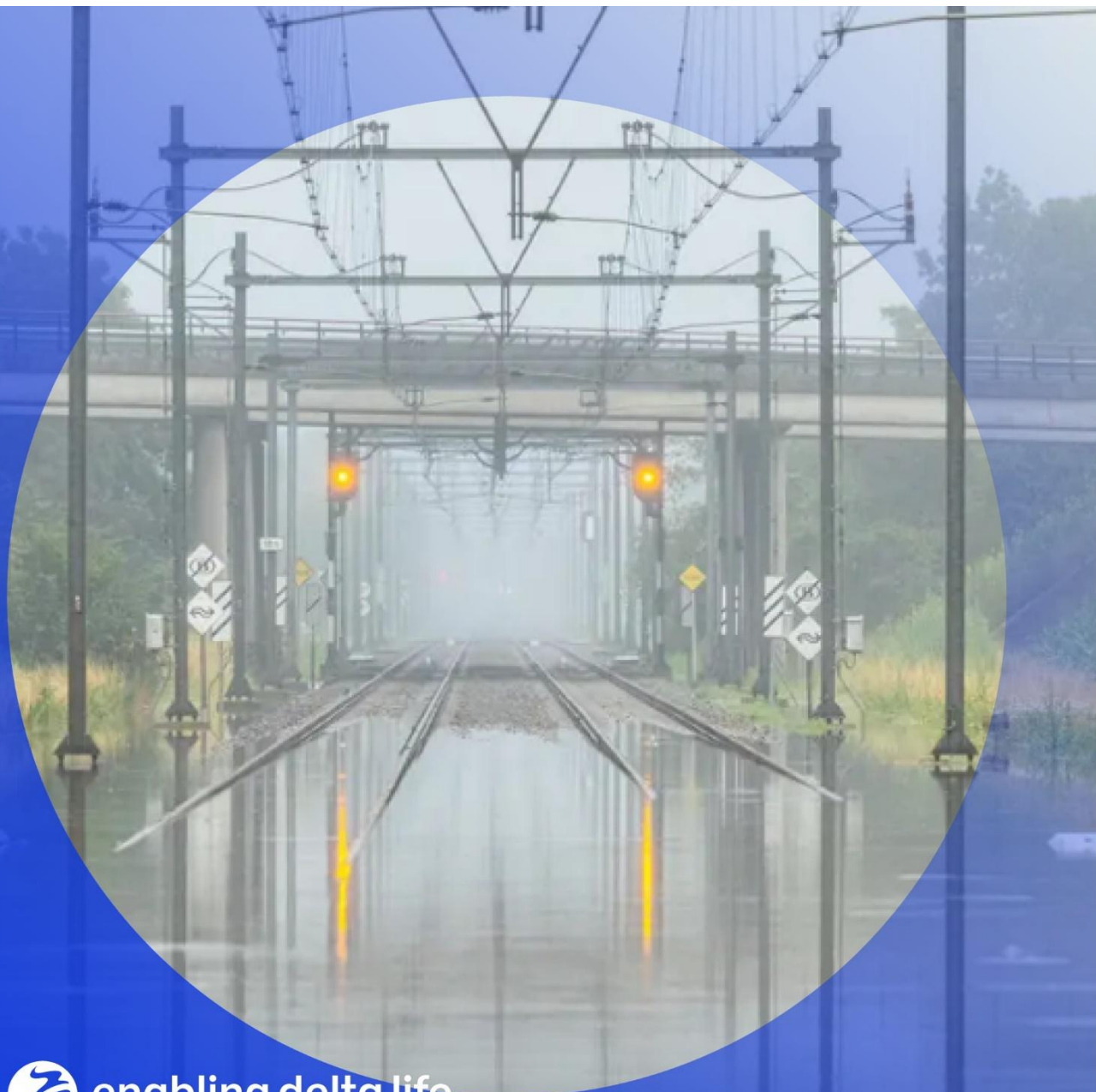


## Wateroverlast en kritieke infrastructuur: van blootstelling naar maatschappelijke impact

Aanpak voor het bepalen van maatschappelijke impact van wateroverlast,  
toegepast op het spoor



## **Wateroverlast en kritieke infrastructuur: van blootstelling naar maatschappelijke impact**

Aanpak voor het bepalen van maatschappelijke impact van wateroverlast, toegepast op het spoor

### **Auteur(s)**

Sanne Juch

Lieke Meijer

Thomas Bles

Afbeelding voorblad © ProRail

## Wateroverlast en kritieke infrastructuur: van blootstelling naar maatschappelijke impact

Aanpak voor het bepalen van maatschappelijke impact van wateroverlast, toegepast op het spoor

<b>Opdrachtgever</b>	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
<b>Contactpersoon</b>	Jasper Luiten
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Wateroverlast, kritieke infrastructuur, maatschappelijke impact, transport, spoor

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	12-03-2025
<b>Projectnummer</b>	11209224-002
<b>Document ID</b>	11209224-002-ZWS-0003
<b>Pagina's</b>	60
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

### Auteur(s)

	Sanne Juch Lieke Meijer Thomas Bles	
	<i>Dit rapport is opgesteld mede op basis van informatie aangeleverd door deskundigen werkzaam bij ProRail. Wij bedanken ProRail voor de bijdragen en deelname aan expert-werksessies. De aanpak en bevindingen zijn door ProRail voorafgaand aan de publicatie voorgelegd en akkoord bevonden (28 februari 2025).</i>	

# Samenvatting

Naar aanleiding van het hoogwater in Limburg in 2021 zijn er verschillende beleidsaanbevelingen gedaan om de impact van extreme weersomstandigheden te beperken. Een van de belangrijkste aanbevelingen (aanbeveling 12) is gericht op het opstellen van gevolgbeperkende normering voor vitale en kwetsbare infrastructurele functies.

Om een normering voor gevolgbeperking tegen schade of uitval van belangrijke infrastructurele functies te bepalen, is het essentieel om te begrijpen hoe deze objecten functioneren binnen hun netwerk. Zonder dit inzicht is het onmogelijk om effectieve normen te stellen. Dit kennisgat werd duidelijk in het Discussiestuk "Normering Gevolgen voor Vitale en Kwetsbare Functies" (Deltares, 2024). Uit dit onderzoek blijkt ook dat het vaststellen van normen voor vitale en kwetsbare functies complex is vanwege de verschillende eindgebruikers en de afhankelijkheden tussen deze functies (Deltares, 2024). Bovendien is er onduidelijkheid over de gevolgen van de uitval van een object op gebiedsniveau, een cruciale vraag om te beantwoorden om te begrijpen hoe normstellingen invloed kunnen hebben op infrastructurele netwerken.

In deze rapportage staat de volgende hoofdvraag centraal: "Hoe leidt de uitval van een infrastructureel object tot het falen van een functie en welke impact heeft dit op een gebied?" Het doel van deze studie is om te begrijpen en te kwantificeren hoe het falen van een infrastructureel object door wateroverlast zich kan vertalen in maatschappelijke impact. Dit draagt bij aan een beter inzicht in de gevolgen van het uitvallen van vitale infrastructurele functies voor onze maatschappij. De directe schade aan de infrastructuur valt buiten de scope van deze studie.

Om gedegen antwoord te geven op de hoofdvraag, volgen we een risico-gestuurde aanpak die het mogelijk maakt om van blootstellingsinformatie (exposure) toe te werken naar een inschatting van maatschappelijke impact. Deze methode passen we toe op een complexe situatie met een sterke verwevenheid van vele objecten. De aanpak bestaat uit vijf hoofdcomponenten:

1. **Opstellen van impactpaden:** Het opstellen van impactpaden om de belangrijkste faaloorzaken kwalitatief in beeld te krijgen.
2. **Dataverzameling:** Het verzamelen van gedetailleerde informatie over vitale infrastructuur, waterbeelden en gebruikersdata.
3. **Blootstellings- en uitvalanalyse:** Het analyseren van hoe wateroverlast kritieke infrastructuurobjecten beïnvloedt en leidt tot functieverlies.
4. **Gevolgbeperking:** Het kwantificeren van de maatschappelijke impact van uitval door middel van impactpaden, formules voor functiehersteltijd en economische schade.
5. **Ketenafhankelijkheden:** Het meenemen van cascade-effecten door middel van verhaallijnen.

De ontwikkelde impactanalyse-aanpak maakt het mogelijk om, ondanks de complexe samenhang van infrastructuurcomponenten, een inschatting te maken van de maatschappelijke impact van het uitvallen van een vitale functie. De uitkomsten bieden inzicht in de componenten die infrastructuur gevoelig maken voor wateroverlast en de factoren die maatschappelijke impact of hinder veroorzaken. Het toepassen van deze aanpak helpt zowel beheerders als beleidsmakers om beter voorbereid te zijn op toekomstig extreem weer. Met deze aanpak kunnen kwantitatieve inschattingen worden gemaakt, maar wanneer dit niet mogelijk is, kan het opstellen van kwalitatieve impactpaden ook veel inzicht geven in de onderlinge samenhang van objecten in het netwerk en mogelijke knelpunten.

Het opstellen van verhaallijnen en impactpaden is een waardevolle methodiek voor het inschatten van cascade-effecten. Door middel van kwantitatieve formules voor gevolgbeoordeling is het mogelijk om kwantitatief in te schatten wat de maatschappelijke gevolgen zijn van het uitvallen van een vitale functie.

In dit rapport passen we bovenstaande methode toe op de vitale functie 'spoor'. De methode is getoetst voor een casus rondom het spoorwegennet, waarbij de wateroverlast die op 29 juni 2021 plaatsvond rondom Bunde en Eygelshoven in Limburg als uitgangspunt dient. Daarbij worden afhankelijkheden van andere vitale functies elektriciteit, telecom en het wegennet ook meegenomen in de analyse. Toepassing van deze methodiek op de casus Bunde laat zien dat wateroverlast significant kan bijdragen aan de uitval van spoorobjecten, wat leidt tot substantiële maatschappelijke impact. Voor de wateroverlast bij Bunde, een event van ongeveer 30 uur, resulteerde dit in ongeveer 34.000 getroffen reizigers en een maatschappelijke schade van tussen de 140.000 en 290.000 euro. Elke tien minuten extra omreistijd leidt daarbij tot een toename van ongeveer 57.700 euro schade.

Op basis van onze bevindingen bevelen we aan om de voorgestelde methode toe te passen op andere vitale infrastructurele functies en deze te valideren door historische gebeurtenissen door te rekenen. In vervolgonderzoeken is het belangrijk om te identificeren waar de belangrijkste 'drivers' van maatschappelijke impact liggen. Met andere woorden: welke componenten zijn bepalend voor de maatschappelijke impact bij het uitvallen van een functie? Voor een goede inschatting van maatschappelijke gevolgen adviseren we om representatieve data van de belangrijkste assets, gebruikersdata en hazard data te verzamelen, maar detailanalyses alleen toe te passen wanneer noodzakelijk. Daarnaast bevelen we aan om verschillende schaalniveaus te betrekken bij de implementatie, van objectniveau tot systeemniveau, zodat de aanpak breed gedragen wordt en de benodigde kennis van de verschillende onderdelen van het systeem kan worden benut.

*Dit rapport is opgesteld mede op basis van informatie aangeleverd door deskundigen werkzaam bij ProRail. Wij bedanken ProRail voor de bijdragen en deelname aan expert-werksessies. De aanpak en bevindingen zijn door ProRail voorafgaand aan de publicatie voorgelegd en akkoord bevonden (28 februari 2025).*

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>	
<b>1</b>	<b>Achtergrond en introductie</b>	<b>8</b>
1.1	Aanleiding	8
1.2	Hoofdvraag en doel	8
1.3	Casus Bunde	10
<b>2</b>	<b>Aanpak bepalen maatschappelijke gevolgen</b>	<b>11</b>
2.1	Opstellen impactpaden	12
2.2	Dataverzameling	12
2.3	Blootstellings- en uitvalanalyse	13
2.4	Gevolgbepaling	13
2.4.1	Stap 1 gevolgbepaling: Bepalen van functieherstelduur	14
2.4.2	Stap 2 gevolgbepaling: Bepalen persoonsverliesuren	16
2.4.3	Stap 3 gevolgbepaling: Bepalen maatschappelijke verliezen in euro's	17
2.5	Ketenafhankelijkheid	18
<b>3</b>	<b>Begrip van falen middels impactpaden</b>	<b>19</b>
3.1	Impactpad voor het spoor	19
3.1.1	Meenemen van ketenafhankelijkheden	19
<b>4</b>	<b>Dataverzameling</b>	<b>21</b>
4.1	Dreiging: waterbeelden	22
4.2	Blootstelling: spoordata	23
4.3	Gevoeligheid: kritieke uitvalwaardes spoorobjecten	26
4.4	Gevolgen: reparatietijden	27
4.5	Ketenafhankelijkheden: elektriciteit-, telecom- en wegennet data	28
<b>5</b>	<b>Blootstelling en uitval van objecten</b>	<b>30</b>
5.1	Uitval spoorobjecten	30
5.2	Uitval van het elektriciteit- en wegennet	33
<b>6</b>	<b>Gevolgbepaling: naar maatschappelijke impact</b>	<b>37</b>
6.1	Uitwerking berekening maatschappelijke impact op de casus	37
6.1.1	Bepalen van functieherstelduur	37
6.1.2	Bepalen van persoonsverliesuren en monetaire schade	39
6.1.3	Goederentreinen en overige treinen	40
<b>7</b>	<b>Ketenafhankelijkheid</b>	<b>42</b>
7.1	Verhaallijn 1: Langdurige Stroomuitval en Wateroverlast	42

7.2	Verhaallijn 2: Uitval van Wegennet en Bereikbaarheid	43
7.3	Verhaallijn 3: Beperkte Beschikbaarheid van Omreisroutes	44
<b>8</b>	<b>Conclusie</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Lessen en aanbevelingen</b>	<b>47</b>
9.1	Impactpaden	47
9.2	Dataverzameling	47
9.3	Uitvalanalyse	48
9.4	Impactanalyse	48
9.5	Randvoorwaarden	49
9.6	Gebruik van de methode	49
<b>10</b>	<b>Bronnen</b>	<b>50</b>
10.1	Expert-werksessies	51

# 1 Achtergrond en introductie

## 1.1 Aanleiding

Om de impact van extreme weersomstandigheden, zoals zware regenval te beperken, is naar aanleiding van het hoogwater van Limburg 2021 een aantal beleidsaanbevelingen gedaan. Aanleiding voor deze aanbevelingen is de noodzaak om beter voorbereid te zijn op klimaatverandering en de toenemende frequentie en intensiteit van extreme weersomstandigheden, zoals de wateroverlast in Limburg in 2021.

Dit project wordt uitgevoerd in het kader van de aanbevelingen van de Beleidstafel Hoogwater en Wateroverlast, specifiek aanbevelingen 12 & 13:

1. **Aanbeveling 12:** "Zet in op een normering gevolgbepijking tegen schade of uitval van belangrijke functies (zoals vitaal en kwetsbaar) in een gebied en leg rollen en verantwoordelijkheden vast."
2. **Aanbeveling 13:** "Maak extreme neerslag een risico in de risicomanagement-systemen voor vitale processen en versterk de bijbehorende coördinatie."

Aanbeveling 12 en 13 richten zich specifiek op vitale en kwetsbare infrastructurele functies: de functies die maatschappelijk ontwrichtende gevolgen kunnen hebben wanneer zij uitvallen. Onder deze functies vallen bijvoorbeeld drinkwater, elektriciteit en telecom, maar ook het spoor- en wegennetwerk.

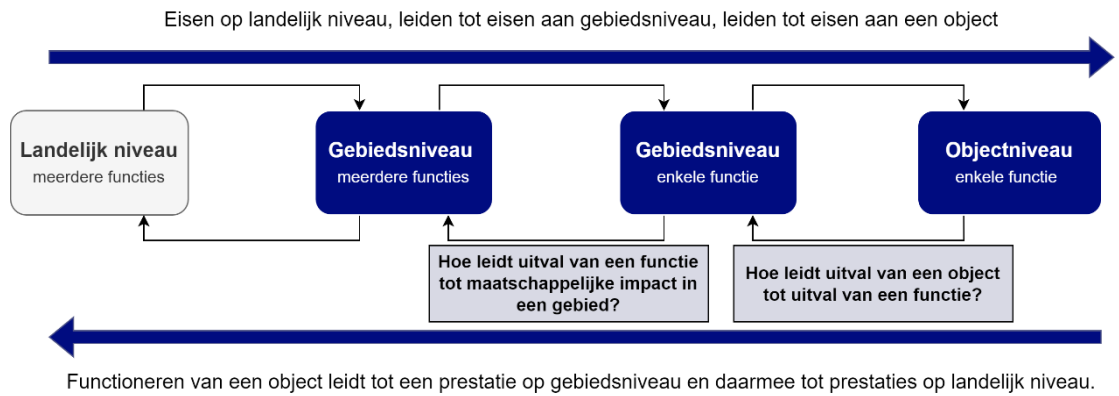
## 1.2 Hoofdvraag en doel

Om een normering voor gevolgbepijking tegen schade of uitval van belangrijke infrastructurele functies te bepalen, is het essentieel om te begrijpen hoe deze objecten functioneren binnen het netwerk. Zonder dit inzicht is het onmogelijk om effectieve normen te stellen. Dit kennisgat werd duidelijk in het Discussiestuk "Normering Gevolgen voor Vitale en Kwetsbare Functies" (Deltares, 2024). Uit dat onderzoek blijkt ook dat het vaststellen van normen voor vitale en kwetsbare functies complex is vanwege de verschillende eindgebruikers en de afhankelijkheden tussen deze functies (Deltares, 2024). Bovendien is er onduidelijkheid over de gevolgen van de uitval van een object op gebiedsniveau, een cruciale vraag om te beantwoorden om te begrijpen hoe normstellingen invloed kunnen hebben op infrastructurele netwerken.

Daarom richten we ons in de huidige studie op de volgende hoofdvraag:

**"Hoe veroorzaakt de uitval van een infrastructureel object de uitval van een functie en welke impact heeft dit op een gebied?"**

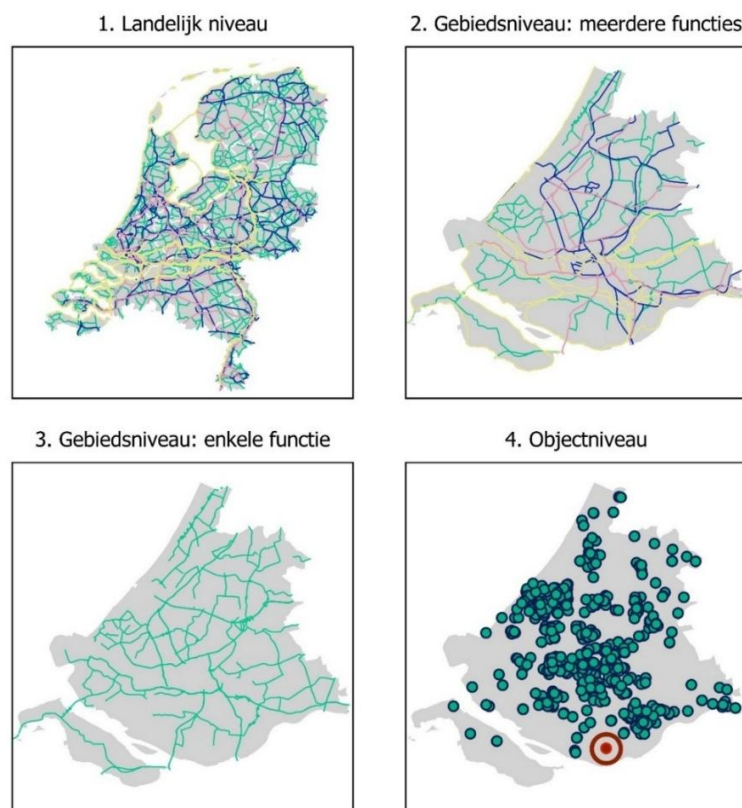
Deze studie heeft dan ook als doel het begrijpen en kwantificeren van de manier waarop het falen van een infrastructureel object door wateroverlast zich kan vertalen in maatschappelijke impact. Dit draagt bij aan een beter begrip van de impact van de uitval van vitale infrastructurele functies op onze maatschappij, zoals geschematiseerd in Figuur 1.1. In deze analyse wordt de directe schade aan de infrastructuur buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1.1 Schematisering van hoe uitval van een infrastructureel object kan doorwerken tot impact in een gebied. Aangepast van Deltares, 2024.

Hierbij wordt voortgebouwd op de vier verschillende schaalniveaus van infrastructurele functies die gevisualiseerd zijn in Figuur 1.2 (Deltares, 2024):

1. Landelijk niveau: waarbinnen meerdere infrastructurele functies van toepassing zijn.
2. Gebiedsniveau: waarbinnen meerdere infrastructurele functies van toepassing zijn.
3. Gebiedsniveau: enkele functie (dit gebied kan in sommige gevallen ook landelijk zijn, bijvoorbeeld het hoofdwegennet).
4. Objectniveau: de objecten behorende bij 1 functie (bijvoorbeeld elektriciteitskasten in een elektriciteitsnetwerk).



Figuur 1.2 Onderscheid tussen landelijk niveau, gebiedsniveau: meerdere functies, gebiedsniveau: enkele functie en objectniveau (Deltares, 2024).

Om de bovenstaande hoofdvraag te beantwoorden is gekozen om een case studie te doen van de vitale functie transport: specifiek het spoor.

Deze aanbieder is gekozen omdat het een (publieke) aanbieder is waarbij concrete voorbeelden zijn waarbij wateroverlast heeft geleid tot uitval van de vitale functie. Daarnaast is het spoor een functie waarbij meerdere functies verweven zijn (zoals wegtransport en de energievoorziening), wat leidt tot complexiteit door onderlinge afhankelijkheden van andere vitale functies. De analyse in dit rapport is uitgevoerd in samenspraak met experts van ProRail.

Om deze analyse goed te begrijpen, is het belangrijk om enige basiskennis te hebben over de functie van het spoor en de rol van ProRail en de verschillende indicatoren die worden gebruikt om de impact van wateroverlast op het spoor te bepalen. Daarom is in Bijlage A 'Theoretische Basis' meer detail uitgewerkt.

### 1.3 Casus Bunde

De casus die de leidraad vormt voor dit rapport, is de wateroverlast die op 29 juni 2021 plaatsvond op verschillende plaatsen in Limburg<sup>1</sup>. In Zuid-Limburg viel op die dag vooral veel neerslag in Eygelshoven (het oostelijke puntje tegen de Duitse grens) en in Bunde (ten noorden van Maastricht) (Deltares, 2022). Gemiddeld viel er in Eygelshoven ongeveer 100 mm in 24 uur, waarvan verreweg het grootste deel in twee uur tijd in de avond viel: maximaal 90mm. Deze bui heeft een geschatte herhalingsperiode van circa 350 jaar. Het KNMI geeft aan dat de kans op dit soort buien door klimaatverandering sterk toe kan nemen. Voor 2050 zou de herhalingsperiode daardoor kunnen toenemen naar 1:175 jaar (Deltares, 2022).

Als gevolg van deze extreme bui stonden op verschillende plekken in Limburg straten blank en ook het spoor bij Bunde stond onder water, waardoor er geen treinverkeer mogelijk was (Figuur 1.3). Het herstel van de functie spoor bij Bunde duurde ruim een dag (ProRail, 2021). De functie spoor verwijst in hierbij naar het vermogen van het spoorwegsysteem om zijn normale operationele taken uit te voeren, zoals het veilig en efficiënt vervoeren van passagiers en goederen.

In dit rapport gebruiken we de situatie op het spoor bij Bunde als leidraad en ter validatie van verkregen inzichten. Deze casus is een illustratief voorbeeld van hoe wateroverlast kan leiden tot maatschappelijke hinder.



*Figuur 1.3 Ondergelopen spoorwegovergang bij Bunde, tijdens de wateroverlast van 29 juni 2021. Bron: <https://nos.nl/artikel/2387253-straten-en-spoor-in-zuid-limburg-blank-door-zware-regenval>.*

---

<sup>1</sup> Let op: dit is niet het hoogwater van juli 2021

## 2 Aanpak bepalen maatschappelijke gevolgen

In deze voorliggende analyse werken we de impact van wateroverlast voor de maatschappij uit met verschillende stappen, zoals geïllustreerd in Figuur 2.1.

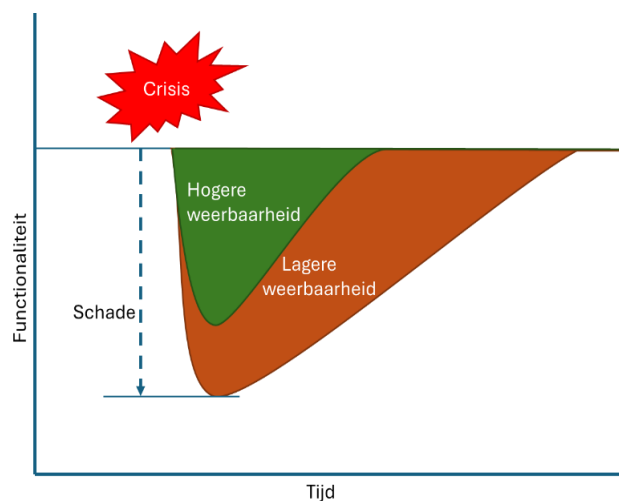


Figuur 2.1 Stappen voor de analyse.

Deze stappen zijn gestoeld op een risico-gestuurde aanpak (Figuur 2.2). In de literatuur wordt voor dergelijke studies vaak gewerkt met het concept 'resilience', wat kan worden gevisualiseerd in een zogenaamde 'resilience triangle' (Figuur 2.3).



Figuur 2.2 Risico conform definitie van UNISDR als een combinatie van hazard (bedreiging), exposure (blootstelling) en vulnerability (gevoeligheid/schade)



Figuur 2.3 De resilience triangle, waarbij resilience vertaald wordt naar 'weerbaarheid' of 'klimaatbestendigheid'. De weerbaarheid is hoger als een object of functie minder schade oploopt en/of als de verstoring die daardoor ontstaat korter duurt.

Deze definities komen als volgt terug in de stappen die weergegeven zijn in Figuur 2.1.

1. **Identificeren van faalpaden:** Eerst worden mogelijke faalpaden opgesteld waarin wateroverlast kan leiden tot uitval van vitale functies. Deze paden helpen bepalen welke objecten gevoelig en kwetsbaar zijn voor wateroverlast.
2. **Blootstelling van spoorobjecten:** Vervolgens wordt voor elk individueel spoorobject vastgesteld hoe hoog het water kan komen bij wateroverlast. Dit geeft inzicht in de mate van blootstelling van elk object.
3. **Analyse van mogelijke uitval:** Daarna wordt geanalyseerd welke spoorobjecten kunnen uitvallen door de dreiging van wateroverlast. Door kritieke uitvalhoogtes te

gebruiken, wordt de kwetsbaarheid van elk object bepaald en wordt duidelijk of en hoeveel schade er aan de spoorfunctie ontstaat.

4. **Kwantificeren van gevolgen/maatschappelijke impact:** Vervolgens wordt de maatschappelijke impact van de uitval gekwantificeerd. Dit vereist inzicht in hoe lang de vitale objecten en de spoorfunctie uitvallen. De duur van de uitval bepaalt de impact op de maatschappij.
5. **Uitbreiden van de analyse met ketenafhankelijkheden:** Ten slotte wordt de analyse uitgebreid door de afhankelijkheid van andere vitale functies te onderzoeken. Voor deze functies wordt ook vastgesteld of ze blootgesteld en kwetsbaar zijn, en hoelang hun uitval zal duren.

## 2.1 Opstellen impactpaden

De eerste stap in het analyseren van de maatschappelijke impact van het uitvallen van een vitale functie, zoals personenvervoer via het spoor, is het opstellen van impactpaden. Deze paden bieden inzicht in hoe klimaatdreigingen een systeem beïnvloeden en welke gevolgen dit heeft voor gebruikers. In een impactpad worden de belangrijkste objecten en de gevolgen van hun uitval opgenomen. Impactpaden beschrijven de meest voorkomende manieren waarop wateroverlast kan leiden tot het uitvallen van een vitale functie, inclusief tussenstappen. Ze vormen de basis voor gerichte dataverzameling voor verdere analyse. Bovendien bieden impactpaden mogelijkheden om ketenafhankelijkheden en cascade-effecten te identificeren.

## 2.2 Dataverzameling

De tweede stap richting maatschappelijke impact is het verzamelen van benodigde informatie en data. Dit gebeurt op een aantal niveaus:

### 1. Dreigingsdata

Omdat wateroverlast centraal staat in deze analyse, is het vertrekpunt een waterbeeld. In deze analyse zijn twee verschillende waterbeelden gehanteerd die verder worden toegelicht in het datahoofdstuk.

### 2. Objectdata

Als tweede stap moeten relevante objecten ruimtelijk in beeld worden gebracht. De relevante objecten in deze casus zijn geïdentificeerd middels de impactpaden en zijn vervolgens geïdentificeerd met inhoudelijke experts en datasets van ProRail.

### 3. Gevoeligheidsdata

Wanneer de belangrijkste objecten geïdentificeerd zijn, worden kritieke uitvalwaarden bepaald: dat zijn waterdieptes waarbij de geselecteerde objecten uitvallen als gevolg van wateroverlast. Bijvoorbeeld: als er dertig centimeter water in een stroomkast staat, valt deze uit. De kritieke waterdieptes zijn in deze studie bepaald op basis van de expert-inschattingen van ProRail.

### 4. Data voor het bepalen van maatschappelijke impact

Om maatschappelijke impact te kunnen bepalen is allerlei kennis nodig. Met name het verzamelen van reparatietijden is een data-intensieve klus. Dit wordt verder uitgewerkt in het datahoofdstuk en toegepast in de gevolgbepaling (Hoofdstuk 6).

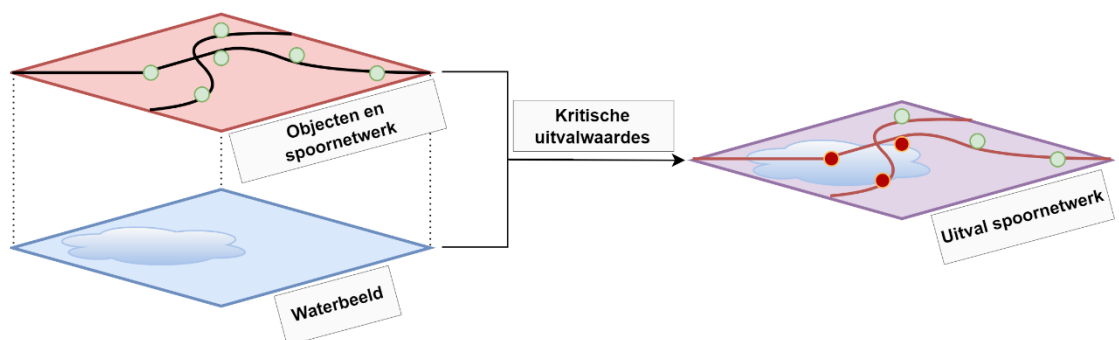
### 5. Data over ketenafhankelijkheid

Uit de impactpaden wordt ook duidelijk van welke andere vitale functies een aanbieder afhankelijk is. In deze analyse nemen we om die reden ook elektriciteit, telecom en het wegennet mee en verzamelen we data voor deze drie netwerken.

De spoorweg is namelijk afhankelijk van elektriciteit en telecom om te kunnen functioneren. Wanneer het spoor uitvalt, zal worden geprobeerd reizigers om te leiden via een alternatieve spoorroute of via bussen. Voor dat laatste is beschikbaarheid van het wegennet een voorwaarde.

## 2.3 Blootstellings- en uitvalanalyse

Wanneer de dataverzameling is voltooid en de dreigingsdata en objectdata beschikbaar zijn, worden de objecten in kaart gebracht die blootgesteld zijn aan water. Deze blootstellingsanalyse begint met de geografische locatie van relevante spoorobjecten. Vervolgens worden de waterbeelden ruimtelijk over de spoorobjecten gelegd om inzichtelijk te maken welke objecten worden blootgesteld aan water. Voor elk object wordt de mogelijke waterdiepte door wateroverlast bepaald voor twee verschillende buien. Met behulp van de kritieke uitvalwaarden kan vervolgens worden vastgesteld welke objecten uitvallen en daarmee het functioneren van het spoor beïnvloeden. Deze stappen zijn schematisch weergegeven in onderstaand Figuur 2.4. De resultaten van deze analyse staan beschreven in Hoofdstuk 5.



Figuur 2.4 Schematische weergave van de ruimtelijke 'overlay' om tot een uitvals-analyse te komen.

## 2.4 Gevolgbepaling

De maatschappelijke gevolgen worden bepaald in de gevolgbepaling. Op basis van deze drie componenten kan worden berekend wat de monetaire maatschappelijke verliezen zijn bij uitval van een functie. Hierin zijn drie hoofdstappen te onderscheiden:

1. **Functieherstelduur:** Hoe lang is de functie niet beschikbaar? Ofwel: Hoe lang kunnen mensen niet reizen met de trein?
2. **Persoonsverliesuren:** Hoeveel mensen ondervinden problemen als de functie niet beschikbaar is en voor hoe lang? Ofwel: Hoeveel mensen moeten omreizen als gevolg van het uitvallen van het spoortraject en wat is hun extra reistijd?
3. **Economische verliezen:** Wat is de economische waarde van deze persoonsverliesuren? Ofwel: Hoeveel Euro's maatschappelijke schade treedt erop omdat mensen moeten omreizen door het uitgevallen spoortraject?

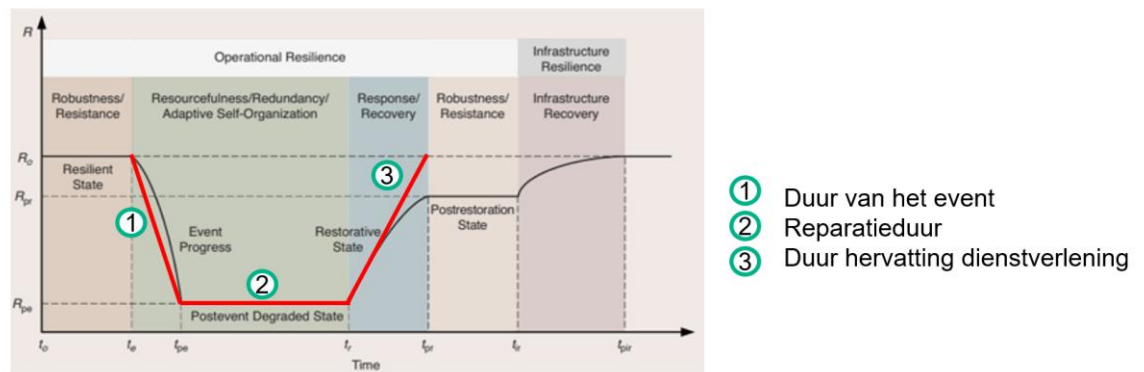
Waarbij de totale maatschappelijke verliezen een combinatie zijn van de drie hierboven genoemde hoofdstappen. De directe schade aan de infrastructuur wordt in deze analyse niet bepaald.

In dit hoofdstuk geven we de algemene concepten weer die achter deze aanpak zitten. De formules worden toegepast op de casus in Hoofdstuk 6.

## 2.4.1 Stap 1 gevolgbeplating: Bepalen van functieherstelduur<sup>2</sup>

De eerste stap in deze gevolgbeplating is het berekenen van de functieherstelduur. Deze aanpak berekent hoelang een vitale functie niet beschikbaar is: ofwel hoelang het duurt voordat een vitale functie weer volledig operationeel is. Binnen de functieherstelduur worden ook weer drie stappen onderscheiden. Deze drie stappen zijn uitgewerkt in Figuur 2.5. Hierin wordt een versimpelde resilience-curve weergegeven met drie componenten:

1. De **duur van het event** zorgt voor functieverlies en uitval.
2. Deze uitval duurt enige tijd, totdat de getroffen objecten gerepareerd zijn (**reparatieduur**).
3. Voordat alles weer functioneert als normaal, duurt het nog enige tijd tot het **hervatten van business as usual**.



Figuur 2.5 Versimpelde versie van een resilience curve. Met de stappen 1-3 worden verschillende componenten van functieherstelduur weergegeven, aangepast van Purnomo Yusgiantoro Center (2020).

In dit onderzoek wordt de functieherstelduur berekend door de som te nemen van de drie hierboven beschreven componenten.

$$FHD = t_{event} + t_{reparatie} + t_{HD} \quad (\text{Verg. 1})$$

Waarbij:

$t_{event}$  = Duur van wateroverlast gebeurtenis.

$t_{reparatie}$  = Reparatieduur.

$t_{HD}$  = Duur hervatting dienstverlening.

### 2.4.1.1 Duur van wateroverlast ( $t_{event}$ )

Er wordt aangenomen dat de duur van de wateroverlast nauwkeurig kan worden gemeten en er geen treinen rijden gedurende de gehele periode van de wateroverlast op het spoor.

### 2.4.1.2 Bepalen van reparatieduur ( $t_{reparatie}$ ):

De uitvalduur van een vitale functie wordt grotendeels bepaald door de reparatietijd van individuele objecten. Deze tijd bepaalt hoelang het duurt voordat objecten weer functioneren op een niveau waarbij de functie (deels) is hersteld. Het is echter uitdagend om nauwkeurige reparatietijden per object te bepalen. Dit vereist gedetailleerde data en een goed begrip van reparatie- en inspectieprocedures.

<sup>2</sup> De term 'functieherstelduur' zoals deze in dit rapport wordt gebruikt is anders dan hoe deze term gebruikt wordt bij ProRail. Wat in dit rapport 'reparatieduur' wordt genoemd, wordt bij ProRail 'functieherstelduur' genoemd. Wij breiden dit uit met de duur van het even en het hervatten van business as usual.

Hieronder laten we twee voorbeelden zien van hoe reparatieduur bepaald kan worden op basis van twee verschillende uitgangspunten:

- 1) **Uitgangspunt voor seriële reparatie:** Wanneer meerdere objecten van hetzelfde type uitvallen, worden deze één voor één gerepareerd. Objecten van verschillende typen kunnen echter gelijktijdig worden gerepareerd.
- 2) **Uitgangspunt voor parallelle reparatie:** De reparatie van verschillende soorten objecten, evenals objecten binnen dezelfde categorie, kan parallel worden uitgevoerd. Hoe meer objecten van dezelfde soort op één locatie moeten worden gerepareerd, hoe efficiënter de uitvoering kan zijn. Deze benadering gaat ervan uit dat de eerste paar objecten het langst duren om te herstellen, maar dat het herstel sneller verloopt naarmate er meer objecten van hetzelfde type moeten worden gerepareerd. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat er meer aannemers worden ingezet.

### 1. Reparatieduur op basis van seriële hersteltijd

De reparatieduur op basis van de seriële hersteltijd, gaat ervanuit dat objecten van hetzelfde objecttype een voor een worden gerepareerd en dat het objecttype dat het langst duurt om te herstellen maatgevend is voor de totale herstelduur. Voor het bepalen van de reparatietijden op basis van deze seriële aanpak gebruik je de volgende stappen:

1. Bepaal het aantal getroffen objecten per objecttype.
2. Vermenigvuldig dit aantal met de reparatieduur van dat objecttype.
3. Identificeer welk objecttype de langste reparatieduur heeft. Dit is de maatgevende reparatieduur.

$$\text{Reparatieduur seriële hersteltijd} = \max((N_x \times R_x), (N_y \times R_y), (N_z \times R_z)) \quad (\text{Verg. 2})$$

Waarbij:

- $(N_x), (N_y), (N_z)$  = aantal uitgevallen objecten van respectievelijk objecttype  $(x), (y), (z)$ .
- $(R_x), (R_y), (R_z)$  = reparatieduur van respectievelijk objecttype  $(x), (y), (z)$ .

De aanpak op basis van seriële reparaties kan de reparatieduur overschatten omdat deze ervan uitgaat dat objecten binnen eenzelfde objectsoort niet tegelijkertijd kunnen worden gerepareerd.

#### Fictief rekenvoorbeeld

Er zijn twee soorten objecten geraakt bij een event: 10 railspoelen en 8 kasten. De railspoelen hebben een herstelduur van 391 minuten en de kasten van 487 minuten.

Reparatieduur railspoelen =  $10 \times 391$  minuten = 3910 minuten = 65.0 uur

Reparatieduur kasten =  $8 \times 487$  minuten = 3896 minuten = 64.9 uur

De maximale reparatieduur van deze twee objectsoorten is leidend. Op basis van deze formule zou de hersteltijd dan 65 uur, oftewel 2.7 dagen zijn.

### 2. Reparatieduur op basis van parallelle reparatie

In werkelijkheid gebeurt het herstel vaak niet object voor object maar kunnen er ook meerdere objecten (binnen een objectsoort) tegelijk worden gerepareerd, zeker bij grote events als wateroverlast. Daarom is het ook mogelijk om reparatietijden te vanuit het uitgangspunt van parallelle reparatie. Ook hier wordt ervan uitgegaan dat de maximale reparatieduur maatgevend is.

De aanpak op basis van parallelle reparatie kan ook conceptueel uitgeschreven worden:

Maatgevende reparatieduur op basis van parallelle reparatie =  
 $MAX((\sqrt{N_x} \times R_x), (\sqrt{N_y} \times R_y), (\sqrt{N_z} \times R_z))$

(Verg. 3)

Waarbij:

- $(N_x)$ ,  $(N_y)$ ,  $(N_z)$  = aantal uitgevallen objecten van respectievelijk objecttype (x), (y), (z).
- $(R_x)$ ,  $(R_y)$ ,  $(R_z)$  = reparatieduur van respectievelijk objecttype (x), (y), (z).

#### Fictief rekenvoorbeeld

Er zijn twee soorten objecten geraakt bij een event: 10 railspoelen en 8 kasten. De railspoelen hebben een herstelduur van 391 minuten en de kasten van 487 minuten.

Reparatieduur railspoelen =  $\sqrt{10} * 391$  minuten = 1236.5 minuten = 20.6 uur

Reparatieduur kasten =  $\sqrt{8} * 487$  minuten = 1088.9 minuten = 18.1 uur

De maximale reparatieduur van deze twee objectsoorten is leidend. Op basis van deze formule zou de hersteltijd dan 20.6 uur, oftewel 0.9 dag zijn.

Beide methoden richten zich uitsluitend op de uitval en het herstel van objecten, zonder rekening te houden met leveringsproblemen bij grote uitval of het feit dat in de praktijk een specifieke groep medewerkers per techniekveld of objecttype kan worden ingezet. Indien dergelijke gegevens beschikbaar zijn, kan deze complexiteit aan de formule worden toegevoegd.

Daarnaast gaat deze methode ervan uit dat alle objecten gelijk kunnen worden uitgevoerd en dat er geen volgorde is in het herstel. In werkelijkheid hoeft dit niet altijd het geval te zijn. Bijvoorbeeld, bij verzakking van het spoor door wateroverlast moet eerst het spoor worden hersteld voordat andere objecten kunnen worden gerepareerd. De tijd voor spoorherstel wordt dan opgeteld bij de reparatietijd van andere objecten.

De reparatieduur van spoorobjecten wordt als een vaste waarde aangenomen, waarbij geen treinen rijden gedurende de reparatieperiode. In de praktijk kunnen treinen soms vertraagd rijden en worden objecten 's nachts vervangen om de dienstregeling niet te onderbreken. Deze complexiteit wordt echter niet meegenomen in de formule.

#### 2.4.1.3 Vaste tijd tot volledige hervatting van de dienstregeling ( $t_{HD}$ )

De tijd tot volledige hervatting van de treindienstregeling wordt als een constante waarde beschouwd. Dit wordt tot heden echter niet gedocumenteerd en is daardoor een schatting op basis van ervaringen van de experts.

#### 2.4.2 Stap 2 gevolgbeoordeling: Bepalen persoonsverliesuren

De tweede stap in de gevolgbeoordeling is vaststellen hoeveel mensen hinder hebben ondervonden van de uitval van de functie. Dit kan worden gedaan door het aantal persoonsverliesuren te berekenen. Persoonsverliesuren zijn de totale reistijdverliezen die ontstaan omdat reizigers niet op tijd op hun bestemming kunnen komen (KiM, 2017). De persoonsverliesuren kunnen worden omgerekend naar economische verliezen, door de uren te vermenigvuldigen met de zogenaamde 'Value of Time'. Dat gebeurt in de derde stap (bepalen maatschappelijke verliezen in euro's) van de gevolgbeoordeling. De economische verliezen worden als maat gehanteerd voor de maatschappelijke impact. Deze aanpak wordt door economen breed gebruikt en door het KiM ook voorzien van data voor de Value of Time.

De aanpak die we in dit rapport hanteren is vergelijkbaar met de methode die voor het hoofdwegennet is gebruikt in klimaatrisicostudies: het aantal voertuigverliesuren als gevolg van files en omreizen (Deltares, 2019).

De totale persoonsverliesuren die optreden kunnen als volgt bepaald worden:

$$\text{Persoonsverliesuren (PVU)} = \text{FHD} * \text{UT} * \text{GR} * t_{\text{extra}} \quad (\text{Verg. 4})$$

Waarbij:

FHD = De som van de duur van de wateroverlast, de reparatieduur van de spoorobjecten en de tijd tot de dienstregeling volledig is hervat.

UT = Aantal uitgevallen treinen per uur.

GR = Aantal getroffen reizigers per trein.

$t_{\text{extra}}$  = Omreistijd per persoon in uren.

Bij het berekenen van de maatschappelijke impact van wateroverlast op het spoor op basis van de bovenstaande formule, worden verschillende aannames gedaan:

1. **Uniform aantal uitgevallen treinen (UT):** Het aantal treinen dat per uur uitvalt (UT) wordt als constant beschouwd gedurende de gehele uitvalperiode. Dit houdt geen rekening met mogelijke variaties in de dienstregeling of piek- en daluren.
2. **Gemiddeld aantal getroffen reizigers (GR):** Het aantal getroffen reizigers per trein (GR) wordt als een gemiddelde waarde genomen. Dit houdt geen rekening met variaties in het aantal reizigers per trein, zoals tijdens spitsuren of rustige periodes. Ook wordt geen rekening gehouden met veranderend reizigersgedrag tijdens verstoringen.
3. **Gemiddelde omreistijd per persoon ( $t_{\text{extra}}$ ):** De extra reistijd per persoon ( $t_{\text{extra}}$ ) wordt als een gemiddelde waarde aangenomen waarbij is aangenomen dat omreizen via andere spoortrajecten mogelijk is. Het houdt geen rekening met individuele verschillen in omreistijd, afhankelijk van de specifieke reisroutes en alternatieve vervoersopties.
4. **Lineaire relatie tussen uitval en verliesuren:** De formule gaat uit van een lineaire relatie tussen de duur van de uitval en het aantal persoonsverliesuren. Dit betekent dat elke extra uur uitval resulteert in een proportioneel gelijk aantal extra verliesuren, zonder rekening te houden met mogelijke niet-lineaire effecten. Zo is bijvoorbeeld voor te stellen dat hoe langer het event duurt meer reizigers op de hoogte zijn waardoor zij direct omreizen of hun plannen aanpassen waardoor omreizen niet meer nodig is.

### 2.4.3 Stap 3 gevolgbeoordeling: Bepalen maatschappelijke verliezen in euro's

Om de economische schade van persoonsverliesuren te berekenen, gebruiken we de waarde van tijd (Value of Time (VoT) van de gemiddelde reiziger. Rijkswaterstaat heeft deze waardes gewaardeerd voor verschillende type reizigers voor het jaar 2022. De VoT van een gemiddelde treinreiziger is berekend op 10,08 euro per uur (Rijkswaterstaat, n.d.). De formule voor het berekenen van de totale schade in euro's is als volgt:

$$\text{Verliezen in euro's} = \text{PVU} * \text{VOT} \quad (\text{Verg. 5})$$

Waarbij:

- PVU = Persoonsverliesuren.
- VoT = Value of Time: De geschatte waarde van tijd per uur voor een gemiddelde reiziger.

De aannames en overwegingen bij deze aanpak:

1. **Constate waarde van tijd:** De waarde van tijd wordt als een constante waarde van 10,08 euro per uur aangenomen. Dit is een gemiddelde schatting en houdt geen rekening met variaties in de waarde van tijd afhankelijk van het type reiziger (bijvoorbeeld zakelijk, woon-werk, of vrijetijd) of de economische omstandigheden (Rijkswaterstaat, n.d.).
2. **Geen secundaire economische effecten:** De berekening houdt geen rekening met secundaire economische effecten zoals verlies van productiviteit, extra kosten voor alternatieve vervoersmiddelen, of bredere maatschappelijke kosten zoals milieueffecten.
3. **Lineaire relatie tussen verliesuren en economische schade:** Er wordt aangenomen dat elke extra verliesuur resulteert in een proportioneel gelijk bedrag aan economische schade, zonder rekening te houden met mogelijke niet-lineaire effecten.

## 2.5 Ketenafhankelijkheid

Om de complexiteit van verschillende afhankelijkheden, zoals elektriciteit en bereikbaarheid, te integreren, wordt ook aandacht besteed aan ketenafhankelijkheid. Door verschillende scenario's en verhaallijnen te ontwikkelen die illustreren hoe het uitvallen van andere vitale functies de maatschappelijke impact van spooruitval kan beïnvloeden, kunnen de formules voor de gevolgbepaling worden aangepast. Hierdoor kunnen deze formules ook (een deel van) de complexiteit door ketenafhankelijkheden meenemen. Dit staat verder uitgewerkt in Hoofdstuk 7.

## 3 Begrip van falen middels impactpaden

Dit hoofdstuk dient als een voorbeeld van hoe impactpaden kunnen worden opgesteld en kunnen worden toegepast op het spoor. Het impactpad, ontwikkeld voor de casus rondom Bunde, wordt gepresenteerd in Figuur 3.1. Daarin zijn alleen spoorobjecten meegenomen die zich binnen het studiegebied van de casus bevinden (Figuur 4.4). De aanpak die nu wordt gepresenteerd voor deze casus, is ook generiek toepasbaar op andere infrastructurele netwerken.

### 3.1 Impactpad voor het spoor

Het spoor is zeer gevoelig voor wateroverlast: zodra er water op de spoorbaan staat, kan er eigenlijk niet meer overheen gereden worden. Dit komt allereerst doordat de spoorbaan slecht zichtbaar wordt, maar ook doordat de treindetectie uitvalt. Dit brengt de veiligheid van reizigers in het geding en is reden om de trein niet te laten rijden over dat spoordeel. Hetzelfde geldt voor de overweg: als deze onder water staat, kan de veiligheid niet worden gegarandeerd en is ook de treindetectie niet zeker. Dat leidt ertoe dat het spoor niet begaanbaar is en dat de trein niet kan rijden over het bijbehorende spoor. Een mogelijke bijkomende complicerende factor is de mogelijkheid tot verzakking van het spoor bij wateroverlast: wanneer de spoorbaanondergrond verzadigd raakt is er een mogelijkheid tot verzakking, wat leidt tot grotere gevolgen en langdurige uitval omdat dit lastig te herstellen is en lang duurt. Dit is niet voorgekomen bij de wateroverlast rondom Bunde van 29 juni 2021. Andere objecten die gevoelig zijn voor wateroverlast zijn elektronische componenten die kunnen uitvallen bij ongeveer 10-30 cm water. Denk hierbij aan componenten als railspoelen, maar ook elektrische voorzieningen in kabelkasten die andere objecten aansturen.

#### 3.1.1 Meenemen van ketenafhankelijkheden

De spoorwegen zijn sterk afhankelijk van elektriciteit voor signalering, communicatie en energievoorziening van treinen. Als de elektriciteitsvoorziening wegvalt, falen elektrische installaties en is het spoor niet meer bruikbaar. Treinen worden via de bovenleiding van stroom voorzien, terwijl seinen en veiligheidssystemen een lager voltage gebruiken. Stationsfaciliteiten zoals verlichting en roltrappen zijn afhankelijk van het reguliere stroomnet. De overgang van het externe elektriciteitsnet naar het netwerk van ProRail vindt plaats bij onderstations en verdeelkasten, die essentieel zijn voor de continuïteit en betrouwbaarheid van het spoorwegnetwerk. Uitval van vitale infrastructuur zoals elektriciteit kan daarmee dus ook leiden tot uitval van het spoor. Bij uitval van telecommunicatie, is er geen communicatie meer mogelijk tussen de treindienstleider en de machinist, waardoor de veiligheid niet gegarandeerd kan worden. Dit zal er ook toe leiden dat er op getroffen trajecten geen treinen mogen of kunnen rijden.

De bereikbaarheid van treinstations via de weg is essentieel voor reizigers, vooral bij verstoringen of onderhoudswerkzaamheden. Een goed functionerend wegennet is nodig om extra verkeersdruk op te vangen en om hulpdiensten snel ter plaatse te laten komen bij incidenten. De interactie tussen spoor-, elektriciteit-, telecom- en wegverbindingen is van groot belang voor een betrouwbaar transportnetwerk, waarbij uitval van een van deze systemen vaak cascade-effecten heeft op de andere systemen. Wanneer een spoorwegovergang bijvoorbeeld onbruikbaar is door wateroverlast, gaan de slagbomen automatisch naar beneden. Hierdoor wordt de overweg ontoegankelijk voor autoverkeer, wat de bereikbaarheid van de weg vermindert. Dit is een direct cascade-effect van de impact op het spoor naar de weg.



## 4 Dataverzameling

In dit hoofdstuk wordt het dataverzamelingsproces beschreven. In Figuur 4.1 staat uitgewerkt hoe de verschillende datacomponenten bijdragen aan de verschillende analyses. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van deze verschillende data-componenten.

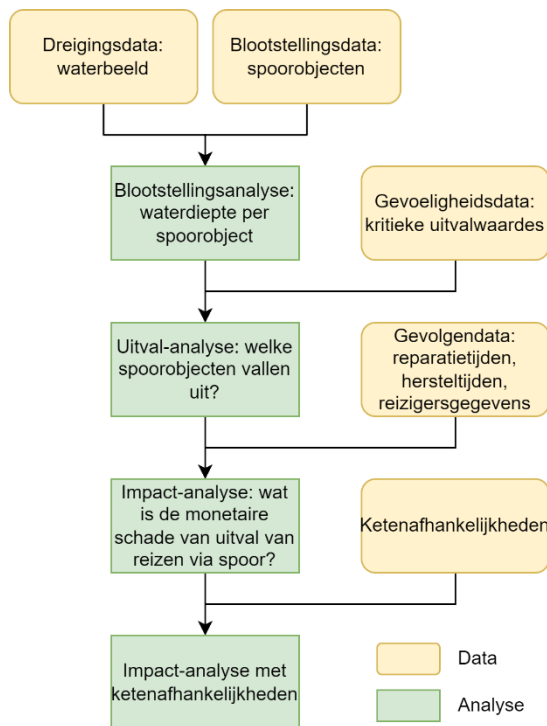
De data is verzameld op vijf verschillende niveaus:

- 1) Dreigingsdata.
- 2) Blootstellingsdata/objectdata.
- 3) Gevoelighedsdata.
- 4) Gevolgendata.
- 5) Ketenaafhankelijkheid-data.

Tabel 4.1 Data en bijbehorende databronnen en link.

Categorie	Databron	Data	Link
Dreigingsdata	Klimaat-effectatlas	Waterdiepte kaarten	<a href="https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/236484/deltares-september-2018-overstromingsrisicos-door-intense-neerslag.pdf">Klimaat-effectatlas</a> , gebaseerd op: <a href="https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/236484/deltares-september-2018-overstromingsrisicos-door-intense-neerslag.pdf">https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/236484/deltares-september-2018-overstromingsrisicos-door-intense-neerslag.pdf</a>
Objectdata	RailMaps	Spoor-objecten	<a href="https://www.spoordata.nl/informatieproducten/railmaps">https://www.spoordata.nl/informatieproducten/railmaps</a>
Gevolgendata	Rijden de treinen	Archief treinstoringen	<a href="https://www.rijdendetreinen.nl/storingen/37924-29-juni-2021-herstelwerkzaamheden-sittard-maastricht">https://www.rijdendetreinen.nl/storingen/37924-29-juni-2021-herstelwerkzaamheden-sittard-maastricht</a>
Gevolgendata	SAP	Storingsmeldingen en reparatietijden	ProRail interne storingsdatabase
Gevolgendata	Kennisinstituut Mobiliteit. 2017. Maatschappelijke kosten van verstoringen op het spoor	Value of Time	<a href="https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2017/12/21/maatschappelijke-kosten-van-verstoringen-op-het-spoor">https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2017/12/21/maatschappelijke-kosten-van-verstoringen-op-het-spoor</a>
Ketenaafhankelijkheid	OpenStreetMap	Telecommasten (tower='communication')	<a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a>
Ketenaafhankelijkheid	Enexis Open Data	Elektriciteitsdata (laagspannings-, middenspannings-, hoogspanningsstations en kabels)	<a href="https://www.enexis.nl/over-ons/open-data">https://www.enexis.nl/over-ons/open-data</a>
Ketenaafhankelijkheid	Deltares RA2CE toolkit + OpenStreetMap	Wegennet extractie uit OpenStreetMap + analyse wateroverlast	<a href="https://github.com/Deltares/ra2ce">https://github.com/Deltares/ra2ce</a> <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a>

De verzamelde data wordt uiteindelijk gebruikt om de analyses nauwkeurig uit te voeren. De onderlinge samenhang van de verschillende databronnen is weergegeven in Figuur 4.1. Dreigings- en objectdata leiden tot een blootstellingsanalyse. Deze blootstellingsanalyse, gecombineerd met gevoelighedsdata, resulteert in een uitvalanalyse. Vanuit de uitvalanalyse kunnen de gevolgen worden bepaald met behulp van gevolgendata. Ten slotte leidt het integreren van ketenaafhankelijkheden tot een impactanalyse, waarbij mogelijke aanpassingen worden geïdentificeerd om rekening te houden met deze afhankelijkheden.



Figuur 4.1 Analyse-stappen en bijbehorende databronnen.

## 4.1 Dreiging: waterbeelden

Voor de waterbeelden is gebruik gemaakt van de waterdieptekaarten van de [klimaat-effectatlas](#) ('Waterdiepte bij hevige bui' afkomstig van de Richtlijn Overstromingsrisico's (Deltares, 2018) voor twee verschillende buien:

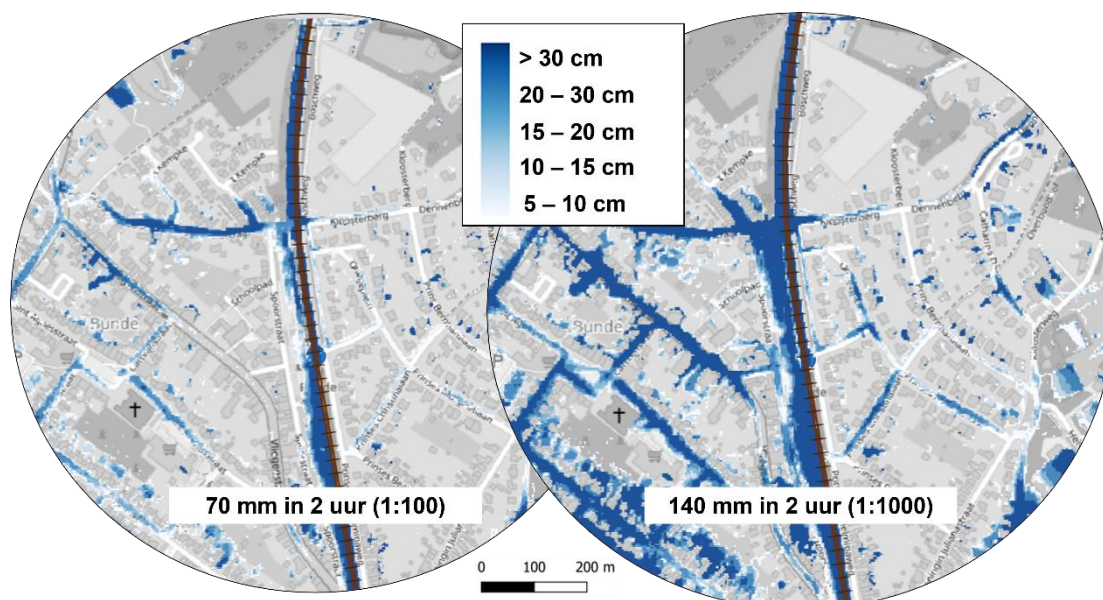
- 1) 70 mm regen in 2 uur. Herhalingstijd 1:100 jaar.
- 2) 140 mm regen in 2 uur: Herhalingstijd 1:1000 jaar.

De bui die op 29 juni 2021 in Limburg viel had een herhalingstijd van 1:350 jaar (Deltares, 2022), waarbij er lokaal in totaal maximaal 140 mm in 24 uur viel met piekbuien van 90mm in 2 uur tijd. Daarmee zat die bui tussen de twee waterdiepte-situaties in die worden geanalyseerd in dit rapport.

Deze twee kaarten visualiseren de waterdiepte door onderscheid te maken in vijf waterdiepteklassen, zoals gevisualiseerd in Figuur 4.2.

1. 5-10 cm.
2. 10-15 cm.
3. 15-20 cm.
4. 20-30 cm.
5. > 30 cm.

Er is in deze databronnen geen onderscheid aangebracht in waterdieptes boven de 30 cm. Hierdoor ontbreekt gedetailleerd inzicht in de variaties van waterdieptes boven de 30 cm, wat de nauwkeurigheid van de impactanalyse kan beïnvloeden. Dit gebrek aan detail kan leiden tot een onvolledig beeld van de mogelijke schade en herstelduren. Hiervoor zullen aannames worden gedaan.



Figuur 4.2 Overzicht waterbeelden: links 70 mm regen in 2 uur (herhalingstijd 1:100 jaar) en rechts 140 mm regen in 2 uur (herhalingstijd 1:1000).

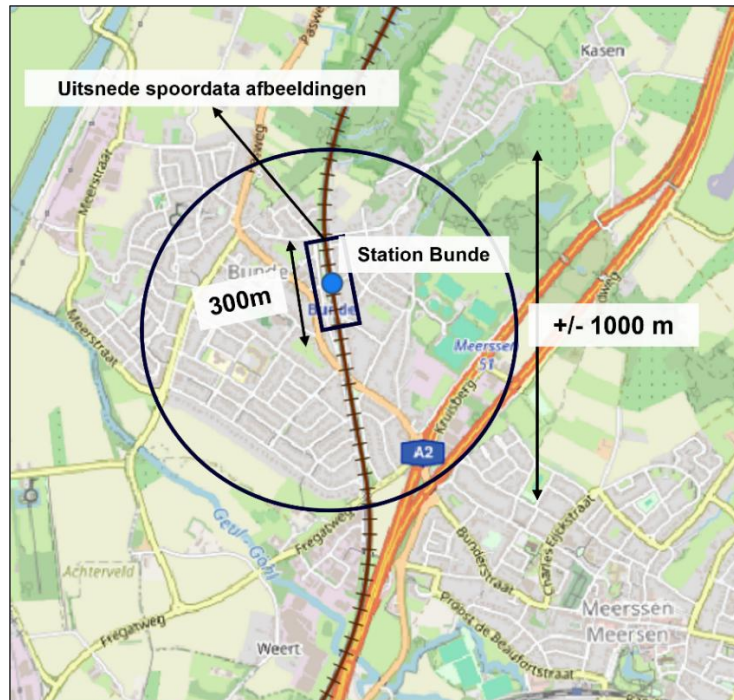
Er is een duidelijk verschil zichtbaar in de ernst van de overlast tussen de twee buien. Met name in de straten van de wijk ten westen van het spoor is de situatie sterk verslechterd. Op het spoor lijkt de situatie enigszins vergelijkbaar; in beide gevallen staat het spoor bijna over de gehele lengte voor minimaal 30 cm onderwater. In werkelijkheid kunnen de waterdieptes verschillen tussen deze twee type buien. Door gebrek aan detaillering in de data kan dit echter in deze analyse niet inzichtelijk worden gemaakt.

## 4.2 Blootstelling: spoordata

Voor de spoorobjecten en relevante informatie over uitval en herstelduren hebben we verschillende datasets verkregen van ProRail. Hieronder noemen we de belangrijkste:

- **GIS-database:** In de GIS database van ProRail (RailMaps) staat een groot deel van de objecten onder beheer van ProRail. De ruimtelijke locatie is belangrijk om te kunnen bepalen welke objecten worden blootgesteld zijn aan water en dus mogelijk uitvallen.
- **Objectenstructuurlijst:** Een lijst met alle objecten en de structuur met benaming hoe ze zijn opgenomen in de verschillende datasystemen van ProRail. Hiermee konden we de namen van de objectenstructuurlijst aan de GIS-database koppelen.

Het geselecteerde studiegebied is gelegen in een straal van 500 m rond het geschatte middelpunt van station Bunde. Zo kom je uit op ongeveer een kilometer aan spoor waarvan de objecten in beeld zijn gebracht (Figuur 4.3). In eerste instantie is de spoordata verzameld voor alle data beschikbaar in RailMaps in het studiegebied.



Figuur 4.3 Illustratie van de geografische criteria voor de selectie van de spoordata, met daarbij aangegeven uitsnede voor de spoordata afbeeldingen.

Op basis van de totale lijst van objecten hebben we toegewerkt naar een lijst van objecten die relevant zijn voor deze casestudie. Dit is gedaan op basis van drie criteria: Het object ligt fysiek bij het spoor van Bunde (op basis van de GIS gegevens):

- 1) Het object is cruciaal voor de functie van het spoor (zonder het object vindt er direct verstoring van de dienstregeling plaats) op basis van de impactpaden.
- 2) Het object is gevoelig voor water.

Hieruit volgde, na validatie door ProRail, een lijst van 11 objecten die de basis vormde voor de verdere analyse. Het overzicht hiervan staat in Tabel 4.2.

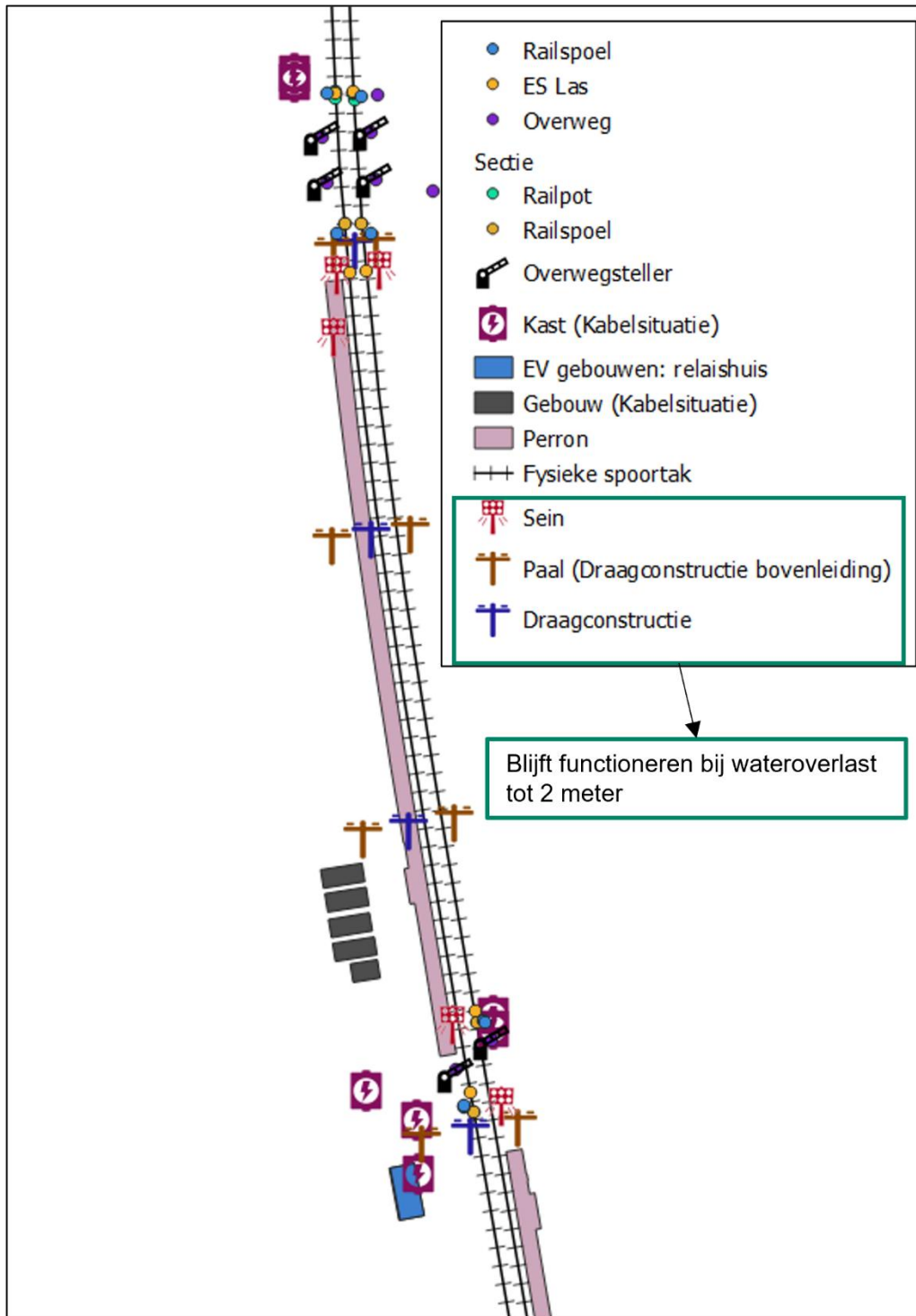
Tabel 4.2 Selectie van spoorobjecten met daarbij de benaming volgens (van links naar rechts) de GIS database van ProRail, de IHC (of Objectenstructuurlijst) en het SAP systeem (storingmeldingen).

GIS Laag	Objectsoort	SAP Naam	Functie van het object
<b>Draag-constructie</b>	Draag-constructie Bovenleiding 1500V	DRGCIE	De Draagconstructie Bovenleiding 1500V is het geheel van bovenleidingportalen, bovenleidingpalen en funderingen hiervan in een 1500V-systeem.
<b>ES-Las</b>	ES-las	ESLAS	Elektrische scheidingslas: onderdeel van treindetectie en wordt gebruikt om het spoor in secties te verdelen. ES-las is onderdeel van de spoorstaaf.
<b>Fysieke spoortak</b>	Spoortak	SPOORTAK	Een Spoortak is het geheel aan objecten die "het spoor" vormen. Hieronder vallen ook zaken als bijvoorbeeld ballast, dwarsliggers en spoorstaven.
<b>Gebouw</b>	Railgebonden gebouw	GEBOUW	Bij Bunde is het railgebonden gebouw een reluishuis wat elektrische voorzieningen bevat.
<b>Kast (kabelsituatie)</b>	Kabelkast	KABELKAST	Een kabelkast is een elektriciteits-voorziening-kast met een overgang naar één of meerdere kabels.
<b>Lichtsein/sein</b>	Lichtsein	SEIN	Lichtseinen zijn vaste objecten die ter plekke geldende veiligheidsregels weergeven t.b.v. de machinist en treinpersoneel. Een sein heeft altijd een lichtbron.

GIS Laag	Objectsoort	SAP Naam	Functie van het object
<b>Overweg</b>	Overweg	OVERWEG	Een overweg is het gebied waarin één of meer sporen een overpad (weg, fietspad, voetpad) gelijkvloers kruist. Ook wel spoorwegovergang genoemd.
<b>Overwegsteller</b>	Overwegsteller	OVWSTELLER	Een overwegsteller is een onderdeel van de overweg, waarmee de fysieke doorgang van verkeer over het overwegpad kan worden geblokkeerd.
<b>Perron</b>	Perron	PERRON	Perron is een opstapvoorziening of platform die het in- en uitstappen van passagiers op het instapniveau van het openbaar vervoer of voor het laden en lossen van goederen mogelijk maakt.
<b>Railspoel</b>	Railspoel	DETGRSSSL	De railspoel retourleiding en aarding 25 kV wordt gebruikt in verbindingen tussen de spoorstaven. Het is een belangrijk onderdeel van de treindetectie.
<b>Sectie</b>	GRS SSL Sectie	DETGRSSSL	GRS SSL is een veelgebruikt type treindetectie, waar door middel van relais in een spoorstroomkring bepaald wordt of een trein zich in een geïsoleerde spoorsectie bevindt. Bevat railpotten en railspoelen, onderdeel van de treinbeveiliging

\* Railspoel valt onder de laag GRS SSL Sectie in de GIS database maar kent in het SAP systeem geen aparte SAP categorie.

De geselecteerde spoorobjecten zijn hieronder weergegeven op de kaart.



Figuur 4.4 Spoorobjecten gevoelig voor wateroverlast, gelegen bij station Bunde. Dit is een uitsnede van een deel van de verzamelde spoorobjecten in het gedefinieerde studiegebied bij Bunde en is een illustratief voorbeeld.

### 4.3 Gevoeligheid: kritieke uitvalwaardes spoorobjecten

Het bepalen van de kritieke uitvalwaarde is cruciaal voor de gevolgbepaling. De kritieke uitvalwaarde bepaalt namelijk bij welke waterdiepte een object uitvalt als gevolg van blootstelling aan wateroverlast.

De uitvalwaardes per object zijn bepaald op basis van een expertsessie met experts van ProRail. Zie

Tabel 4.3 voor een overzicht van de verschillende spoor objecten met de bijbehorende kritieke uitvalwaardes.

Tabel 4.3 Overzicht kritieke uitvalwaardes van relevante spoorobjecten.

GIS laag	Kritieke uitvalwaarde [cm]
ES-Las	1
Overweg	1
Perron	1
Fysieke spoortak	1
Sectie	10
Railspoel	10
Gebouw	10
Kast (kabelsituatie)	10
Overwegsteller	100
Lichtsein/sein	200
Draagconstructie	400

#### 4.4 Gevolgen: reparatietijden

ProRail beschikt over data met betrekking tot reparatieduren in relatie tot verschillende faaloorzaken en voor diverse spoorobjecten. Deze reparatietijden zijn vastgelegd in een systeem (SAP) waarin informatie staat over de oorzaak van falen (bijv. regen, vorst of wateroverlast), de uitgevallen objecten en de tijd die nodig was om de onderdelen te repareren.

Voor de dataverzameling van de reparatietijden van de objecten maken we gebruik van de landelijke dataset en maken we geen onderscheid tussen wateroverlast of andere klimaatdreigingen, omdat voor deze oorzaken niet genoeg data beschikbaar was. Daarmee analyseren we dus de reparatieduren voor alle oorzaken.

Bij de data-inspectie bleek namelijk dat er een grote spreiding zit in de reparatieduurdata: er zijn veel lage waarden, maar ook enkele zeer hoge waarden. In deze casus hebben we zowel het gemiddelde als de mediaan van de reparatieduur bepaald om hier inzicht in te krijgen. De resultaten staan weergegeven in Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Vergelijking van de gemiddelde en mediaan reparatieduren van de verschillende objecten.

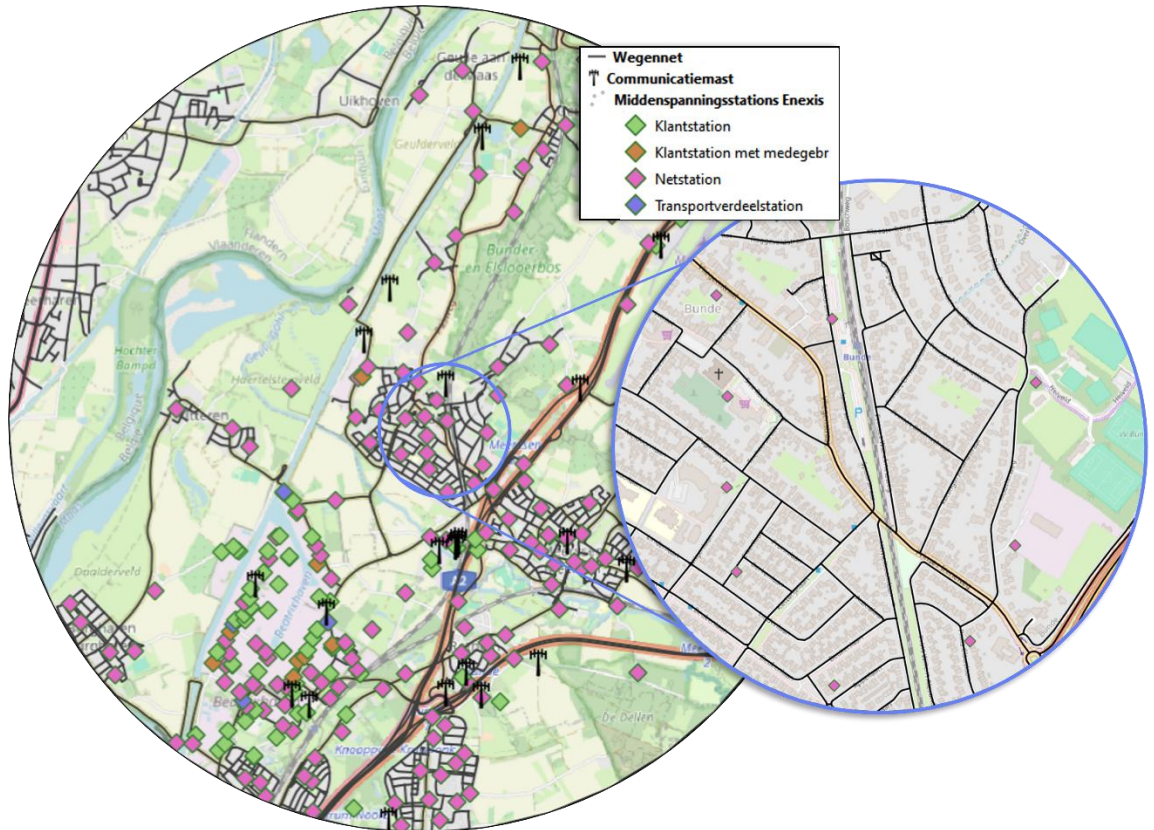
GIS laag	Mediaan (uur)	Gemiddelde (uur)	Aantal meldingen alle oorzaken
Fysieke spoortak	2.1	29.9	1890
Overwegsteller	0.7	8.7	98
Kast (kabelsituatie)	8.1	8.1	1
Lichtsein/sein	0.3	7.5	616

GIS laag	Mediaan (uur)	Gemiddelde (uur)	Aantal meldingen alle oorzaken
ES-Las	1.5	7.0	708
Sectie	1.5	6.5	2632
Railspoelen + railpotten	1.5	6.5	2632
Overweg	0.8	3.4	883
Draagconstructie	1.5	2.7	5
Perron	0.2	2.1	45
Gebouw	0.5	1.8	21

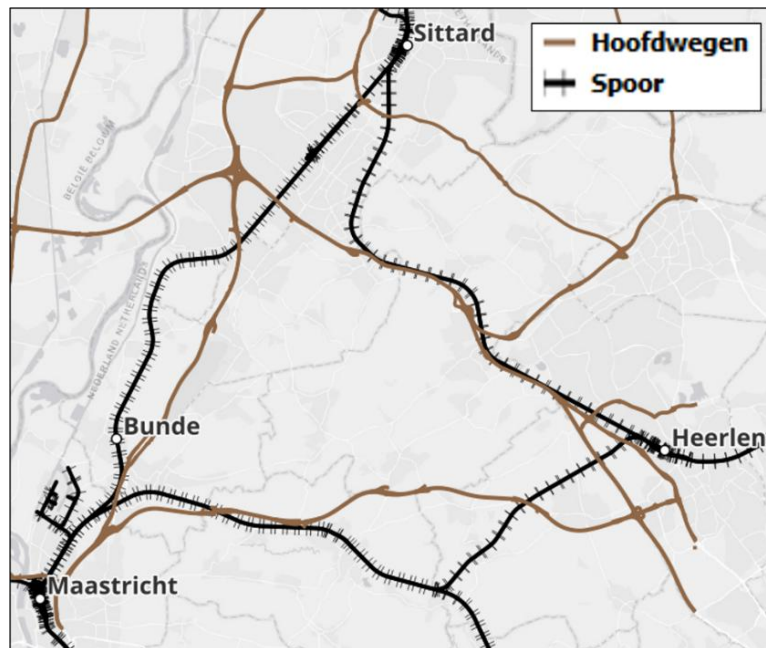
Bij ProRail zien we dat de langste reparatietijden gemiddeld optreden bij de fysieke spoortak, zoals bij ernstige verzakkingen van het spoor. Deze gevallen komen echter niet vaak voor, wat duidelijk wordt als we naar de mediaan kijken. Het is ook belangrijk om te vermelden dat de mediaan voor de 'kast'-objecten een vertekend beeld geeft; er is slechts één gebeurtenis geregistreerd met een herstelduur van ongeveer 8 uur, waardoor mediaan en gemiddelde gelijk zijn. Over het algemeen kunnen objecten redelijk snel worden hersteld. Binnen een tijdsbestek van ongeveer 8 tot 9 uur kunnen de meeste relevante objecten worden gerepareerd.

#### 4.5 Ketenafhankelijkheden: elektriciteit-, telecom- en wegennet data

Op basis van de impactpaden is bepaald dat elektriciteit, telecom maar ook het wegennet van invloed kunnen zijn op het functioneren van het spoor. Daarom is naast de spoorgegevens ook data van elektriciteit, telecom en wegen verzameld. Deze datasets zijn voor een groter gebied verzameld dan de spoordata, omdat uitval van objecten uit de nabije omgeving ook impact kunnen hebben op het functioneren van het spoor (denk bijvoorbeeld aan elektriciteitsuitval omdat een groot elektriciteitsstation uitvalt wat de toevoer van elektriciteit naar het spoor stopt). De bronnen van deze data staan beschreven in Tabel 4.1. Een aantal van deze data is gevisualiseerd in Figuur 4.5 en Figuur 4.6.



Figuur 4.5 Elektriciteit- en telecomdata en het wegennet in de omgeving van het spoor bij Bunde.



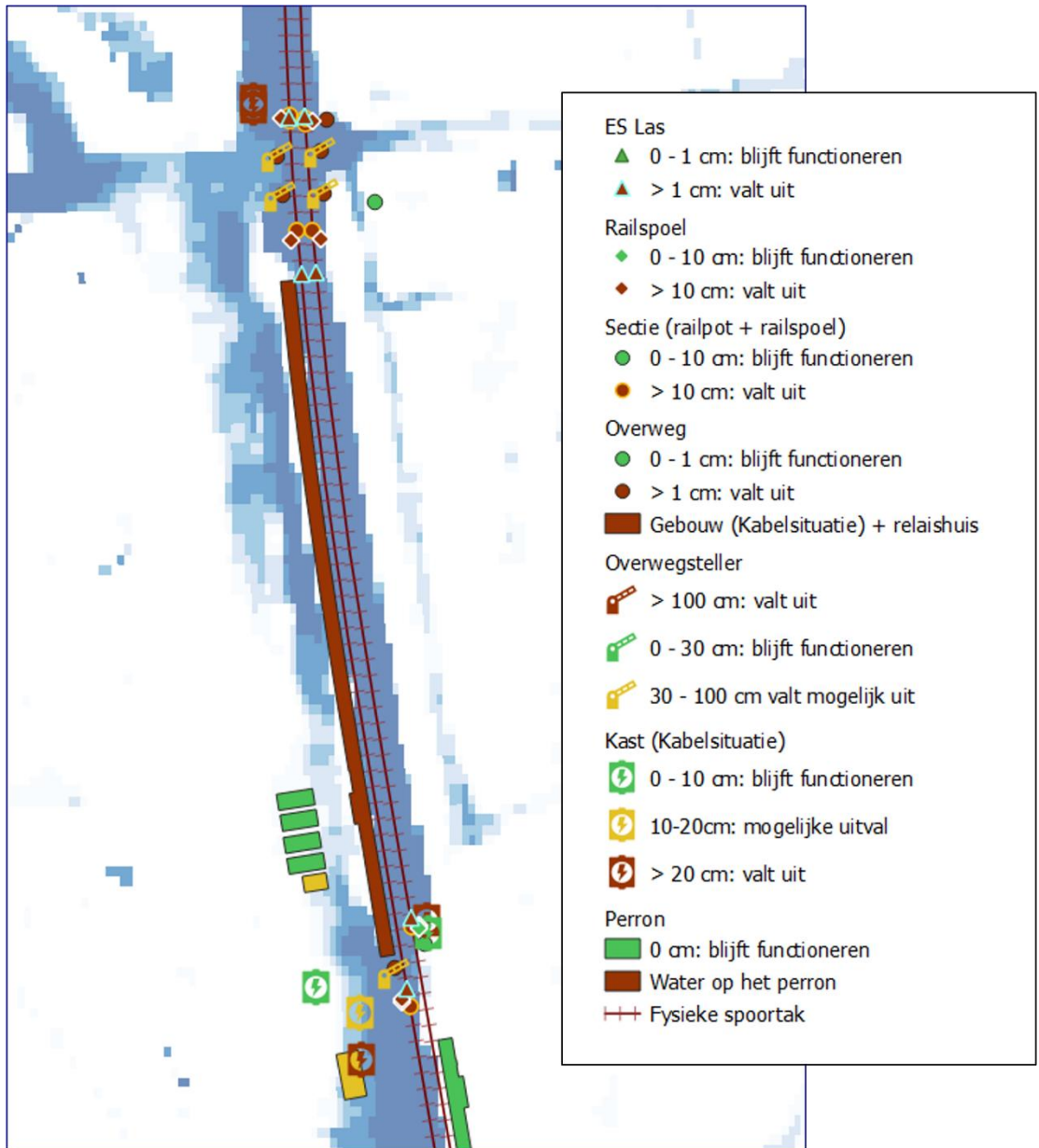
Figuur 4.6 Hoofdwegen en spoorwegen tussen Maastricht, Sittard en Heerlen, waarbij Bunde gelegen is op de spoortak tussen Sittard en Maastricht (RailMaps, 2024, OpenStreetMap, 2024).

## 5 Blootstelling en uitval van objecten

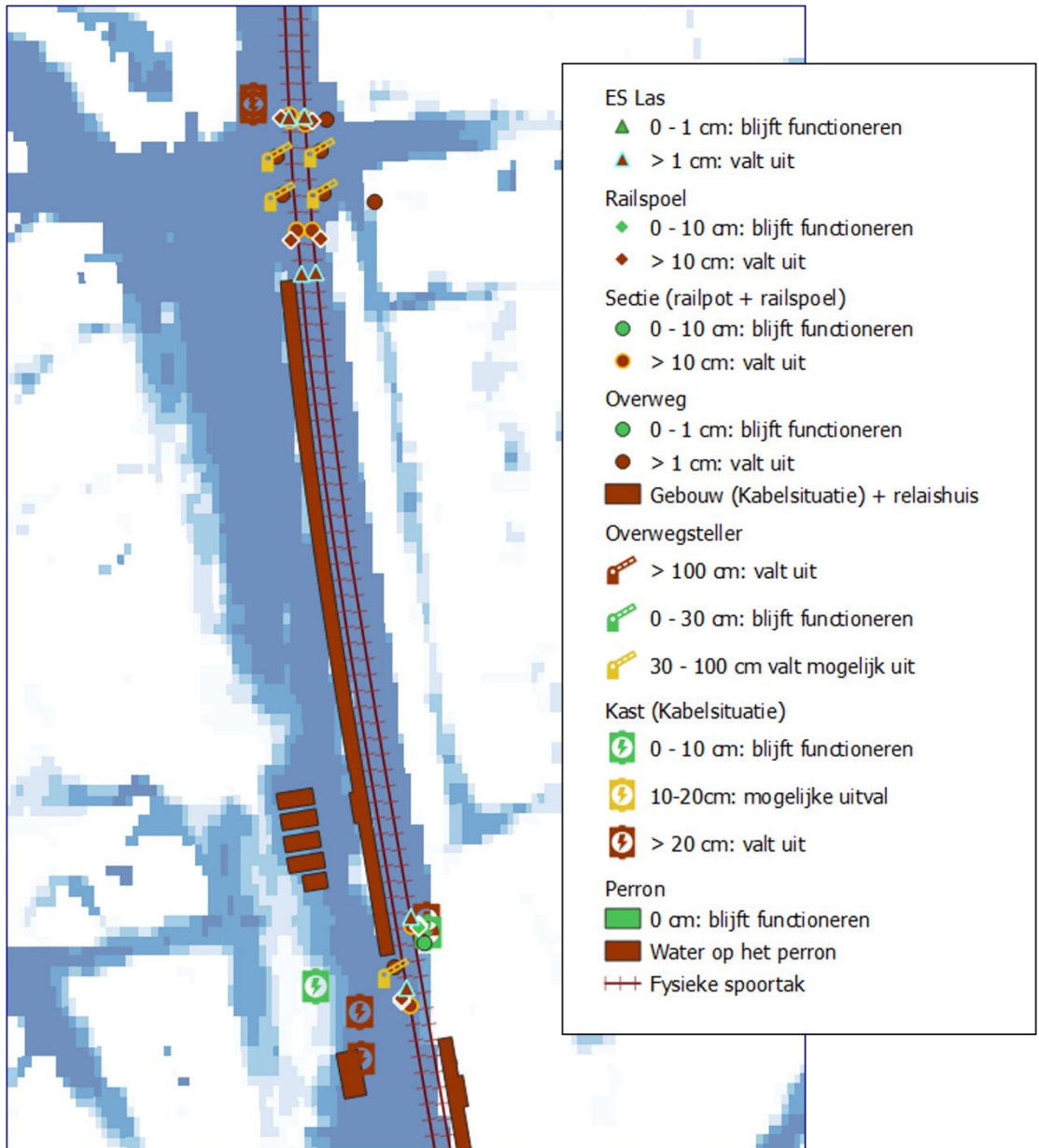
Wanneer de waterbeelden en de relevante objecten beschikbaar zijn, kan middels een ruimtelijke overlay een blootstellingsanalyse worden gedaan. Met een blootstellingsanalyse wordt bepaald aan welke waterdieptes objecten worden blootgesteld. Wanneer dit wordt gecombineerd met de informatie van de kritieke uitvalwaardes ( Tabel 4.3) ontstaan uitvals-kaarten zoals hieronder gepresenteerd worden.

### 5.1 Uitval spoorobjecten

Hieronder zijn de uitval-kaarten weergegeven voor de twee waterdieptekaarten uit deze analyse (bui 1 met 1:100 jaar herhalingsstijd en bui 2 met 1:1000 jaar herhalingsstijd). Hieruit blijkt dat er in beide situaties zowel water op het spoor als op het perron ontstaat. Daarnaast worden veel spoorobjecten blootgesteld die resulteren in uitval, omdat de waterdiepte groter is dan de kritieke uitvalwaarde van die objecten.



Figuur 5.1 Uitval van spoorobjecten gevoelig voor wateroverlast bij een bui van 70 mm in 2 uur (herhalingsstijd 1:100 jaar) voor een spoorsegment bij station Bunde. De seinen en onderdelen van de draagconstructie zijn niet op de kaart weergegeven, omdat deze niet gevoelig zijn voor wateroverlast <2 m.



Figuur 5.2 Uitval van spoorobjecten gevoelig voor wateroverlast bij een bui van 140 mm in 2 uur (herhalingsstijd 1:1000 jaar) voor een spoorsegment bij station Bunde. De seinen en onderdelen van de draagconstructie zijn niet op de kaart weergegeven, omdat deze niet gevoelig zijn voor wateroverlast <2 m.

Op basis van de geografische uitval-analyse is het mogelijk te bepalen hoeveel objecten er uitvallen in welke categorie. Tussen de uitval van de 1:100 en 1:1000 bui zit niet veel verschil. Er zullen vooral meer gebouwen uitvallen in de 1:1000 situatie.

Tabel 5.1 Overzicht van het aantal uitgevallen spoorobjecten op basis van de 1:100 bui en de 1:1000 bui.

Objecttype	Aantal uitgevallen objecten bij 1:100 bui	Aantal uitgevallen objecten bij 1:1000 bui	Totaal aantal objecten in studiegebied
Fysieke spoortak	1	1	1
ES-Las	14	14	18
Overweg (inclusief paalvoeten en bellen)	3	3	21
Perron	1	2	2
GRS SSL Sectie (railpotten + railspoelen). Treindetectiesysteem	32	32	42
Kast (kabelsituatie)	9	9	16
Gebouw (kabelsituatie + relaishuis)	2	6	6
Overwegsteller	7 objecten met > 30 cm Mogelijke uitval, maar omdat het water niet meer dan een meter was bij Bunde, worden deze beschouwd als niet uitgevallen.	9 objecten > 30 cm Mogelijke uitval, maar omdat het water niet meer dan een meter was bij Bunde, worden deze beschouwd als niet uitgevallen.	14
Lichtsein/sein	0	0	8
Draagconstructie	0	0	20

## 5.2 Uitval van het elektriciteit- en wegennet

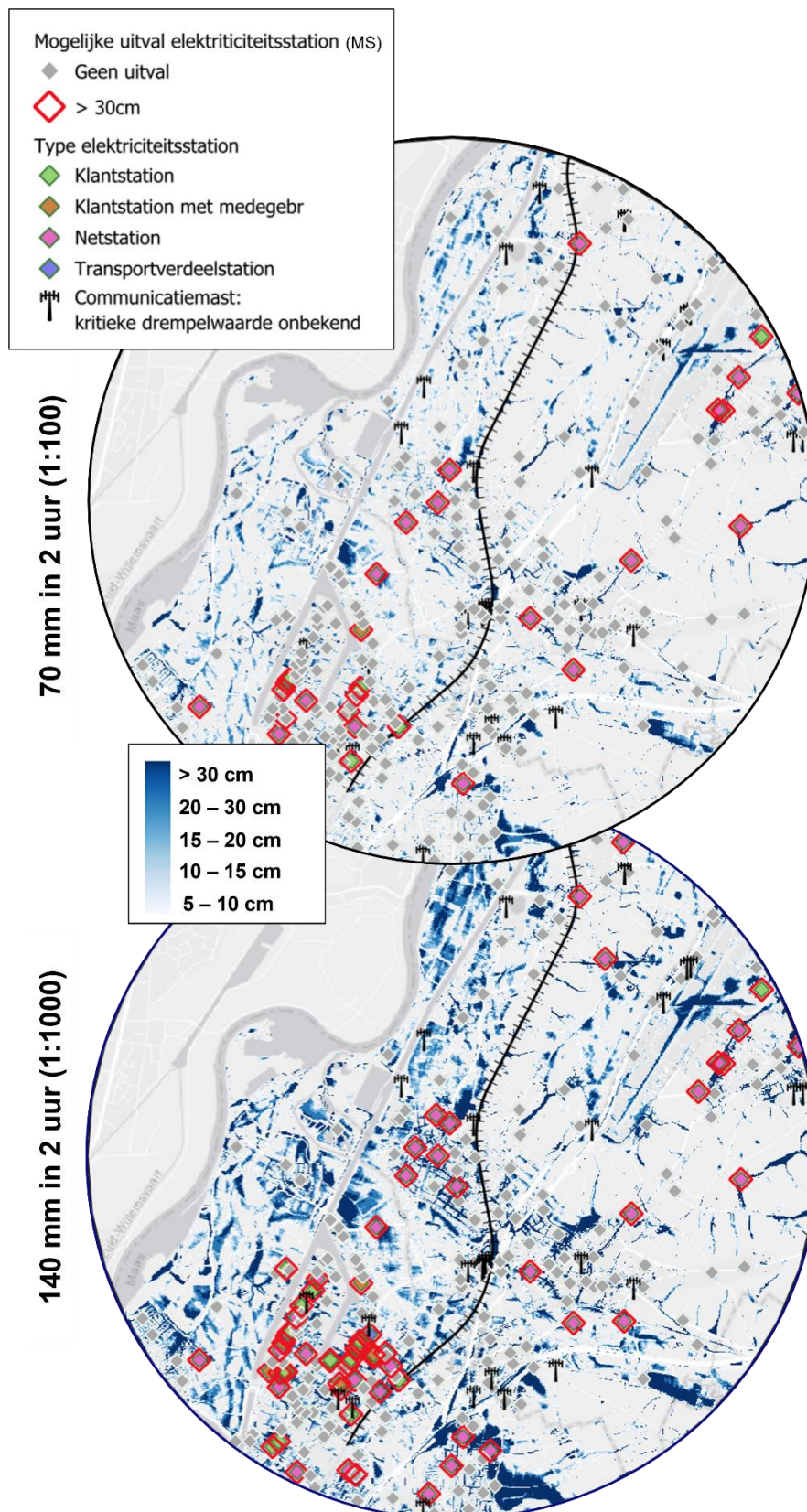
Bij de uitval-analyse voor het elektriciteits- en wegennet is het belangrijk om te vermelden dat het gebruikte waterbeeld van 1:1000 jaar te extreem is voor de situatie van 29 juni 2021, waarbij de herhalingstijd werd geschat op 1:350 jaar (Deltares, 2022). De 1:1000 bui, waarvan het waterbeeld wordt gebruikt, gaat uit van wateroverlast in de hele provincie, terwijl de wateroverlast in de casus meer lokaal geconcentreerd was. Tijdens het event van 29 juni was er echter op meerdere plekken in Limburg extreme regenval en daardoor wateroverlast. Hoewel deze waterbeelden niet volledig overeenkomen met de werkelijkheid, zijn ze toch gebruikt om een indruk te krijgen van de kwetsbaarheden van het elektriciteits- en (hoofd)wegennet.

Figuur 5.3 geeft de resultaten van de analyse voor elektriciteitsstations weer. Op deze kaart is te zien welke elektriciteitstations (middenspanning) worden blootgesteld aan >30cm water. Deze middenspanningsstations hebben een kritieke uitvalwaarde van 45cm (zoals bepaald in NKWK, 2024). Omdat de gebruikte waterdieptekaarten maar tot maximaal >30cm gaan, is het moeilijk om precies te zeggen of de stations zullen uitvallen. Over het algemeen kan stroom bij uitval omgeleid worden bij uitval.

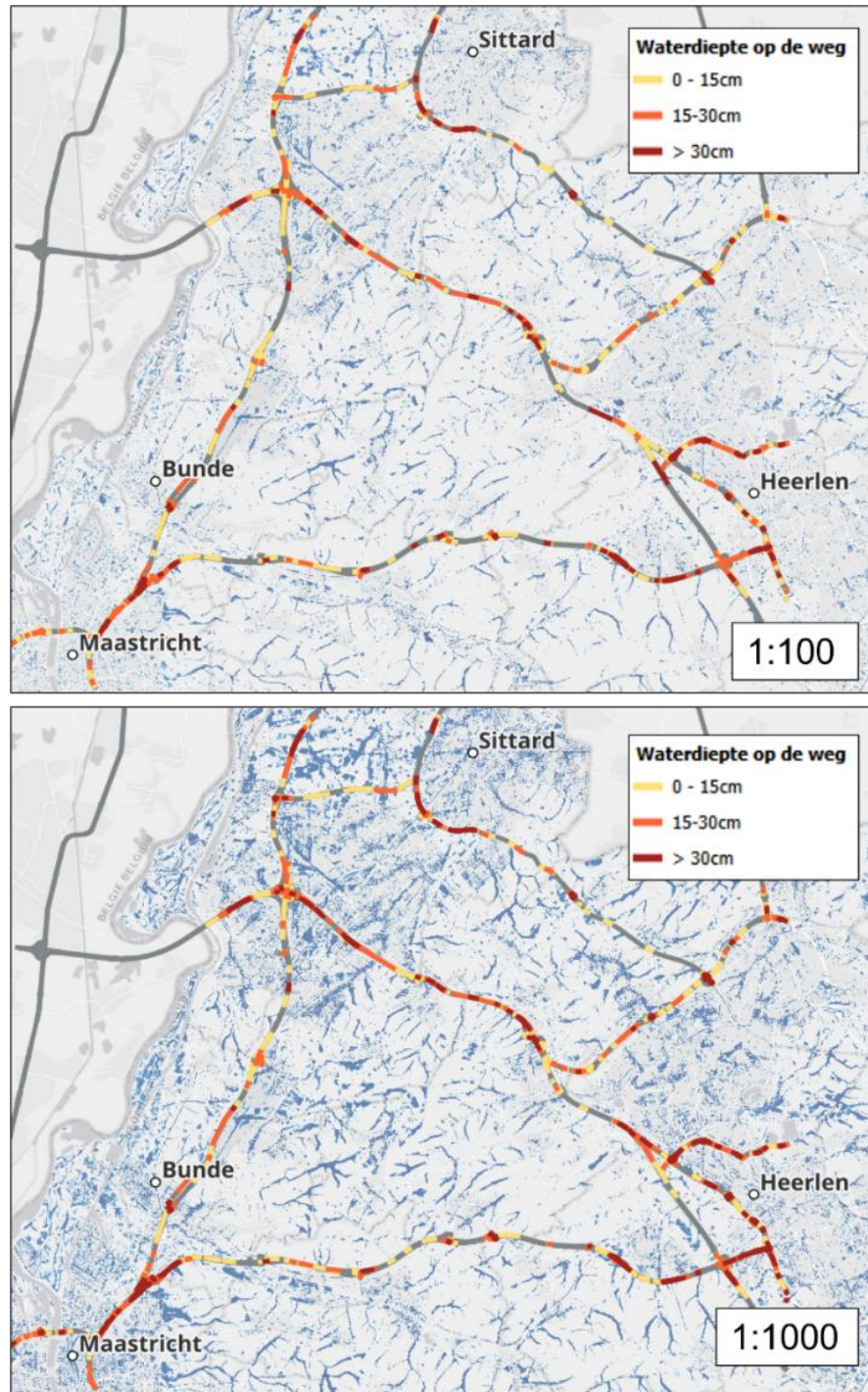
Indien meerdere objecten uitvallen in hetzelfde gebied wordt dit lastiger. Het is niet bekend wat de uitval van de middenspanningstations exact betekent voor het spoor. Het is denkbaar dat objecten van het spoor niet meer functioneren als deze uitvallen, zoals aangegeven door de experts van ProRail. Ook zou de energievoorziening naar de treinen kunnen uitvallen. Voor telecommasten is er nog geen kritieke drempelwaarde bekend, waardoor uitval van telecom niet kwantitatief is meegenomen in deze analyse.

Ook voor het wegennet is een blootstellings- en uitval-analyse gedaan. Figuur 5.4 laat zien dat op verschillende delen van de snelweg meer dan 30 cm water op de weg staat bij zowel de 1:100 als 1:1000 bui. Bij waterdieptes van meer dan 30cm zijn wegen ontoegankelijk voor personenauto's en zullen hulpdiensten ook ernstige hinder ondervinden (Pregolato et al., 2017). Het uitvallen van delen van het hoofdwegennet betekent dat het niet langer mogelijk is om over deze snelwegdelen te rijden, en dat deze vanaf de oprit worden afgesloten. Automobilisten en ander wegverkeer zullen (via het lokale wegennet) naar alternatieve routes moeten zoeken, waarbij de beschikbaarheid hiervan waarschijnlijk ook zeer beperkt zal zijn door wateroverlast. Daarnaast zal er op de wegen die nog beschikbaar zijn drukte en mogelijke verkeersinfarcten ontstaan, zeker als een dergelijke situatie optreedt tijdens spitsuren. Dit geldt vooral bij de meer extreme weersomstandigheden van een 1:1000 bui waarbij meer wegen worden geraakt.

Het is hierbij wel belangrijk om te noemen dat er onzekerheden zijn in relatie tot wateroverlast en het hoofdwegennet. Doorgaans is het hoofdwegennet uitgerust met pompen en afwatering. Desalniettemin is het de vraag of dit water effectief kan worden weggepompt als er in de omgeving ook wateroverlast is (Deltares, 2023). Daarnaast is het belangrijk om op te merken dat de waterbeelden die we in deze analyse gebruiken, zijn samengevoegd tot een nationale kaart. In werkelijkheid zal dit soort intense buien vaker lokaal optreden zoals in de casus van 29 juni 2021. Desalniettemin heeft de extreme regenval van juli 2021 gedemonstreerd dat dit ook op grotere schaal voor kan komen.



Figuur 5.3 Overzicht van mogelijk uitval van elektriciteitsstations middenspanning door blootstelling aan een waterdiepte van meer dan 30 cm.



Figuur 5.4 Overzicht van waterdieptes op de weg voor de 1:100 bui (boven) en de 1:1000 bui (onder).

## 6 Gevolgbepaling: naar maatschappelijke impact

In dit hoofdstuk wordt voortgebouwd op de resultaten uit de hiervoor gepresenteerde uitvalanalyse. Nu bekend is hoeveel spoorobjecten falen door wateroverlast, kan de stap worden gemaakt naar een gevolgbepaling van het niet meer kunnen reizen met de trein. In dit hoofdstuk leggen we eerst stapsgewijs uit wat de componenten zijn die berekend moeten worden om maatschappelijke impact te kunnen kwantificeren. Daarna passen we de formules toe op de casus Bunde en vullen we deze in met getallen.

### 6.1 Uitwerking berekening maatschappelijke impact op de casus

Om de aanpak voor maatschappelijke impact concreter te maken, wordt deze uitgewerkt voor de geselecteerde casus rondom Bunde. Hieronder volgt de toepassing van de hierboven gedefinieerde formules, met een onderbouwing van de gekozen waarden.

#### 6.1.1 Bepalen van functieherstelduur

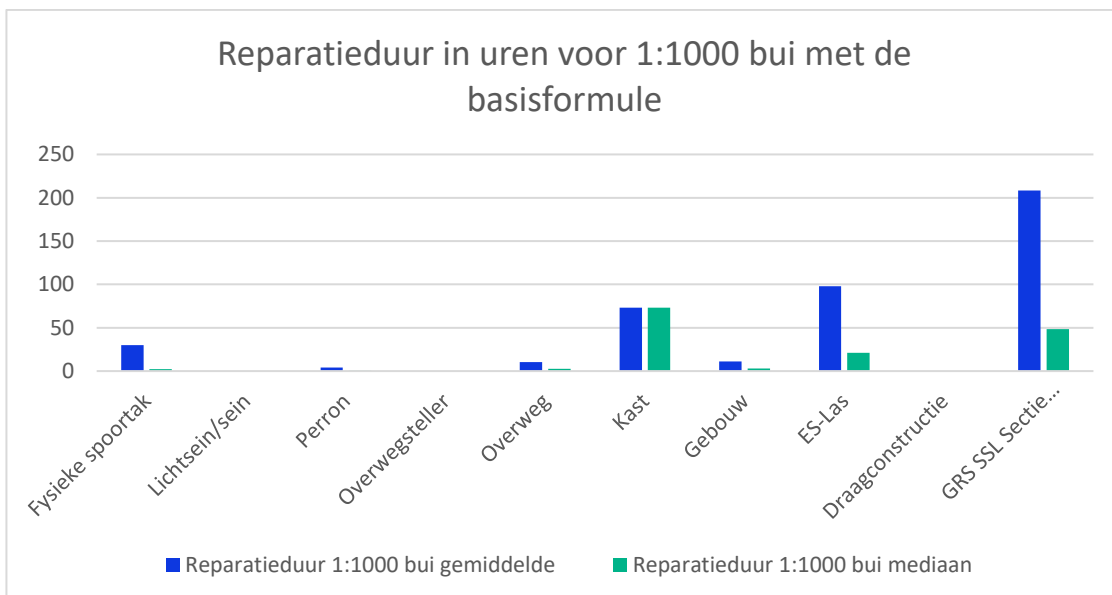
Om de functieherstelduur te berekenen zijn er waardes geschat voor de duur van het event ( $t_{\text{event}}$ ), de reparatieduur ( $t_{\text{reparatie}}$ ) en de benodigde tijd tot volledige hervatting van de dienstregeling ( $t_{\text{HD}}$ ).

##### 6.1.1.1 Duur wateroverlast

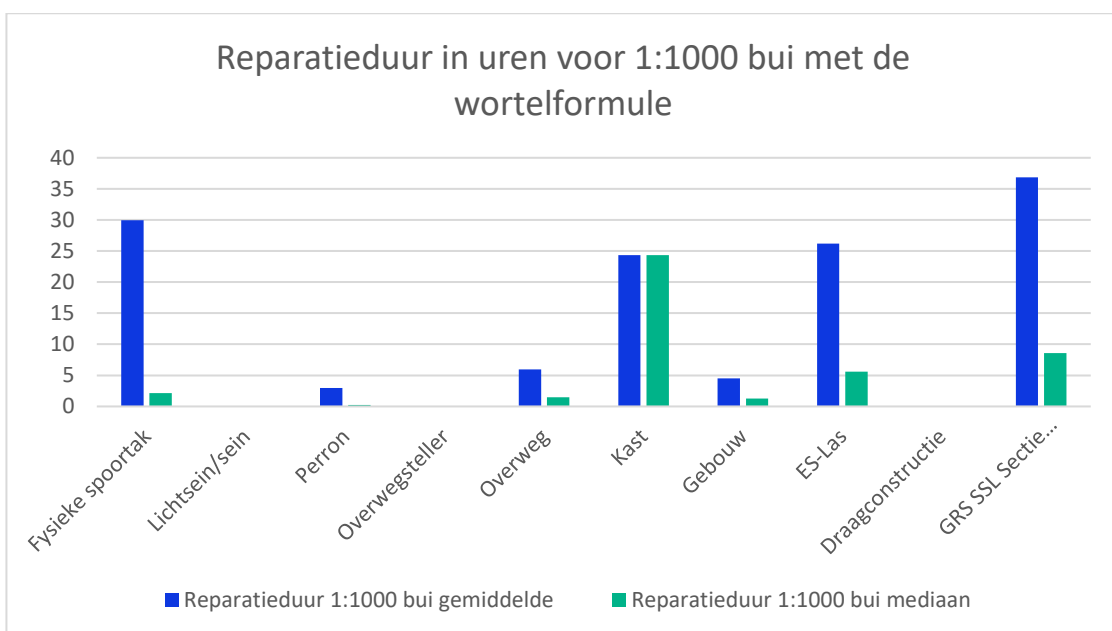
Op basis een [archief van treinstoringen](#) in Nederland kunnen we een schatting maken van de duur van het event van 29 juni, 2021. Volgens deze pagina ontstonden de eerste storingen in de treindienst tussen Beek-Elsloo en Bunde rond 19.50. 5 minuten later werd er gemeld dat er tussen Sittard en Maastricht geen treinen meer rijden door de weersomstandigheden. Dit hield aan tot tenminste 23:55, waarna een verwacht moment van hervatting dienstregeling werd geven van 30 juni 18:30. Dit suggereert dat er een inspectie mogelijk was en vanaf dit moment de herstelwerkzaamheden konden worden gestart. Op basis van deze gegevens schatten we de duur van de wateroverlast op het spoor op **4 uur**.

##### 6.1.1.2 Reparatieduur

Beide reparatieduur-methoden zijn uitgewerkt voor de casus bij Bunde. De reparatietijden per spoorobject zijn eerder uitgewerkt in het datahoofdstuk (Tabel 4.4). Deze reparatietijden per spoorobject zijn gecombineerd met de informatie over het aantal uitgevallen objecten per objecttype (Tabel 5.1) en zijn ingevuld in zowel de seriële reparatieformule als de parallelle reparatieformule. De resultaten hiervan zijn uitgesplitst in de 1:100 en 1:1000 bui en zijn gevisualiseerd in Figuur 6.1 en Figuur 6.2. Per objectsoort wordt hier de reparatieduur gevisualiseerd als gevolg van de aanpak met seriële en parallelle reparatie. Er zijn hierbij twee opties uitgewerkt: de mediaan en gemiddelde reparatieduur.



Figuur 6.1 Vergelijking van gemiddelde en mediaan reparatieduur voor en 1:1000 bui per object op basis van de seriële formule.



Figuur 6.2 Vergelijking van gemiddelde en mediaan reparatieduur voor en 1:1000 bui per object op basis van de parallelle formule.

De berekende reparatietijden kunnen we samenvatten voor de twee verschillende methodes. Omdat er tussen de 1:100 en 1:1000 bui geen grote verschillen in getroffen aantal objecten zit, is de reparatieduur in dagen nagenoeg gelijk. Daarom vatten we in onderstaande tabel de resultaten in een keer samen voor beide buien.

Tabel 6.1 Overzicht gemiddelde en mediaan reparatieduur in dagen op basis van seriële en parallelle reparatie

Reparatieduur in dagen	Seriële reparatie	Parallele reparatie
Gemiddelde reparatieduur	8.7	1.6
Mediaan reparatieduur	3.0	1.0

De resultaten hebben we gevalideerd met ProRail. Hieruit bleek dat de totale overlast bij Bunde ongeveer een dag heeft geduurd. Op basis van deze casus zou de methode op basis van parallelle reparatie hier de beste benadering zijn reparatieduur. Het maakt relatief gezien niet zoveel uit of de gemiddelde of mediaan reparatieduur wordt genomen in de deze formule. We kiezen er in deze casus voor om de mediaan parallelle reparatie te hanteren, waarbij met een reparatieduur van 24 uur. Per casus moet hier een keuze in gemaakt worden, het liefst met data om de resultaten te valideren.

#### 6.1.1.3 Duur hervatten dienstregeling

De experts van ProRail hebben aangegeven dat de duur tot volledige hervatting van de dienstregeling na herstel meestal 1 tot 2 uur duurt. Daarbij werd aangegeven dat de situatie bij Bunde redelijk simpel is als je kijkt naar het spoor; 1 traject en geen wisselbanen. Op basis van deze informatie stellen we daarom de  $t_{HD}$  vast op 1 uur.

Op basis van de hierboven uitgewerkte getallen, kunnen we de volgende waardes invullen voor de casus:

- $t_{event}$ : 4 uur (duur van wateroverlast).
- $t_{reparatie}$ : 24 uur (reparatieduur).
- $t_{HD}$ : 1 uur (tijd tot volledige hervatting van de dienstregeling).

Hiermee komen we voor de functieherstelduur (FHD) op een **totaal van 29 uur**.

#### 6.1.2 Bepalen van persoonsverliesuren en monetaire schade

Om de monetaire schade te berekenen gebruiken we de eerder uitgewerkte formules voor persoonsverliesuren en de waarde voor de Value of Time. Naast de zojuist berekende functieherstelduur, hebben we hiervoor waardes nodig voor het aantal uitgevallen treinen per uur (UT), het aantal reizigers per trein (TR), en de omreistijd per persoon in uren.

##### 6.1.2.1 Uniform aantal uitgevallen treinen (UT)

Voor het aantal uitgevallen treinen per uur maken wij gebruik van de informatie die ProRail geleverd heeft. Uit die gegevens komt naar voren dat er per werkdag 185 reizigerstreinen over het traject bij Bunde rijden. In het weekend zijn dit er minder, namelijk 87 treinen. Omdat 29 juni 2021 op een dinsdag viel gaan we uit van 185 treinen per dag, wat voor het aantal uitgevallen treinen per uur (UT) uitkomt op 9,25 treinen.

##### 6.1.2.2 Gemiddeld aantal getroffen reizigers (GR)

Voor het aantal reizigers per trein is er ook gebruik gemaakt van de data geleverd door ProRail. Dit komt neer op 128 reizigers per trein.

### 6.1.2.3 Gemiddelde omreistijd per persoon ( $t_{\text{extra}}$ )

Om de omreistijd te berekenen zijn er grofweg twee groepen reizigers waarmee rekening gehouden moet worden: 1) een groep reizigers die tussen Maastricht en Sittard reizen en 2) de groep reizigers die op het traject Maastricht-Sittard (met de stoptrein) in of uitstappen. Voor de eerste groep is er gekeken naar de mogelijke omreisroutes via het spoor voor het traject Maastricht – Sittard. Hierbij wordt aangenomen dat omreizen via het spoor nog mogelijk is en er geen extra bussen zijn ingezet. Op basis van Figuur 4.6, een schematische weergave van het spoor op kaart, is vast te stellen dat er een omreisroute via Heerlen mogelijk is. De NS dienstregeling geeft aan dat deze route, inclusief overstaptijd, ongeveer 45 minuten duurt. Aangezien de minimale reistijd tussen Maastricht en Sittard normaal gesproken 15 minuten is, betekent deze omreisroute een extra reistijd van 30 minuten

Voor de groep die naar of van Bunde of een van de tussenliggende stations reizen, is het mogelijk om de bus te nemen (zolang de weg nog redelijkerwijs toegankelijk is). De reistijd per bus voor Bunde-Maastricht is 30 minuten, waar deze normaal per trein 5 minuten is. Dit betekent een extra reistijd van 25 minuten (0,4 uur). De reistijd per bus voor Bunde-Sittard is tussen de 55 en 65 minuten, een reis die normaal per trein 15 minuten duurt. Hier ervaart de reiziger dus een extra reistijd van tussen de 40 en 50 minuten (ofwel afgerond tussen 0,66 en 0,85 uur).

Samengevat gebruiken we de volgende waardes:

- **FHD**: 29 uur.
- **UT**: 9,25 treinen per uur.
- **TR**: 128 treinreizigers per trein.
- $t_{\text{extra}}$ : 0,4 en 0,85 uur per persoon.

Hiermee komen we uit op:

- $29 \text{ uur} * 9,25 \text{ treinen/uur} * 128 \text{ personen/trein} * 0,4 \text{ tot } 0,85 \text{ uur/persoon} = \text{tussen de } 14.000 \text{ en } 29.000 \text{ persoonsverliesuren.}$

Op basis van deze berekeningen en een value of time van 10,08 euro per uur (Rijkswaterstaat, n.d.), komt de totale economische schade voor reizigers door de spooruitval in Bunde uit op afgerond tussen de **140.000 en 290.000 euro's**.

Deze aanpak is een versimpelde versie van de realiteit, waarbij we geen rekening houden met het aantal reizigers per beschreven groep. Je zou deze berekening kunnen verbeteren door de berekening van het persoonsverliesuren apart te doen per groep en daarna bij elkaar op te tellen. Bijvoorbeeld: 80% van de reizigers reizen tussen Maastricht en Sittard (groep 1) en 20% van de reizigers stappen in of uit op het traject Maastricht-Sittard (groep 2). Hiervoor heb je gedetailleerde informatie nodig van het in-uitstap gedrag van de reizigers.

### 6.1.3 Goederentreinen en overige treinen

Naast de persoonsverliesuren en de hieruit volgende monetaire schade zijn er een aantal andere elementen met gevolgen voor de maatschappij die momenteel niet worden meegenomen. Een belangrijk aspect hiervan is de impact van de uitval van het spoor op goederentreinen. Deze goederentreinen vervoeren een breed scala aan grondstoffen en goederen, die door extreme regenval sterk vertraagd kunnen worden.

De vertraging van goederentreinen heeft meerdere negatieve effecten, zowel direct als indirect. Een direct gevolg is dat de vertragingen tot hogere logistieke kosten kunnen leiden, omdat alternatieve transportmethoden moeten worden ingezet of omdat goederen langer opgeslagen moeten worden. Een belangrijk cascade-effect is dat de uitval van functie spoor kan leiden tot verstoringen in de toeleveringsketen, wat resulteert in tekorten aan essentiële

goederen en grondstoffen. Dit kan op zijn beurt de productieprocessen in verschillende industrieën vertragen of stilleggen.

Voor Bunde weten we op basis van de data van ProRail dat er op dit traject nog 13 goederentreinen en 10 overige treinen (voornamelijk diensttreinen die van de ene plek naar de andere moeten worden verplaatst). Ook is er bij navraag aangegeven dat deze treinen de meeste vertraging ondervinden. Voor deze treinen werken ze met 'tijdslots', wanneer deze gemist wordt moeten de desbetreffende treinen op het volgende open slot wachten. In het geval van zulke events worden deze slots eerst gevuld met de reizigerstreinen, deze hebben een hogere prioriteit, waardoor de goederentreinen en overige treinen veel langere vertragingen oplopen en daarmee relatief veel schade ondervinden. Voor een vervolgstudie zou het goed zijn om dit in meer detail te bekijken en hier de formules en berekeningen op aan te passen.

# 7 Ketenafhankelijkheid

De analyse tot zover beschrijft de impact op de maatschappij als het spoor “direct” uitvalt door wateroverlast. Hierin zijn de afhankelijkheden van andere netwerken niet meegenomen. Het is uitdagend om de volledige impact van deze afhankelijkheden te kwantificeren. Tegelijkertijd is het in het geval van grootschalige wateroverlast tevens zeer aannemelijk dat andere kritieke netwerken ook storingen of uitval zullen ondervinden, wat invloed heeft op de uiteindelijke herstelduur van het spoor.

Om meer grip te krijgen op de invloed van deze afhankelijkheden, beschrijven we in dit hoofdstuk een aantal verhaallijnen. Deze verhaallijnen illustreren de extra complexiteit die in overweging moet worden genomen wanneer de afhankelijkheden van het spoorstelsel worden meegenomen. Vervolgens wordt per verhaallijn verkend hoe dit vertaald kan worden in een extra component of verdere uitdieping van een component in de verschillende formules.

## 7.1 Verhaallijn 1: Langdurige Stroomuitval en Wateroverlast

**Situatie:** Hevige regenval leidt tot wateroverlast op het spoor en veroorzaakt stroomuitval in de regio.

- **Impact op Spoor:** Door de stroomuitval in de regio vallen elektrische installaties zoals seinen en wissels uit. Dit resulteert in de uitval van het functie spoor. Daarbij kunnen zonder stroom pompen en afwateringssysteem niet functioneren, waardoor wateroverlast op het spoor langer aanhoudt. Bij station Bunde zijn overigens geen pompen aanwezig, waardoor dit een hypothetische aanname is.
- **Herstel:** Het herstel van de stroomvoorziening duurt langer dan de benodigde reparatie van het spoor. Hierdoor houden de problemen op het spoor langer aan.
- **Gevolgen:** Treinen kunnen niet rijden, stations kunnen onder water komen te staan, en er kan schade ontstaan aan de infrastructuur. De herstelwerkzaamheden worden vertraagd door de aanhoudende stroomuitval.

Allereerst illustreert deze verhaallijn dat door de uitval van de stroom de duur van de wateroverlast zelf langer kan aanhouden, dit zal zeker het geval zijn als een hoogspanningsstation uitvalt. Dit betekent in de berekening een verhoogde waarde voor  $t_{event}$  in formule voor functieherstelduur. Afgeleid uit de berekeningen onder vergelijking 6 betekent elk uur dat de functieherstelduur toeneemt op het traject van Bunde, een extra 888 reizigers die worden getroffen en daarmee een extra 9000 euro schade aan persoonsverliesuren.

Verder beschrijft de verhaallijn hoe de reparatieduur van de stroomvoorziening langer kan duren dan de reparatieduur van het spoor zelf. In dit geval is de reparatieduur van de stroomvoorziening maatgevend. In andere woorden; de totale reparatieduur is gelijk aan de maximale tijd die nodig is om ofwel de stroomvoorziening te herstellen, ofwel het spoor te repareren, afhankelijk van welke van de twee langer duurt. Dit kan op de volgende manier in de formule voor functieherstelduur (FHD) worden opgenomen:

$$FHD = t_{event} + t_{reparatie} + t_{HD} \quad (\text{Verg. 6})$$

Waarbij in dit geval:

$$t_{\text{reparatie}} = \max(t_{\text{rep\_spoor}}, t_{\text{rep\_elektra}}).$$

$t_{\text{event}}$  = duur van wateroverlast event.

$t_{\text{HD}}$  = duur hervatting dienstverlening.

Belangrijk om op te merken is dat hierin het herstel van de stroomvoorziening en het herstel van het spoor als onafhankelijke processen worden beschouwd. Dit betekent dat de tijd die nodig is om elk van deze componenten te repareren, niet direct afhankelijk is van de andere componenten. In werkelijkheid is dit niet altijd zo. Er zijn uitzonderingen te bedenken waar het herstel van een spoorobject pas kan worden uitgevoerd of afgerond nadat de stroomvoorziening hersteld is, bijvoorbeeld door storingen die zijn ontstaan als gevolg van de stroomuitval. Deze "extra herstelduur" kan je dan optellen bij het component  $t_{\text{rep\_spoor}}$

$$t_{\text{reparatie}} = \max((t_{\text{rep\_spoor}} + t_{\text{rep\_storing}}), t_{\text{rep\_elektra}}) \quad (\text{Verg. 7})$$

Dit is echter één manier om deze extra duur mee te nemen, waar opmerkingen bij te plaatsen zijn. We hebben geen uitgebreide analyse kunnen doen om te bepalen wat de beste manier is om dit mee te nemen. Het zou goed zijn om hier in een vervolgstudie nog naar te kijken.

## 7.2 Verhaallijn 2: Uitval van Wegennet en Bereikbaarheid

**Situatie:** Hevige regenval leidt tot wateroverlast op het spoor en veroorzaakt ook uitval van het wegnnet, waardoor bereikbaarheid een probleem wordt.

- **Impact op Spoor:** De uitval van het wegnnet belemmert de toegang tot kritieke locaties voor herstelwerkzaamheden. Dit vertraagt de inzet van herstelteams en de aanvoer van benodigde materialen.
- **Herstel:** De herstelwerkzaamheden aan het spoor worden vertraagd door de beperkte bereikbaarheid. Dit leidt tot langere uitvaltijden en grotere verstoringen in het treinverkeer.
- **Gevolgen:** De gecombineerde impact van wateroverlast en beperkte bereikbaarheid resulteert in aanzienlijke vertragingen en verstoringen in het treinverkeer. De herstelwerkzaamheden nemen meer tijd in beslag, wat de impact op reizigers en goederenvervoer vergroot.

In dit geval kan de beperkte bereikbaarheid op twee manieren van invloed zijn:

1. **Vertraging van de eerste inspectie (voor de melding):** Dit kan gebeuren doordat het langer duurt om bij de locatie te komen.
2. **Verlenging van de reparatieduur:** Dit komt doordat de benodigde middelen en menskracht er langer over doen om ter plaatse te komen nadat de melding is gedaan.

Om rekening te houden met de extra aanrijdtijd voor de inspectie, voegen we een extra component toe aan de formule van functieherstelduur;  $t_{\text{extra\_i}}$ . Om de extra tijd in de reparatieduur mee te nemen, voegen we een extra variabele toe aan  $t_{\text{reparatie}}$ . De aangepaste formules worden:

$$FHD = t_{\text{event}} + t_{\text{reparatie}} + t_{\text{HD}} + t_{\text{extra\_i}} \quad (\text{Verg. 8})$$

Met:

$$t_{\text{reparatie}} = \max((t_{\text{rep\_spoor}} + t_{\text{extra\_r}}), (t_{\text{rep\_elektra}} + t_{\text{rep\_storing}})).$$

Waarbij:

$t_{\text{extra\_r}}$  = de extra tijd nodig is om op locatie te raken voor de reparatie.

Ook hier geldt een extra 888 getroffen reizigers en daarmee 9000 euro schade aan persoonsverliesuren per uur extra functieherstelduur.

### 7.3 Verhaallijn 3: Beperkte Beschikbaarheid van Omreisroutes

**Situatie:** Hevige regenval leidt tot wateroverlast op het spoor, waardoor ook andere spoorlijnen onbruikbaar worden. Tegelijkertijd veroorzaakt de wateroverlast ook uitval van het wegennet.

- **Impact op Spoor:** De beperkte beschikbaarheid van andere spoortrajecten en de uitval van het wegennet verergeren de situatie aanzienlijk. Reizigers en goederenvervoer moeten gebruikmaken van langere en minder efficiënte spoorroutes, wat leidt tot aanzienlijke vertragingen. Daarbij maakt de uitval van het wegennet het moeilijker voor reizigers om een alternatieve opstaplocatie te vinden en/of om overstappen te maken tussen verschillende vervoersmiddelen. Voor Prorail is het in deze situatie ook lastiger om bussen in te zetten als alternatief voor de trein.
- **Herstel:** Het herstel van zowel de spoor-omreisroutes als de bereikbaarheid via het wegennet duurt lang. De beperkte capaciteit van de alternatieve spoorroutes en de ontoegankelijkheid van wegen vertragen de inzet van herstelteams en de aanvoer van benodigde materialen.
- **Gevolgen:** De gecombineerde impact leidt tot ernstige verstoringen en langere reistijden voor reizigers en goederenvervoer. De omreistijden nemen toe doordat reizigers gedwongen worden om nog langere routes te nemen of zelfs te wachten tot de wegen weer toegankelijk zijn. De impact op de logistiek en het dagelijkse woon-werkverkeer is aanzienlijk.

Deze verhaallijn illustreert de complexiteit door de afhankelijkheden en cascade-effecten rondom het spoor. Het toont opnieuw dat de bereikbaarheid belangrijk is voor spoedig herstel, zoals in verhaallijn 2 ook naar voren kwam. Daarnaast toont verhaallijn 2 ook dat het functioneren van het wegennet essentieel is voor de gevolgenbeperking bij uitval van het spoor, omdat er dan alternatieve routen via de weg mogelijk zijn en vervangende bussen kunnen worden ingezet om de omreistijden te beperken.

Wanneer het wegennet beperkt bruikbaar is en de omreisroutes daardoor beperkt zijn, zal de omreistijd ( $t_{\text{extra}}$  in verg. 5) sterk toenemen. Dit is zeer aannemelijk als je kijkt naar uitvalkaarten van het wegennet (Figuur 5.4). Uitgaande van de waardes aangenomen voor het berekenen van de persoonsverliesuren en monetaire schade voor Bunde, is er een toename van 57684.48 euro's schade per elke 10 minuten extra omreistijd. Dit leidt tot een verdubbeling van de omreistijd, wat een verdubbeling van de monetaire schade betekent. Dit toont aan dat de beperkingen en/of uitval van het wegennet leidt tot aanzienlijke hogere schades.

Hierboven hebben we complexiteit van de uitval van het wegennet versimpeld en vertaald naar een toename in omreistijd. Dit is echter niet volledig correct; voor reizen per auto geldt er immers een andere value of time dan voor treinreizigers. Daarnaast is het zeer complex om de omreistijd via het wegennet te bepalen aangezien dit sterk afhankelijk is van de begin en eindlocatie, de mogelijke omreisroutes en drukte op de weg.

## 8 Conclusie

In dit rapport staat de hoofdvraag centraal: "Hoe veroorzaakt de uitval van een kritiek infrastructureel object de uitval van een vitale functie en welke maatschappelijke impact heeft dit op een gebied?" Beantwoording van die vraag is nodig om te begrijpen welke eisen aan vitale objecten en functies gesteld moeten worden om maatschappelijke ontwrichting te voorkomen.

Vanwege de complexiteit van de vraag is ervoor gekozen om de vraag eerst voor een casus te beantwoorden. In deze studie is een aanpak ontwikkeld die ook toegepast kan worden in andere casussen en voor andere vitale functies. In de aanpak komen alle stappen terug van doorwerking van uitval van objecten tot uitval van de functie en impact voor de maatschappij, rekening houdend met ketenafhankelijkheden tussen verschillende functies en objecten.

Gebleken is dat de volgende stappen gebruikt kunnen worden om de maatschappelijke impact in beeld te brengen:

- Impactpad-analyse om te begrijpen hoe falen van objecten samenhangt en hoe dit uiteindelijk leidt tot uitval van de functie transport.
- Dataverzameling van waterbeelden en van de vitale infrastructuurobjecten en het gebruik van de vitale functies.
- Uitval-analyse van kritieke objecten, door middel van kritieke uitvalwaardes die inzicht geven in de waterdiepte waarbij falen van de objecten optreedt.
- Impact-analyse door vaststellen van de duur van uitval in combinatie met de gevolgen die dat heeft voor de gebruikers (de reizigers).
- Meenemen van ketenafhankelijkheden door verhaallijnen op te stellen en formules aan te passen.

Het opstellen van impactpaden legt de expertise van deskundigen vast en analyseert de werking van infrastructurele objecten binnen hun netwerk. Impactpaden tonen aan dat blootstelling van spoorobjecten aan wateroverlast tot verschillende gevolgen kan leiden, maar uiteindelijk dezelfde impact heeft: uitval van de infrastructurele functie.

Het verzamelen van geschikte data is tijdrovend, maar cruciaal voor een gedegen analyse. Naast het vinden van de juiste data, zoals de geografische locatie van spoor-assets, is het belangrijk deze data goed te begrijpen. In deze casus is gebruikgemaakt van de expertise van ProRail en hun gedetailleerde database. Het selecteren van cruciale en watergevoelige assets vereist gedetailleerde kennis. Met de juiste data en begrip is een complexe analyse mogelijk. Kritieke uitvalwaardes helpen modelleren welke spoor-assets falen door wateroverlast.

De reparatieduur van een vitale functie kan worden gekwantificeerd door het aantal uitgevallen objecten te combineren met hun reparatieduur. Verschillende methodes zijn doorgerekend en een formule met parallelle reparatiemogelijkheden benadert de werkelijkheid het best.

Maatschappelijke impact kan worden bepaald met generieke formules voor functieherstelduur gekoppeld aan persoonsverliesuren. Deze aanpak is toepasbaar op meerdere casussen en geeft inzicht in de maatschappelijke impact van de uitvalduur van een vitale functie. De formule in dit rapport is toegespitst op mobiliteit.

Ketenafhankelijkheden zijn ook meegenomen in de analyse. Bijvoorbeeld, uitval van elektriciteit leidt tot problemen op het spoor. Voor mobiliteit is er ook een afhankelijkheid van de weg. Wateroverlast die zowel weg als spoor raakt, vergroot de bereikbaarheidsproblemen en impact op reizigers. Door formules aan te passen met ketenafhankelijkheid, kan deze impact ook worden meegenomen.

Wanneer we deze aanpak en formules gebruiken om de maatschappelijk impact te bepalen voor de casus Bunde komen we uit op ongeveer **34.000 getroffen reizigers**, tussen de **14.000 en 29.000 persoons-verliesuren** en een totale economische schade voor reizigers van tussen de **140.000 en 290.000 Euro**. Voor deze casus blijkt ook dat voor elke 10 minuten extra *omreistijd* er een toename van ongeveer 57.700 euro schade optreedt. Dit toont aan dat de beperkingen en/of uitval van het wegennet leidt tot aanzienlijke hogere kosten. Dit is enkel de schade voor de getroffen reizigers. De goederentreinen en overige treinen (voornamelijk diensttreinen die van de ene plek naar de andere moeten worden verplaatst) zijn hierin niet meegenomen.

*Dit rapport is opgesteld mede op basis van informatie aangeleverd door deskundigen werkzaam bij ProRail. Wij bedanken ProRail voor de bijdragen en deelname aan expertsessies. De aanpak en bevindingen zijn door ProRail voorafgaand aan de publicatie voorgelegd en akkoord bevonden (28 februari 2025).*

## 9 Lessen en aanbevelingen

Het begrijpen van de manieren waarop infrastructurele functies kunnen falen, helpt bij het voorbereiden van deze functies op uitval door extreem weer. De ontwikkelde aanpak van dit rapport maakt het voor andere aanbieders gemakkelijker om grip te krijgen op hoe hun functies kunnen falen en wat de gevolgen daarvan kunnen zijn. Onze gedemonstreerde aanpak bestaat uit de stappen: opstellen impactpaden, dataverzameling, uitvalanalyse, en impactanalyse (gevolgbepaling en ketenafhankelijkheid).

### 9.1 Impactpaden

De impactpaden bieden een relatief eenvoudige manier om kwalitatief de gevolgen en keteneffecten binnen het netwerk te begrijpen. Het tekenen van impactpaden is waardevol om het falen inzichtelijk en communiceerbaar te maken. Ook wanneer er geen kwantitatieve gegevens beschikbaar zijn, kan deze methode nog steeds waardevolle inzichten bieden in de complexe samenhang van assets in hun systeem en hoe uitval van deze assets kan leiden tot functieverlies. Het vormt op deze manier een goede basis en praatplaat om te komen tot de juiste analyses in het vervolg.

#### Aanbeveling 1

Stel impactpaden op voor vitale infrastructurele functies om inzicht te krijgen in mogelijke faalpaden van de vitale functie.

### 9.2 Dataverzameling

Voor een goede kwantitatieve analyse is betrouwbare data essentieel. Het verkrijgen van deze data kan tijdrovend zijn. Verschillende databronnen zijn vereist: rondom objecten en netwerken, gebruikersdata en dreigingsdata. Bij wateroverlast is het bijvoorbeeld belangrijk om goede waterbeelden te hebben om de daadwerkelijke schades te kunnen bepalen en te valideren. Het is belangrijk om het doel voor ogen te houden en daarmee hoog-detailanalyses alleen toe te passen wanneer deze nodig zijn en/of cruciale kennisgaten vullen.

#### Aanbeveling 2

Zorg voor representatieve data van de belangrijkste assets, gebruikersdata en hazard data maar houd hierbij het doel voor ogen: pas detailanalyses alleen toe als deze noodzakelijk zijn

### 9.3 Uitvalanalyse

De uitvalanalyse combineert het dreigingsbeeld met inhoudelijke kennis en de locaties van objecten die gevoelig zijn voor de dreiging. Het identificeren van kritieke uitvalwaardes is hierbij een cruciale stap en zorgt ervoor dat een gedegen inschatting kan worden gemaakt van object-uitval door wateroverlast. Er zijn databases beschikbaar met kritieke uitvalwaardes. Maar in de praktijk is het erg zinvol en relatief eenvoudig mogelijk om specifieke uitvalwaardes te verkrijgen van de assets die horen bij de vitale functie. Consultatie van assetmanagers en business continuity managers is nuttig.

#### Aanbeveling 3

Breng kritieke uitvalwaardes in kaart voor de belangrijkste objecten zodat de stap kan worden gezet van blootstelling naar een uitval-inschatting.

### 9.4 Impactanalyse

Het verkrijgen van grip op maatschappelijke impact kan worden bereikt door de impactpaden kwantitatief in te vullen met de ontwikkelde formules. Deze voorbeeldformules voor maatschappelijke impact zijn in de basis vrij eenvoudig aan te passen voor andere infrastructurele functies. De bouwstenen van de impactformules zijn flexibel en aanpasbaar, waardoor ze generiek zijn en potentieel toepasbaar op verschillende infrastructuurnetwerken.

Door middel van verhaallijnen kunnen vervolgens verschillende scenario's worden opgesteld, waarbij ook de geïdentificeerde cascades kunnen worden meegenomen door het aanpassen van de formules. Hoewel de aanpak niet de exacte schade zal opleveren van de geïdentificeerde keteneffecten, kan deze aanpak wel gebruikt worden om een gevoel te krijgen voor de (monetaire) orde van grootte van de effecten. Dit is waardevol, omdat vitale functies vaak niet los te zien zijn van hun ketenafhankelijkheden.

De uiteindelijke impact van functieverlies of uitval wordt in grote mate bepaald door de duur van de uitval, waarbij de reparatieduur specifiek van grote invloed is. Reparatieuren van functies zijn conceptueel te benaderen en kunnen ook worden omgezet of uitgebouwd naar andere vitale netwerken.

#### Aanbeveling 4

Pas de voorgestelde methode toe op andere infrastructuurnetwerken: stel impactpaden op, vul de formules in en stel verhaallijnen op

#### Aanbeveling 5

Valideer de voorgestelde methode door voorgevallen events in het verleden door te rekenen

## 9.5 Randvoorwaarden

Er zijn enkele randvoorwaarden die bepalend zijn voor het succes van deze methode. Het is essentieel om alle bedrijfsonderdelen van de vitale functie te betrekken, van assetniveau tot systeemniveau. Expertkennis is nodig om de juiste informatie rondom assets en kritieke uitvalwaardes te kunnen aanleveren en duiden. Betrokkenheid van verschillende afdelingen bij vitale infrastructuurbeheerders is noodzakelijk (BCM, asset management, inkoop, klimaatadaptatie, levering, monitoring).

### Aanbeveling 6

Betrek alle bedrijfsonderdelen van de vitale functie in het proces (van assetniveau tot systeemniveau) zodat de aanpak breed gedragen wordt, en de benodigde kennis van de verschillende onderdelen van het systeem kan worden benut.

## 9.6 Gebruik van de methode

Met de gedemonstreerde aanpak wordt het mogelijk om inzicht te krijgen in de belangrijkste factoren die bijdragen aan lange herstelduur en disruptie. De analyse kan dienen als basis voor het identificeren en prioriteren van maatregelen voor bijvoorbeeld Business Continuity Management. Daarnaast kan de analyse een fundament vormen voor klimaatadaptatie en handelingsperspectieven bieden, zodat duidelijk wordt waar adaptatie nodig is of voordelen kan opleveren.

### Aanbeveling 7

Identificeer waar de belangrijkste 'drivers' van maatschappelijke impact zitten: wat zijn de bepalende componenten voor maatschappelijke impact bij uitval van een functie?  
Op basis hiervan kunnen mogelijke maatregelen worden geïdentificeerd.

## 10 Bronnen

Deltares. (2018). Overstromingsrisico's door intense neerslag.

[https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/236484/deltares\\_september\\_2018\\_overstromingsrisicos\\_door\\_intense\\_neerslag.pdf](https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/236484/deltares_september_2018_overstromingsrisicos_door_intense_neerslag.pdf).

Deltares. (2019). Impact van klimaatverandering op wegherstel en verkeersstremming; Uitkomst landelijke klimaatstresstest HWN, 11203738-003-BGS-0001, Versie 1.1, 12 juli 2019, definitief rapport.

Deltares. (2022). Juli 2021: Overstroming en wateroverlast in Zuid-Limburg. Waterschap Limburg. [https://www.waterschaplimburg.nl/publish/pages/7013/juli\\_2021\\_overstroming\\_en\\_wateroverlast\\_in\\_zuid-limburg.pdf](https://www.waterschaplimburg.nl/publish/pages/7013/juli_2021_overstroming_en_wateroverlast_in_zuid-limburg.pdf)

Deltares. (2023). Grootschalig Neerslag Event provincie Zuid Holland Effecten op bereikbaarheid op het Hoofdwegennetwerk en onderliggend netwerk.

Deltares. (2024). Discussiestuk normering gevolgen voor vitale en kwetsbare functies. Klimaatadaptatie Nederland. <https://klimaatadaptatienederland.nl/@293598/discussiestuk-normering-gevolgen-vitaal-kwetsbaar/>.

Kennisinstituut Mobiliteit. 2017. Maatschappelijke kosten van verstoringen op het spoor <https://www.kimnet.nl/binaries/kimnet/documenten/rapporten/2017/12/21/maatschappelijke-kosten-van-verstoringen-op-het-spoor/Maatschappelijke+kosten+van+verstoringen+op+het+spoor.pdf>.

NKWK. 2024. Werkpakket Wateroverlast en overstroming 2023-2024. <https://klimaatadaptatienederland.nl/@290981/rapport-nkww-kbs-wateroverlast-overstroming/>.

NOS. (2021, juli 14). Straten en spoor in Zuid-Limburg blank door zware regenval. NOS. <https://nos.nl/artikel/2387253-straten-en-spoor-in-zuid-limburg-blank-door-zware-regenval>.

ProRail. (2021, juli 14). Noodweer zorgt voor uitval in Limburg. ProRail. <https://www.prorail.nl/nieuws/noodweer-zorgt-voor-uitval-in-limburg>.

Purnomo Yusgiantoro Center. (2020). Transforming from a reliable to a resilient power.

system. Bezocht op 3 februari 2025, van <https://www.purnomoyusgiantorocenter.org/id/transforming-from-a-reliable-to-a-resilient-power-system/>

Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., & Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>.

Rijkswaterstaat. 2024. Files. <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/open-data/modellen-en-applicaties/verkeers-en-vervoermodellen/jaarlijkse-prognoses/belangrijkste-prognoses/files>.

Rijkswaterstaat. (n.d.). *Kengetallen bereikbaarheid MAP*. RWS Economie. <https://www.rwseconomie.nl/kengetallen/kengetallen-bereikbaarheid-map>.

## 10.1 Expert-werksessies

Datum	Titel sessie	Aanwezige experts (functie) (buiten het projectteam van Deltares)
27 mei 2024	Afstemming en bepalen locatie casus ProRail rondom normering vitale functies	<p>ProRail</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseur klimaatadaptatie spoorweginfrastructuur,</li> <li>• Programmamanager klimaatadaptatie,</li> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM. Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> </ul> <p>Ministerie van Infrastructuur &amp; Waterstaat</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SITO-PS opdrachtgevers DGWB klimaatadaptatie en RWS</li> </ul>
22 oktober 2024	Impact Wateroverlast op Prorail - Schadefuncties en Impactpaden	<p>ProRail</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseur klimaatadaptatie spoorweginfrastructuur</li> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM, Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> <li>• Programmamanager klimaatadaptatie</li> </ul>
6 november 2024	Werksessie dataverzameling assets	<p>ProRail</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM, Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> </ul>
11 november 2024	Bepalen kritieke uitvalwaardes voor assets	<p>ProRail</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseur klimaatadaptatie spoorweginfrastructuur</li> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM, Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> <li>• Programmamanager klimaatadaptatie</li> <li>• Corporate Business Continuity Officer &amp; Data Protection Officer (Functionaris Gegevensbescherming)</li> </ul>
2 december 2024	Eerste resultaten presentatie	<p>ProRail</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseur klimaatadaptatie spoorweginfrastructuur</li> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM, Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> <li>• Programmamanager klimaatadaptatie</li> <li>• Corporate Business Continuity Officer &amp; Data Protection Officer (Functionaris Gegevensbescherming)</li> </ul>

<b>30 januari 2025</b>	Terugmeldsessie 'Wateroverlast & Kritieke Infrastructuur: van blootstelling tot maatschappelijke impact' case-studie spoor	ProRail <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseur klimaatadaptatie spoorweginfrastructuur</li> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM, Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> <li>• Programmamanger klimaatadaptatie</li> <li>• Corporate Business Continuity Officer &amp; Data Protection Officer (Functionaris Gegevensbescherming)</li> </ul> Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat <ul style="list-style-type: none"> <li>• SITO-PS opdrachtgevers DGWB klimaatadaptatie en RWS</li> </ul>
<b>28 februari 2025</b>	Akkordering controle rapport	ProRail <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseur klimaatadaptatie spoorweginfrastructuur</li> <li>• Instandhoudingsspecialist RAMSHE-LCM, Asset Ontwikkeling &amp; Informatie, Assetstrategie</li> </ul>

## A Theoretische basis

Binnen deze casestudie staat het spoorstelsel centraal. Deze bijlage vormt het fundament voor het begrip van de functie spoor en de rol van ProRail, de verschillende objecten die bij het spoor horen, de interactie van elektra en het wegennet en de verschillende indicatoren die gebruikt worden om de impact van wateroverlast op het spoor te bepalen

### A.1 Functie Spoor en de rol van ProRail.

Het spoorwegennet in Nederland speelt een cruciale rol in het vervoer van zowel mensen als goederen. Het bestaat uit een uitgebreid netwerk van spoorlijnen, stations, wissels, seinen, en andere infrastructuur die nodig is om treinen veilig en efficiënt te laten rijden.

ProRail is de organisatie die verantwoordelijk is voor het beheer van het Nederlandse Hoofdspoorwegennet. Hieronder vallen verantwoordelijkheden als onderhoud en vernieuwing van het spoor, garanderen van veiligheid op het spoor, verkeersleiding van treinbewegingen, uitbreiding van het spoornetwerk en het beheer van stations. ProRail werkt nauw samen met vervoerders zoals de Nederlandse Spoorwegen (NS) en andere partijen om ervoor te zorgen dat het spoorwegennet naar behoren functioneert

### A.2 Objecten die bij de functie van het spoor horen

De functie 'spoor' omvat een breed scala aan objecten die essentieel zijn voor het functioneren van het spoorwegennet. Deze objecten kunnen worden onderverdeeld in verschillende categorieën, met onder andere:

- **Spoorlijnen en Wissels:** Dit omvat de fysieke rails en mechanismen die treinen van het ene spoor naar het andere leiden.
- **Seinen en Signaleringsystemen:** Visuele en elektronische systemen die de bewegingen van treinen coördineren en de veiligheid waarborgen.
- **Relaiskasten en Verdeelstations:** Installaties voor elektrische schakelingen en stroomvoorziening voor het spoorwegennet.
- **Communicatiesystemen:** Systemen voor telecommunicatie en data-uitwisseling tussen treinen en verkeersleiding.
- **Stations en Faciliteiten:** Gebouwen, perrons en voorzieningen voor reizigers.
- **Ondersteunende Infrastructuur:** Bovenleidingen, tunnels en bruggen die het spoorwegennet ondersteunen.

### A.3 Afhankelijkheid van elektra, telecom en bereikbaarheid

De spoorwegen zijn sterk afhankelijk van elektriciteit voor signalering, communicatie en energievoorziening van treinen. De afhankelijkheid kan op twee manieren worden bekeken. Ten eerste worden treinen via de bovenleiding voorzien van stroom. De bovenleiding wordt gevoed door een hoogspanningsnet nadat het is omgezet in gelijkspanning in onderstations. Seinen en veiligheidssystemen gebruiken een lager voltage, dat ook wordt omgezet in onderstations. Verlichting, roltrappen en andere faciliteiten op stations zijn afhankelijk van het reguliere stroomnet, dat via verdeelkasten is verbonden met de lokale infrastructuur van ProRail. De overgang van het externe elektriciteitsnet naar het netwerk van ProRail vindt plaats bij onderstations en verdeelkasten. Dit zijn cruciale punten voor de continuïteit van de stroomvoorziening en de betrouwbaarheid van het spoorwegennet.

De bereikbaarheid van treinstations via de weg is essentieel, zowel voor reizigers als voor het transport van goederen, vooral bij verstoringen of onderhoudswerkzaamheden. Een goed

functionerend wegennet is nodig om extra verkeersdruk op te vangen en om hulpdiensten snel ter plaatse te kunnen laten komen bij incidenten. De interactie tussen spoor, elektriciteit, telecom en wegverbindingen is daarom van groot belang voor een betrouwbaar transportnetwerk, waarbij uitval van een van deze systemen vaak cascade-effecten heeft op de andere. In deze casestudie nemen we deze afhankelijkheden (deels) mee.

## A.4 Indicatoren om de impact op het spoor te bepalen

Wateroverlast kan aanzienlijke gevolgen hebben voor het spoorwegennetwerk. Dit kan op verschillende manier uitgedrukt worden, zoals fysieke schade aan de infrastructuur, aantal of duur van operationele verstoringen, aantal veiligheidsincidenten, hinder voor reizigers of de economische impact voor de maatschappij.

ProRail gebruikt ook een aantal van dit soort indicatoren, waarvan twee relevant zijn voor deze casestudie om de uiteindelijke impact op de maatschappij te duiden: *hinder* of *treinvertragingminuten* en *functieherstelduur*

### Hinder en treinvertragingminuten

Binnen ProRail wordt de term "*hinder*" gebruikt om de vertraging van treinen te duiden uitgedrukt in treinvertragingminuten (TVM). ProRail onderscheidt hierin verschillende klassen van hinder. Met name categorie 1 en categorie 2 hinder zorgen voor grote hinder en vertraging voor gebruikers (meer dan 10 uur vertraging). Hierbij is het ook goed om te noemen dat categorie 9 'geen hinder' optreedt wanneer treinen volledig uitvallen buiten de macht van ProRail. Hoewel dit mogelijk wel hinder veroorzaakt voor de reiziger, wordt dit binnen de systemen van ProRail niet onderscheiden. In Tabel 2.1 worden het aantal treinvertragingminuten per hinderklasse weergegeven.

Tabel A.1 Overzicht van de categorisering van hinder in treinvertragingminuten.

Categorie	Betekenis
1. Zeer veel hinder	>= 2400 treinvertragingminuten
2. Veel hinder	>= 680 en < 2400 treinvertragingminuten
3. Hinder	>= 40 en < 680 treinvertragingminuten
4. Beperkt hinder	< 40 treinvertragingminuten
9. Geen hinder	Geen treindienst aantastende onderbreking

### Functieherstelduur

*Functieherstelduur* verwijst binnen ProRail naar de tijd die nodig is om een bepaalde functie of dienst te herstellen na een verstoring of uitval. Voor ProRail is het belangrijk om te begrijpen hoelang de herstelduur is van verschillende objecten als gevolg van diverse oorzaken. Daarom registreren zij voor alle storingsmeldingen de waarschijnlijke oorzaak, het type technisch object, de functieherstelduur, de totale treinvertragingminuten als gevolg van de storing, en de bijbehorende Hinderklasse. Deze gegevens worden berekend vanaf het moment van de melding tot het moment waarop de melding wordt afgesloten in het systeem, dit is daarmee inclusief de reistijd van de benodigde werknemers en/of (indien nodig) de besteltijd van onderdelen.

Functieherstelduren kunnen op verschillende manieren worden bekeken, bijvoorbeeld per asset, per storingstype of per oorzaak. Op basis van deze gegevens kan op verschillende manieren gekwantificeerd worden wat de uitvalduur/functieherstelduur gegeven een bepaalde asset of storing is maar ook hoe lang bepaalde objecten uitvallen als gevolg van een bepaalde oorzaak.

Per oorzaak kan vervolgens berekend worden wat de minimale, maximale, mediaan en totale (op basis van alle meldingen en voor alle type objecten) treinvertragingminuten en functieherstelduur is. Op deze manier wordt er gevoel verkregen voor de impact van wateroverlast in termen van aantal meldingen en hinder in vergelijking met andere oorzaken voor storingen. In Tabel 2.2 wordt ter illustratie de top 10 oorzaken met de langste totale herstelduur in uren weergegeven en vergeleken met de oorzaak 'Regen / Vocht / Wateroverlast', die onderaan is toegevoegd.

Tabel A.2 Top 10 van oorzaken met de hoogste totale functieherstelduren van alle objecten [in minuten] in vergelijking met de oorzaak "Regen / Vocht / Wateroverlast" (onderaan). Weergeeft de maximale, minimale, gemiddelde en totale functieherstelduren per oorzaak met in de laatste kolom de aantal meldingen geregistreerd in storingssysteem van ProRail (SAP).

Omschrijving oorzaak	max [minuten]	Min [minuten]	Gemiddeld [minuten]	Totaal [minuten]	Aantal meldingen
<b>Slijtage</b>	30222	0	56	39537	706
<b>Overig technisch</b>	3600	0	9	33188	3505
<b>Onderdeel defect door onbekende oorzaak</b>	2842	0	11	15862	1502
<b>Verzakking / klink / Zetting</b>	8200	0	27	12357	450
<b>Bij onderzoek in orde/geen oorzaak gevonden</b>	553	0	3	6207	1959
<b>Geen onderzoek</b>	880	0	7	5818	776
<b>Veroudering</b>	1110	0	17	4643	267
<b>Onjuiste geometrie/ligging/blinde vering</b>	446	0	7	3982	600
<b>Breuk/Scheurvorming/Afbrokkeling</b>	140	0	14	3620	266
<b>Afstelling onjuist/verlopen</b>	736	0	5	3168	682
<b>Regen / Vocht / Wateroverlast</b>	168	0	11	943	85

Op basis van deze tabel blijkt dat 'Regen / Vocht / Wateroverlast' een relatief lage totale herstelduur heeft van 943 uur en slechts 85 meldingen, wat aanzienlijk lager is dan de andere oorzaken. De gemiddelde herstelduur van 11 uur plaatst deze oorzaak in de middenmoot, vergelijkbaar met 'Onderdeel defect door onbekende oorzaak' en 'Breuk/Scheurvorming/Afbrokkeling'. De maximale herstelduur van 168 uur is ook relatief laag in vergelijking met de hoogste waarde van 30222 uur voor 'Slijtage'. Dit suggereert dat incidenten veroorzaakt door regen, vocht en wateroverlast over het algemeen minder ernstig en minder frequent zijn.

Een belangrijke opmerking hierbij is dat veel meldingen met een andere oorzaak, wel mogelijk een verband hebben met wateroverlast (bijvoorbeeld: 'slijtage', 'verzakking/klink/zetting' en 'corrosie'). Dit betekent dat de impact van regen, vocht en wateroverlast waarschijnlijk onderschat wordt, omdat het indirect bijdraagt aan andere problemen. Daarbij is de nauwkeurigheid van de gegevens afhankelijk van hoe consistent en precies storingen worden geregistreerd in het storingssysteem. Daarom is voor deze studie ervoor gekozen om niet specifiek te filteren op de oorzaak voor het bepalen van de mediaan functieherstelduur van een asset, maar alle oorzaken mee te nemen. We nemen aan dat dit herstelduurwaardes geeft die het dichtst bij de realiteit liggen.

Daarnaast zijn er nog een aantal andere kanttekeningen te plaatsen bij het gebruik van deze data. De functieherstelduur is gebaseerd op het moment dat de melding is aangemaakt tot het moment dat deze wordt afgesloten. Het omvat daarmee ook bijvoorbeeld de reistijd van de werknemers en eventuele besteltijd van onderdelen, wat dus per casus sterk kan variëren afhankelijk van de locatie van de storing, het object en de beschikbaarheid van onderdelen.

## B Vergelijking oorzaken voor functieherstelduur voor verschillende objecten van het spoor

Als je kijkt naar welke onderdelen het meest en het langst kapot zijn, ziet de lijst als volgt uit.

Soort technisch object	Regen, Vocht en Wateroverlast					Alle oorzaken				
	Max	Min	Mean	Sum	Count	Max	Min	Mean	Sum	Count
25BOVNLEID	123	123	123	123	1	3040	1	364	9107	25
BALLAST	42	42	42	42	1	122	19	61	183	3
BEHUIZBEV	433	433	433	433	1	66595	1	941	81845	87
BOVENLEID	583	178	380	761	2	3711	1	326	63284	194
DETECTREIN	316	316	316	316	1	52808	1	338	217074	642
DETGRSSSL	10081	5	926	20366	22	216001	0	391	1028899	2632
DETJADE1SL	4611	1	1567	4700	3	4810	1	247	35505	144
DETJADE2SL	2771	1	492	7880	16	10253	1	348	40052	115
INTERLOCK	27	27	27	27	1	31591	1	360	60201	167
ONDERDGANG	70	70	70	70	1	70	70	70	70	1
OVERWEG	760	1	260	1041	4	60313	1	206	182201	883
PERRON	157	157	157	157	1	1448	0	126	5683	45
PLAATSBEP	810	35	246	1232	5	15162	1	180	225787	1253
SEIN	704	704	704	704	1	58672	0	454	279685	616
SPOORDRKW	127	1	64	128	2	35671	1	576	63339	110
SPOORTAK	6956	1	1167	14006	12	1813322	1	1800	3401216	1890
TALUDTRAP	2505	2505	2505	2505	1	2505	2505	2505	2505	1
TANKINST	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
WISSEL	391	1	142	570	4	75683	0	517	1149308	2223
WISSELSTEL	993	1	369	1106	3	45995	0	493	592053	1202
ZIJWBEV	410	410	410	410	1	1374	1	449	5842	13

Op basis van de gegevens in de tabel kunnen we concluderen dat bepaalde technische objecten bijzonder gevoelig zijn voor problemen veroorzaakt door regen, vocht en wateroverlast. **DETGRSSSL** springt eruit met een totale herstelduur van 20.366 uur en 22 meldingen, wat aangeeft dat dit object vaak en langdurig getroffen wordt door watergerelateerde problemen. **SPOORTAK** volgt met een totale herstelduur van 14.006 uur

en 12 meldingen, wat ook wijst op een aanzienlijke gevoeligheid. Andere objecten zoals **DETJADE2SL** en **DETJADE1SL** hebben eveneens hoge hersteluren, ondanks een lager aantal meldingen, wat suggereert dat de incidenten die zich voordoen ernstig zijn. Deze bevindingen zijn in lijn met wat we in de literatuur en andere bronnen zien over de gevoeligheid van technische objecten voor regen, vocht en wateroverlast<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> <https://maps.prorail.nl/portal/apps/sites/#/klimaat/pages/wateroverlast>

## C Reparatieduren per objecttype

GIS laag	Mediaan FHD alle oorzaken [min]	Gemiddelde FHD alle oorzaken	Aantal Meldingen alle oorzaken	Gemiddelde FHD regen /vorst /wateroverlast
Sectie	91	391	2632	926
Railspoel	91	391	2632	926
Draagconstructie	90	160	5	-
ES-Las	90	420	708	-
Gebouw	31	110	21	-
Kast (kabelsituatie)	487	487	1	-
Overweg	51	205	883	260
Overwegsteller	43	522	98	-
Perron	11	126	45	157
Lichtsein/sein	20	451	616	704
Fysieke spoortak	129	1797	1890	1167

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](http://www.deltares.nl)