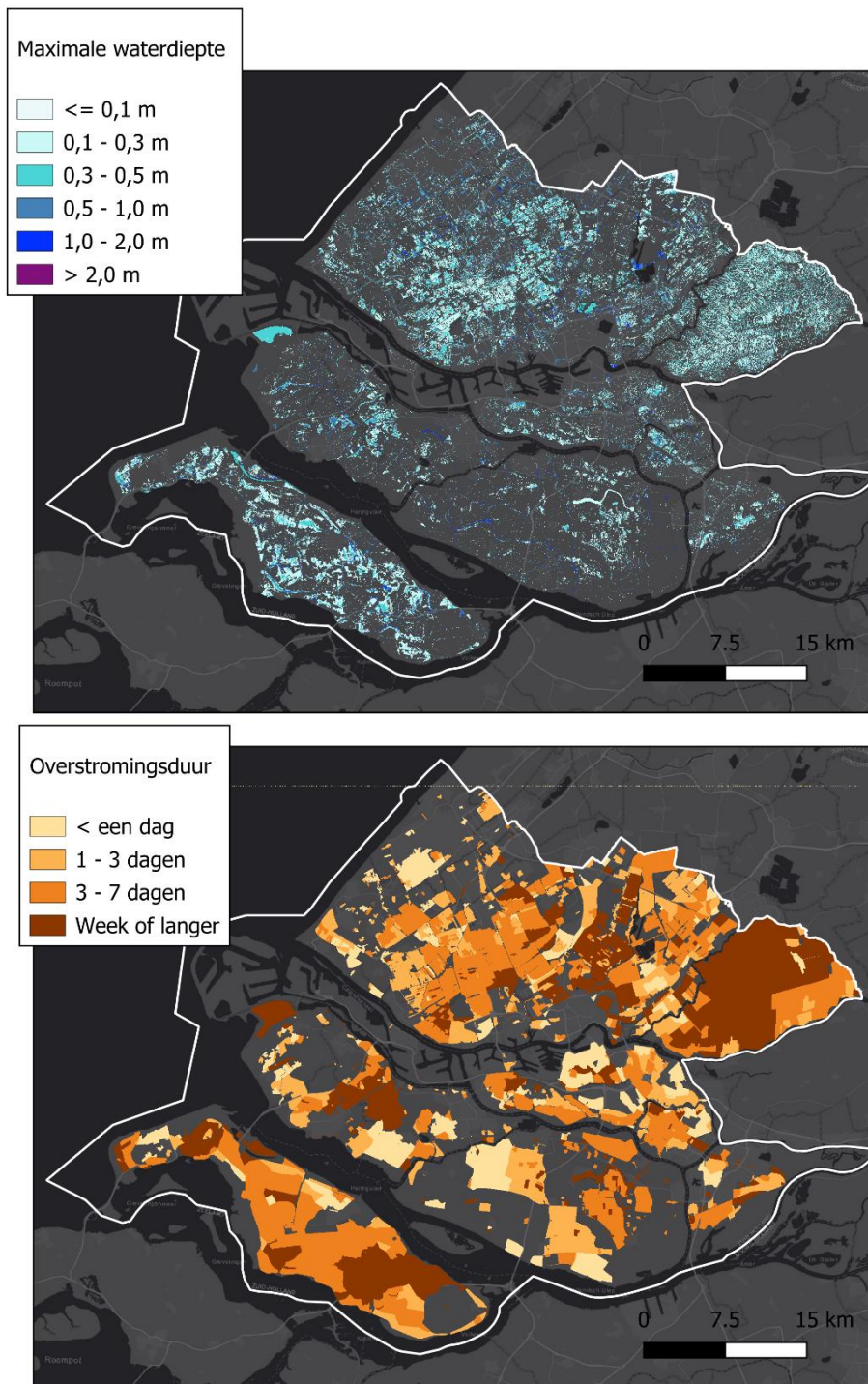
Landelijk Overstromingsduurkaart

Overstromingsduur

- Minder dan een dag
- 1 - 3 dagen
- 3 - 7 dagen
- Week of langer
- Geen Data



Figuur 2.4 De duur van water op maaiveld bij grootschalige extreme neerslag. Kaart gemaakt op basis van de beschikbare overstromingsduurkaarten van de bovenregionale stresstestregio's. Deze gecombineerde kaart hoort niet bij 1 gebeurtenis: in werkelijkheid zal een of twee van de hier bekeken regio's tegelijkertijd getroffen worden door extreme neerslag en niet het hele land (Deltares, 2025).



Figuur 2.5 Maximale waterdiepte en overstromingsduur Noordwestelijke Delta (uit de bovenregionale stresstests wateroverlast).

2.3 Bepalen impact van uitval elektriciteit

Elektriciteit is een van de meest vitale functies in onze samenleving. Uitval van het elektriciteitsnet kan grote gevolgen hebben voor huishoudens, bedrijven en kritieke voorzieningen. Hieronder wordt eerst kort beschreven wat in het algemeen de onderdelen zijn van het elektriciteitsnet. Daarna wordt beschreven hoe mogelijke uitval door wateroverlast kan worden bepaald. Vervolgens wordt de methode om de impact van

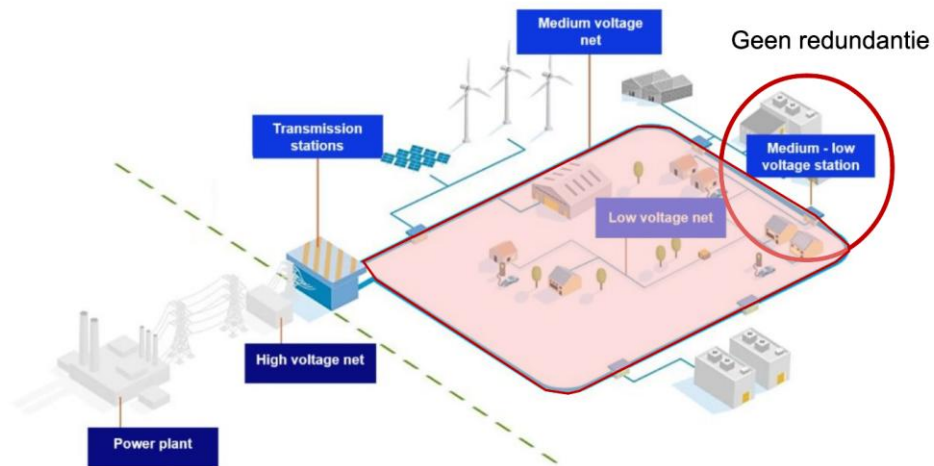
storingen te kwantificeren toegelicht, zowel in termen van ruimtelijke spreiding als maatschappelijke gevolgen.

2.3.1 Opbouw elektriciteitsnet

Het elektriciteitsnet van Stedin bestaat uit verschillende onderdelen. Omdat we in deze analyse geen stroom zullen modelleren, hebben we ons gericht op objecten die bij uitval direct leiden tot schade. We richten ons op midden-laagspanningsstations (MS-LS stations). Deze stations zijn doorgaans niet of weinig redundant zijn: wanneer een station uitvalt, ervaren alle aangesloten laagspanningsafnemers, zoals huishoudens en bedrijven, een stroomonderbreking (Figuur 2.6). Dit maakt deze objecten geschikt voor het beoordelen van kwetsbaarheden bij wateroverlast.

Een midden-laagspanningsstation is een transformatorstation dat de middenspanning van het net (meestal tussen 1.000 en 25.000 volt) omzet naar laagspanning (400/230 volt), geschikt voor direct gebruik. Het station bestaat uit drie hoofdcomponenten:

- **Middenspanningszijde:** hier komt de spanning van het middenspanningsnet binnen, doorgaans rond 10.000 volt.
- **Transformator:** zet de spanning om naar een veilig en bruikbaar niveau.
- **Laagspanningszijde:** hier wordt de laagspanning verdeeld en beveiligd voor eindgebruikers in de omgeving.



Figuur 2.6 Opbouw van het elektriciteitsnet: uitval bij een midden-laagspanningsstation leidt tot uitval bij de laagspannings-afnemers, aangepast van (Overbetuwe Bestuurlijke Informatie, n.d.).

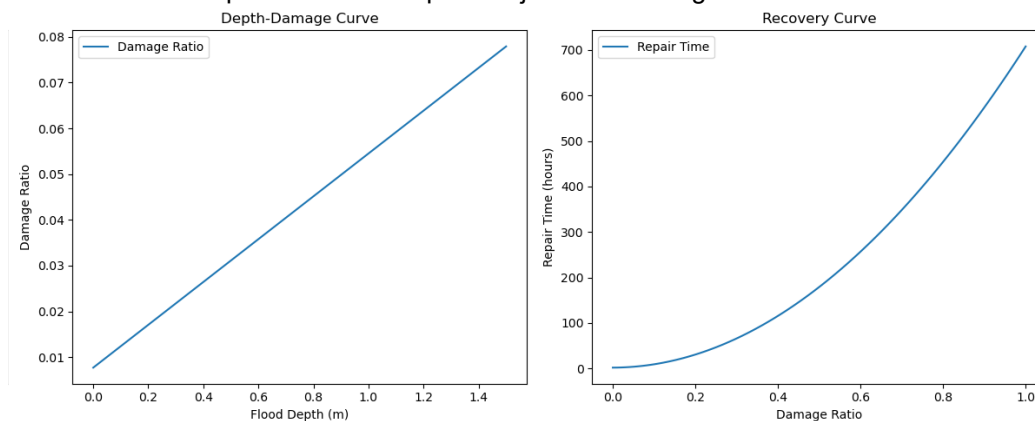
2.3.2 Blootstelling

Om te beoordelen of wateroverlast leidt tot problemen voor het elektriciteitsnet, is eerst een blootstellingsanalyse uitgevoerd. Hierbij is het waterbeeld gecombineerd met de geografische ligging van de MS-LS stations. Per station is vastgesteld of het zich in een gebied met wateroverlast bevindt en, zo ja, welke waterdiepte daar optreedt.

Vervolgens is geanalyseerd of deze stations daadwerkelijk kunnen uitvallen door wateroverlast. Voor midden-laagspanningsstations zijn drempelwaarden gevonden van 45 tot 80 cm waterdiepte (NKWK Klimaatbestendige Stad, 2024), waarbij bij waterdieptes vanaf 45 cm mogelijke uitval kan worden verwacht. In deze studie hebben we daarom gewerkt met een drempelwaarde van 45 cm. Tegelijkertijd blijkt vanuit internationale studies dat ook bij 20 cm mogelijk schade kan optreden (FEMA, 2003). In Nederland liggen de drempels van midden-spanningsstations echter vaak op 20-30 cm (NKWK Klimaatbestendige Stad, 2024).

2.3.3.2 Bepaling hersteltijd

Om de reparatietijd van getroffen stations te bepalen is de waterdiepte gerelateerd aan de mogelijke schade die optreedt. We schatten de schade aan MS-LS stations in door de waterdiepte te koppelen aan de schade aan het station via een schade-diepte-curve (kwetsbaarheidsfunctie) (FEMA, 2003; Sánchez-Muñoz, et al., 2020). De schade aan een station wordt uitgedrukt als een schaderatio: het verband tussen de overstromingsdiepte en het relatieve schadepercentage dat optreedt aan een elektriciteitsstation. Ten slotte wordt deze schaderatio gebruikt om de hersteltijd in uren te schatten via een herstel-tijd functie (Movahednia, Kargarian, Ozdemir, & Hagen, 2022; Sánchez-Muñoz, et al., 2020). Figuur 2.8 laat de schade-diepte en schade-reparatietijd curves zien gebruikt in deze studie



Figuur 2.8 Schade-dieptecurve en reparatietijdcurve (FEMA, 2003; Sánchez-Muñoz, et al., 2020).

2.4 Kwantificeren keten-afhankelijkheid elektriciteit van bereikbaarheid

Uit eerdere studies is gebleken dat het herstel van de elektriciteitsvoorziening tijdens grootschalige wateroverlast afhankelijk is van de toegankelijkheid van wegen (Meijer, van Marle, & Bles, 2025). Fysieke aanwezigheid bij beschadigde objecten is vaak noodzakelijk om te kunnen inspecteren wat er aan de hand is en om herstel uit te voeren.

Hoewel wegen uiteraard ook belangrijk zijn voor algemene mobiliteit, richten we ons hier specifiek op de rol van de weg in het herstel van elektriciteit infrastructuur. Als wegen onbegaanbaar zijn, vertraagt dit het herstel van elektriciteitsstoringen en vergroot het de maatschappelijke impact.

Onder **bereikbaarheid** wordt verstaan de mate waarin een specifieke locatie fysiek bereikbaar is; kun je er komen ja of nee? Bij **connectiviteit** wordt bedoeld op de mate waarin het wegennetwerk onderling verbonden is en redundantie biedt. Een goed verbonden netwerk maakt het mogelijk om alternatieve routes te gebruiken wanneer een verbinding uitvalt.

2.4.1 Blootstellingsanalyse

Voor het wegennet is eerst een blootstellingsanalyse uitgevoerd met RA2CE (Zie Textbox 2.1). Met deze tooling kunnen voor infrastructuurnetwerken snel blootstelling- en risicoanalyses worden uitgevoerd. Per weg (van kruispunt tot kruispunt) is aangenomen dat een weg niet meer beschikbaar is als zowel de gemiddelde waterdiepte 10 cm bedraagt en daarnaast minimaal 25% van de weg is blootgesteld. Hierbij is aangenomen dat een weg onbegaanbaar wordt wanneer de gemiddelde waterdiepte 10 cm bedraagt en minimaal 25% van het wegdeel overstroomd is (Pregolato, 2017). Voor de bovenregionale stresstesten van Rijkswaterstaat zijn dezelfde criteria gebruikt (Meijer, Gunaratne, & Bles, Bovenregionale stresstest wateroverlast op het hoofdwegennet, 2026 (concept)).

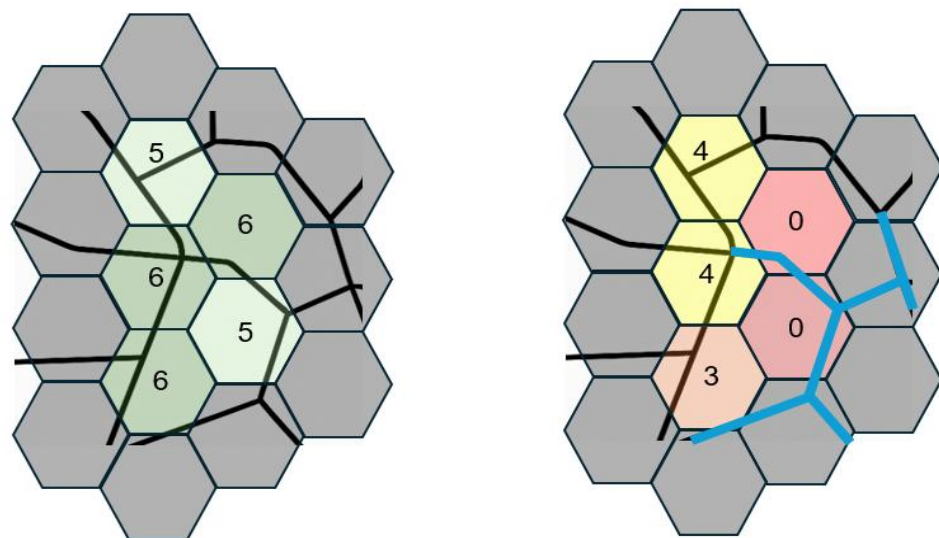
In de analyse zijn niet alle specifieke objecten van het wegennet meegenomen, zoals tunnels, verdiepte liggingen, kanteldijken of hemelwaterafvoer. Op basis van de kaarten zal dus een extra validatie moeten worden uitgevoerd indien de resultaten gebruikt gaan worden voor besluitvorming. De nauwkeurigheid van de resultaten hangt daarnaast ook af van de kwaliteit van de waterdieptekaarten en de aannames voor modellering.

Textbox 2.1 RA2CE modellering.

We hebben voor de analyses gebruik gemaakt van het RA2CE-platform (*Resilience Assessment and Adaptation for Critical Infrastructure*). Dit is een open-source Python-pakket dat is ontwikkeld door Deltares en wereldwijd wordt ingezet om eigenaren en beheerders van infrastructuur te ondersteunen bij risicoanalyses en besluitvorming rondom klimaatadaptatie. Het platform genereert impactkaarten voor infrastructuurnetwerken. De resultaten kunnen worden uitgedrukt in termen van de jaarlijks te verwachte schade voor de beheerder (direct) en de jaarlijks te verwachten verliezen voor weggebruikers door uitval van de infrastructuur uitgedrukt in maatschappelijke kosten (indirect). De netwerkanalyses zijn gebaseerd op grafentheorie, een methode die veel wordt toegepast in mobiliteitsvraagstukken. Daarnaast bevat het RA2CE platform een module om sociale kwetsbaarheid mee te nemen in toegankelijkheidsanalyses. De software is openbaar beschikbaar via: <https://github.com/Deltares/ra2ce>

2.4.2 Bereikbaarheidsanalyse

Om te beoordelen hoe goed locaties en vitale objecten bereikbaar zijn in een normale situatie alsook tijdens neerslagoverstroming, hebben we een methode ontwikkeld waarmee je in een oogopslag kunt zien welke gebieden goed bereikbaar zijn en waar knelpunten ontstaan. Dit is belangrijk voor organisaties die storingen moeten verhelpen, maar ook voor crisisbeheersing en herstel.



Figuur 2.9 Schematische weergave voor het bepalen van de toegankelijkheid voor de 5 middelste hexagonen. Links is de situatie zonder overstrooming. De getallen geven weer hoeveel verbindingen er nog met naburige cellen zijn. Rechts is een deel van het wegennetwerk overstroomd. Het aantal verbindingen met naburige cellen neemt daardoor af.

In deze methode is het studiegebied verdeeld in zeshoeken (hexagonen) met zijdes van 300 meter. Voor elk hexagoon is met RA2CE bepaald of deze vanuit directe buurcellen

bereikbaar zijn: hoe meer buurcellen via het wegennet kunnen worden bereikt, hoe meer opties er zijn om op een bepaalde locatie te komen en hoe kleiner het effect is van het uitvallen van een wegverbinding. Deze analyse is uitgevoerd voor de situatie zonder overstroming en met overstroming (Figuur 2.9). Hiermee is het mogelijk om kwetsbare plekken te identificeren zonder uitval, maar ook waar de wateroverlast leidt tot de grootste effecten.

Deze methode biedt vooral inzicht of een locatie direct verbonden is met een van de buurcellen, maar geeft niet direct inzicht in de toegankelijkheid van de hele regio. Hiermee wordt vooral inzicht verkregen in locaties die snel geïsoleerd raken en daardoor niet meer toegankelijk zijn. Daarnaast zijn snelwegen niet meegenomen als verbindingen tussen buurcellen, omdat je op een snelweg alleen bij op- en afritten van richting kunt veranderen. Hierdoor is niet altijd een directe verbinding mogelijk. Deze keuze maakt de analyse realistischer voor noodsituaties.

In deze analyse is geen expliciete correctie toegepast voor de werkelijke hoogte van wegen. Het onderliggende waterbeeld is gebaseerd op een Digitaal Hoogtemodel (DEM), waardoor de gemiddelde hoogteligging per gridcel wel degelijk is meegenomen. Wegen liggen echter vaak net iets hoger dan de gemiddelde hoogte binnen een gridcel van het DEM, bijvoorbeeld door ophogingen, taluds of dijken die in het DEM niet altijd volledig of nauwkeurig worden gerepresenteerd. Wanneer deze lokale ophogingen van wegen niet volledig zijn verwerkt in het waterbeeld, kan dat leiden tot een vertekening in de berekende waterdieptes op wegen en daarmee in de inschatting van de bereikbaarheid. Ondanks deze beperking biedt de methode een duidelijk signaal waar de grootste risico's voor bereikbaarheid liggen en waar cascade-effecten op andere vitale infrastructuren kunnen optreden.

2.4.3 Effecten bereikbaarheid op elektriciteit

Voor de blootgestelde stations met een waterdiepte van meer dan 45 cm is bepaald of er sprake is van bereikbaarheidsverlies dat leidt tot beperkte toegang tot het gebied. Dit is gedefinieerd als een situatie waarin meer dan 80% van de beschikbare routes naar aangrenzende hexagonen wegvalt, waardoor een beperkt aantal wegen nog beschikbaar is voor herstel. Om zicht te krijgen op de onzekerheden is deze analyse ook uitgevoerd voor stations met een waterdiepte van meer dan 20 cm. Hoewel bij deze stations mogelijk geen directe uitval optreedt, kan er wel schade ontstaan en vormt beperkte beschikbaarheid van wegen een probleem voor inspectie en herstel.

Daarnaast is bepaald hoe de duur van de blootstelling van het MS-LS station zich verhoudt tot de verstoring van de wegen. Door de duur van de blootstelling van het elektriciteitsstation te combineren met de maximale duur van wegverstoring in dezelfde hexagoon, kunnen we een indicatie geven van wat bepalend is voor de hersteltijd en of bereikbaarheid een belemmering vormt voor herstelwerkzaamheden.

Tot slot zijn ook de resultaten geaggregeerd tot wijkniveau (CBS). Dit allereerst om administratieve grenzen vaak meer houvast bieden voor beleidsmakers. Tegelijkertijd is dit ook het schaalniveau waarop deze resultaten gebruikt zouden moeten worden, omdat in de analyses onzekerheden zijn geïntroduceerd. Het wijkniveau geeft een ruimtelijk beeld waarbij niet op specifieke locaties wordt ingezoomd.

2.4.4 Hotspotanalyse elektriciteit en bereikbaarheid gecombineerd

In deze studie is een hotspotanalyse uitgevoerd om te bepalen welke wijken relatief sterk worden getroffen door elektriciteitsuitval en wegverstoringen. Daarbij zijn twee indicatoren meegenomen:

- (1) Het percentage overstroomde wegen.
- (2) Het aantal persoonsverliesuren van elektriciteitsuitval.

De wijken zijn gerangschikt op basis van deze factoren. De factoren zijn eerst afzonderlijk genormaliseerd. Wijken zonder blootstelling (waarde = 0) worden niet meegenomen in de rangorde en krijgen automatisch een score van 0. Dit voorkomt dat wijken zonder problemen toch een relatief hoge of lage positie krijgen.

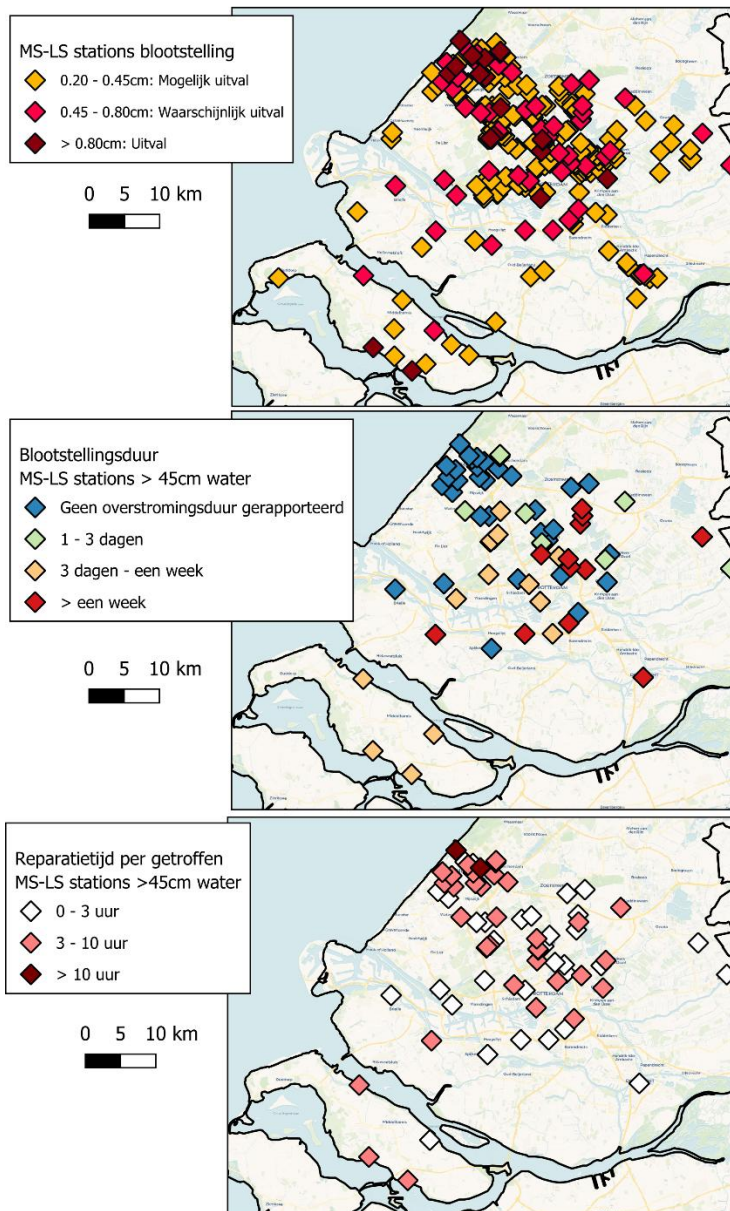
Voor alle wijken met een blootstellingswaarde groter dan 0 wordt per indicator een percentielschaal berekend. De wijk met de laagste blootstelling krijgt hierbij een score dicht bij 0, en de wijk met de hoogste blootstelling een score van 100. Deze aanpak maakt de indicatoren vergelijkbaar en voorkomt dat uitschieters het beeld sterk vertekenen. De uiteindelijke hotspotindex wordt bepaald door de twee genormaliseerde indicatoren bij elkaar op te tellen (beide met een gelijke gewing). De index loopt van 0 (geen blootstelling) tot 100 (de hoogste gecombineerde blootstelling binnen het studiegebied). Hiermee ontstaat een relatieve maat die inzicht geeft in welke wijken het meest kwetsbaar zijn voor de gecombineerde effecten van infrastructuurverstoring en de impact op bewoners.

3 Resultaten

3.1 Impact uitval elektriciteit

3.1.1 Blootstelling- & uitval elektriciteit

Blootstelling en reparatietijd



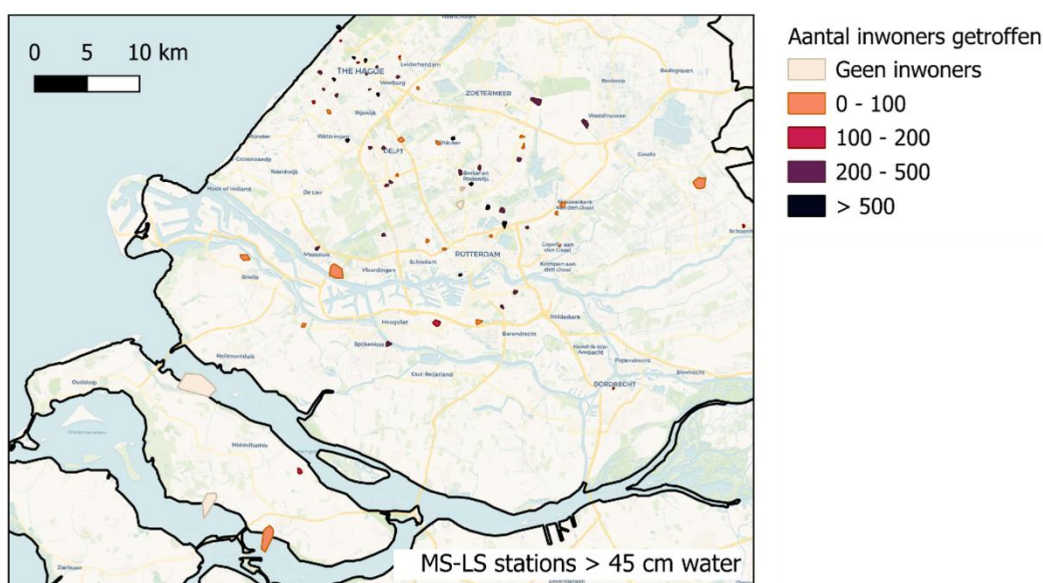
Figuur 3.1 Resultaten blootstelling van LS-MS stations (boven), de verwachte duur van blootstelling (midden) en de hieraan gekoppelde reparatietijd (onder).

Van de in totaal 10034 midden-laagspanningsstations in het studiegebied, worden de meeste niet blootgesteld aan waterdieptes groter dan 45 cm. In de regio Den Haag, Delft en Rotterdam zijn 733 stations blootgesteld aan water. De meeste locaties (457 stations) hebben waterdieptes van minder dan 20 cm. 71 stations overschrijden de kritieke drempelwaarde van 45 cm, en in sommige gevallen (21 stations) 80 cm, waardoor uitval aannemelijk is (Figuur 3.1 bovenste paneel).

Van de 71 stations blootgesteld aan meer dan 45 cm water, is er voor 28 locaties geen duur gerapporteerd in de beschikbare kaartlagen (Figuur 3.1 middelste paneel). Voor de overige locaties bevindt een deel van de stations in gebieden met hoge waterdieptes, maar met een korte duur van overlast (minder dan één dag), met name rond Den Haag. In contrast daarmee wordt in de Krimpenerwaard en bij Gouda langdurige wateroverlast verwacht, waarbij ook midden-laagspanningsstations voor langere perioden worden blootgesteld. Dit vergroot het risico op schade en zorgt voor een langere uitvalduur van elektriciteit.

De blootstellingsduur, in combinatie met de reparatietijd (Figuur 3.1 onderste paneel), geeft een indicatie van hoelang het theoretisch duurt om de stations te herstellen, wanneer nog geen rekening wordt gehouden met verstoring van de bereikbaarheid, aanrijdtijden en beschikbaarheid van personeel. Gelijktijdige verstoringen op meerdere locaties en de impact van water op de bereikbaarheid van wegen kunnen het herstelproces namelijk verder n compliceren.

3.1.2 Impact uitval elektriciteit



Figuur 3.2 Aantal inwoners in stroomuitvalgebieden bij een drempelwaarde van 45 cm.

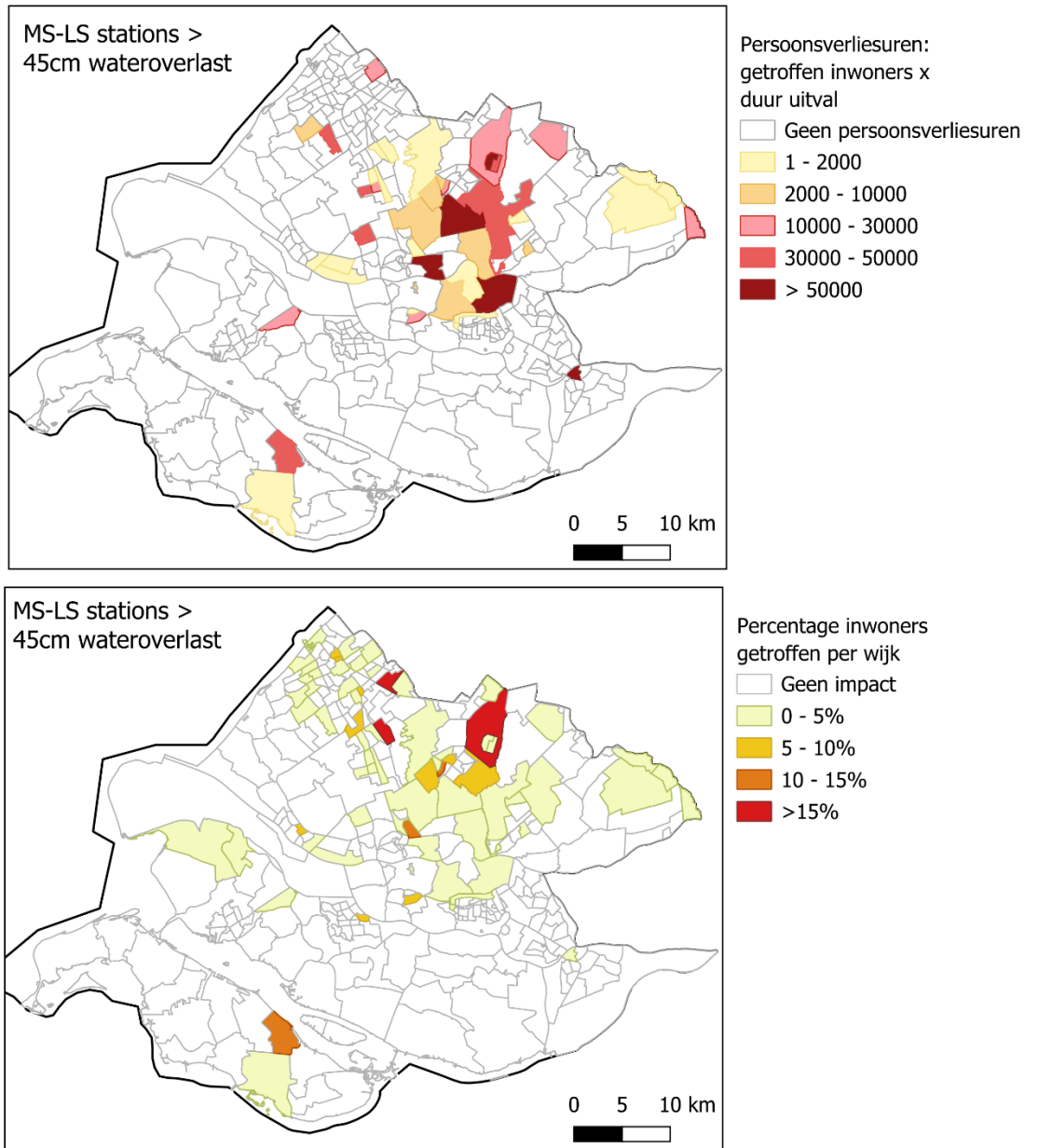
Ten gevolge van mogelijke uitval van 71 stations waar de blootstelling groter is dan 45 cm worden naar schatting 16.000 inwoners getroffen door elektriciteitsuitval. Van deze groep verblijven ongeveer 12.000 inwoners in gebieden waar de wateroverlast langer dan een dag aanhoudt. Door een combinatie van het aantal inwoners in combinatie met de duur van de uitval is berekend hoeveel persoonverliesuren ('people-hours' zonder stroom) uitval verwacht kan worden. De verwachte totale persoonsverliesuren door de extreme neerslag in het geanalyseerde gebied is meer dan 1 miljoen persoonsverliesuren (Figuur 3.3).

Deze uitkomsten zijn vervolgens geaggregeerd tot wijkniveau. In sommige wijken is het percentage getroffen inwoners relatief laag, maar door de verwachte langere duur van uitval van de elektriciteit kan dit tot leiden tot relatief hoge persoonsverliesuren (Figuur 3.3). De uitvalduur is een belangrijke bepalende factor voor persoonsverliesuren, met name in dit gebied omdat de uitvalmodellering op een grovere resolutie gedaan is dan de wateroverlast. De wijken met de hoogste persoonsverliesuren staan hieronder beknopt samengevat in Tabel 3.1. In sommige wijken, met name rondom Den Haag, waar wel personen getroffen worden, is geen duur gegeven in de waterbeelden. Om deze reden worden daar geen persoonsverliesuren gevonden.

Uit de analyse blijkt dat de bijdrage aan de persoonsverliesuren per wijk sterk verschilt. In Hillegersberg-Schiebroek worden relatief meer inwoners getroffen (~1750), terwijl de blootstellingsduur van meerdere elektriciteitsstations oploopt tot ~24 dagen. De persoonsverliesuren in deze wijk worden daardoor bepaald door een combinatie van relatief meer getroffen inwoners en relatief langere uitvalduur. In Wijk 31 Bleiswijk worden daarentegen relatief weinig inwoners getroffen (~170), maar vallen beide stations uit voor ~24 dagen. Hierdoor worden de persoonsverliesuren in deze wijk vrijwel volledig bepaald door de relatief lange uitvalduur. In Delfshaven is de situatie omgekeerd: de uitvalduur is relatief kort (ca. 5 dagen), maar er worden relatief meer inwoners geraakt (~800). Hierdoor wordt de omvang van de persoonsverliesuren vooral bepaald door het relatief grotere aantal getroffen inwoners. In Wijk 01 Binnenstad worden relatief weinig inwoners geraakt (~120), maar bedraagt de uitvalduur ~21 dagen, waardoor de persoonsverliesuren hier vooral bepaald worden door de relatief lange duur van de onderbreking. In IJsselmonde worden relatief meer inwoners geraakt (~570) en is er sprake van een uitvalduur van één van de stations van ~10 dagen. De persoonsverliesuren in deze wijk worden dus bepaald door een combinatie van een relatief grotere getroffen populatie en een middelmatige uitvalduur.

Tabel 3.1 Wijken met de hoogste persoonsverliesuren door uitval van elektriciteit.

Wijk	Aantal elektriciteitsstations > 45cm	Overstromingsduur van de elektriciteitsstations > 45cm	Aantal geraakte inwoners	Bepalend voor persoonsverliesuren
Hillegersberg-Schiebroek	3	~5 dagen, ~24 dagen, ~9 dagen	~1750	Combinatie van langere duur (tot 24 dagen) en meer inwoners
Wijk 31 Bleiswijk	2	~24 dagen (beide)	~170	Langere uitvalduur, ondanks relatief minder getroffen inwoners
Delfshaven	1	~5 dagen	~800	Relatief meer inwoners getroffen bij een kortere duur
Wijk 01 Binnenstad	1	~21 dagen	~120	Langere uitvalduur ondanks minder getroffen inwoners
IJsselmonde	2	~10 dagen & geen duur	~570	Meer getroffen inwoners bij middelmatige duur

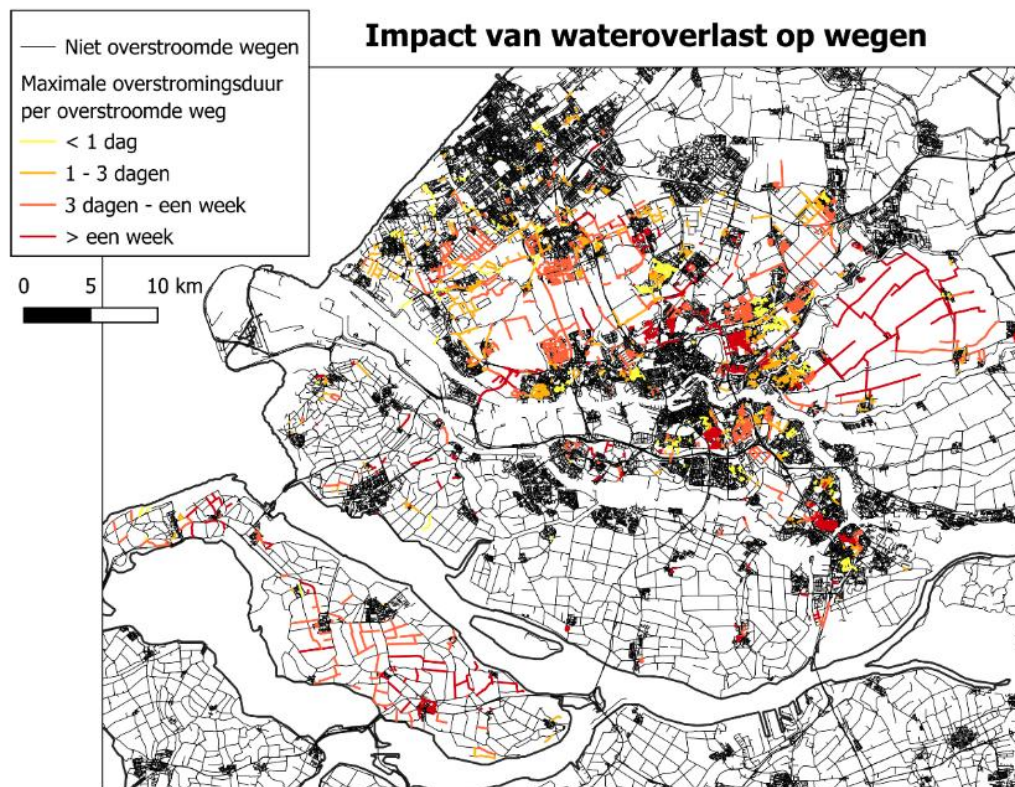


Figuur 3.3 Persoonsverliesuren en percentage getroffen inwoners per wijk.

3.2 Effecten van extreme neerslag op wegen

3.2.1 Blootstelling

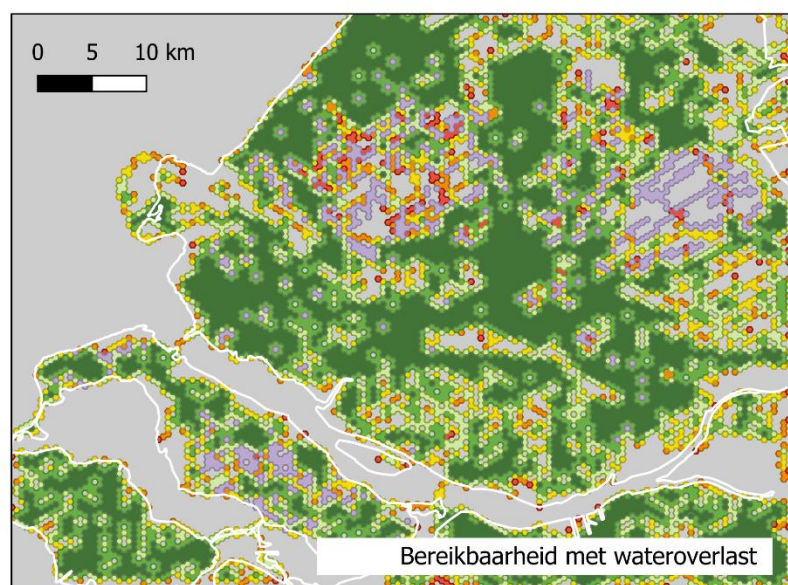
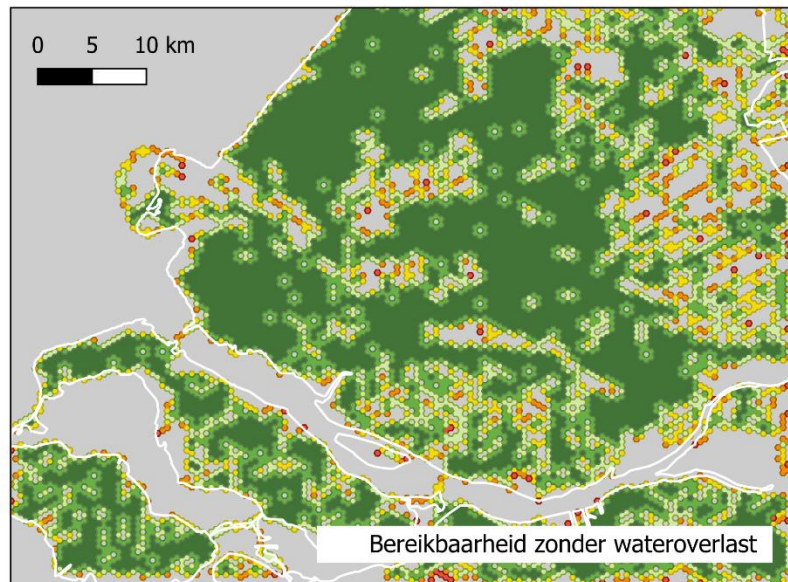
Vervolgens is geanalyseerd wat het effect is van de extreme neerslag op toegankelijkheid van de wegen en bereikbaarheid van het gebied. Figuur 3.4 laat zien welke wegen waarschijnlijk beperkt beschikbaar zijn. Op deze locaties is de gemiddelde waterdiepte groter dan 10 cm en is daarnaast meer dan 25% van de weg blootgesteld aan water. Daarnaast is voor elke weg aangegeven wat de maximale overstroomingsduur is.



Figuur 3.4 Blootstellingskaart extreme neerslag op weginfrastructuur.

3.2.2 Bereikbaarheid

Om inzicht te krijgen in de effecten van de extreme neerslag op de bereikbaarheid van locaties in het gebied is vervolgens de bereikbaarheidsanalyse uitgevoerd. Figuur 3.5 toont de resultaten van de hexagoonanalyse voor de situatie met en zonder wateroverlast. Zonder wateroverlast zijn in de meeste gebieden de buurcellen via het wegennet bereikbaar. Tijdens de wateroverlast verandert dit beeld en neemt in meerdere gebieden de bereikbaarheid af. Dit is vooral zichtbaar in de gebieden tussen bebouwd gebied, die vaak relatief minder bebouwd zijn en waar doorgaans een beperkt aantal routes beschikbaar is die dienen als verbindingswegen tussen kernen, zoals tussen Delft en Den Haag. Doordat meerdere wegen tegelijkertijd uitvallen, zijn vaak de alternatieve routes niet meer beschikbaar.



- Aantal directe buurcellen bereikbaar
- Er liggen geen wegen in deze cel
 - De cel was eerst bereikbaar, maar is door wateroverlast onbereikbaar
 - 1: Er kan 1 buurcel worden bereikt. De bereikbaarheid is gering.
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
 - 6: Alle aangrenzende cellen zijn bereikbaar; volledige bereikbaarheid

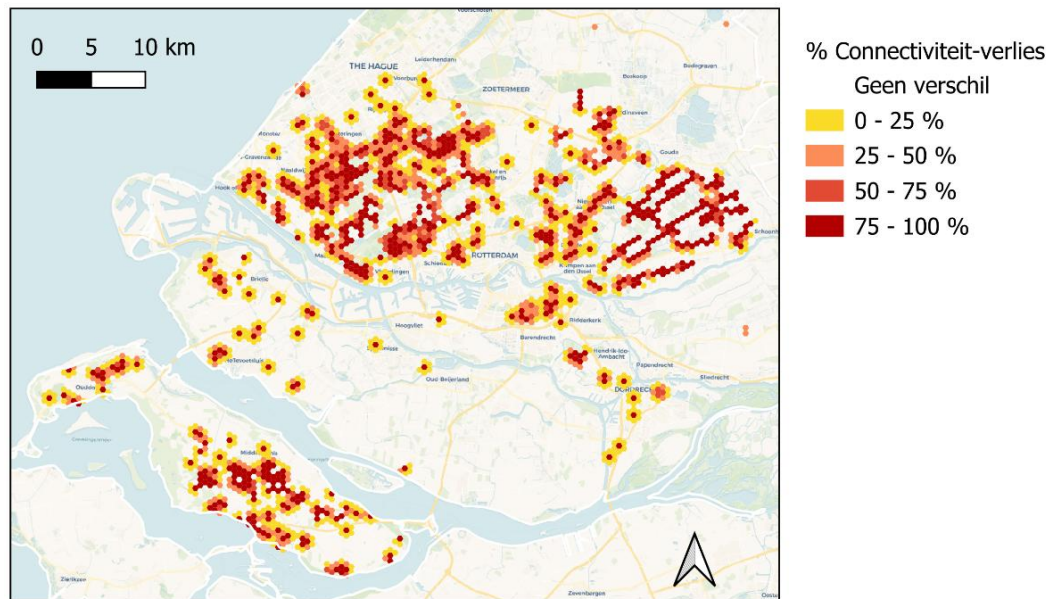
Figuur 3.5 Bereikbaarheid van wegen omgezet naar hexagonenresultaten; groene gebieden zijn goed omsloten door het wegennet terwijl bij rode gebieden er weinig alternatieve wegen zijn. Grijs gebieden hebben geen wegen beschikbaar.

Ook in de Krimpenerwaard daalt het aantal beschikbare routes door de extreme neerslag. Omdat hier van nature weinig alternatieve wegen aanwezig zijn, leidt dit in sommige gevallen tot mogelijke isolatie van gebieden. Dit blijkt ook uit Figuur 3.6, waarin het percentage connectiviteitsverlies per hexagoon wordt weergegeven. Het connectiviteitsverliespercentage

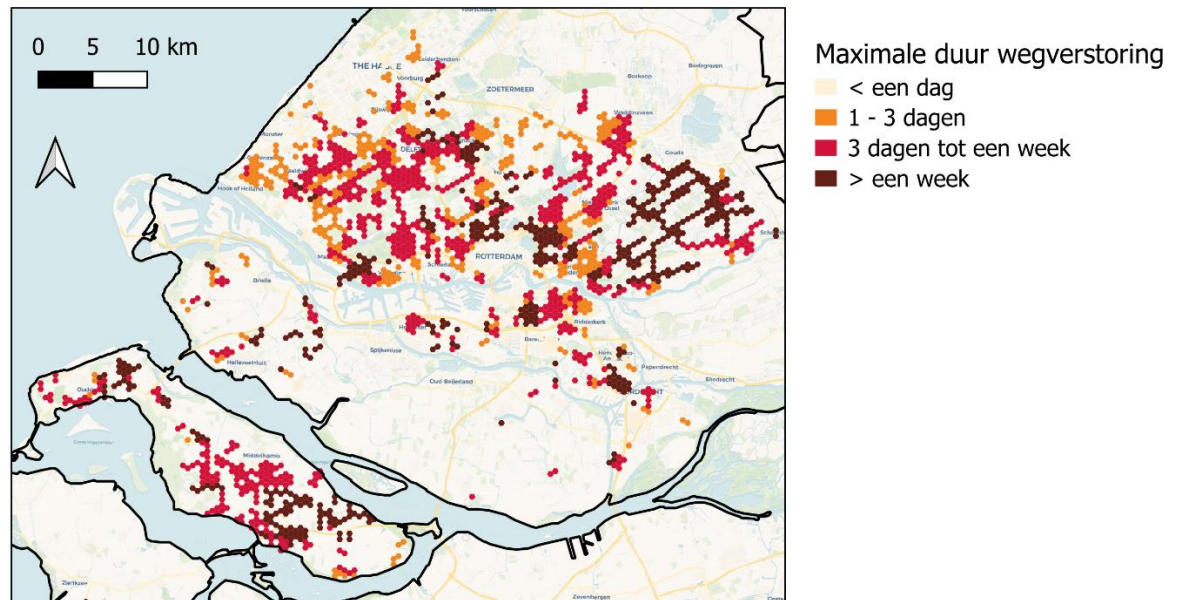
geeft aan welk deel van de routes die oorspronkelijk beschikbaar waren, door wateroverlast niet meer beschikbaar is. Met name in de Krimpenerwaard worden de wegen, die daar al schaars zijn, veelvuldig blootgesteld met als gevolg geen connectiviteit een hoog connectiviteitsverlies en isolatie van dat ge

Uit de analyse blijkt bovendien dat het probleem niet alleen zit in het verlies van verbindingen, maar ook in de duur van de verstoring. In gebieden zoals de Krimpenerwaard blijven wegen langdurig onbegaanbaar (Figuur 3.7).

Zowel in de Krimpenerwaard alsook op Goeree-Overflakkee zijn gebieden zichtbaar die meer dan een week verstoord kunnen zijn en waarbij 75–100% van de wegen naar aangrenzende hexagonen niet beschikbaar is, waardoor het waarschijnlijk zal zijn dat er gebieden geïsoleerd raken. Dit is in lijn met eerdere studies naar het functioneren van het wegennet bij wateroverlast (van Ginkel, Meijer, & Woning, 2023)



Figuur 3.6 Verskil in bereikbaarheid van directe buurcellen met en zonder wateroverlast.



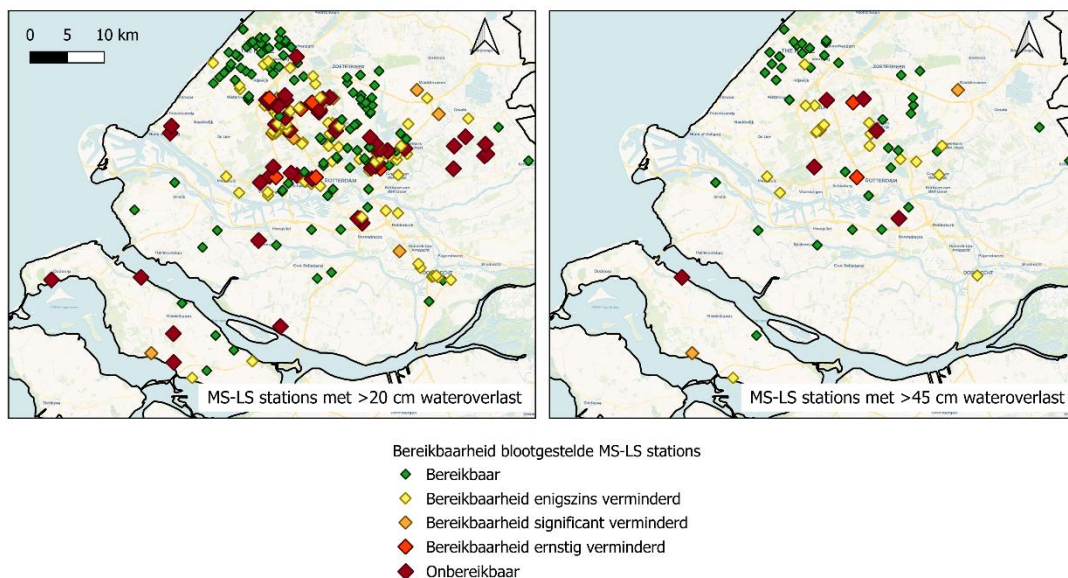
Figuur 3.7 Maximale verstoringsduur per hexagoon van de getroffen wegen in die hexagoon.

3.3 Effecten bereikbaarheid op elektriciteit

Wanneer we de resultaten van toegankelijkheid van gebieden combineren met de gebieden getroffen door stroomuitval, kunnen we onderzoeken hoe de ketenafhankelijkheid van bereikbaarheid het herstel van elektriciteitsstations beïnvloedt. Hierbij geven we antwoord op hoe het verlies van bereikbaarheid de hersteltijd van stroomstoringen beïnvloedt en hoe de gestremde bereikbaarheid zich verhoudt tot de locaties van getroffen elektriciteitsstations.

Van de 71 elektriciteitsstations blootgesteld aan meer dan 45 cm waterdiepte (Figuur 3.8, rechts), zijn 38 stations nog bereikbaar. Deze stations liggen met name in stedelijk of bebouwd gebied. Voor 27 elektriciteitsstations is de bereikbaarheid daarentegen beperkt en 6 locaties zijn helemaal niet meer bereikbaar.

Om zicht te krijgen op onzekerheden in de blootstelling zijn de analyses uitgevoerd voor elektriciteitsstations blootgesteld aan minimaal 20 cm waterdiepte (Figuur 3.8, links).



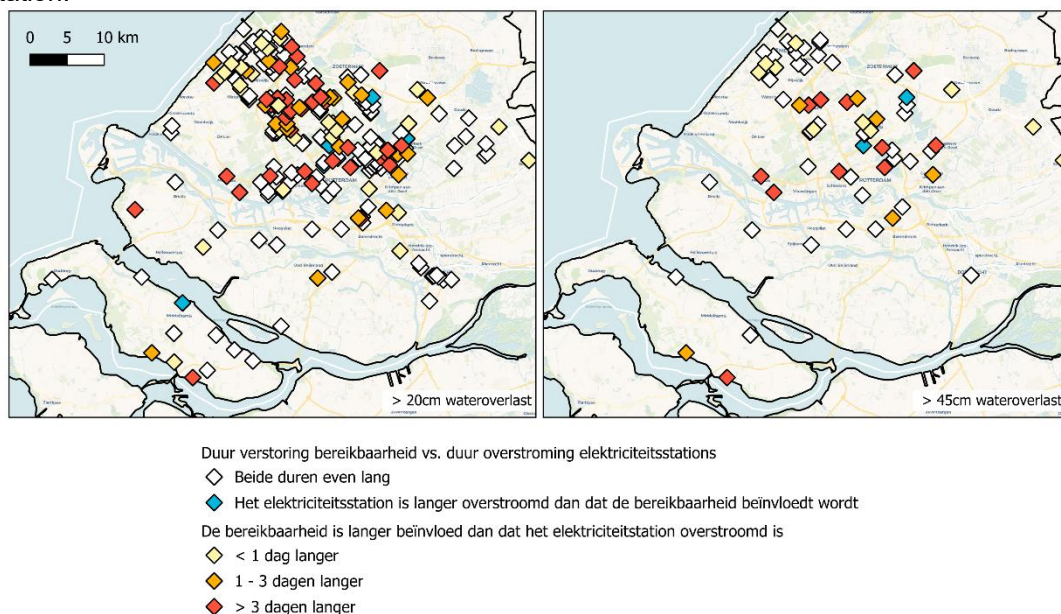
Figuur 3.8 Bereikbaarheid van blootgestelde MS-LS stations voor 20 cm waterdiepte (links) en 45 cm waterdiepte (rechts).

3.3.1

Duur overstrooming elektriciteitsstations in vergelijking tot duur overstrooming wegen

Door de duur van de blootstelling van het elektriciteitsstation te combineren met de maximale duur van een wegverstoring op deze locatie, ontstaat inzicht in welke functie langer beïnvloed wordt door de overstrooming: bereikbaarheid of elektriciteit.

Voor 28 stations blijkt dat de wegen langer ontoegankelijk blijven dan de periode waarin het station zelf overstroomd is, bij een drempelwaarde van 45cm. Dit kan de hersteltijd verlengen, omdat het herstel pas kunnen starten zodra de locatie bereikbaar is. Deze verlenging van hersteltijd kan oplopen tot meerdere dagen, afhankelijk van de locatie van het station.



Figuur 3.9 Duur blootstelling elektriciteitsstations in combinatie met de duur van weg- en bereikbaarheidsverstoring.

3.3.2 Impact per wijk

Tot slot zijn ook de bereikbaarheidsanalyses geaggregeerd naar wijkniveau. Door de inzichten uit de bereikbaarheidsanalyse te combineren met de impactkaarten met persoonsverliesuren (zie Hoofdstuk 3.1.2) kan inzichtelijk worden gemaakt welke wijken waarschijnlijk getroffen zullen worden door zowel stroomuitval als beperkte bereikbaarheid (Figuur 3.10).

Er is overlap tussen de wijken met stroomuitval en het percentage wegen overstroomd per wijk, hoewel er ook wijken zijn waar er wel blootstelling van de wegen gevonden wordt, maar geen elektriciteitsuitval. Daarnaast is te zien dat de wijken waar de persoonsverliesuren van elektriciteit het hoogst zijn, niet hetzelfde zijn als de wijken waar de verstoring op de weg het grootst is.

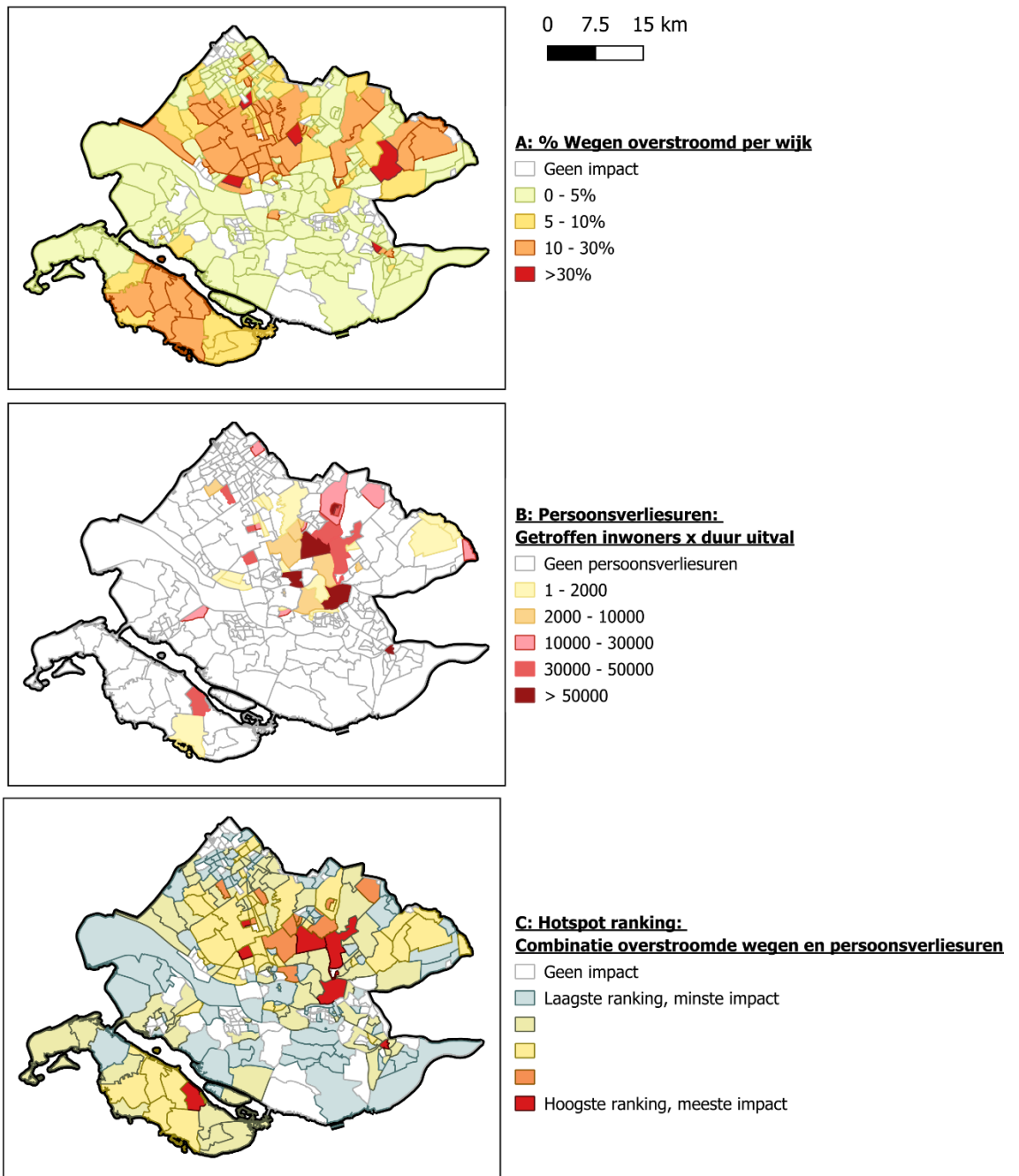
Om deze gecombineerde effecten verder te duiden, is vervolgens een hotspotanalyse uitgevoerd die gebieden identificeert waar zowel veel bewoners worden getroffen als de bereikbaarheid beperkt blijft. Voor alle wijken met blootstelling, zijn beide indicatoren eerst genormaliseerd op een percentielschaal (0–100), waardoor de wijk met de laagste blootstelling een lage score krijgt en de hoogste blootstelling een score van 100. De uiteindelijke hotspotindex is berekend door de twee genormaliseerde indicatoren samen te voegen met gelijke gewing. Het resultaat is een relatieve index (0–100) die zichtbaar maakt welke wijken het meest kwetsbaar zijn voor de gecombineerde effecten van infrastructuurverstoring en de impact op bewoners. Dit biedt beleidsmakers handvatten om prioriteiten te stellen op wijkniveau.

De top 10 wijken die als hoogste uit de hotspotanalyse komen zijn hieronder uitgewerkt in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Top 10 wijken met elektriciteitsuitval en overstroomde wegen gecombineerd.

Wijk	Persoonsverliesuren (afgerond op duizendtallen)	Percentage overstroomde wegen
Wijk 01 Binnenstad	64000	11%
Hillegersberg-Schiebroek	42000	8%
Prins Alexander	48000	11%
Holy Noord	35000	14%
Stad aan 't Haringvliet	32000	17%
Wijk 22 Tanthof-West	32000	14%
IJsselmonde	55000	7%
Wijk 40 Wateringse Veld	39000	8%
Wijk 25 Zuidpolder	12000	20%
Delfshaven	95000	4%

In veel wijken waar het percentage overstroomde wegen het hoogst is, worden geen of vrijwel geen persoonsverliesuren van elektriciteit gevonden, waardoor deze als minder hoog uit de analyse komen. Bijvoorbeeld Wijk 28 Rodenrijs, Wijk 02 Ouderkerk aan den IJssel, Wijk 10, Wijk 03 Noord en Westwijk waarbij het percentage overstroomde wegen allemaal boven de 30% ligt, maar waar weinig tot geen persoonsverliesuren optreden, met uitzondering van Wijk 28 Rodenrijs, die niet in de top 10 valt maar wel hoog scoort in de hotspotanalyse.



Figuur 3.10 Overstroomde wegen en persoonsverliesuren per wijk en gecombineerde hotspot ranking.

4 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste inzichten uit de studie samengevat en gekoppeld aan de onderzoeksvragen uit de inleiding. De centrale vragen waren:

1. Welke gebieden worden getroffen door stroomstoringen, hoelang duren deze, hoeveel mensen wonen daar en hoe kunnen deze uitkomsten worden geëvalueerd?
2. Hoe beïnvloedt het verlies van bereikbaarheid de hersteltijd van stroomstoringen?

De conclusies geven antwoord op deze vragen door de resultaten uit de voorgaande hoofdstukken te integreren. Daarbij wordt ingegaan op de schaalbaarheid van de gebruikte methoden, de geleerde lessen en aanbevelingen voor vervolgonderzoek en toepassing in andere gebieden.

4.1 Schaalbaarheid gebruikte methoden

De analyses tonen aan dat de gehanteerde methodiek breed toepasbaar is. Voor de elektriciteitsimpact is gewerkt met een generieke aanpak: een blootstellingsanalyse op basis van waterdiepte, gecombineerd met een drempelwaarde en servicegebieden van midden-laagspanningsstations. Door deze servicegebieden te koppelen aan bevolkingsdata ontstaat een robuuste eerste inschatting van het aantal getroffen inwoners. Het meenemen van zowel waterdiepte als duur maakt het mogelijk om persoonsverliesuren te berekenen, wat een completer beeld geeft van maatschappelijke gevolgen.

De analyse laat zien dat meerdere combinaties kunnen leiden tot hoge persoonsverliesuren. Enerzijds kan een relatief kleine bevolking toch een hoge impact ervaren wanneer de uitval langdurig aanhoudt. Anderzijds kan een grote bevolking al bij een kortdurende uitval tot hoge persoonsverliesuren leiden. Deze variatie onderstreept dat zowel de duur van de verstoring als de omvang van de getroffen bevolking bepalend zijn voor de uiteindelijke maatschappelijke impact.

Voor bereikbaarheid is een hexagoonbenadering toegepast, waarmee op een uniforme manier inzicht wordt verkregen in lokale connectiviteit en kwetsbare gebieden. Deze methode is eenvoudig te herhalen voor andere scenario's, vitale infrastructuur en regio's, zoals natuurbranden, dijkdoorbraken of grootschalige wegafsluitingen. Het grote voordeel is dat deze aanpak snel laat zien waar knelpunten ontstaan, zonder complexe netwerkmodellen. De resultaten helpen bij het prioriteren van herstelacties, het plannen van noodroutes en het inschatten van cascade-effecten tussen vitale infrastructuur.

Omdat de gebruikte datasets (waterdiepte, duur, bevolkingsdata) landelijk beschikbaar zijn, kan deze methode in principe op nationale schaal worden toegepast. Dit biedt een krachtig instrument voor stresstesten, risicobeoordeling en het prioriteren van herstelmaatregelen.

Daarnaast is de methode voor bereikbaarheid niet alleen relevant voor elektriciteitsnetwerken, maar ook voor andere vitale functies die afhankelijk zijn van fysieke bereikbaarheid, zoals telecommunicatie, waterbeheer en noodhulpdiensten (Meijer, van Marle, & Bles, Klimaatdreigingen en vitale infrastructurele functies gemeente Amsterdam, 2025). Bereikbaarheid vormt in al deze gevallen een cruciale randvoorwaarde voor herstel. Door dezelfde benadering toe te passen, kunnen kwetsbare gebieden worden geïdentificeerd en prioriteiten worden gesteld voor herstelstrategieën en noodplannen.

Door zowel elektriciteitsuitval als beperkingen op het wegennet samen te nemen in de hotspotanalyse ontstaat inzicht in wijken waar deze problemen gelijktijdig optreden. Dit helpt om de uitkomsten te duiden en een inhoudelijke dialoog te voeren over prioritering. Wijken die zowel onbereikbaar zijn als gevoelig voor stroomuitval kunnen mogelijk als eerste geprioriteerd worden.

Aanbeveling: Pas de ontwikkelde methoden toe op andere bovenregionale stresstestgebieden en breid ze uit naar andere vitale infrastructuur. Combineer deze analyses met aanvullende informatie over lokale om de nauwkeurigheid te vergroten

4.1.1 Belangrijkste aannames en beperkingen

Waterbeelden

- Waterkaarten bevatten alleen maximale waterdiepte en duur, geen dynamische tijdreeksen. In deze studie is aangenomen dat de maximale waterdiepte de gehele blootstellingsduur geldt, maar in werkelijkheid zal de maximale waterdiepte niet de gehele duur gelden. Dit zal resulteren in een overschatting van de impact, omdat geen gedetailleerde veranderingen over tijd zijn meegenomen.
- Het duurbeeld van de Noordwestelijke Delta is opgesteld op een grover resolutieniveau dan de maximale waterdieptekaart. Niet op alle plaatsen waarvoor een duur beschikbaar is, is er ook sprake van wateroverlast. Hier is rekening mee gehouden bij de analyses. Desalniettemin kan het leiden tot een misinschatting van de exacte duur op een specifieke locatie. Tegelijkertijd geven deze duurbeelden wel inzicht in de ordegrottes die verwacht worden in bepaalde gebieden.
- Artefacten die in de waterbeelden voorkomen, zijn in deze methode niet afzonderlijk gecorrigeerd. In de waterbeelden kunnen vals-positieve signalen optreden, bijvoorbeeld doordat losse pixels op de weg als water worden weergegeven of doordat bestaande watergangen en rivieren onderdeel uitmaken van het waterbeeld. Hierdoor kunnen wegen die zulke watergangen kruisen in de analyse ten onrechte als overstroomd worden aangemerkt. De gehanteerde drempelwaarde voor wegwitval sluit echter aan bij de aanpak van de bovenregionale stresstest wateroverlast op het hoofdwegennet (Meijer, Gunaratne & Bles, 2026 (concept)). Door deze drempel toe te passen wordt een groot deel van dergelijke artefacten al automatisch uitgesloten.

Elektriciteitsanalyse

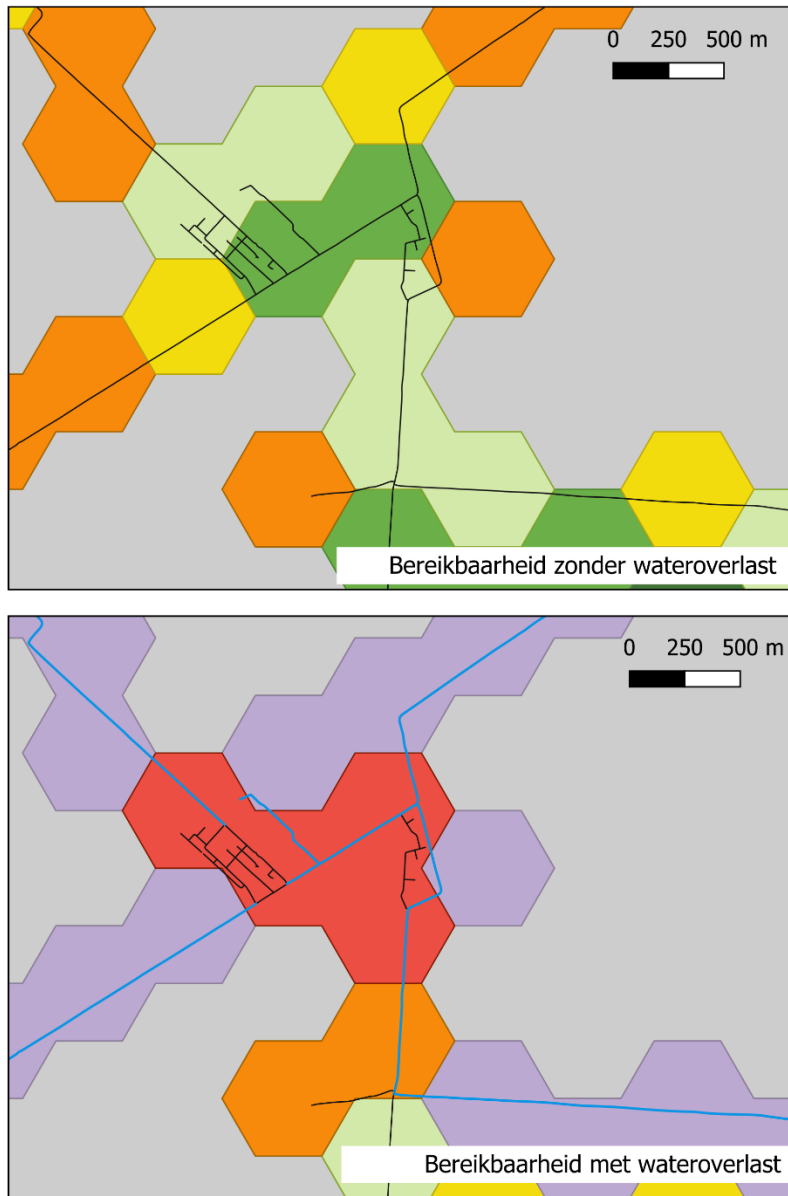
- Voor 28 van de 71 LS/MS stations wat er wel een maximale waterdiepte, maar geen duur gerapporteerd. Voor deze locaties is wel blootstelling, aantal personen getroffen en reparatietijd bepaald, maar geen persoonsverliesuren berekend, omdat niet ingeschat kan worden wat de duur van de uitval is. Dit leidt mogelijk tot een onderschatting van de bepaalde persoonsverliesuren. Bij implementatie wordt geadviseerd om dit te valideren met de ontwikkelaar van de waterbeelden.
- Er is een drempelwaarde van 45 cm voor uitval elektriciteit gehanteerd en voor de combinatie met bereikbaarheid is ook een ondergrens van 20 cm meegenomen. Bij de interpretatie van de resultaten wordt geadviseerd om te kijken naar de hotspots, maar om ook onzekerheid analyses te overwegen. Ter illustratie: een drempelwaarde van 45 cm leidt tot 1 miljoen persoonsverliesuren en bij een drempelwaarde van 20 cm, wordt dit 5x zo hoog.
- Er is geen rekening gehouden met specifieke lokale omstandigheden rondom de LS-MS stations. Het kan zijn dat deze stations verhoogd zijn. De methode is toepasbaar voor algehele trends. Wanneer over wordt gegaan tot maatregelen op specifieke locaties, vraagt dit een lokale validatie.

Bereikbaarheidsanalyse

De hexagoonanalyse is een methode die de bereikbaarheid via het wegennet vertaalt naar een visuele weergave van onderling verbonden gebieden. Figuur 4.1 toont een voorbeeld van de resultaten op meer detailniveau. Daarin is te zien dat gebieden die onder normale omstandigheden meerdere directe buurcellen kunnen bereiken via het wegennet, in de wateroverlastsituatie vrijwel geen verbindingen meer overhouden omdat veel wegen zijn overstroomd. Het voorbeeld laat ook zien dat de analyse per cel inzicht geeft in de lokale situatie, maar dat een gebied toch geïsoleerd kan raken terwijl binnen het gebied zelf nog wel verplaatsing mogelijk is. Dit gebeurt wanneer bijna alle omliggende cellen paars kleuren: binnen het cluster kan nog worden gereisd, maar het cluster is van buitenaf nauwelijks bereikbaar.

De methode kent enkele beperkingen die van belang zijn voor de interpretatie.

- **Alleen directe buurcellen worden beschouwd**
De analyse richt zich uitsluitend op directe buurcellen. Hierdoor wordt vooral zichtbaar hoe cellen elkaar op lokale schaal kunnen bereiken. Dit kan kleinere 'eilandjes' van bereikbaarheid opleveren. Deze eilandvorming is terug te zien in de resultaten, waarbij cellen aan de randen van zulke clusters minder buurcellen bereiken.
- **Routes via andere cellen kunnen leiden tot overschatting**
De berekening start vanuit het middelpunt van elke cel (de centrale node). Deze wordt geprojecteerd op de dichtstbijzijnde beschikbare weg binnen die cel. Vervolgens wordt gekeken of routes beschikbaar zijn naar de middens van de aangrenzende cellen. Daarbij mogen routes ook door andere cellen lopen. Dit kan ertoe leiden dat een cel alle burens kan bereiken, ook wanneer sommige wegen binnen of nabij de cel overstroomd zijn. In werkelijkheid kan dit omrijden extra afstand met zich meebrengen. In een vervolgstudie is het zinvol om deze afstand mee te nemen.
- **Vereenvoudigde weergave van overstroomde infrastructuur**
Bij het modelleren van overstroomde wegen is beperkt rekening gehouden met kenmerken zoals tunnels, verdiept gelegen wegen en verhoogde wegdelen. Dit kan ertoe leiden dat een weg in de analyse als overstroomd verschijnt, terwijl deze in werkelijkheid boven het waterpeil ligt. In de bovenregionale stresstest wateroverlast op het hoofdwegennet kwam bijvoorbeeld naar voren dat rivierlopen zichtbaar bleven in het waterbeeld, waardoor wegen over bruggen soms onterecht als overstroomd werden beschouwd (Meijer, Gunaratne, & Bles, Bovenregionale stresstest wateroverlast op het hoofdwegennet, 2026 (concept)). Ook is er onzekerheid over wegdelen die verdiept liggen en tunnels. Ondanks dat er mogelijk pompcapaciteit aanwezig is in tunnels en verdiepte liggingen is het onzeker of deze pompen het water kunnen afpompen tijdens dergelijke wateroverlast waarbij de omgeving vol water staat (van Ginkel, Meijer, & Woning, 2023). Het opnemen van dergelijke wegkenmerken zou de betrouwbaarheid van de analyse vergroten.
- **Gebruik van hexagonen van 300 × 300 meter**
De analyse werkt met hexagonen van 300 × 300 meter. Dit is geschikt voor inzicht in ruimtelijke patronen, maar geeft minder gedetailleerd inzicht dan met kleinere cellen mogelijk is. Tegelijkertijd zorgt een hoger detailniveau voor een toename in reken capaciteit.
- **Alleen toegankelijkheid naar directe buurcellen**
De analyse kijkt alleen naar de bereikbaarheid van aangrenzende cellen van 300 × 300 meter. Voor robuustere analyses kan worden overwogen om verdere relaties mee te nemen, al vraagt dit meer reken capaciteit.
- **Geen modellering van verkeersdrukke**
De analyse richt zich op de fysieke beschikbaarheid van wegen. Factoren zoals toegenomen verkeersdrukke, files of verkeerschaos zijn niet meegenomen, terwijl deze in de praktijk de bereikbaarheid kunnen beïnvloeden.



- Aantal directe buurcellen bereikbaar
- Er liggen geen wegen in deze cel
 - De cel was eerst bereikbaar, maar is door wateroverlast onbereikbaar
 - 1: Er kan 1 buurcel worden bereikt. De bereikbaarheid is gering.
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
 - 6: Alle aangrenzende cellen zijn bereikbaar; volledige bereikbaarheid
 - Overstroomde wgen

Figuur 4.1 Hexagoon-analyse resultaten in meer detail.

4.2 Andere geleerde lessen en aanbevelingen

De analyse van uitval van vitale functies bij wateroverlast laat zien dat kwetsbaarheden niet alleen ontstaan binnen afzonderlijke netwerken, maar ook door afhankelijkheden van netwerken. Hieronder staan de belangrijkste lessen uit deze studie, inclusief aanbevelingen.

1. Kijk verder dan blootstelling: kwantificeer gevolgen en afhankelijkheden

Alleen bepalen of het elektriciteitsstation wordt blootgesteld aan water geeft geen volledig beeld van de risico's. De ernst van maatschappelijke gevolgen wordt bepaald door een combinatie van factoren: de mate van blootstelling, de duur van de overlast, lokale omstandigheden en de interactie met cascade-effecten. Juist door over gevolgen na te denken, wordt het mogelijk om impact beter in te schatten en te vergelijken. Dit roept belangrijke vragen op, zoals: wanneer zijn gevolgen acceptabel en wanneer niet? Blootstelling alleen kan deze vraag niet beantwoorden, zeker niet als niet duidelijk is wat de gevolgen van blootstelling zijn. Het kwantificeren van gevolgen en het meenemen van cascades, is daarom cruciaal om inschattingen te maken over in hoeverre een risico acceptabel is.

Aanbeveling: Neem in stresstesten en klimaatrisico-analyses de stap op waarin gevolgen worden gekwantificeerd. Stel daarnaast duidelijke indicatoren op waarmee overheden kunnen bepalen wanneer een situatie onacceptabel is en hoe prioriteiten moeten worden gesteld. Dit maakt het mogelijk om adaptatiemaatregelen goed af te wegen, maar ook om keuzes te maken in crisissituaties en in de voorbereiding daarop.

2. Bereikbaarheid is een randvoorwaarde voor herstel maar is ook een uitdaging tijdens een crisis

Bereikbaarheid bepaalt in hoge mate hoe snel inspecties en reparaties kunnen plaatsvinden. Tijdens grootschalige wateroverlast is dit echter een uitdaging: wegen kunnen langdurig onbegaanbaar zijn door wateroverlast, waardoor bijvoorbeeld herstelteams niet op locatie komen. Dit vergroot niet alleen de duur van uitval, maar ook de maatschappelijke impact. Zelfs wanneer vitale assets niet langer overstroomd zijn, kan beperkte bereikbaarheid van wegen het herstel vertragen.

De ontwikkelde methode in deze studie kan voor elk type verstoring en voor andere gebieden worden toegepast.

Aanbeveling: Pas de ontwikkelde bereikbaarheidsmethode toe in andere gebieden. Daarbij wordt ook aanbevolen om de bereikbaarheidsanalyse te gebruiken om de bereikbaarheid van andere interessante locaties te stresstesten, zoals bijvoorbeeld ziekenhuizen, brandweerkazernes of supermarkten. Aanbevolen wordt om deze bereikbaarheidsaanpak en de inzichten die hieruit ontstaan expliciet onderdeel te maken van risicoanalyses, noodplannen en risicodialogen. Daarnaast is het belangrijk om vooraf inzicht te hebben in kwetsbare gebieden door stresstesten en bereikbaarheidsanalyses, zodat prioriteiten tijdig kunnen worden gesteld.

3. Denk en handel vanuit het systeem

Vitale infrastructuur werkt nooit los van elkaar. Elektriciteit, wegen, drinkwater, telecom, etc. vormen een samenhangend geheel. Storingen in een netwerk, zoals in elektriciteit, kunnen direct gevolgen hebben voor andere netwerken, zoals telecommunicatie. . In deze studie zijn slechts twee netwerken bestudeerd: elektriciteit en bereikbaarheid van locaties via het wegennet, waarin met name de gevolgen van gestremde bereikbaarheid centraal stonden. In werkelijkheid is de verwevenheid van infrastructurele functies nog veel complexer.

Zoals deze studie laat zien, staan netwerken niet op zichzelf, maar kunnen verstoringen in het ene netwerk leiden tot problemen, uitdagingen of vertraagd herstel in andere netwerken. Dat wordt in dit rapport duidelijk doordat verstoring van het wegennet kan leiden tot moeilijkheden bij het herstel van de elektriciteitsvoorziening. Bij grote klimaatdreigingen, die vaak op meerdere plekken tegelijk optreden, kunnen dit soort afhankelijkheden elkaar versterken. Hierdoor ontstaan combinaties van problemen die niet zichtbaar worden als netwerken afzonderlijk worden beoordeeld. Dit kan leiden tot vertraging in herstelwerkzaamheden, langere uitval voor bewoners of cascade-effecten in andere delen van het systeem.

Het is daarom belangrijk om niet alleen naar individuele netwerken te kijken, maar naar het geheel waarin zij opereren. Alleen wanneer duidelijk is hoe netwerken elkaar beïnvloeden, kan beter worden bepaald welke gebieden of functies als eerste ondersteuning nodig hebben.

Aanbeveling: Verken adaptatiemogelijkheden op systeemniveau. Stimuleer bijvoorbeeld samenwerking tussen netbeheerders, waterbeheerders en wegbeheerders om adaptieve herstelstrategieën te ontwerpen die gericht zijn op veerkracht in het gehele systeem. Besteed in risicodialogen en crisisplannen expliciet aandacht aan afhankelijkheden en mogelijke cascade-effecten, zodat keuzes niet alleen vanuit één netwerk worden gemaakt maar afgestemd zijn op het functioneren van het totale systeem.

4. Neem sociale kwetsbaarheid mee

De huidige analyse richt zich op het aantal getroffen personen door elektriciteitsuitval en de ketenafhankelijkheid met bereikbaarheid. Hierbij is geen rekening gehouden met kenmerken van de personen, zoals leeftijd, zorgbehoefte, opleidingsniveau en inkomen, die ook bepalen hoe kwetsbaar mensen zijn voor de gevolgen van extreme neerslag.

Aanbeveling: Verrijk vervolgstudies met sociale kwetsbaarheidsindicatoren om prioritering van herstelwerkzaamheden beter af te stemmen op maatschappelijke impact.

5 Referenties

- CBS. (2024). *Kaart van 100 meter bij 100 meter met statistieken*. Opgehaald van <https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/nederland-regionaal/geografische-data/kaart-van-100-meter-bij-100-meter-met-statistieken>
- FEMA. (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS®MH MR4 Technical Manual*.
http://www.civil.ist.utl.pt/~mlopes/conteudos/DamageStates/hazus_mr4_earthquake_tech_manual.pdf.
- Juch, S., Meijer, L., Bles, T., van Marle, M., & Noijons, B. (2025). *Handreiking klimaatbestendige vitale infrastructuur*. Delft: Deltares.
- Meijer, L., Gunaratne, C., & Bles, T. (2026 (concept)). *Bovenregionale stresstest wateroverlast op het hoofdwegennet*. Deltares (rapportnummer: 11211513-003-GEO-0001).
- Meijer, L., van Marle, M., & Bles, T. (2024). *Kennisoverzicht wateroverlast in relatie tot vitale functies*. Deltares (rapportnr: 11209224-002-ZWS-0001).
- Meijer, L., van Marle, M., & Bles, T. (2025). *Klimaatdreigingen en vitale infrastructurele functies gemeente Amsterdam*. Deltares (rapportnr: 11210680-002-GEO-0001).
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2025). *Aanpak gevolgenbeeld vitaal. Procesleidraad voor het uitwerken van een onderdeel van bovenregionale stresstesten wateroverlast*.
- Movahednia, M., Kargarian, A., Ozdemir, C., & Hagen, S. (2022). *Power Grid Resilience Enhancement via Protecting Electrical Substations Against Flood Hazards: A Stochastic Framework*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(3), 2132-2143.
- NKWK Klimaatbestendige Stad. (2024). *Werkpakket Wateroverlast en overstroming 2023-2024. Methodiek voor een kwantitatieve risicodialoog en het opstellen van een bibliotheek met*. Nationaal Kennis en innovatieprogramma Water en Klimaat.
- Overbetuwe Bestuurlijke Informatie. (n.d.). *Informatiememo: gevolgen netcongestie Overbetuwe, notitie Liander 'netcongestie en elektriciteitsvoorzieningen'*.
- Pregolato, M. F. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation research part D: transport and environment*, 55: 67-81.
- Sánchez-Muñoz, D., Domínguez-García, J. L., Martínez-Gomariz, E., Russo, B., Stevens, J., & Pardo, M. (2020). Electrical Grid Risk Assessment Against Flooding in Barcelona and Bristol Cities. *Sustainability*, 12(4), 1527.
- van Ginkel, K., Meijer, L., & Woning, M. (2023). *Grootschalig Neerslag Event provincie Zuid-Holland. Effecten op bereikbaarheid op het Hoofdwegennet en onderliggend netwerk*. 11208077-006. . Delft: Deltares.

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