

stowa

VAN (SPOOR)WEGTALUD NAAR DIJKTALUD



RAPPORT

2025
40

VAN (SPOOR)WEGTALUD NAAR DIJKTALUD

RAPPORT

2025

40

ISBN 978.94.6479.128.0



COLOFON

Amersfoort, december 2025

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Marit Lambers - Sweco
Bram Wolters - Sweco
Louis Broersma - Sweco

BEGELEIDINGSCOMMISSIE
Marian Bootink - STOWA / hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Oscar van Dam - STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-40
ISBN 978.94.6479.128.0

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

Kunnen wegen en spoorlijnen bij een overstroming dienen als een tijdelijk dijklichaam? En kunnen ze bij ernstige wateroverlast worden gebruikt voor transport in het kader van crisisbeheer en herstel? Het rapport Van (spoor) talud naar dijktaalud inventariseerde aan de hand van vier deelstudies hoe de Nederlandse spoor- en infrastructuur zich gedraagt in extreme situaties.

LOKATIESTUDIES

De onderzoekers selecteerden gebieden met verschillende bodemsoorten in de provincies Zeeland, Utrecht, Noord-Brabant en Overijssel. Voor elke provincie werden van 3 spoorlijnen en 3 verkeerswegen de bodemopbouw en het dwarsprofiel geanalyseerd, om te zien hoe water een baanlichaam binnendringt en of de dwarsprofielen voldoende stabiel blijven bij wateroverlast. De uitkomst is dat zand stabiel is dan klei. Dat komt omdat een baanlichaam van zand weliswaar sneller verzadigt raakt, maar het water ook veel sneller kan afvoeren. Bij een ondergrond van klei verlopen verzadiging en afvoer veel geleidelijker.

WEGEN EN SPOORWEGEN

De stabiliteit bij verzadiging neemt altijd af, maar wegen hebben het voordeel dat ze zijn opgebouwd uit een zandcunet. Spoorwegen kennen — vooral als ze van oudere datum zijn — een andere opbouw en bestaan vaak uit lokaal aanwezig bodemmateriaal. Vooral baanvakken met een ondergrond van klei zijn daardoor kwetsbaar, zoals bleek in 2023, toen overvloedige neerslag in Zeeland zorgde voor schade aan spoorwegverbindingen.

Ook de belasting maakt uit: verkeerswegen zijn breder dan spoorlijnen. Vaak kunnen een of meer rijstroken worden afgesloten, of kan zwaar verkeer worden beperkt, terwijl de belasting van spoorwegen tot 4 maal zo groot is als bij autowegen. Problemen vanwege stroomuitval en materieel komen daar nog bij. Wegen lenen zich dus beter voor inzet als tijdelijke waterkering dan spoortaluds.

WELKE MAATREGELEN ZIJN MOGELIJK?

De onderzoekers hebben ook gekeken naar de toepassing van een kleideklaag om een wegtalud 'waterdicht' te maken, zoals bij een echte dijk. Analyse wijst uit dat dat werkt, maar dat de afvoer van water wel een aandachtspunt is.

Het aanpassen van baanlichamen vraagt om investeringen die alleen voor korte trajecten kosteneffectief zijn en een effect hebben over een relatief grote afstand (Stratelligence, 2022). Dit is bijvoorbeeld het geval bij het ophogen van plaatselijk lagere delen van wegen, het aanbrengen van een kleilaag en het minder steil opzetten (verflauwen) van taluds. Daarnaast helpen goede inspecties en monitoring van grondwaterstanden, het versterken van de onderdoorgangen bij bruggen en viaducten en flauwere taluds die bij overstroming beter bestand zijn tegen afkalving of bezwijken.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

SAMENVATTING

AANLEIDING EN ONDERZOEKSVRAGEN

Als gevolg van klimaatverandering wordt Nederland steeds vaker geconfronteerd met extreme omstandigheden die kunnen leiden tot wateroverlast of overstromingen.

Het is wenselijk om in beeld te krijgen of (spoor)wegen (tijdelijk) bestand zijn tegen een overstroming. Het gebruik van (spoor)wegen is bijvoorbeeld mogelijk door in de vorm van een tijdelijk dijklichaam de **overstroming te remmen** om het moment van overstromen van het daarachter gelegen gebied uit te stellen (gericht voor gebieden met slachtoffer-risico). Daarnaast is de vraag in hoeverre we (spoor)wegen tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming weer kunnen gebruiken voor transport, bijvoorbeeld in het kader van **crisis-beheer en herstel**.

Dit verkennende onderzoek richt zich op het vergroten van kennis over hoe de Nederlandse spoor- en weginfrastructuur zich gedraagt bij wateroverlast en overstromingen. Het onderzoek spitst zich toe op drie vragen: hoe gedragen (spoor)wegen zich in extreme situaties?, hoe kunnen we (spoor)wegen inzetten tijdens en na extreme wateroverlast en overstromingen? en met welke maatregelen kunnen we de inzet van (spoor)wegen verbeteren?

AANPAK

In dit onderzoek zijn vier voorbeeldgebieden in Nederland geselecteerd waarin spoorwegen en wegen mogelijk blootgesteld worden aan extreme omstandigheden. Dit zijn vier voorbeeldgebieden met verschillende ondergronden (klei, zand en veen) en verschil in impact van mogelijke overstromingen: Dit betreft een mogelijke doorbraak van waterkeringen langs de kust in West-Nederland (provincie Zeeland), vanuit de grote rivieren de Lek (provincie Utrecht), de Maas (provincie Noord-Brabant) en vanuit de Overijsselse Vecht (provincie Overijssel). Binnen deze gebieden zijn drie locaties van spoorwegen en drie locaties van wegen geselecteerd. Hiervan zijn de bodemopbouw en de dwarsprofielen in beeld gebracht waarna onderzocht is hoe water een baanlichaam binnendringt. Daarna is onderzocht in welke mate deze profielen stabiel blijven.

RESULTATEN – HOE GEDRAGEN (SPOOR)WEGEN ZICH IN EXTREME OMSTANDIGHEDEN?

De stabiliteit neemt bij **verzadiging** van alle grondsoorten sterk af. Een profiel van zand behoudt onder verzadigde omstandigheden een hogere stabiliteit in vergelijking met een baanlichaam dat opgebouwd is uit klei. De aanwezigheid van zand in een baanlichaam zorgt ervoor dat het baanlichaam snel verzadigt (binnen 72 uur), terwijl bij een baanlichaam van klei het meerdere weken duurt voordat de volledige verzadiging bereikt is. Echter daalt de waterstand in een baanlichaam van zand ook geleidelijk mee als de buitenwaterstand daalt terwijl dit bij een baanlichaam van klei sterk achterblijft. Het afdekken van een talud en vertragen van de toestroom van water is daarom een van de mogelijke maatregelen om langer stabiel baanlichaam te kunnen garanderen. De afvoer van water in normale situaties is dan wel een aandachtspunt.

Figuur 1.1 Zandcunet rijksweg (bron: Sweco)



Wegen hebben het voordeel dat deze zijn opgebouwd uit een zandcunet¹ (zie inzet) waardoor deze minder kwetsbaar zijn. De mate waarin wegen meer kwetsbaar zijn is bij klei of veen in de ondergrond en taluds waardoor overtollig water minder goed kan worden afgevoerd. Voor spoorwegen geldt dat deze een iets andere opbouw kennen, maar vooral oudere baanlichamen zijn opgebouwd uit lokaal aanwezig bodemmateriaal. Hierdoor zijn vooral de profielen met een klei ondergrond kwetsbaar. De situatie eind 2023 in Zeeland is hiervan een voorbeeld toen overvloedige neerslag na weken voor schade aan spoorwegen zorgde.

De belasting van wegen en spoorwegen maakt ook een groot verschil. Bij de bredere wegen zoals hier beschouwd (snelwegen en een vierbaans provinciale weg) kunnen een of meer rijstroken worden afgesloten of kan (zwaar) verkeer worden beperkt, terwijl de belasting van spoorwegen niet kan worden gevarieerd (hooguit de belading). Bovendien is de bovenbelasting waaraan baanlichamen worden blootgesteld voor spoorwegen tot bij benadering 4 maal zo groot in vergelijking met de bovenbelasting bij wegen.

Wegen lenen zich meer voor het tijdelijk tegenhouden van water door de aanwezigheid van een zandcunet en vaak de grotere breedte van de weg en taluds. Als een deel van de weg bezwijkt, is dit meestal 10 a 15% langs de rand van het profiel. Spoorwegen lijken eerder te bezwijken en hebben veelal een geringere breedte in vergelijking met (snel)wegen.

Opgemerkt wordt dat vanwege uitval van stroom en de beschikbaarheid van materieel, de spoorwegen bij dreigende wateroverlast of overstroming niet meer worden ingezet omdat het risico op uitval te groot is.

Bij een overstroming zoekt het water zich in eerste instantie een weg via de **onderdoorgangen** onder (spoor)wegen. Door de stroming door onderdoorgangen kan instabiliteit ontstaan als gevolg van het wegspoelen van materiaal van het baanlichaam achter en onder deze constructies (achter- en onderloopsheid). Hierdoor kunnen viaducten en bruggen bezwijken en kan dit de aanleiding zijn voor het bezwijken van het gehele baanlichaam.

De inzet van wegen en spoorwegen na een extreme gebeurtenis verschilt sterk van de opbouw van het baanlichaam. Er van uitgaande dat het baanlichaam is gespaard dient de waterspanning in het baanlichaam voldoende te zijn gedaald.

¹ Een cunet is het deel onder verharding (bijvoorbeeld een weg) dat bewust wordt uitgegraven in een grondlaag en met zand of puin wordt gevuld om de draagkracht te vergroten voor wat erboven ligt.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Aanleiding van voorliggend onderzoek is het feit dat als gevolg van klimaatverandering we vaker te maken hebben met extreme omstandigheden die kunnen leiden tot wateroverlast of overstromingen. Er is behoefte aan meer inzicht in wat dit zal betekenen voor de spoor- en weginfrastructuur. Hiervoor is verkend hoe (spoor)wegen zich in extreme situaties gedragen, hoe we (spoor)wegen kunnen inzetten tijdens en na extreme wateroverlast en overstromingen en met welke maatregelen we de inzet van (spoor)wegen kunnen verbeteren.

In vier voorbeeldgebieden hebben we hiervoor 3 locaties van spoorwegen en 3 locaties van wegen geselecteerd waarvan we het dwarsprofiel, de bodemopbouw en de wijze waarop dit profiel wordt blootgesteld aan extreme wateroverlast en overstromingen hebben geanalyseerd. Vervolgens is nagegaan wat dit betekent voor het handelingsperspectief in de voorbeeldgebieden.

In dit licht kunnen we het volgende concluderen:

- Wegen met zandcunet en bredere (en flauwere) taluds zijn relatief beter bestand tegen overstroming in vergelijking met spoorwegen.
- Wegprofielen bezwijken meestal langs de randen (10-15%).
- Spoorwegen met veelal een geringere breedte, zijn kwetsbaarder in vergelijking met wegen. Spoorwegen zijn ook kwetsbaarder als gevolg van een hogere bovenbelasting (tot 4x groter dan (snel)wegen).
- Spoorwegen worden bij dreigende wateroverlast niet gebruikt vanwege stroomuitval en materieelproblemen. Bij wegen in risicogebieden zal geadviseerd worden om de wegen niet te gebruiken vanwege het risico om hier vast te komen staan.
- Spoorwegen zijn minder stabiel en lenen zich hierdoor minder goed voor inzet om waterstroming te remmen.
- Ondergangen zoals bruggen en viaducten zorgen voor waterdoorstroming, wat instabiliteit veroorzaakt in het baanlichaam ter plaatse. Dit kan aanleiding zijn tot bezwijken waardoor van remmen van een overstroming of het gebruik na een overstroming geen sprake is.
- Na een extreme gebeurtenis moeten baanlichamen voldoende hersteld zijn voor inzet voor regulier gebruik.

WELKE MAATREGELEN ZIJN MOGELIJK?

Uit de analyse met het toepassen van een deklaag is naar voren gekomen dat dit contraproductief werkt. Het voordeel is dat water moeilijker vanaf de zijkant het baanlichaam kan binnendringen, maar water kan er onder normale omstandigheden ook moeilijker uit (neerslag zijwaarts afvoeren), waardoor het baanlichaam in normale omstandigheden minder stabiel is. Dit kan worden opgeheven met drainage, maar dit moet doordacht worden toegepast (alleen aan de niet-overstroombare zijde).

Maatregelen treffen aan baanlichamen vraagt om investeringen die alleen kosteneffectief zijn als dit op een korte afstand nodig is en effect heeft over een relatief grote afstand (Stratelligence, 2022). Dit is bijvoorbeeld het geval bij het ophogen van plaatselijk lagere delen van wegen, het aanbrengen van extra aarde en het minder steil opzetten (verflauwen) van taluds.

Maatregelen die er toe bijdragen om (spoor)wegen te kunnen gebruiken tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming zijn:

- Monitoring van de grondwaterstanden in het baanlichaam door middel van peilbuizen.
- Monitoring van verplaatsing van grond door bijvoorbeeld afschuiving of verzakking met behulp van satellietdata.
- Gedeeltelijke belasting en gebruik van wegen, bijvoorbeeld door het afsluiten van rijstroken of het afsluiten / omleiden voor zwaar verkeer.
- Het versterken van onderdoorgangen zoals bruggen en viaducten zodat deze bestand zijn tegen bezwijken bij een overstroming.
- Meer grond toepassen op taluds en flauwere taluds toepassen, zodat deze bij overstroming beter bestand zijn tegen afkalving/bezwijken.
- Taluds en (spoor)wegen bij voorkeur periodiek inspecteren, vooral voor kritische delen in navolging van de inspecties in de dijkenwereld.

WELKE AANBEVELINGEN KUNNEN WORDEN GEDAAN VOOR NADER ONDERZOEK?

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Nader onderzoek is nodig om beter inzicht te krijgen in welke mate onderdoorgangen zoals viaducten en bruggen, bezwijken als gevolg van stroming.
- Nader onderzoek naar de locaties waar de omvang van de maatregelen beperkt is, maar de impact van maatregel groot is (kosteneffectief), bijvoorbeeld door (spoor)wegen 'waterdichter' te maken door de onderdoorgangen te verbeteren en het plaatselijk verhogen van (spoor)wegen voor bijvoorbeeld de essentiële routes door Nederland.
- Naast permanente ingrepen is het ook mogelijk om na te gaan of tijdelijke ingrepen effectief zijn.
- Nu is niet bekend wat de invloed is van kabels en leidingen. Mogelijk is dit extra aanleiding om de infrastructuur te sparen. Nader onderzoek dient meer inzicht te bieden op de aanwezigheid van kabels en leidingen en de invloed van kabels en leidingen op bezwijken.
- Er is geanalyseerd wat de invloed is van een overstroming met een zeer kleine kans (overschrijdingsfrequentie variërend van 1:2000 tot 1:12500 jaar langs de rivieren en 1:400.000 jaar in Zeeland) en wateroverlast uit de klimaateffectatlas (overschrijdingsfrequentie eenmaal per 100 jaar). Het kan relevant zijn om ook nog voor tussenliggende situaties een analyse uit te voeren, vooral daar waar de overschrijdingsfrequentie erg klein is (situatie Zeeland).
- Gezien de beperkte mogelijkheden voor spoorwegen, is nader onderzoek naar de inzetbaarheid van spoorwegen in dit stadium niet efficiënt.
- Extreme neerslag, in combinatie met overstroming, zorgt voor verdergaande instabiliteit, aangezien het baanlichaam dan volledig verzadigd raakt. Deze gevoeligheidsanalyse vraagt echter om een nader onderzoek, aangezien de kans dat beide extreme gebeurtenissen tegelijkertijd optreden erg klein is.

STOWA IN HET KORT

KENNIS OVER WATER, VOOR NU ÉN LATER

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer – kortweg STOWA – is het kennisplatform van regionale waterbeheerders in Nederland. Vanuit ons kantoor in Amersfoort werken we aan het ontwikkelen, verzamelen, verspreiden en implementeren van toegepaste kennis. Die kennis hebben waterbeheerders nodig om de opgaven waar zij voor staan, goed uit te kunnen voeren. Of het nu gaat om klimaatadaptatie (zowel stedelijk als landelijk gebied), een goede waterkwaliteit, duurzame en effectieve afvalwaterzuivering, veilige dijken en kaden, energietransitie of circulaire economie.

Het soort kennis dat wij ontwikkelen, is breed: technisch en natuurwetenschappelijk, maar soms ook bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk. Om te zorgen dat die kennis maximaal kan worden toegepast in de praktijk, presenteren we onze onderzoeksresultaten indien mogelijk in de vorm van praktische handreikingen, tools en instrumenten. Ook faciliteren we met het oog op kennisdoorwerking Communities of Practice en organiseren we daarvoor allerlei bijeenkomsten en webinars. Via onze eigen en andermans media geven we uitleg over de achtergronden bij ons werk.

STOWA werkt vraaggestuurd. We inventariseren welke kennisvragen waterbeheerders hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers: universiteiten, kennisinstituten, kennisbedrijven of adviesbureaus. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van gezamenlijke kennisprojecten op ons. Maar wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de projectresultaten de deelnemers praktische handelingsperspectieven bieden. Ieder project wordt om die reden begeleid door een commissie waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden vastgesteld door programmacommissies, waar waterbeheerders ook zitting in hebben.

STOWA is onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan waterbeheerders te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast een cijfermatige jaarrekening ook een directieverslag opgenomen over de stichting en haar activiteiten. Het budget bedraagt jaarlijks ongeveer 20 miljoen euro. Onze deelnemers leggen gezamenlijk ieder jaar ongeveer 10 miljoen in als structurele bijdrage. Daarnaast ontvangen we jaarlijks ongeveer 10 miljoen euro in de vorm van bijdragen aan afzonderlijke projecten.

VAN (SPOOR)WEGTALUD NAAR DIJKTALUD

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Leeswijzer	2
2	METHODE	3
2.1	Inventarisatie	3
2.2	Analyse grondwaterstroming en stabiliteit	5
2.2.1	Geohydrologische analyse	6
2.2.2	Stabiliteitsberekeningen	6
2.3	Praktische toepasbaarheid	7
2.3.1	Handelingsperspectief	7
2.3.2	Maatregelen	8
3	RESULTATEN	9
3.1	Water in een grondlichaam	9
3.2	De stabiliteit van een baanlichaam	10
3.3	Conclusies uitgevoerde analyses	12
3.3.1	Inzicht in de stabiliteit van (spoor)wegen	12
3.3.2	Handelingsperspectief tijdens en na overstroming	13
3.3.3	Maatregelen om gebruik van (spoor)wegen te verbeteren	14
3.4	Handelingsperspectief per voorbeeldgebied	15

4	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	17
4.1	Inzicht in huidige situatie	17
4.2	Inzet (spoor)wegen tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming	17
4.3	Maatregelen om inzet tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming te verbeteren	18
4.4	Aanbevelingen	18
5	LITERATUURLIJST	20
BIJLAGE 1	OPBOUW VAN (SPOOR)WEGEN	21
BIJLAGE 2	VOORBEELDGEBIEDEN	23
BIJLAGE 3	MAATREGELEN	38
BIJLAGE 4	GEOHYDROLOGISCHE EN GEOTECHNISCHE ANALYSE EN RESULTATEN	40
BIJLAGE 5	HANDELINGSPERSPECTIEF PER VOORBEELDGEBIED	46

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Als gevolg van klimaatverandering wordt Nederland steeds vaker geconfronteerd met extreme omstandigheden die kunnen leiden tot wateroverlast of overstromingen. Tot nu toe wordt ervan uitgegaan dat infrastructuur, zoals spoorwegen en wegen, in stand blijven (standzeker zijn) en boven een bepaald niveau overstromen. In hoeverre wegen en spoorwegen standzeker zijn, is in het verleden veel gebaseerd op aannames en er is op kleine schaal onderzoek hiernaar gedaan (Deltares, 2014)². In het licht van klimaatverandering is het gewenst om meer inzicht te krijgen in hoeverre spoor(wegen) standzeker zijn, hoe we dit kunnen verbeteren en in welke mate we (spoor)wegen kunnen gebruiken tijdens en na extreme wateroverlast en overstromingen.

Het is wenselijk om in beeld te krijgen of (spoor)wegen (tijdelijk) bestand zijn tegen een overstroming. Het gebruik van (spoor)wegen is bijvoorbeeld mogelijk door in de vorm van een tijdelijk dijklichaam de **overstroming te remmen** om het moment van overstromen van het daarachter gelegen gebied uit te stellen (gericht voor gebieden met slachtoffer-risico). Daarnaast is de vraag in hoeverre we (spoor)wegen tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming weer kunnen gebruiken voor transport, bijvoorbeeld in het kader van **crisis-beheer en herstel**.

Wanneer we weten hoe (spoor)wegen zich gedragen ten tijde van overstromingen en extreem weer, kunnen we maatregelen nemen om de inzet van (spoor)wegen te verbeteren.

1.2 DOELSTELLING

Dit **verkennende** onderzoek richt zich op het vergroten van kennis over hoe de Nederlandse spoor- en weginfrastructuur zich gedraagt bij wateroverlast en overstromingen. Het is nadrukkelijk een **verkennend** onderzoek met als doel om na te gaan welke mogelijkheden er zijn in de ruimtelijke ordening, zonder grote ingrepen. Het onderzoek spitst zich toe op de volgende drie onderzoeksvragen:

1. Hoe gedragen (spoor)wegen zich in extreme situaties als gevolg van extreme wateroverlast en overstroming?
2. Hoe kunnen we de (spoor)wegen inzetten tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming?
3. Met welke maatregelen kunnen we de mogelijkheden voor de inzet van (spoor)wegen tijdens en na extreme wateroverlast en overstromingen verbeteren?

Hiermee draagt het onderzoek bij aan inzicht in hoe infrastructuur effectief kan worden benut tijdens en na extreme gebeurtenissen als gevolg van klimaatverandering en hoe het gebruik en beheer van (spoor)wegen in dit licht kan worden verbeterd.

2 Tijdens het onderzoek bleek dat in 2014 door Deltares 6 dwarsprofielen van snelwegen zijn geanalyseerd. In voorliggend onderzoek zijn de conclusies vergeleken

1.3 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 beschrijft de methode van het onderzoek. Hoofdstuk 3 gaat in op de resultaten en hoofdstuk 4 bevat tot slot de conclusies en aanbevelingen.

In de bijlagen is achtergrondinformatie te vinden, zoals de meer gedetailleerde geohydrologische en geotechnische analyse van de dwarsprofielen en achtergrondinformatie van de geselecteerde voorbeeldlocaties.

2

METHODE

2.1 INVENTARISATIE

Om te begrijpen hoe (spoor)wegen zich gedragen wanneer zij worden belast door water, is het noodzakelijk om eerst inzicht te hebben in de **opbouw van dwarsprofielen van (spoor)wegen** in Nederland. Hiervoor is gebruik gemaakt van kennis en ervaring van (spoor)wegbeheerders, publiek beschikbare gegevens en de expertise van specialisten binnen Sweco. Daarnaast zijn interviews gehouden met vertegenwoordigers van Rijkswaterstaat en ProRail om praktijkervaring en aanvullende inzichten te verzamelen. De geïnventariseerde opbouw van (spoor)wegen is vastgelegd in Bijlage 1.

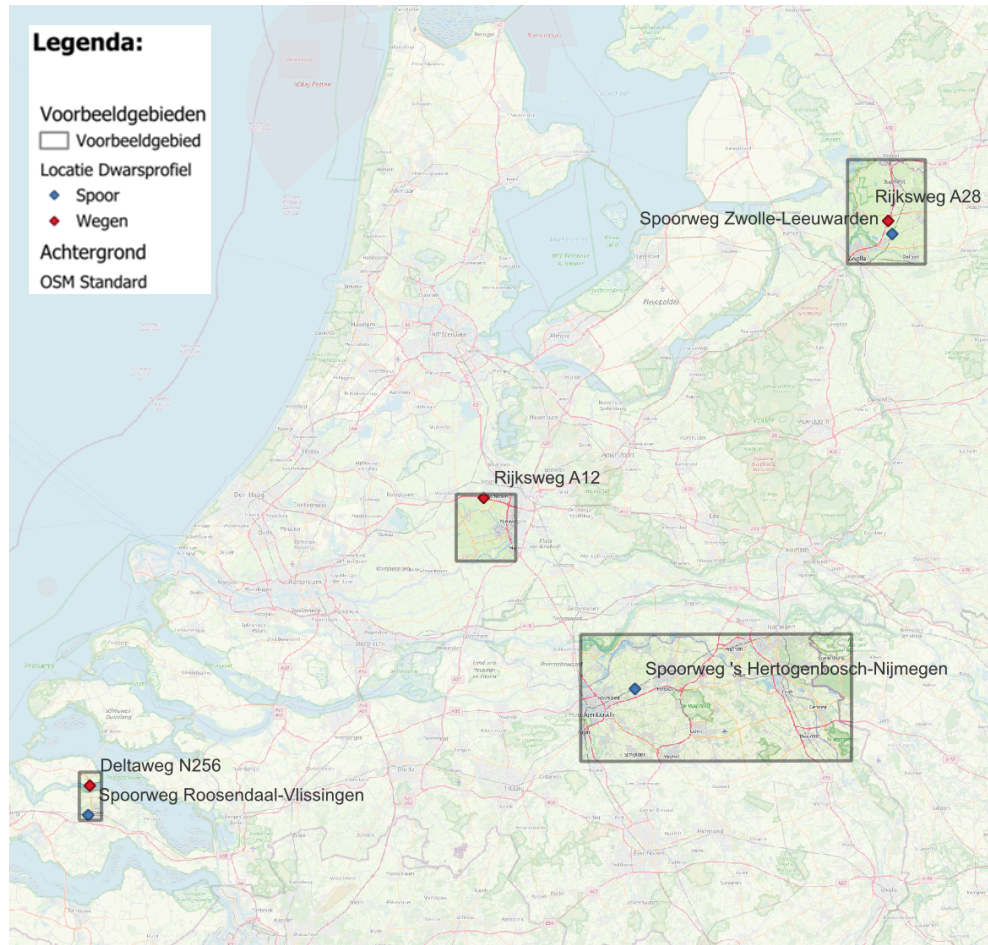
Met deze kennis zijn **vier voorbeeldgebieden geselecteerd** (Figuur 2.2) met (spoor)wegen die mogelijk inzetbaar zijn om water te remmen of waarin inzet van (spoor)wegen tijdens en na extreme wateroverlast en overstromingen belangrijk is, bijvoorbeeld door het functioneren als crisis- en herstelroute. De gebieden verschillen in ondergrond, liggen verspreid over Nederland en variëren qua de verwachte impact van mogelijke overstromingen. Deze variatie maakt het mogelijk om de resultaten in een brede context te plaatsen en het onderzoek te benutten als een verkenning op Nationale schaal. In de voorbeeldgebieden zijn in totaal **zes locaties van dwarsprofielen** geselecteerd: drie voor spoorwegen en drie voor wegen.

Figuur 2.1 Wegen – baanlichamen met daarin onderdoorgangen (bron: Sweco)



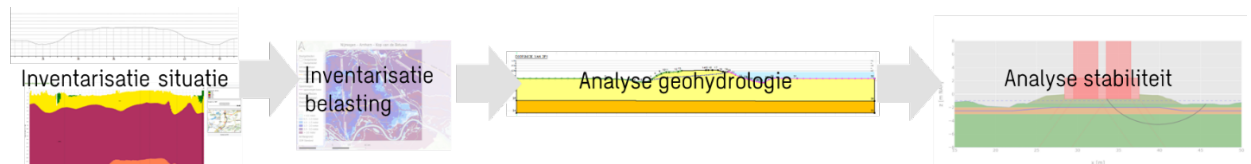
Voor elke (spoor)weglocatie zijn de dwarsprofielen en relevante eigenschappen geïnventariseerd, waaronder de bodemopbouw, hoogteligging, belasting door overstromingen en andere factoren die bepalend zijn voor het gedrag van de constructie. Op basis van deze inventarisatie is geanalyseerd hoe de (spoor)wegprofielen zich gedragen als gevolg van de aanwezigheid van water tegen het talud. De voorbeeldgebieden en de geselecteerde (spoor)wegen en bijbehorende dwarsprofielen en opbouw van de ondergrond zijn beschreven in bijlage 2.

Figuur 2.2 De Voorbeeldgebieden die gebruikt zijn voor de praktische vertaling van theoretische resultaten



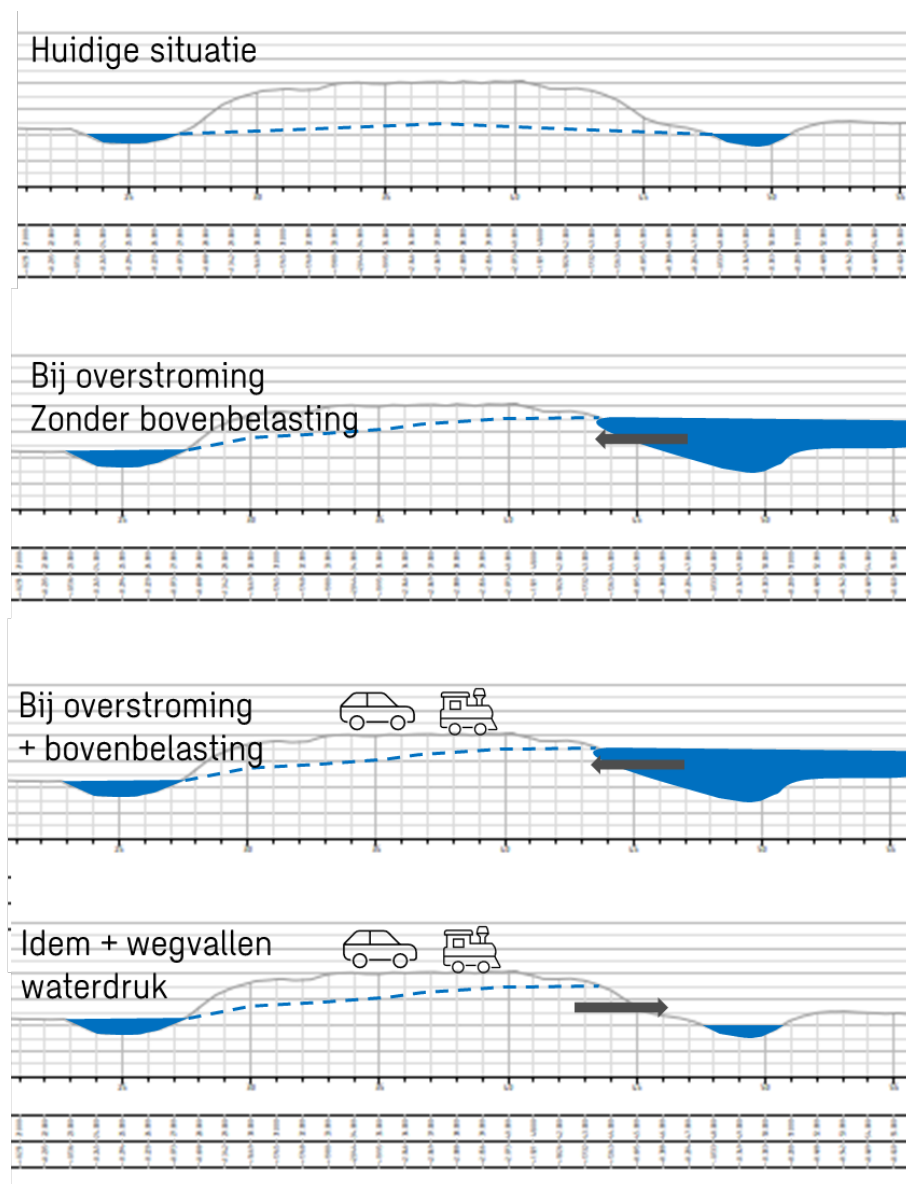
In de vier voorbeeldgebieden is de stabiliteit van (spoor)wegprofielen onderzocht bij waterbelasting. Dit gebeurde in twee stappen: eerst is met geohydrologische berekeningen bepaald hoe water het baanlichaam binnendringt, daarna zijn geotechnische berekeningen uitgevoerd om de stabiliteit te beoordelen. Zo ontstaat inzicht in wat er gebeurt als water tegen een talud staat, wanneer een profiel kan falen en welke maatregelen dit risico verkleinen. Het proces is schematisch weergegeven Figuur 2.3.

Figuur 2.3 Schematische weergave van de doorlopen stappen



Hierbij zijn vervolgens 4 situaties beschouwd, die schematisch zijn weergegeven in Figuur 2.4.

Figuur 2.4 Beschouwde situaties voor analyse van de stabiliteit als gevolg van aanwezigheid van water in en langs een (spoor)weg



Hoe deze situaties zijn toegepast, is beschreven in paragraaf 2.2.

2.2 ANALYSE GRONDWATERSTROMING EN STABILITEIT

Water in een baanlichaam van een (spoor)weg beïnvloedt de sterkte en stabiliteit van deze (spoor)weg. Naarmate een grondlichaam van een (spoor)weg meer water bevat, lukt dit minder goed en zal dit baanlichaam gaan vervormen door verschuiving en verzakkingen van grond waardoor de (spoor)weg niet meer kan worden gebruikt. Voor de berekening van de stabiliteit van een (spoor)weglichaam is eerst berekend hoe water een profiel binnendringt. Vervolgens is berekend in welke mate een baanlichaam stabiel blijft.

Hieronder is beschreven hoe de geohydrologische analyses en stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd.

2.2.1 GEOHYDROLOGISCHE ANALYSE

De geohydrologische analyse is gedaan voor een normale situatie, waarbij er sprake is van een stabiel waterpeil. Daarnaast is een berekening uitgevoerd op het moment dat de maximale waterstand in het dwarsprofiel wordt gerealiseerd (steady state) en de daarop volgende situatie waarbij het buitenwater zeer snel verdwijnt (en het grondlichaam dus nog volledig verzadigd is). Deze scenario's zijn schematisch weergegeven in Figuur 2.4.

Naast de uiteindelijke verzadigde situaties, is voor een dwarsprofiel een tijdsafhankelijke analyse uitgevoerd waarbij de stabiliteit bij verschillende tijdstappen tijdens het overstromingsscenario is beschouwd. Het waterpeil stijgt dan mee. Hierbij is een tijdbestek aangehouden van dagen, hooguit een week, waarin in toenemende mate verzadiging van het baanlichaam optreedt.

Tot slot is voor één dwarsprofiel gekeken naar de invloed van een volledig verzadigd grondlichaam (als gevolg van neerslag). Op deze manier ontstaat er een beeld van de stabiliteit van de (spoor)wegen bij verschillende waterpeilen en met en zonder boven-belasting in de vorm van het verkeer en rijdend spooarmaterieel.

Om ook de invloed van maatregelen in beeld te krijgen, is vervolgens een berekening uitgevoerd waarbij een slecht doorlatende deklaag aanwezig is op het talud in de vorm van bijvoorbeeld klei, folie of een mengsel van kalk en klei. Het doel hiervan is om na te gaan wat het effect hiervan is op de stabiliteit.

De uitgangspunten voor de uitgevoerde berekeningen zijn toegelicht in Bijlage 4. De gehanteerde bodemopbouw van de dwarsprofielen is opgenomen in Bijlage 2.

2.2.2 STABILITEITSBEREKENINGEN

Voor de stabiliteitsanalyse is onderzocht in welke mate een grondlichaam stabiel is. Hiervoor is gebruik gemaakt van de berekening van extreme situaties, zoals in de voorgaande paragraaf toegelicht. In dit geval is gerekend met de Bishops-methode in het programma D-Stability (versie 2024.01). De uitgangspunten en resultaten zijn opgenomen in Bijlage 4.

Om de invloed van het verkeer mee te nemen, is gerekend met de volgende standaard belastingen voor weg- en spoorconstructies:

- Voor wegen is uitgegaan van een belasting van 13 kN/m² over 2,5 m breedte; voor spoorwegen van 12,5 kN/m² over de breedte van het ballastbed.
- Daarnaast is een tijdelijke treinbelasting van 45,5 kN/m² over 3 m meegenomen. Voor alle belastingen geldt een spreidingshoek van 30° en een consolidatiepercentage van 50% voor cohesieve gronden, in lijn met de LNA-aanpak.

Volgens deze methodiek voldoet een spoorbaan als de stabiliteitsfactor (SF) groter is dan 0,95, waarbij een glijvlak ten minste de aardebaan raakt. Voor wegen is een vergelijkbare benadering toegepast, waarbij een glijvlak wordt geforceerd dat de kruin raakt. Voor wegen geldt echter geen specifieke grenswaarde voor de SF.

2.3 PRAKTISCHE TOEPASBAARHEID

Door de technische analyses te vertalen naar praktische toepasbaarheid, ontstaat een concreet handelingsperspectief dat beheerders en crisisorganisaties helpt om tijdens en na een overstroming doelgericht te handelen.

In de **tweede werksessie**³ zijn de resultaten besproken met regionale vertegenwoordigers, waaronder weg- en spoorbeheerders, waterbeheerders en vertegenwoordigers van de veiligheidsregio's. In deze bijeenkomst stond de lokale context centraal: hoe vertalen de theoretische analyses zich naar de specifieke omstandigheden van de gebieden en in hoeverre zijn de voorgestelde handelingsperspectieven daar praktisch toepasbaar?

Aannames en analyses zijn getoetst aan praktijkervaringen en aangevuld met gebieds-specifieke inzichten en maatregelen. Gezamenlijk is verkend of het handelingsperspectief overeenkomt met de werkelijkheid en welke aanvullende maatregelen kansrijk en uitvoerbaar zijn, zowel in de fase van dreiging als tijdens en na een overstroming. Dit heeft geleid tot een scherper beeld van de inzetbaarheid van (spoor)wegen als waterkering en crisis- of herstelroute.

De inzichten zijn verwerkt in de conclusies en vormen daarmee een brug tussen de technische analyses en de operationele inzetbaarheid van (spoor)wegen als tijdelijke waterkering of crisis- en herstelroute.

2.3.1 HANDELINGSPERSPECTIEF

Om de (geo)technische analyses te vertalen naar praktisch toepasbare resultaten, is in dit onderzoek ook het handelingsperspectief per voorbeeldgebied in kaart gebracht.

De resultaten uit de analyses zijn gebruikt om te bepalen waar en hoe (spoor)wegen tijdelijk kunnen functioneren als waterkering of als crisis- en herstelroute, welke versterkingen daarvoor nodig zijn en welke beheer- en ontwerpkeuzes de kans op falen verkleinen.

De focus ligt op het vergroten van de stabiliteit om water te remmen en het inzetten van (spoor)wegen crisisorganisatie en herstel. Dit handelingsperspectief is uitgewerkt voor verschillende tijdvensters (van de situatie zonder dreiging, bij een dreiging, tot tijdens en na een doorbraak), en schematisch weergegeven in Figuur 2.5.

Figuur 2.5 Schematische weergave van tijdvensters waarin onderscheid is gemaakt in de uitwerking van het handelingsperspectief en mogelijke maatregelen



3 Op 9 september 2025 vond de tweede werksessie plaats in Fort Vreeswijk in Nieuwegein

2.3.2 MAATREGELEN

In dit onderzoek zijn, naast de analyses, ook mogelijke maatregelen geïnventariseerd om (spoor)wegprofielen langer in stand te houden en de inzetbaarheid bij extreme neerslag of overstromingen te vergroten. Deze maatregelen zijn verzameld uit de volgende bronnen:

1. Interviews met betrokken beheerders en specialisten,
2. Een eerste overzicht van de maatregelen uit het project FIER (2025),
3. De maatregelenlijst uit KBN-HWN v9 (2025)⁴,
4. Inzichten uit het ICARUS-onderzoekstraject (onder andere Deltares)⁵ en
5. Internationale ervaringen van Sweco in onder meer het Verenigd Koninkrijk, Denemarken en Zweden.

De maatregelen variëren van technische ingrepen, zoals het afdekken van taluds met klei, drainage of kalk-klei mengsels, tot beheermaatregelen, zoals monitoring, mobiliteits-management en gefaseerd gebruik van wegen. Ook structurele oplossingen, zoals het ophogen van wegen, extra kolken en verbeterd ontwerp van afwatering en vegetatiebeheer, behoren tot de mogelijkheden. Internationale ervaring onderstreept bovendien het belang van vroegtijdige integratie van klimaatbestendigheid in het ontwerp en de aanleg en van een continue monitoring om risico's, zoals verzadiging en verschuivingen te beperken.

Een overzicht van de belangrijkste maatregelen en hun herkomst is opgenomen in Bijlage 3.

⁴ Inventarisatie vanuit het project Klimaatbestendig Hoofdwegennet, actualisatie februari 2025, Stowa

⁵ Improving the uptake of Climate change Adaptation in the decision making processes of Road aUthoritieS (ICARUS) – Deltares, Tecnala, Ramboll, RDS & Maple Consulting

3

RESULTATEN

Tijdens de **eerste werksessie**⁶ zijn de voorlopige resultaten hiervan gepresenteerd aan de beheerders en geotechnische specialisten. De feedback is gebruikt om de aannames te toetsen en de analyses verder te verfijnen. Daarnaast is in deze sessie gezamenlijk verkend welke maatregelen het meest kansrijk zijn om de inzetbaarheid van (spoor)wegen bij belasting van water als gevolg van extreme wateroverlast en overstromingen te vergroten.

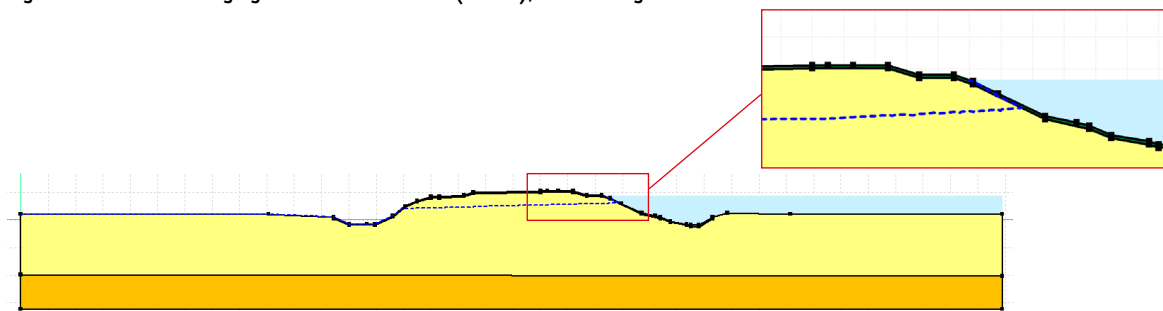
3.1 WATER IN EEN GRONDLICHAAM

Inzicht in hoe water een baanlichaam binnendringt, is nodig om vervolgens de stabiliteit van een baanlichaam te kunnen berekenen (zie paragraaf 3.2). Er is op twee manieren berekend hoe water in een grondlichaam van een (spoor)weg binnendringt. In de eerste plaats is dit bepaald door uit te gaan van een stabiele situatie, bijvoorbeeld bij een maximale waterdiepte in geval van een overstroming. Het moment waarop een stabiele situatie wordt bereikt, verschilt en is afhankelijk van het bodemmateriaal waaruit een baanlichaam van een (spoor)weg is opgebouwd. Bij klei verloopt dit traag, doordat water langzaam in een baanlichaam binnendringt en is een stabiele situatie pas na weken of maanden bereikt. Bij zand verloopt dit veel sneller en is een stabiele situatie al na enkele uren bereikt. Omgekeerd duurt het ook weken tot maanden totdat overtollig water uit een baanlichaam is weggestroomd. Hierdoor kunnen wegen en spoorwegen pas na lange tijd weer worden gebruikt. Illustratief hiervoor zijn de verzakkingen van spoorwegen in provincie Zeeland die in november 2023 ontstonden na een periode met veel neerslag. De oorzaak hiervan was dat, als gevolg van de aanwezigheid van klei in het baanlichaam en de ondergrond, overtollig water niet snel genoeg kon worden afgevoerd.

Een profiel dat is opgebouwd uit zand, zal sneller volstromen. Een profiel met zand is ook weer sneller te gebruiken als het waterpeil na een overstroming weer zakt.

Eén van de mogelijke maatregelen om (spoor)wegen ook bij een overstroming of periode met veel neerslag te beschermen tegen indringing van water, is door de berm en het talud van een watergang te bekleden met een laag klei, folie of mengsel van kalk en klei. Er zijn diverse vormen mogelijk. Onderzocht is wat er gebeurt als een laag klei van 10 cm dikte aangebracht wordt op een baanlichaam van zand. In Figuur 31 is de situatie na 72 uur zichtbaar, waarbij sprake is van een waterstand in het baanlichaam die nog 60 cm onder de buitenwaterstand ligt.

6 Op 16 juni vond de eerste werksessie plaats in Amersfoort

Figuur 3.1 Verzadiging maximale waterstand (72 uur), met deklaag

Een uitgebreider beeld van de resultaten is opgenomen in Bijlage 4.

Een maatregel, zoals hierboven vermeld, is alleen mogelijk als water van buiten het baanlichaam toestroomt. Bij regen zal een profiel ook van boven via de bermen verzadigd raken met neerslag. Een bekleding van de zijkanten (berm en talud) zal dan de afvoer van water vertragen, waardoor ook in normale situaties meer water in het profiel blijft. Dit zorgt voor instabiliteit.

Een drainage is dan bijvoorbeeld nodig om het water uit het baanlichaam af te voeren. Een dergelijke maatregel vraagt dan om veel ingrepen die alleen kosteneffectief zijn als dit gecombineerd kan worden met maatregelen die bijvoorbeeld graverij beperken en als dit op een korte afstand nodig is met een groot effect. Bijvoorbeeld als een klein lager gelegen deel van een (spoor)weg beschermd wordt, waardoor een (spoor)weg over een grotere afstand met meer zekerheid kan worden beschermd tegen overstroming of extreme wateroverlast. Zie hiervoor ook de conclusies uit het onderzoek naar de kosteneffectiviteit van maatregelen (Stratelligence, 2022).

3.2 DE STABILITEIT VAN EEN BAANLICHAAM

De mate waarin een baanlichaam van een (spoor)weg in staat is de druk van rijdend materieel (en het eigen gewicht) over te brengen naar de ondergrond, verschilt – afhankelijk van het materiaal waaruit een baanlichaam is opgebouwd en de samenstelling van de ondergrond daaronder. Zoals vermeld in paragraaf 3.1, zorgt de indringing van water in een baanlichaam voor minder goede eigenschappen om de druk op de ondergrond over te brengen. De verschillen die we daarin hebben berekend per grondsoort, lokale situatie en mate van indringing van water, zijn in deze paragraaf beschreven.

De stabiliteit van een baanlichaam is het grootste bij toepassing van zand. Ook bij klei kan een stabiel profiel worden gerealiseerd, maar dit vergt maatregelen, zoals flauwe taluds.

Als sprake is van bovenbelasting, zoals bij een (spoor)weg, beïnvloedt dit de stabiliteit van een baanlichaam nadelig omdat dan ook de druk van het materieel moet worden overgebracht op de ondergrond. Een spoorweg heeft bij benadering een viermaal zo grote belasting, in vergelijking met de belasting van wegen (zie paragraaf 2.2.2).

Van de beschouwde spoorwegen is ervan uitgegaan dat de opbouw van het baanlichaam gelijk is aan de opbouw van materiaal, zoals dat in de omgeving in de ondergrond wordt aangetroffen.

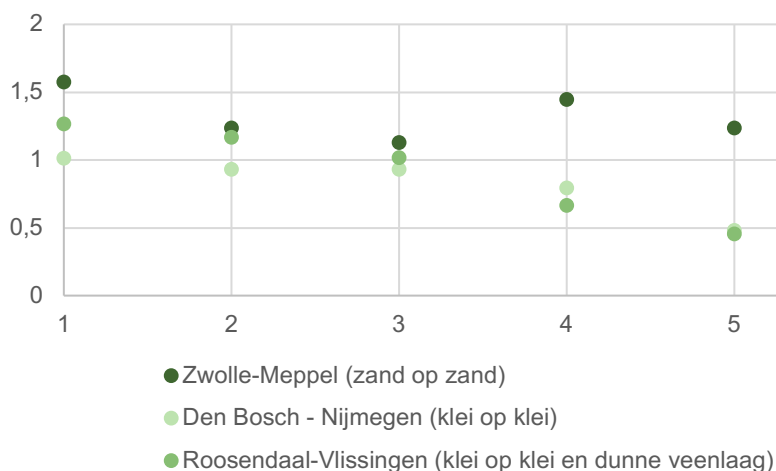
SPOORWEGEN

De berekende SF-factoren voor de situaties, zoals vermeld in tabel 3.1, zijn weergegeven in Figuur 3.2. In de huidige situatie met een normaal waterpeil is de SF-waarde het hoogst, omdat dan de meest stabiele situatie aanwezig is. Naarmate er meer water in een baanlichaam aanwezig is en er sprake is van een grotere verkeersbelasting, ligt de SF-waarde lager. Waarden die lager zijn dan 0,95, geven aan dat er sprake is van een instabiele situatie. Bij kleiprofielen is dit bijvoorbeeld aan de orde.

Tabel 3.1 Beschouwde situaties, zoals opgenomen in de figuren 3.2 en 3.3.

Nr. x-as	Beschouwde situatie
1	Dagelijks (huidige situatie)
2	Maatgevend hoogwater zonder verkeersbelasting
3	Val na hoogwater zonder verkeersbelasting
4	Dagelijks met verkeersbelasting
5	Maatgevend hoogwater met verkeersbelasting
6	Val na hoogwater met verkeersbelasting

Figuur 3.2 Safety factoren voor spoorwegen voor de in tabel 3.1 genoemde situaties

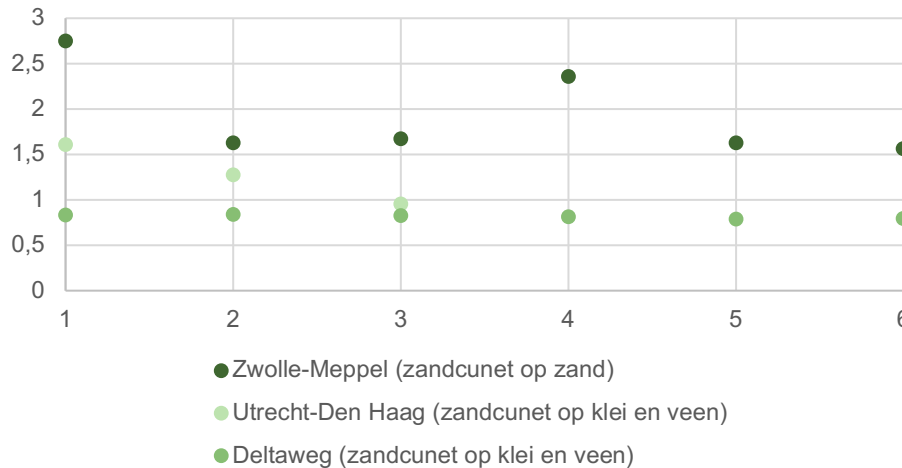


WEGEN

Wat voor spoorwegen geldt, is ook voor wegen van toepassing. De berekende SF-waarden zijn weergegeven in Figuur 3.3. De waarden voor een zandcunet op een klei ondergrond laten zien dat er sprake is van SF-waarden die lager zijn dan 1. Opgemerkt wordt dat dit ook voor de huidige situatie al is berekend. Belangrijk daarbij is dat de belasting van (rijks)wegen met meer kan worden beperkt door is en alleen de randen (circa 10 – 15%) van de dwarsprofielen bezwijken.

Figuur 3.3

Safety factoren voor wegen voor de in tabel 3-1 genoemde situaties



Om meer grip te krijgen op wat er gebeurt als op een zandtalud een afdichtende laag wordt toegepast, zijn berekeningen uitgevoerd voor het wegprofiel in de A28. Daarnaast zijn berekeningen uitgevoerd, waarbij in de tijd de toestroom van grondwater in het dwarsprofiel varieert. Dit is opgenomen in Tabel 3.2.

Tabel 3.2

Extra beschouwde situaties en berekende Safety Factoren voor toepassing van een deklaag op het talud, variante in de tijd en een volledig verzadigd wegprofiel in de A28 ten noorden van Zwolle

Beshouwde situatie	Zwolle-Meppel (zand op zand)
Dagelijks	1,576
Maatgevend hoogwater zonder belasting	1,236
Val na hoogwater zonder belasting	1,1275
Maatgevend hoogwater zonder belasting, met deklaag	1,122
Val na hoogwater zonder belasting, met deklaag	1,144
Maatgevend hoogwater 12 uur zonder belasting	1,56
Val na hoogwater 12 uur zonder belasting	1,512
Maatgevend hoogwater 36 uur zonder belasting	1,378
Val na hoogwater 36 uur zonder belasting	1,326
Neerslag, zonder belasting	0,916
Dagelijks met belasting	1,446
Maatgevend hoogwater met belasting	1,236
Val na hoogwater met belasting	1,1385

3.3 CONCLUSIES UITGEVOERDE ANALYSES

3.3.1 INZICHT IN DE STABILITEIT VAN (SPOOR)WEGEN

De uitgevoerde analyses bieden inzicht in hoe (spoor)wegen zich in de huidige situatie gedragen bij extreme wateroverlast en overstroming. De stabiliteitsberekeningen van de grondlichamen van de (spoor)wegprofielen, zoals ze er nu bijliggen (zonder maatregelen), hebben tot de volgende inzichten geleid:

1. Een verzadigd profiel van klei is minder stabiel in vergelijking met een verzadigd profiel van zand. De stabiliteit neemt bij **verzadiging** van alle grondsoorten sterk af. Een profiel van zand behoudt onder verzadigde omstandigheden een hogere stabiliteit in vergelijking met een baanlichaam dat opgebouwd is uit klei. Voor zand op veen geldt dat er nauwelijks verschil is in stabiliteit; de bovenste drie à vier meter van het profiel is hierin bepalend. Kleiprofielen zijn in de huidige situatie onder normale omstandigheden minder stabiel en

zijn pas bij langdurige blootstelling aan water en verzadiging kwetsbaarder. De situatie in Zeeland eind 2023 tijdens langdurige neerslag is hiervoor illustratief⁷.

2. De aanwezigheid van zand in een baanlichaam zorgt ervoor dat het baanlichaam snel verzadigt (binnen 72 uur), terwijl het bij een baanlichaam van klei meerdere weken duurt voordat de volledige verzadiging bereikt is. Echter daalt de waterstand in een baanlichaam van zand ook geleidelijk mee als de buitenwaterstand daalt, terwijl dit bij een baanlichaam van klei sterk achterblijft. Hierbij is voor de kleiprofielen een snelle daling maatgevend.
3. De stabiliteit van een baanlichaam van zand neemt procentueel meer af dan bij een baanlichaam van klei onder volledig verzadigde omstandigheden. Echter blijft er bij een baanlichaam van zand een hogere mate van stabiliteit over in een volledig verzadigde toestand.
4. De spoorbaan heeft een zeer hoge belasting als er treinen aanwezig zijn. Hierbij zorgt in meerder gevallen de aanwezigheid van treinbelasting onder dagelijkse omstandigheden voor een lagere veiligheid dan wanneer er geen treinen aanwezig zijn onder maatgevende omstandigheden (overstromingen). Dit benadrukt de gesteldheid van het huidige spoornetwerk (aanleiding tot start LNA⁸).
5. Het materiaal van de spoorbaan is belangrijker voor de baanstabiliteit dan het materiaal van de ondergrond.
6. De analyses van de stabiliteit van wegprofielen laten zien dat ongeveer 10 – 15% van het wegprofiel tekenen van falen vertoont, veelal aan de randen door afschuiving van een deel van het baanlichaam.
7. Extreme neerslag, in combinatie met overstroming, zorgt voor verdergaande instabiliteit, aangezien het baanlichaam dan volledig verzadigd raakt. Deze gevoeligheidsanalyse vraagt echter om een nader onderzoek, aangezien de kans dat beide extreme gebeurtenissen tegelijkertijd optreden erg klein is.

3.3.2 HANDELINGSPERSPECTIEF TIJDENS EN NA OVERSTROMING

Wegen lenen zich meer voor het tijdelijk tegenhouden van water door de aanwezigheid van een zandcunet en vaak de grotere breedte van de weg en taluds. Als een deel van de weg bezwijkt, is dit meestal 10 a 15% langs de rand van het profiel. Spoorwegen lijken eerder te bezwijken en hebben veelal een geringere breedte in vergelijking met (snel)wegen.

De mogelijkheden van belasting tijdens een extreme gebeurtenis zijn groter bij wegen dan bij spoorwegen. Bij de bredere wegen zoals hier beschouwd (snelwegen en een vierbaans provinciale weg) kunnen een of meer rijstroken worden afgesloten of kan (zwaar) verkeer worden beperkt, terwijl de belasting van spoorwegen niet kan worden gevarieerd (hooguit de belading). Bovendien is de bovenbelasting waaraan baanlichamen worden blootgesteld voor spoorwegen tot bij benadering 4 maal zo groot in vergelijking met de bovenbelasting bij wegen.

Opgemerkt wordt dat vanwege uitval van stroom en de beschikbaarheid van materieel, de spoorwegen bij dreigende wateroverlast of overstroming niet meer worden ingezet omdat het risico op uitval van te groot is (zie figuur 3.4). In veel gevallen zullen wegen niet meer worden ingezet vanwege het risico dat mensen vast komen te zitten op wegen.

⁷ Extreme regenval en extra treinen zorgen voor verzakkingen Zeeuwse spoor, treinverkeer tot en met zondag ontregeld - mroep Zeeland

⁸ Landelijke netwerkanalyse (LNA) baanstabiliteit door ProRail

Figuur 3.4 Wateroverlast op spoor in Limburg op 15 juli 2021 (bron: Prorail)



Bij een overstroming zoekt het water zich in eerste instantie een weg via de **onderdoorgangen** onder (spoor)wegen. Door de stroming door onderdoorgangen kan instabiliteit ontstaan als gevolg van het wegspoelen van materiaal van het baanlichaam achter en onder deze constructies (achter- en onderloopsheid). Hierdoor kunnen viaducten en bruggen bezwijken en kan dit aanleiding zijn voor het bezwijken van het baanlichaam ter plaatse van de onderdoorgang.

De Inzet van wegen en spoorwegen na een extreme gebeurtenis verschilt sterk van de opbouw van het baanlichaam. Ervan uitgaande dat het baanlichaam gespaard is, dient de waterspanning in het baanlichaam voldoende te zijn gedaald.

3.3.3 MAATREGELEN OM GEBRUIK VAN (SPOOR)WEGEN TE VERBETEREN

Uit de analyse met het toepassen van een deklaag (getoetst voor de spoorbaan uit voorbeeldgebied Overijssel) is naar voren gekomen dat het toepassen van een deklaag onder extreme omstandigheden een negatief effect heeft op de baanstabiliteit. Hoewel de deklaag de verzadiging van het buitentalud (de zijde waar de waterstand hoog is) vertraagt, zorgt zij er tegelijkertijd voor dat het water aan de binnenzijde moeilijker het baanlichaam kan verlaten. Zodra de waterstand aan de buitenzijde daalt, presteert het baanlichaam met een deklaag beter op de buitenwaartse stabiliteit dan zonder deklaag omdat het buitentalud minder verzadigd is geraakt.

Er dient daarom met zorg gekeken te worden naar de inpassing van een waterremmende laag. Het aan beide zijden toepassen van zo'n laag kan leiden tot extra verzadiging van het grondlichaam, indien het water niet kan wegstromen. Om dit te voorkomen, kan het gebruik van drainage naar de zijde waar geen water wordt verwacht, een oplossing bieden. Hierbij wordt opgemerkt dat de investeringen in waterremmende voorzieningen en drainage alleen loont als dit op een korte afstand nodig is en effect heeft over een relatief grote afstand⁹. Dit is bijvoorbeeld het geval bij plaatselijk lagere delen van wegen. Dit geldt eveneens voor ingrepen, zoals het verhogen van de wegen, het aanbrengen van extra aarde en flauwere taluds.

⁹ Afgeleid uit "Vitaal en Kwetsbaar Hoofdwegennet, Stratelligence 2022"

Maatregelen die er toe bijdragen om (spoor)wegen te kunnen gebruiken tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming, zijn:

- monitoring van de grondwaterstanden in het baanlichaam door middel van peilbuizen;
- monitoring van verplaatsing van grond door bijvoorbeeld afschuiving of verzakking met behulp van satellietdata;
- Gedeeltelijke belasting en gebruik van wegen, bijvoorbeeld door het afsluiten van rijstroken of het afsluiten / omleiden voor zwaar verkeer;
- het versterken van onderdoorgangen, zoals bruggen en viaducten, zodat deze bestand zijn tegen bezwijken bij een overstroming;
- meer ersoiebestendige grond toepassen op taluds en flauwere taluds toepassen, zodat deze bij overstroming beter bestand zijn tegen afkalving/bezwijken;
- taluds en (spoor)wegen bij voorkeur periodiek inspecteren, vooral voor kritische delen in navolging van de inspecties in de dijkenwereld.

3.4 HANDELINGSPERSPECTIEF PER VOORBEELDGEBIED

In de Bijlage 5 is het handelingsperspectief per voorbeeldgebied opgenomen, inclusief de aanvullingen uit de sessie op 11 september 2025. Hieronder zijn de belangrijkste mogelijkheden per voorbeeldgebied aangegeven:

A28 en spoorlijn Zwolle-Meppel ten noorden van Zwolle in dijkkring 9

- Uit oogpunt van het sparen van de spoorlijn de onderdoorgangen verstevigen (achter- en onderloopsheid voorkomen) en niet afdichten tijdens een overstroming.
- De A28 inzetten als kering om water te remmen tijdens overstroming vanuit de Overijsselse Vecht.
- Onderdoorgangen van de A28 verstevigen (achter- en onderloopsheid voorkomen) en wel afdichten tijdens een overstroming.
- Om na te gaan of hiermee op de juiste plek extra bescherming wordt geboden, dient te worden nagegaan of in hoeverre dit bescherming biedt voor objecten uit de Wet weerbaarheid kritische entiteiten.

Door gemeente Zwolle is een inventarisatie in eigen huis uitgevoerd, waarbij zij nog de volgende mogelijkheden aanreiken:

- De wegen in het gebied in de toekomst zo aanleggen dat in het gebied sprake is van meerdere 'kommen' in plaats van een groot overstromend gebied. Hiermee kan water worden geremd en het risico worden gespreid.

A12 ten zuiden van Utrecht

- De A12 Oost zo lang mogelijk open houden heeft hier prioriteit ,gelet op het achterliggende gebied.
- Vanuit HOST Nations support is de A12 een belangrijke schakel om open te houden.
- Onderdoorgangen van de A12 verstevigen (achter- en onderloopsheid voorkomen) en wel afdichten tijdens een overstroming.
- Hiermee wordt de A12 een formele kering waarmee grote delen van Utrecht en omgeving beschermd worden.
- Prioriteer hierin de delen waarachter meer vitale functies / kwetsbare objecten aanwezig zijn, zoals het deel direct ten zuidoosten van Utrecht).

Spoorlijn Nijmegen-Den Bosch ten zuiden van de Maas

- Het risico op een doorbraak kan van meerdere kanten komen. Dit vraagt flexibiliteit in de inzet van wegen en spoorwegen en de mate waarin water moet worden geremd.
- Het vanuit meerdere zijden waterkerend maken van taluds maar ook de onderdoorgangen kan dan flexibel worden ingezet, afhankelijk van waar het water vandaan komt.
- Het beschermen en verbeteren van taluds (verflauwen en versterken), bij voorkeur combineren met het tegengaan van graverij.

Deltaweg N256 ten noorden van Goes

- Naast de invloed van een overstroming, is in Zeeland ook de invloed van eb en vloed relevant. Hier kan terugkerende toestroom van water relevant zijn.
- Kijk ook naar overstromingen, waarbij sprake is van een grotere overschrijdingsfrequentie dan 1:400.000 jaar.

4

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 INZICHT IN HUIDIGE SITUATIE

De uitgevoerde analyses bieden inzicht in hoe (spoor)wegen zich in de huidige situatie gedragen bij extreme wateroverlast en overstroming. In de meeste gevallen is overstroming maatgevend, in vergelijking met het optreden van extreme wateroverlast als gevolg van neerslag.

- Zand behoudt onder verzadigde omstandigheden een hogere stabiliteit in vergelijking met een baanlichaam dat opgebouwd is uit klei. Voor zand op veen geldt dat er nauwelijks verschil is in stabiliteit; de bovenste drie à vier meter van het profiel is hierin bepalend. Kleiprofielen zijn minder stabiel.
- Zand behoudt een hogere stabiliteit, klei verzadigt langzaam maar wordt kwetsbaarder.
- Zandbaanlichaam verzadigt snel, klei langzaam; Echter blijft er bij een baanlichaam van zand een hogere mate van stabiliteit over in een volledig verzadigde toestand.
- Bij een baanlichaam van zand daalt de stabiliteit procentueel meer dan bij klei, maar blijft hoger na verzadiging.
- Treinen veroorzaken een grotere bovenbelasting in vergelijking met wegen.
- Het materiaal waarmee de (spoor)weg is opgebouwd, is belangrijker voor de stabiliteit dan het ondergrondmateriaal.
- 10 – 15% van de breedte van een wegprofiel faalt bij bezwijken, vooral door afschuiving aan de randen.

4.2 INZET (SPOOR)WEGEN TIJDENS EN NA EXTREME WATEROVERLAST EN OVERSTROMING

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Wegen met zandcunet en bredere (en flauwere) taluds zijn relatief beter bestand tegen overstroming in vergelijking met spoorwegen.
- Spoorwegen met veelal een geringere breedte zijn kwetsbaarder in vergelijking met wegen.
- Spoorwegen zijn ook kwetsbaarder als gevolg van een hogere belasting (tot 4x groter dan (snel)wegen).
- Spoorwegen worden bij dreigende wateroverlast niet gebruikt vanwege stroomuitval en materieelproblemen. Bij wegen in risicogebieden zal geadviseerd worden om de wegen niet te gebruiken vanwege het risico om hier vast te komen staan.
- Ondergangen, zoals bruggen en viaducten, zorgen voor waterdoorstroming wat instabiliteit veroorzaakt in het baanlichaam ter plaatse. Dit kan aanleiding zijn tot bezwijken, waardoor van remmen van een overstroming of het gebruik na een overstroming geen sprake is.
- Na een extreme gebeurtenis moeten baanlichamen voldoende hersteld zijn voor regulier gebruik.

4.3 MAATREGELEN OM INZET TIJDENS EN NA EXTREME WATEROVERLAST EN OVERSTROMING TE VERBETEREN

Afweging van ingrepen, zoals vertraging van toestroming en drainage voor afvoer van grondwater, dienen te worden afgewogen op basis van de kosteneffectiviteit (Stratelligence, 2022). Uit dit onderzoek blijkt dat vooral maatregelen renderen die op een beperkt locatie nodig zijn, maar een effect hebben over een veel grotere lengte. Dit geldt bijvoorbeeld voor plaatselijk kleinere kwetsbare of lager gelegen delen van (spoor)wegen.

Generieke maatregelen die er toe bijdragen om (spoor)wegen te kunnen gebruiken tijdens en na extreme wateroverlast en overstroming, zijn:

- Vooral wegen kunnen worden ingezet voor het uitstellen van het moment van overstroming. Doe dit vooral gericht op gebieden met een slachtoffer-risico.
- Om (spoor)wegen te kunnen sparen, is focus op de onderdoorgangen nodig aangezien juist door stroming de bruggen en viaducten kunnen bezwijken als gevolg van het eroderen van bodemmateriaal uit het baanlichaam.
- De keuze voor remmen van water of doorlaten van water is afhankelijk van het gebied.
- Wegen zijn vooral voor kwetsbaar langs de randen ter plaatse van de berm en vluchstrook
- Gebruik van infrastructuur na een extreme gebeurtenis is mogelijk door monitoring, gericht op de gemeten grondwaterstanden in het baanlichaam.
- Monitoring van verplaatsing van grond door bijvoorbeeld afschuiving of verzakking met behulp van satellietdata.
- Het versterken van onderdoorgangen, zoals bruggen en viaducten, is nuttig, zeker wanneer het behoud van de (spoor)weg belangrijk is.

Deze maatregelen zijn aanvullend op de maatregelen die eerder al zijn geïnventariseerd. Een overzicht van de belangrijkste maatregelen is opgenomen in Bijlage 3.

De analyse van de profielen van wegen en spoorwegen is vertaald naar 4 voorbeeld-gebieden en hierop is tijdens een tweede werksessie op 11 september jl. gereflecteerd door de vertegenwoordigers van organisaties uit deze regio's. De inzichten in het handelings-perspectief zijn voor een volledig beeld op genomen in Bijlage 5.

4.4 AANBEVELINGEN

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Nader onderzoek is nodig om beter inzicht te krijgen in welke mate onderdoorgangen, zoals viaducten en bruggen, bezwijken als gevolg van een overstroming.
- Nader onderzoek naar de locaties waar de omvang van de maatregelen beperkt is maar de impact van maatregel groot is (kosteneffectief), bijvoorbeeld door (spoor)wegen 'waterdichter' te maken door de onderdoorgangen te verbeteren en het plaatselijk verhogen van (spoor)wegen voor bijvoorbeeld de essentiële routes door Nederland.
- Naast permanente ingrepen, is het ook mogelijk om na te gaan of tijdelijke ingrepen effectief zijn.
- Nu is niet bekend wat de invloed is van kabels en leidingen. Mogelijk is dit extra aanleiding om infrastructuur te sparen. Nader onderzoek dient meer inzicht te bieden op de aanwezigheid van kabels en leidingen en de invloed van kabels en leidingen op bezwijken.

- Er is geanalyseerd wat de invloed is van een overstroming met een zeer kleine kans (overschrijdingsfrequentie, variërend van 1:2000 tot 1:12500 jaar langs de rivieren en 1:400.000 jaar in Zeeland) en wateroverlast uit de Klimaateffectatlas (overschrijdingsfrequentie eenmaal per 100 jaar). Het kan relevant zijn om ook nog voor de tussenliggende situaties een analyse uit te voeren, vooral daar waar de overschrijdingsfrequentie erg klein is (situatie Zeeland).
- Extreme neerslag, in combinatie met overstroming, zorgt voor verdergaande instabiliteit, aangezien het baanlichaam dan volledig verzadigd raakt. Deze gevoeligheidsanalyse vraagt echter om een nader onderzoek, aangezien de kans dat beide extreme gebeurtenissen tegelijkertijd optreden erg klein is.

5

LITERATUURLIJST

Deltares (2014). *KPP Aanlegvraagstukken Klimaatbestendigheid geotechnische constructies: Sterkte en stabiliteit wegen bij overstromingen*.

Deltares (2015). *Evacuatie over de weg bij (dreigende) overstromingen: Achtergronddocument tbv het MEGO-Advies Infrastructuur*.

HKV (2022). *Impact van overstromingen op Hoofdwegennet*.

Stratelligence (2022). *Vitaal en Kwetsbaar Hoofdwegennet: Kosten-batenanalyse van ingrepen in het Hoofdwegennet met het oog op overstromingen*.

Hydrologic (2022). *Handelingsperspectief bij overstromingen Dijkkring 9*.

Garcia-Sanchez et al. (2022). *ICARUS Deliverable D1.1 Baseline report on determining impacts and risk due to climate change*. <https://icarus.project.cedr.eu/icarus-resources/> geraadpleegd op 1 juli 2025.

Omroep Zeeland (2023). *Extreme regenval en extra treinen zorgen voor verzakkingen Zeeuwse spoor, treinverkeer tot en met zondag ontregeld - Omroep Zeeland geraadpleegd op 1 juli 2025*.

STOWA (2025). *Maatregelenoverzicht Klimaatbestendige netwerken Hoofdwegennet*.

Sweco (2025). *Maatregelenlijst project FIER*. Tussenstand geraadpleegd op 14 juli 2025.

BIJLAGE 1

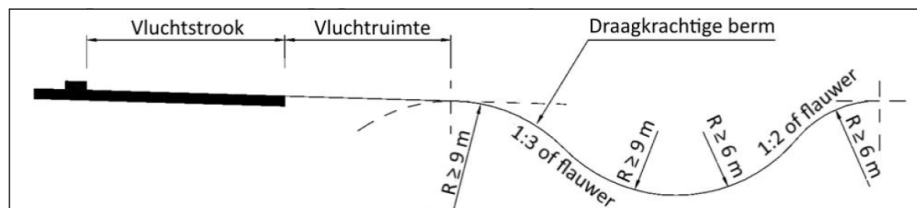
OPBOUW VAN (SPOOR)WEGEN

OPBOUW VAN WEGEN

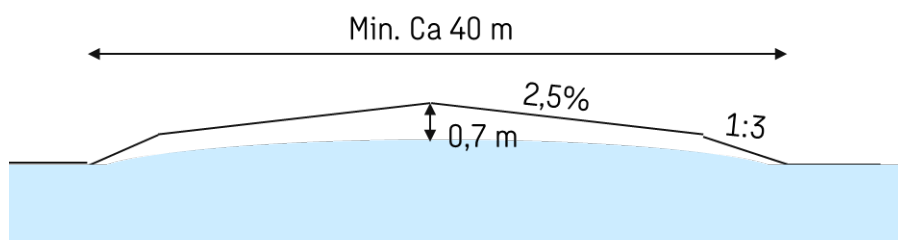
Voor snelwegen geldt in de regel een opbouw die bestaat uit een toplaag van asfalt, daar- onder een gestabiliseerde laag granulaat op een daaronder gelegen zandbed. De asfaltcon- structie heeft een dikte van maximaal 0,25 meter. Naarmate wegen minder worden belast (zoals bij provinciale en gemeentelijke ontsluitingswegen), wordt een geringere dikte van het asfalt toegepast tot circa 0,16 meter. Dit pakket asfalt bestaat veelal uit 4 lagen in verschil- lende samenstellingen. Daaronder is een laag betongranulaat of menggranulaat toegepast met een dikte van 0,25 – 0,3 meter. Hieronder is het zandbed aanwezig met een dikte van minimaal 0,5 meter.

Bij het ontwerp van wegen (in dit geval is de snelwegen toegelicht) wordt bij de opbouw van het weglichaam rekening gehouden met een opbolling van de grondwaterstand die ontstaat doordat een overschot aan neerslag uit het baan-lichaam moet worden afgevoerd. De opbolling waar rekening mee wordt gehouden bedraagt minimaal 0,5 m, maar in veel gevallen zal deze bij extreme neerslag groter zijn (mondelinge opgave) – dit kan 1,0 m bedragen. Het talud van de wegsloot ten weerszijden van de weg bedraagt minimaal 1:3 (zie afbeelding B1.1) en voor de dwarshelling van de wegen wordt veelal 2,5% aangehouden. Dit resulteert in een dwarsprofiel met een breedte van minimaal 40 m bij een opbolling van 0,8 m en een ontwateringsdiepte van 0,7 meter. Het hoogste punt van de weg ligt dan 1,5 m boven het hoogste waterpeil (in rust). In de praktijk komen ook situaties met een geringere drooglegging voor (circa 1,2 m). De opbolling is weergegeven als (blauw) grondwater in het wegprofiel in de afbeelding B1.2.

Afbeelding B1.1 Met inrichting randstrook rijkswegen en de overgang naar de wegsloot (bron: ROA)



Afbeelding B1.2 Schematische weergave van een dwarsprofiel van een weg, uitgaande van een opbolling van 0,5 m en een ontwateringsdiepte van 0,7 m - (grondwater als blauwe arcering)



Voor de analyse van snelwegen is de werkelijke situatie in de volgende drie voorbeeldgebieden geanalyseerd:

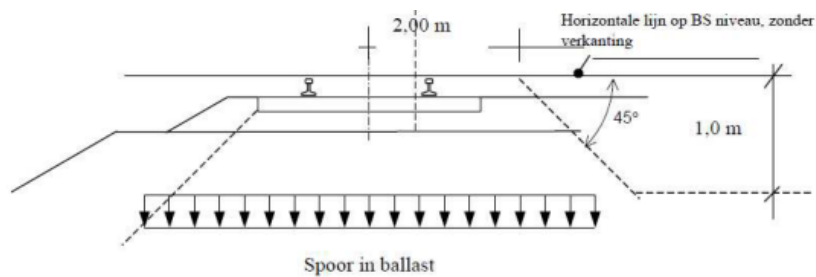
- Rijksweg A28 ten noorden van Zwolle (in dijkkring 9);
- Rijksweg A12 ten westen van Utrecht;
- de Deltaweg ten noorden van Goes (Dit is een provinciale weg).

OPBOUW VAN SPOORWEGEN

Voor de opbouw van spoorwegen is rekening gehouden met een opbouw die bestaat uit een ballastbed en daaronder een bodemprofiel, zoals afgeleid uit de bodemgegevens uit de omgeving of van het baanlichaam zelf.

Dit profiel is hieronder schematisch weergegeven.

Afbeelding B1.3 Schematische weergave van een baanlichaam (bron: ProRail)



De bovenkant van het spoor ligt minimaal 1,0 m boven het aangrenzende maaiveld. Voor de analyse van de spoorwegen is de werkelijke situatie in de volgende drie voorbeeldgebieden geanalyseerd:

- spoorweg Zwolle – Groningen ten noorden van Zwolle (in dijkkring 9);
- spoorweg Nijmegen – Den Bosch (ten zuiden van de Maas);
- spoorweg Roosendaal – Vlissingen (ten westen van Goes).

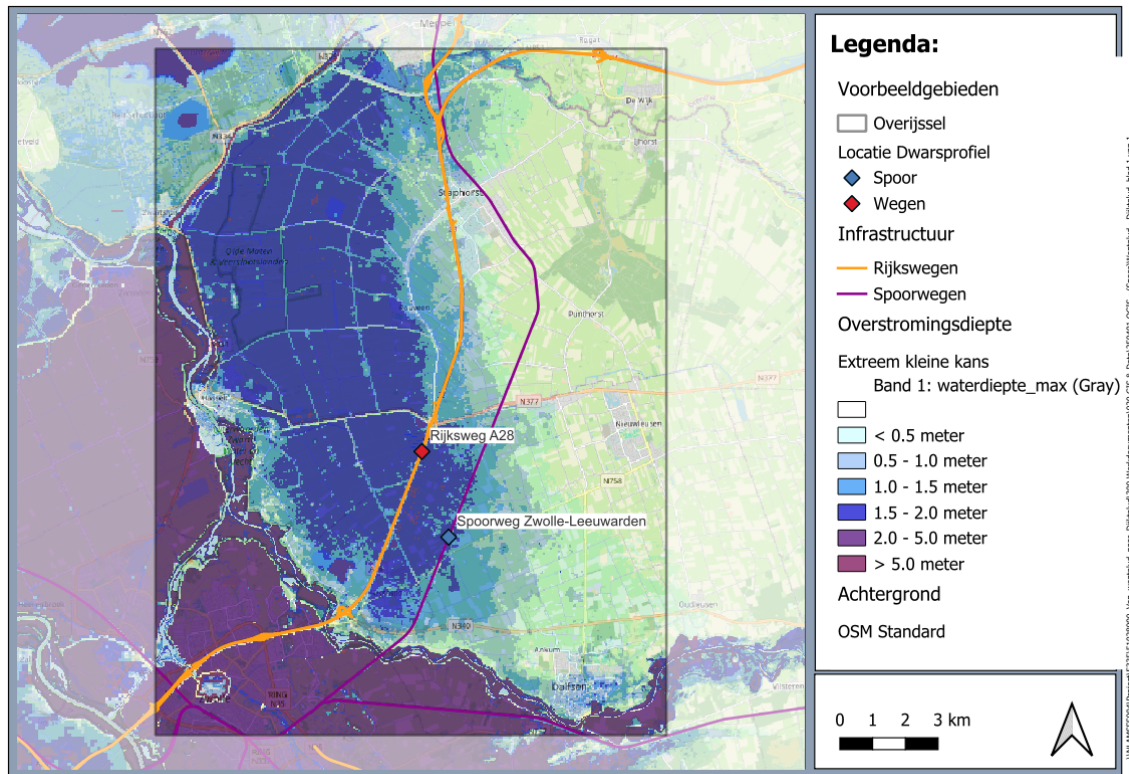
BIJLAGE 2

VOORBEELDGEBIEDEN

OVERIJJSSEL

In Overijssel zijn twee locaties geselecteerd voor dwarsprofielen: de spoorlijn Zwolle – Leeuwarden en de Rijksweg A28. Figuur B2.1 toont de ligging van deze profielen in het voorbeeldgebied, gecombineerd met de mogelijke overstromingsdiepte volgens LIWO die voorkomt bij een **extreem kleine kans** ter illustratie.

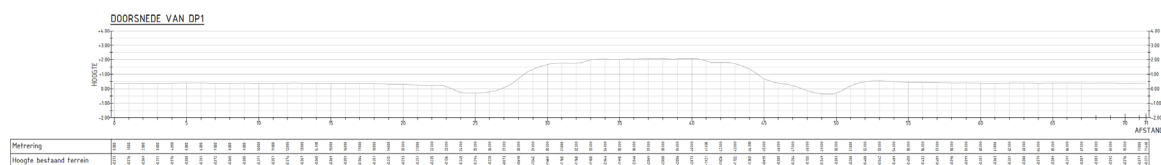
Figuur B2.1 Voorbeeldgebied en locatie dwarsprofielen in Overijssel



PROFIEL & HOOGTEOPBOUW

Het dwarsprofiel van de spoorlijn Zwolle-Meppel is weergegeven in onderstaande figuur B2.2.

Figuur B2.2 Dwarsprofiel spoortlijn Zwolle-Meppel



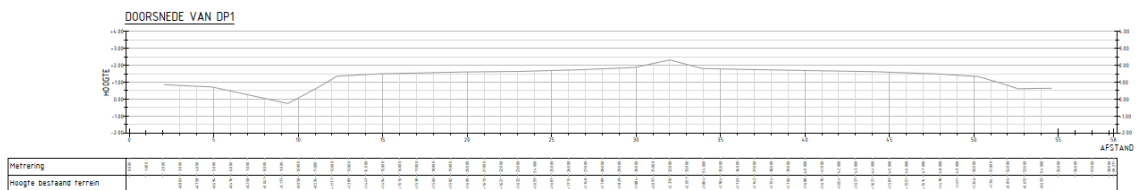
KENMERKEN BAANPROFIEL SPOORLIJN

De geometrische kenmerken van het dwarsprofiel van de spoorbaan in voorbeeldgebied Overijssel zijn als volgt:

- hoogte kruin : NAP +2,0 m
- hoogte maaiveld : NAP +0,2 m
- breedte kruin : 8 m (2 sporen);
- talud : 1:2;
- watergangen aanwezig.

Het dwarsprofiel van de A28 is weergegeven in onderstaande Figuur B2.3.

Figuur B2.3 Dwarsprofiel A28 t.h.v. km 104.2

**KENMERKEN WEGPROFIEL**

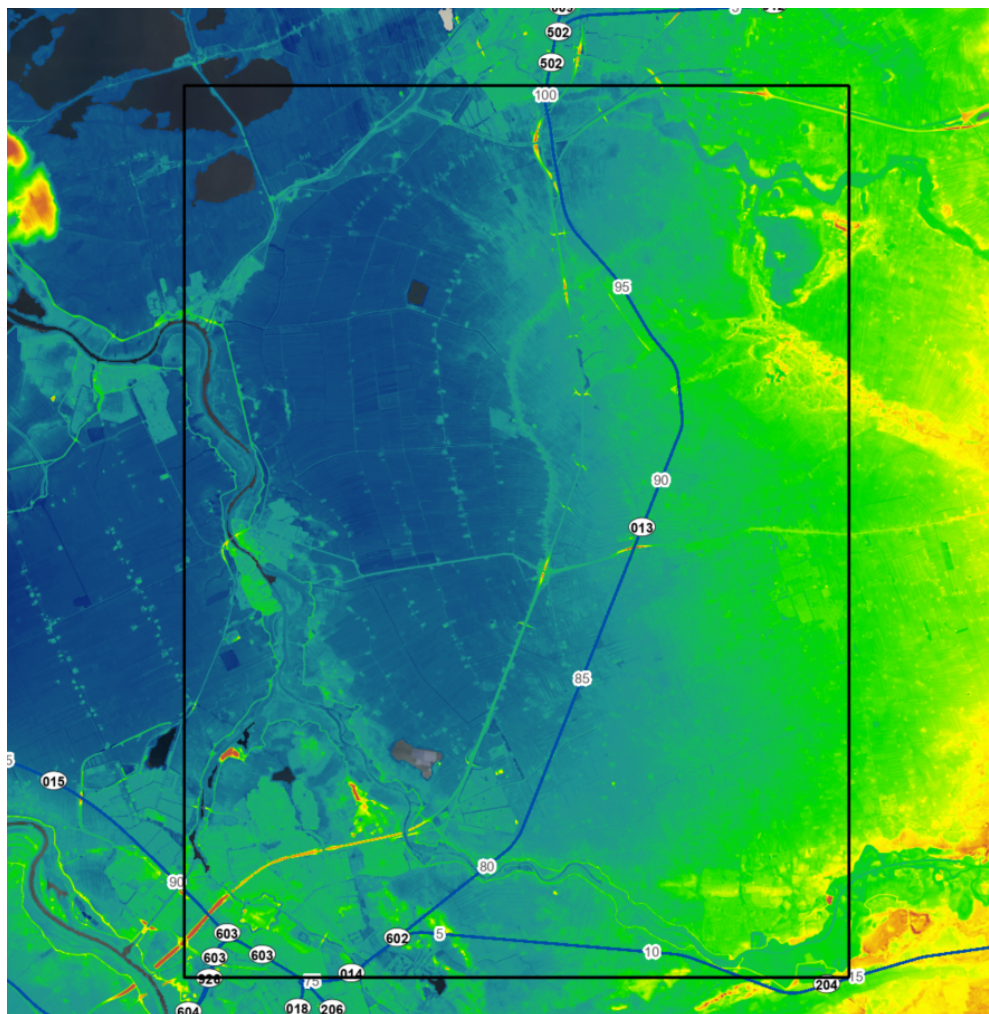
Voor de ondergrondschematisatie van de weg in voorbeeldgebied Overijssel wordt dezelfde ondergrondschematisatie en aardebaan materiaal aangehouden, zoals geschematiseerd voor de spoorbaan.

De kenmerken van het dwarsprofiel van de rijksweg zijn:

- hoogte bovenkant asfalt : NAP + 2,10;
- hoogte maaiveld : NAP +0,8 — 0,9 m;
- breedte wegprofiel : 40 meter;
- taluds : 1:2 — 1:3;
- watergangen aanwezig;

Onderstaande hoogtekaart toont de twee locaties ten noorden van Zwolle.

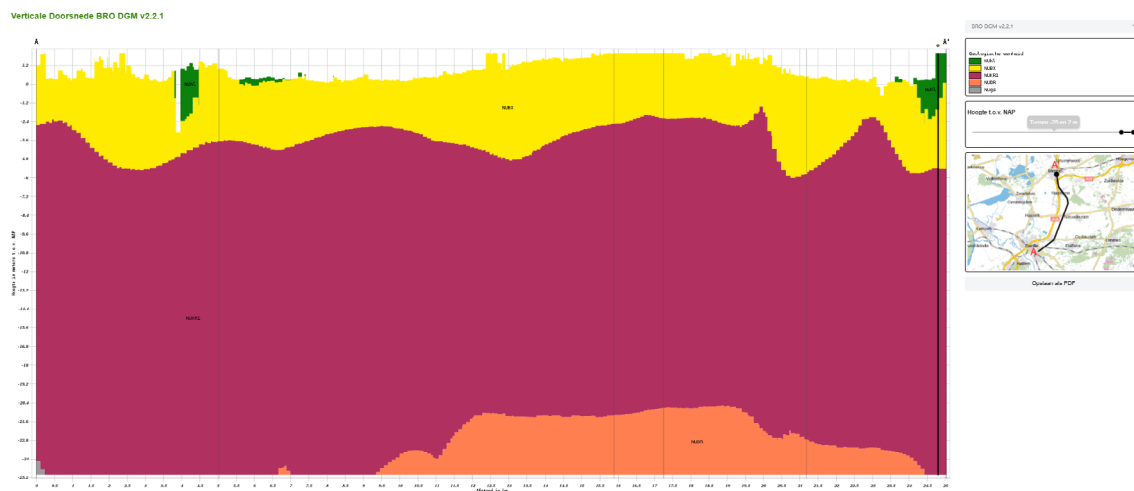
Figuur B2.4 Uitsnede uit AHN met de geselecteerde locaties rood omkaderd (bron AHN-5)



KENMERKEN BAANMATERIAAL

Voor zowel de spoorlijn als de rijksweg geldt een vergelijkbare opbouw van de ondergrond. In Figuur B2.5 is de ondergrondschematisatie volgens het BRO DGM weergegeven. Op basis hiervan zijn de volgende aannames gedaan:

- Ondergrond: het BRO DGM laat zien dat in dit voorbeeldgebied de 'Formatie van Bostel' en de 'Formatie van Kreftenheye' aanwezig zijn. Aangezien het aanwezige grondonderzoek veelal zand laat zien, is gekozen om de ondergrond enkel als zand (P_Rg_zm) te schematiseren.
- Materiaal spoorbaan: er is geen grondonderzoek in de spoorbaan aanwezig maar aangezien de ondergrond van het gebied voornamelijk uit zand bestaat, wordt verwacht dat de spoorbaan ook uit zand is opgebouwd (gebiedseigen grond). De spoorbaan wordt dan ook geschematiseerd als H_Aa_onb_z.

Figuur B2.5 Bodemopbouw ter plaatse van de geselecteerde locatie (bron: Dino-loket)**OVERSTROMING**

In dijkkring 9 ligt de spoorweg Zwolle — Meppel met een baanlichaam circa 1 à 2 m boven maaiveld. Bij een mogelijke doorbraak van de waterkering ten noorden van de Vecht zal water in noordelijke richting stromen. Dit komt overeen met het doorbraakscenario Vecht 'Na Dalfsen' (bron: LIWO Overstromingsscenario's). In Figuur is een beeld van de optredende waterdiepte weergegeven. Het baanlichaam is een barrière in de stroming in noordwestelijke richting. In dit tracé is binnen het rood omkaderde deel een locatie geselecteerd, waarbij de invloed van de overstroming is onderzocht.

Ter plaatse van de geselecteerde locatie doet zich het volgende voor:

- maximale waterdiepte zuidoostzijde circa 1,55 meter;
- stijgsnelheid water = 0,04 m/uur;
- aankomsttijd water 3 uur en 50 minuten.

Ter plaatse van de geselecteerde locatie in de A28 doet zich het volgende voor:

- maximale waterdiepte zuidoostzijde circa 1,87 meter;
- stijgsnelheid water = 0,10 m/uur;
- aankomsttijd water 7 uur.

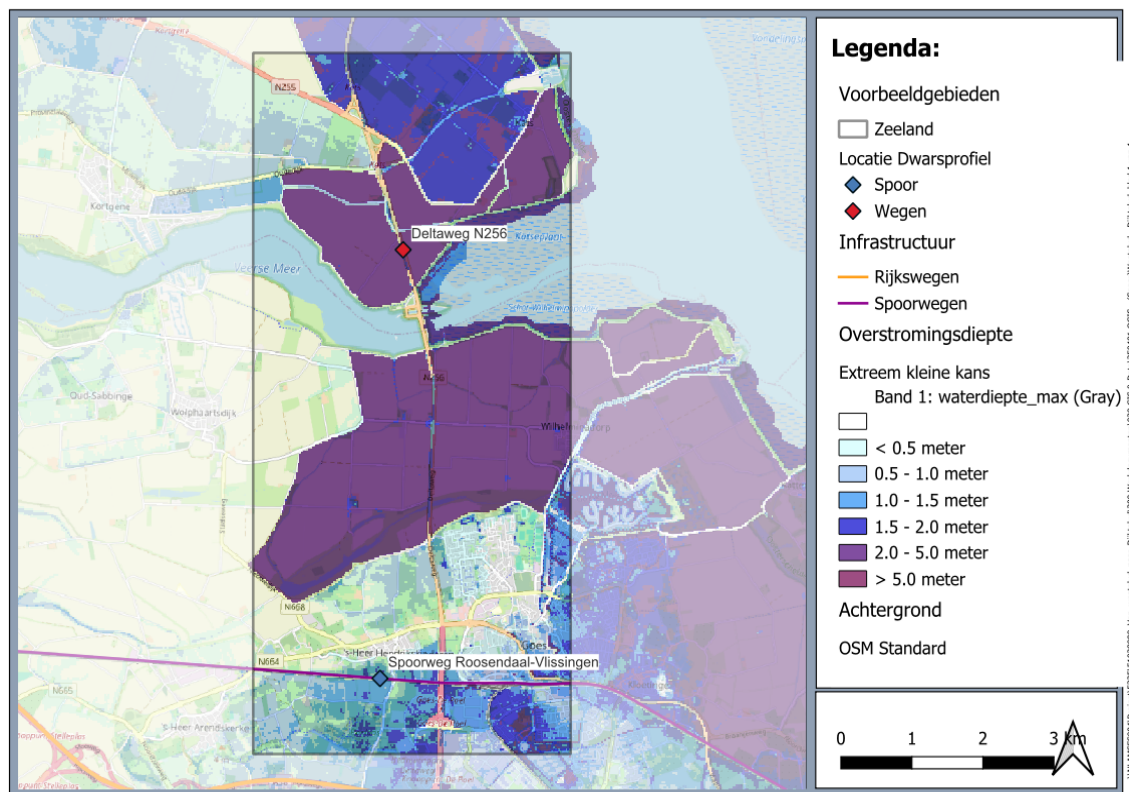
WATEROVERLAST

Naast de invloed van een overstroming, is ook de invloed van extreme neerslag onderzocht. In de stabiliteitsberekeningen is van het meest extreme scenario gerekend, waarbij het baanlichaam volledig verzadigd is terwijl de buitenwater-stand gelijk is aan de dagelijkse waterstand (in teensloot).

ZEELAND

In Zeeland zijn twee locaties geselecteerd voor dwarsprofielen: de spoorlijn Roosendaal — Vlissingen en de Deltaweg (N256). Figuur toont de ligging van deze profielen in het voorbeeldgebied, gecombineerd met de mogelijke overstromingsdiepte volgens LIWO die voorkomt bij een **extreem kleine kans** ter illustratie.

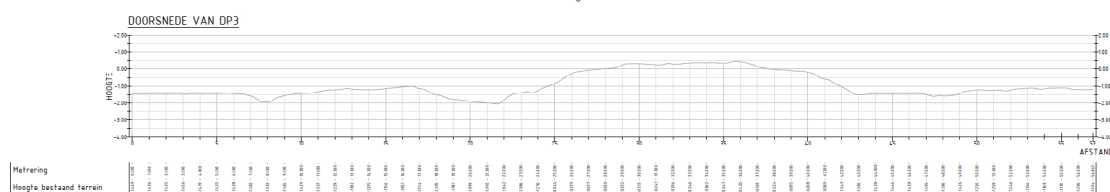
Figuur B2.6 Voorbeeldgebied en locatie dwarsprofielen in Zeeland



PROFIEL & HOOGTEOPBOUW

Het dwarsprofiel van de spoorlijn Roosendaal — Vlissingen net ten westen van Goes is weer-gegeven in onderstaande Figuur B2.7.

Figuur B2.7 Dwarsprofiel spoorlijn Roosendaal-Vlissingen

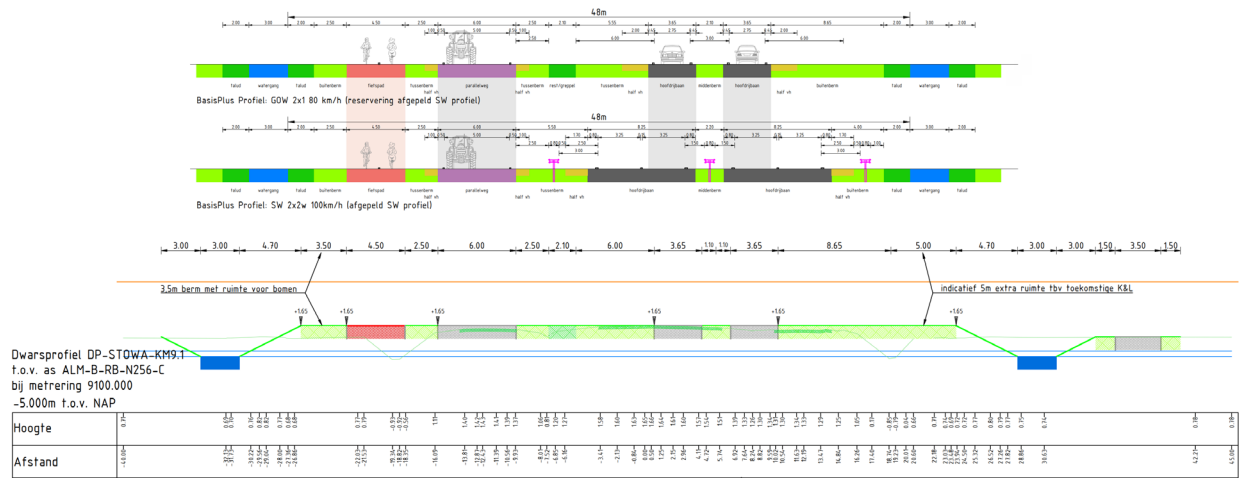


De geometrische kenmerken van het dwarsprofiel van de spoorbaan in pilot-gebied Zeeland zijn als volgt:

- hoogte kruin : NAP +0,4 m;
- hoogte maaiveld : NAP -1,2 m;
- breedte kruin : 8 m (2 sporen);
- talud : 1:2;
- watergangen aanwezig.

Het dwarsprofiel van de Deltaweg is weergegeven in onderstaande Figuur B2.8.

Figuur B2.8 Dwarsprofiel Deltaweg N256 (huidige situatie en Ontwerp) t.h.v. km 9.1

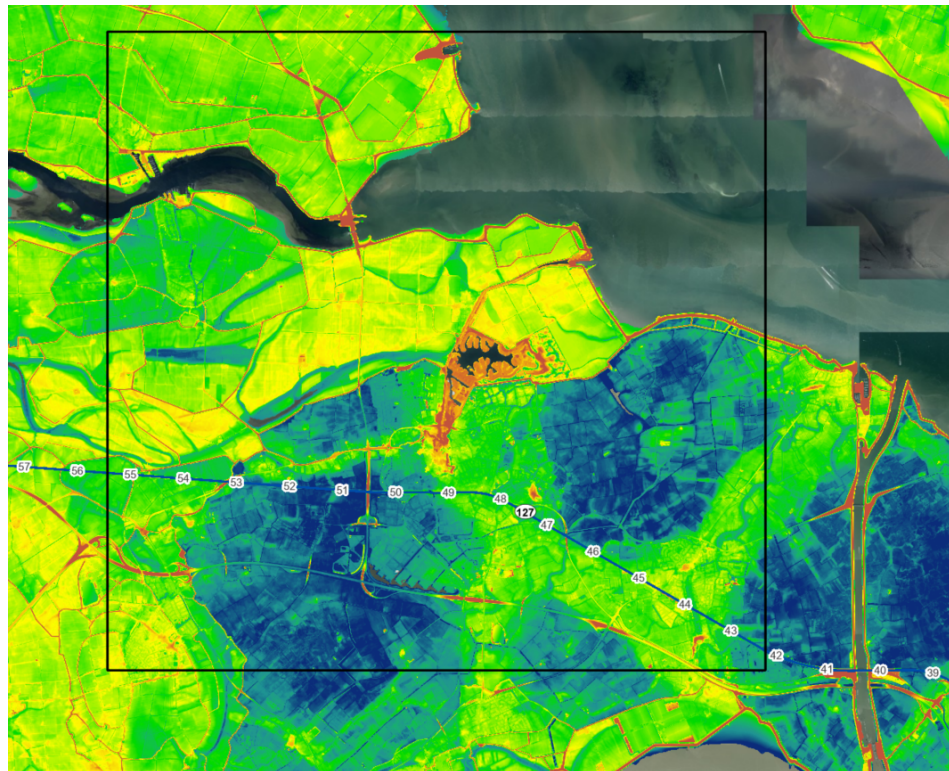


De kenmerken van het dwarsprofiel van de Deltaweg N256 zijn:

- hoogte bovenkant asfalt : NAP + 1.65 m;
- hoogte maaiveld : NAP +0,78 m;
- breedte wegprofiel : 48 meter;
- taluds : 1:3;
- watergangen aanwezig.

De hoogtekkaart op de volgende pagina toont de twee locaties in Zeeland.

Figuur B2.9 Uitsnede uit AHN met de geselecteerde locaties rood omkaderd (bron AHN-5)

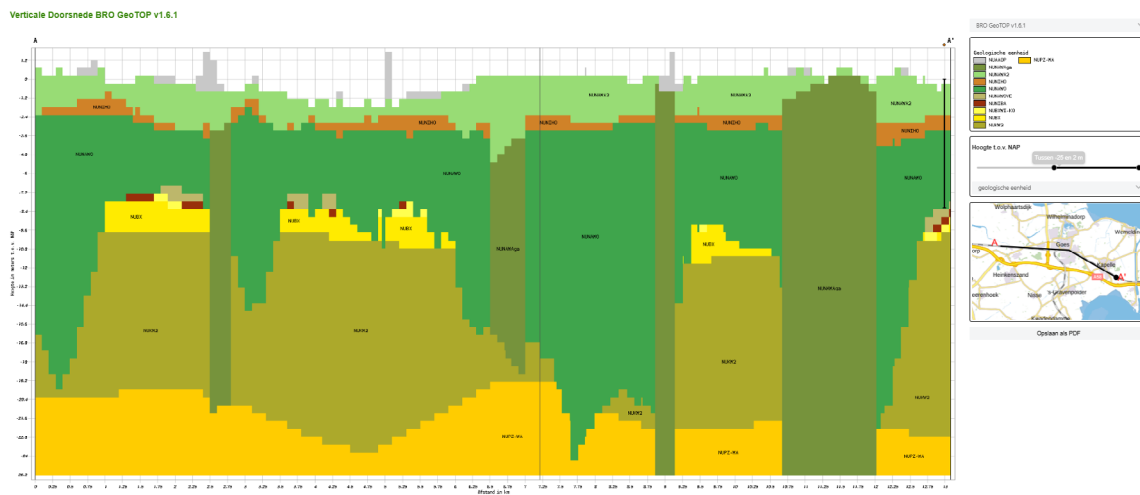


KENMERKEN BAANMATERIAAL

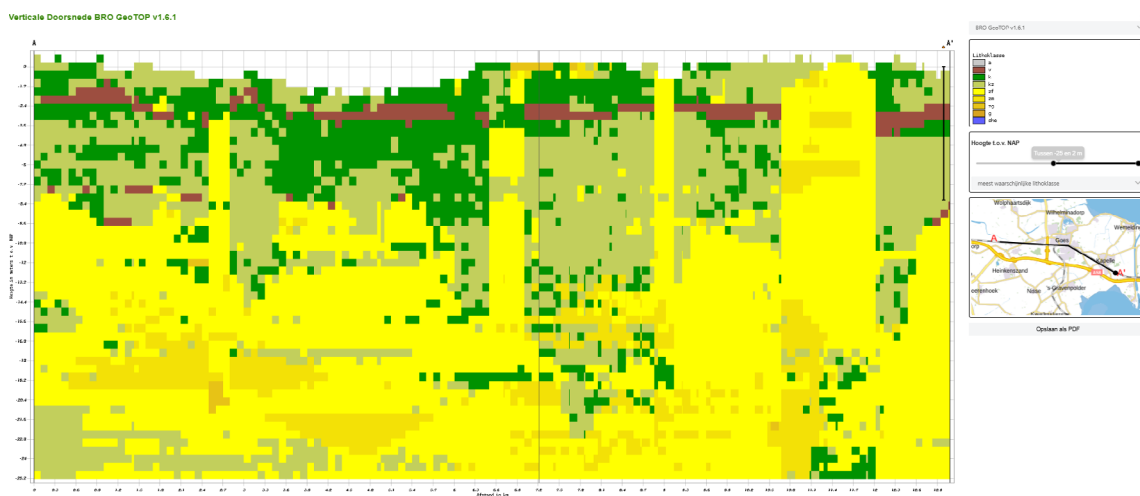
In Figuur B2.10 is de ondergrondschematisatie volgens het BRO GeoTOP weergegeven. Op basis hiervan zijn de volgende aannames gedaan:

- Ondergrond: het BRO GeoTOP laat zien dat in dit voorbeeldgebied voornamelijk de 'Formatie van Naaldwijk' en de 'Formatie van Nieuwkoop' aanwezig is(zijn). Het gegeven van de aanwezige formaties en het aanwezige grondonderzoek heeft geleid tot de volgende ondergrondschematisering:
 - klei (H_Mp_k) tot NAP -2,0 m;
 - veen (Vhv_v) tussen NAP -2 m en NAP -3,0 m;
 - klei (H_Mp_k) tussen NAP -3,0 m en NAP -8,0 m;
 - zand (Mg_zf) vanaf NAP -8,0 m.
- Materiaal spoorbaan: er is geen grondonderzoek in de spoorbaan aanwezig maar aangezien de bovenste laag van de ondergrond van het gebied voornamelijk uit slappe lagen bestaat, wordt verwacht dat de spoorbaan ook uit slappe lagen (klei) is opgebouwd (gebiedseigen grond). De spoorbaan wordt dan ook geschematiseerd als H_Aa_onb_k.

Figuur B2.10 Bodemopbouw ter plaatse van de geselecteerde locatie (bron: BROloket)



Figuur B2.11 De toplaag van de bodem ter plaatse van de geselecteerde locatie (bron: GeoTOP v.1.6.1 BROloket)



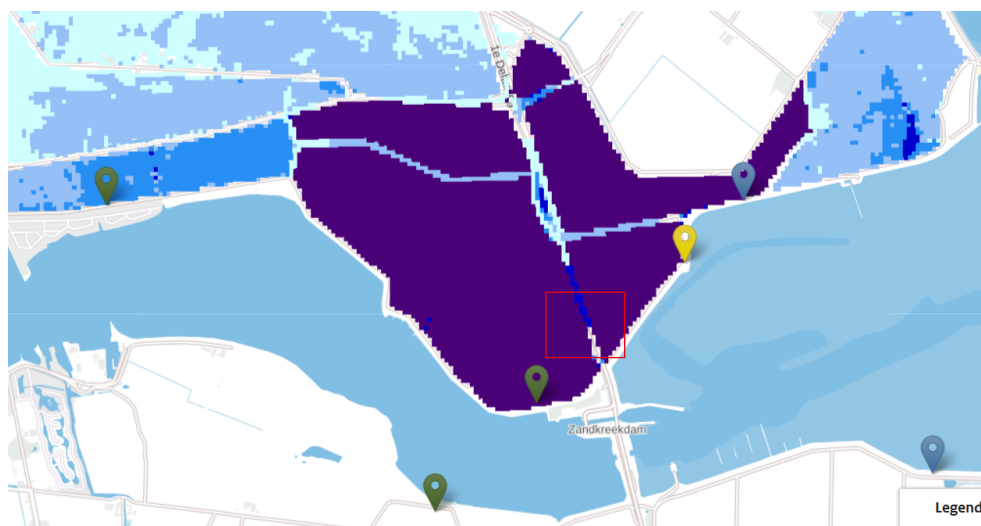
KENMERKEN MATERIAAL WEGPROFIEL

Voor de ondergrondschematisatie van de weg in voorbeeldgebied Zeeland wordt dezelfde ondergrondschematisatie en aardebaan materiaal aangehouden, zoals geschematiseerd voor de spoorbaan.

OVERSTROMINGEN

De Deltaweg N256 ligt als noord-zuid verbinding met een baanlichaam circa 1 m boven maaiveld. Bij een mogelijke doorbraak van de waterkering vanuit het zuidoosten zal water in westelijke richting stromen. Dit komt overeen met het doorbraakscenario 'OS-dp 1720 variant 13_Kaptspolder 1/400000 Osgetij' (bron: LIWO Overstromingsscenario's). In Figuur B2.12 is een beeld van de gevolgen van deze doorbraak weergegeven. Het baanlichaam is een barrière in de stroming in westelijke richting. In dit tracé is binnen het rood omkaderde deel een locatie geselecteerd, waarbij de invloed is onderzocht.

Figuur B2.12 Doorbraak zuidzijde Noord-Beveland 'OS-dp 1720 variant 13-_Katspolder 1/400000' en de ligging van de Deltaweg als lijnelement in het landschap (Bron: LIWO)

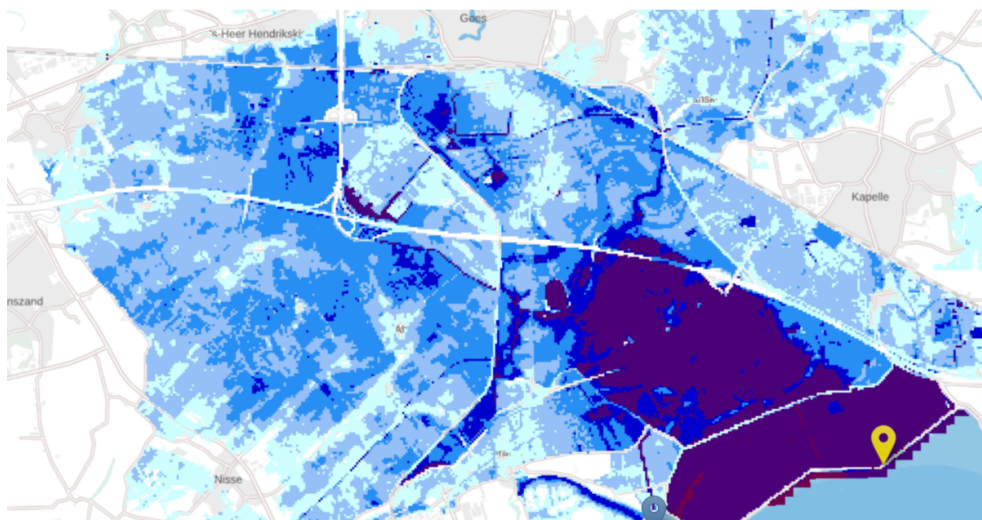


Ter plaatse van de geselecteerde locatie doet zich het volgende voor:

- maximale waterdiepte zuidzijde : 3,1 meter;
- aankomsttijd water : 1 uur;
- stijgsnelheid : 6,3 m/uur.

De spoorlijn Roosendaal – Vlissingen (ten westen van Goes) heeft een baan-lichaam met een kruinhoogte circa 1 m boven maaiveld. Bij een mogelijke doorbraak van de waterkering vanuit het zuiden zal water in noordwestelijke richting stromen. Dit komt overeen met het doorbraakscenario 'Zuid-Beveland 'WSNoo-dp300 variant 11-_Willem_Annapolder 1/400000''(bron: LIWO Overstromingsscenario's). In Figuur B2-13 is een screenshot van de maximale waterdiepte bij deze doorbraak weergegeven. Het baanlichaam is een barrière in de stroming in noordelijke richting naar Goes. In dit tracé is binnen het rood omkaderde deel een locatie weergegeven die voor de analyse is geselecteerd.

Figuur B2.13 Doorbraak zuidzijde Zuid-Beveland 'WSNoo-dp300 variant 11- _Willem_Annapolder 1/400000' en de ligging van de spoorlijn Roosendaal – Vlissingen als lijnelement in het landschap (Bron: LIWO)



Ter plaatse van de geselecteerde locatie doet zich het volgende voor:

- maximale waterdiepte zuidzijde : 1,4 meter;
- aankomsttijd water : 16 uur;
- stijgsnelheid : 0,01 m/uur;
- aankomsttijd water : 7 uur.

WATEROVERLAST

De invloed van extreme wateroverlast, zoals opgenomen in de Klimaateffectatlas, resulteert in een lagere waterstand (circa maaiveld). Voor een beeld van de stabiliteit van de taluds in een zeer natte situatie (en verzadiging van taluds) kan worden gekeken naar de situatie bij de maximale waterstand als gevolg van overstroming.

UTRECHT

In Utrecht is één locatie geselecteerd voor een dwarsprofiel: de Rijksweg A12. Figuur B2.14 toont de ligging van dit profiel in het voorbeeldgebied, gecombineerd met de mogelijke overstromingsdiepte volgens LIWO, bij een extreem kleine kans ter illustratie.

Figuur B2.16 AHN-hoogteprofiel A12 Utrecht

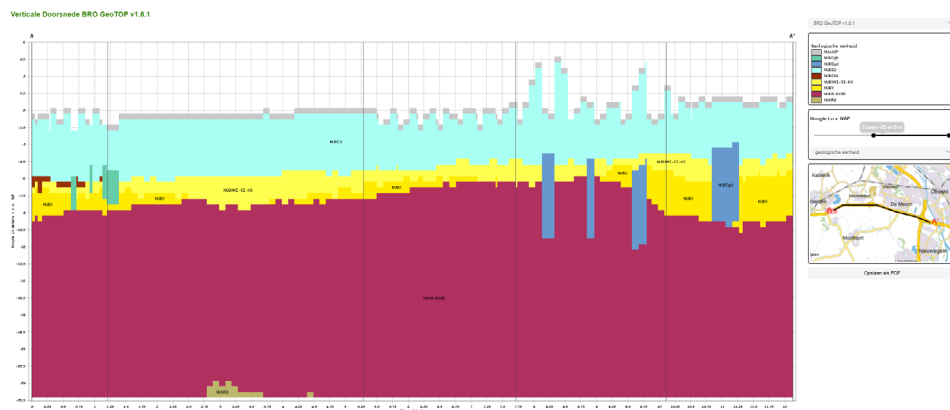


KENMERKEN ONDERGROND WEGPROFIEL

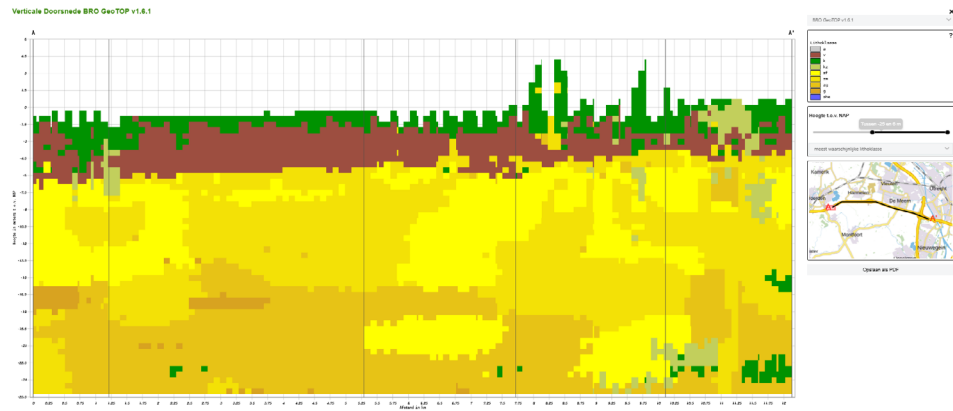
In de figuren B2.17 en B2.18 zijn het AHN en de ondergrondschematisatie volgens het BRO GeoTOP weergegeven. Op basis hiervan zijn de volgende aannames gedaan:

- Ondergrond: het BRO GeoTOP laat zien dat in dit voorbeeldgebied voornamelijk de 'Formatie van Echteld', de "Formatie van Boxtel" en de 'Formatie van Kreftenheye' aanwezig zijn. Het gegeven van de aanwezige formaties en het aanwezige grondonderzoek heeft geleid tot de volgende ondergrondschematisering:
 - klei (H_Rk_k&v) tot NAP -1,5 m;
 - veen (H_Rk_vk) tussen NAP -2,0 m en NAP -5,0 m;
 - zand (H_Rg_zf) vanaf NAP -5,0 m.
- Materiaal aardebaan: er zijn meerdere sonderingen in de weg aanwezig. Op basis hiervan kan vastgesteld worden dat de aardebaan van zand (H_Aa_z) is opgebouwd (tot NAP -1,0 m = hoogte omliggend maaiveld).

Figuur B2.17 Bodemopbouw ter plaatse van de geselecteerde locatie (bron: Dino-loket)



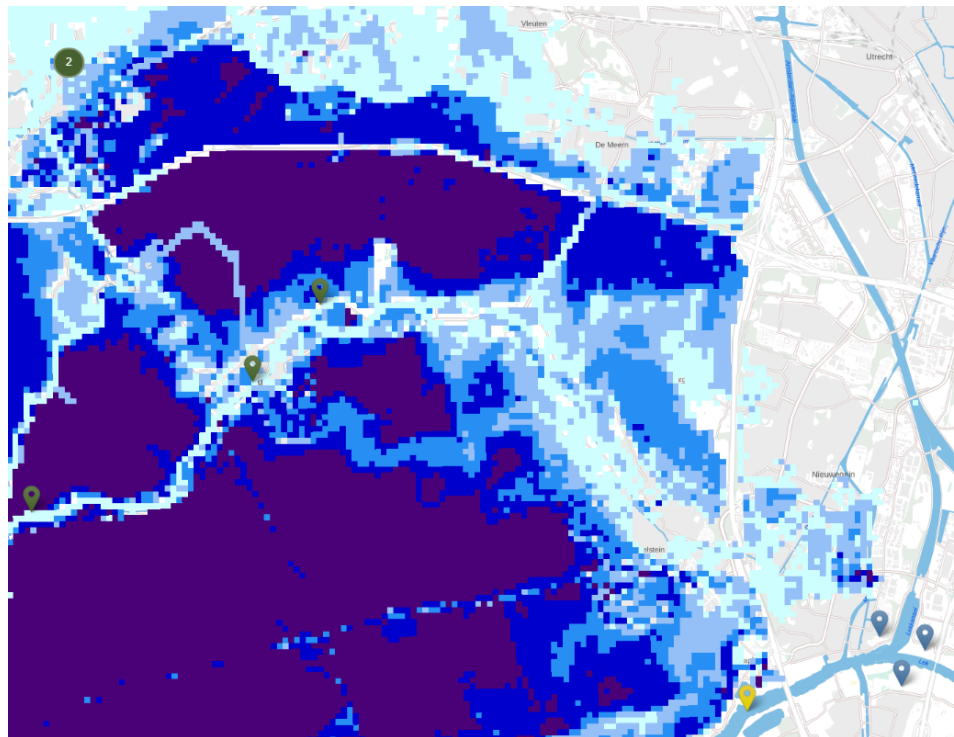
Figuur B2.18 De toplaag van de bodem ter plaatse van de geselecteerde locatie (bron: GeoTOP v.1.6.1 Dino-loket)



OVERSTROMING

In dijkkring 44 ligt de Rijksweg A12 Utrecht — Den Haag met een baanlichaam circa 2 m boven maaiveld. Bij een mogelijke doorbraak van de waterkering langs de noordzijde van de Lek zal water in noordwestelijke richting stromen. Dit komt overeen met het doorbraakscenario ‘Lek km 952,5 (IJsselstein) variant bres15_02A_2000_zand_rep’ (bron: LIWO Overstromingsscenario's). In Figuur B2.19 is een screenshot van deze doorbraak weergegeven. Het baanlichaam is een barrière in de stroming in noordelijke richting. In dit tracé is binnen het rood omkaderde deel een locatie geselecteerd, waarbij de invloed van de stroming is onderzocht.

Figuur B2.19 Maximale waterdiepte bij doorbraak noordzijde van de Lek “Lek km 952,5 (IJsselstein) variant bres15_02A_2000_zand_rep” en de ligging van de Rijksweg Utrecht-Den Haag als lijnelement in het landschap (Bron: LIWO)



Ter plaatse van de geselecteerde locatie doet zich het volgende voor:

- maximale waterdiepte zuidzijde : 2,09 meter;
- aankomsttijd water : 167 uur;
- stijgsnelheid : 0,04 m/uur.

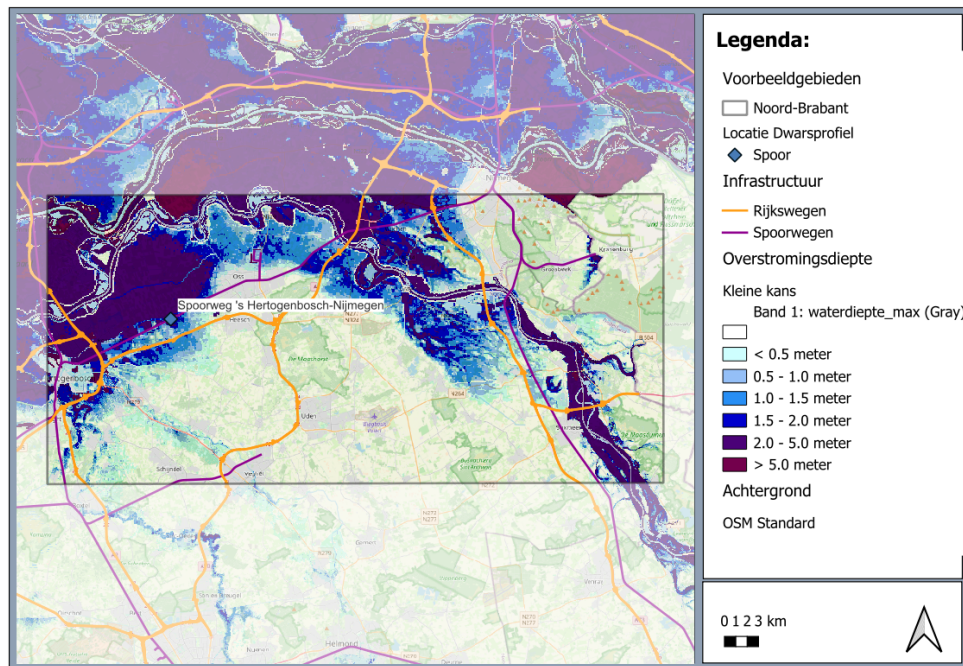
WATEROVERLAST

De invloed van extreme wateroverlast, zoals opgenomen in de Klimaateffectatlas, resulteert in een lagere waterstand (circa maaiveld) in vergelijking met de waterstand als gevolg van een overstroming. Voor een beeld van de stabiliteit van de taluds in een zeer natte situatie (en verzadiging van de taluds) kan worden gekeken naar de situatie bij de maximale waterstand als gevolg van overstroming.

NOORD-BRABANT

In Noord-Brabant is één locatie geselecteerd voor een dwarsprofiel: de spoorlijn 's-Hertogenbosch — Nijmegen. Figuur B2.20 toont de ligging van dit profiel in het voorbeeldgebied, gecombineerd met de mogelijke overstromingsdiepte volgens LIWO bij een **kleine kans** ter illustratie.

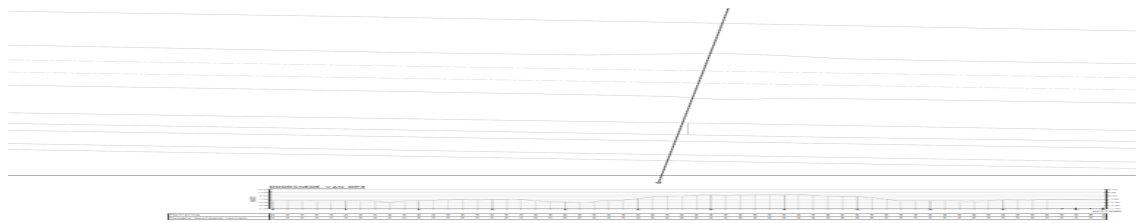
Figuur B2.20 Voorbeeldgebied met daarin de spoorlijn Nijmegen – Den Bosch en overstromingsverloop (bron: LIWO)



PROFIEL EN HOOGTEOPBOUW

Het baanlichaam is in onderstaande figuur B2.21 weergegeven.

Figuur B2.21 Dwarsprofiel van het baanlichaam van de spoorlijn (Bron: AHN5)

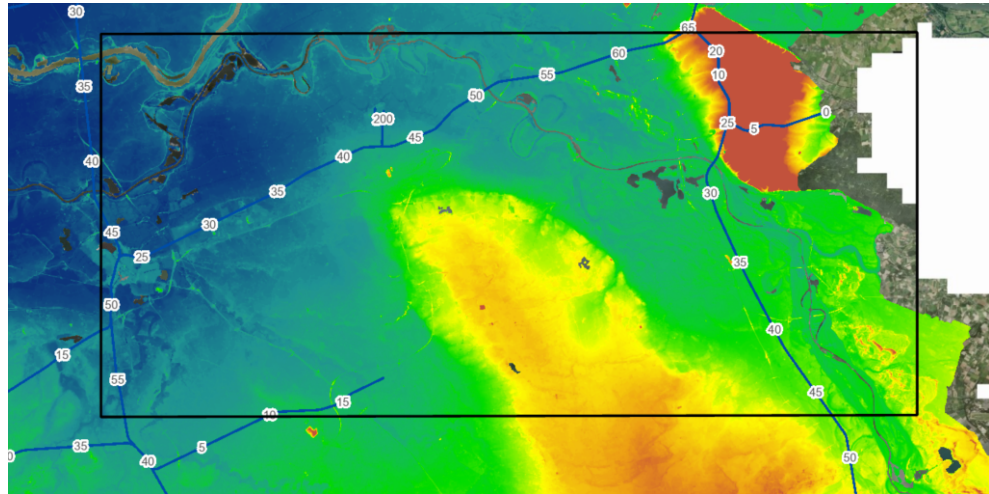


De geometrische kenmerken van het dwarsprofiel van de spoorbaan zijn als volgt:

- hoogte kruin : NAP +7,0 m;
- hoogte maaiveld : NAP +4,0 m;
- breedte kruin : 8 -10 m (2 sporen) — totale breedte baanlichaam 25 m op maaiveld;
- talud : 1:2;
- greppels / watergangen aanwezig.

Onderstaande hoogtekaart toont de locatie in Noord-Brabant.

Figuur B2.22 Uitsnede uit AHN met de geselecteerde locatie rood omkaderd (bron AHN-5)

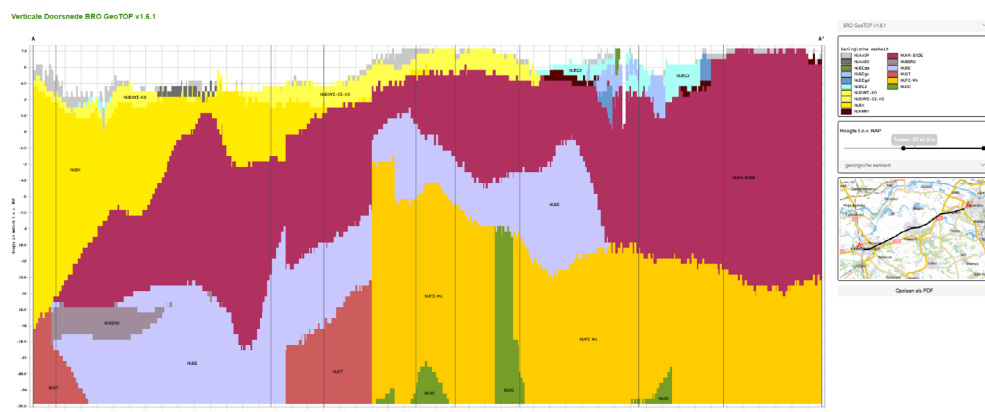


KENMERKEN BAANMATERIAAL

In onderstaande figuren is de ondergrondschematisatie volgens het BRO GeoTOP weer-gegeven. Op basis hiervan zijn de volgende aannames gedaan:

- Ondergrond: het BRO GeoTOP laat zien dat in dit voorbeeldgebied voornamelijk de 'Formatie van Echteld', de 'Formatie van Buxteld' en de 'Formatie van Kreftenheye' aanwezig zijn. In het voorbeeldgebied wordt voor het grootste gedeelte zand herkend in de ondergrond. Echter wordt rondom de Maas klei gevonden tot circa 3,0 m onder maai-veld. Om een onderscheidende schematisatie te kiezen ten opzichte van de schematisatie van voorbeeldgebied 'Dijkkring 9', is gekozen om de volgende ondergrondschematisatie toe te passen:
 - klei (H_Rk_k_k) tot NAP +1,0 m;
 - zand (P_Wrd_zm) vanaf NAP +1,0 m.
- Materiaal spoorbaan: er is geen grondonderzoek in de spoorbaan aanwezig maar aange-zien de ondergrond als klei wordt geschematiseerd, is gekozen om ook het materiaal van de spoorbaan als klei te schematiseren (gebiedseigen grond). De spoorbaan wordt dan ook geschematiseerd als H_Aa_onb_k.

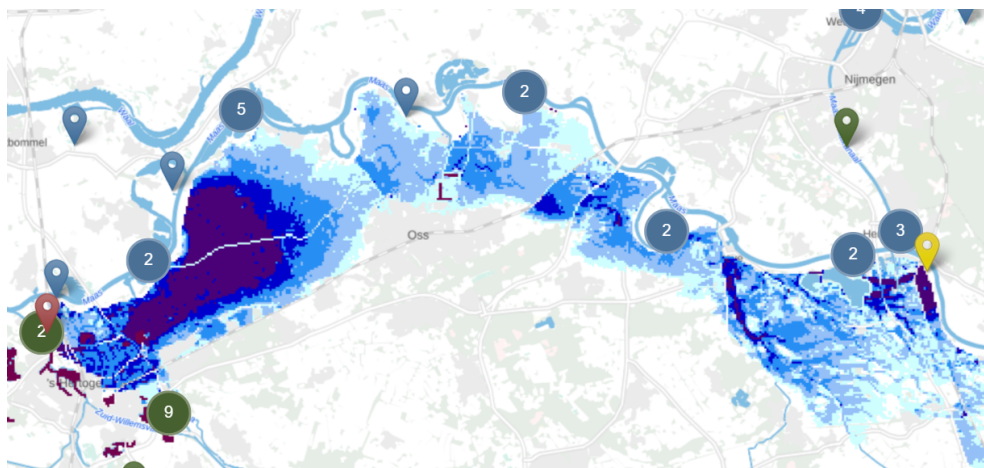
Figuur B2.23 Bodemopbouw ter plaatse van de geselecteerde locatie (Bron: Dino-loket)



OVERSTROMING

De spoorlijn Nijmegen – Den Bosch ligt parallel langs de Maas, met een baanlichaam circa 2 m boven maaiveld. Bij een mogelijke doorbraak van de waterkering ten westen van de Maas zal water in westelijke richting parallel langs de Maas in westelijke richting stromen. Dit komt overeen met het doorbraakscenario 'Katwijk' (bron: LIWO Overstromingsscenario's). In Figuur B2.24 is een screenshot van deze doorbraak weergegeven. Het baanlichaam is een barrière in de stroming in zuidelijke richting. In dit tracé is binnen het rood omkaderde deel een locatie geselecteerd, waarbij de invloed van de stroming is onderzocht.

Figuur B2.24 Doorbraak westzijde van de Maas 'Katwijk' en de ligging van de spoorlijn Nijmegen – Den Bosch als lijnelement in het landschap (Bron: LIWO)



Ter plaatse van de geselecteerde locatie doet zich het volgende voor:

- maximale waterdiepte noordzijde van spoor circa 1,50 meter;
- stijgsnelheid water = 0,02 m/uur;
- aankomsttijd water 283 uur.

WATEROVERLAST

De invloed van extreme wateroverlast, zoals opgenomen in de klimaateffectatlas, resulteert in een lagere waterstand (circa maaiveld) in vergelijking met de waterstand als gevolg van een overstroming. Voor een beeld van de stabiliteit van de taluds in een zeer natte situatie (en verzadiging van de taluds) kan worden gekeken naar de situatie bij de maximale waterstand als gevolg van overstroming.

BIJLAGE 3

MAATREGELEN

Onderstaand volgt een overzichtelijke beschrijving van de mogelijke maatregelen, gegroepeerd naar de verschillende bronnen die in dit onderzoek zijn gebruikt. Deze indeling maakt inzichtelijk welke soorten maatregelen en ingrepen beschikbaar zijn en hoe ze bijdragen aan het langer in stand houden van (spoor)wegprofielen bij extreme neerslag of overstromingen. Deze lijst is niet volledig, maar biedt inspiratie en vormt een basis voor het handelingsperspectief en voor de discussie tijdens de tweede werksessies.

INTERVIEWS MET BETROKKENEN

Maatregelen om verzadiging te beperken

- Afdekken (deel van) talud met klei, folie of andere afdichting.
- Afdekken met drainage om het baanlichaam sneller te laten drogen.
- Toepassen van een kalk – klei-mengsel (werkt ook tegen graverij).
- Aanbrengen van een kleikist in de middenberm (niet geschikt voor spoorwegen).
- Aanbrengen van extra grond als bufferlaag op het talud.

MAATREGELEN VOOR GEBRUIK EN BEHEER

- Tijdelijk stopzetten van het gebruik van het spoor om tijd te winnen (inclusief onderdoorgangen).
- Geen belasting op het spoor tijdens overstroming, waardoor de kans groter is dat het baanlichaam intact blijft.
- Monitoring tijdens en na de extreme situatie (grondwaterstanden, verplaatsingen van grond).
- Wegen gefaseerd inzetten (deels bruikbaar houden).
- Extra aandacht voor kwetsbare delen zoals bermen en vluchtstroken.

KLIMAATBESTENDIGE NETWERKEN – HOOFDWEGENNET (KBN-HWN) V9 (2025) – SELECTIE

MAATREGELEN

- B&O-ingrepen: onderhoud van doorgangen, hemelwaterafvoer op orde brengen, vegetatiebeheer.
- Weg hoger aanleggen om water langer te keren.
- Gedeeltelijk in gebruik nemen van de weg in plaats van volledig, zodat routes sneller inzetbaar zijn.
- Extra kolken aanleggen voor afvoer van water.
- Correctie van wegverkanting bij aanleg, onderhoud en renovatie (2 – 3%).
- Monitoring van waterhoogtes in het weglichaam na overstroming voor tijdige maatregelkeuze.
- Drainage van verzadigd weglichaam om grondwater snel af te voeren.
- Ontwikkelen van mobiliteitsmanagementplannen voor crisissituaties.
- Vegetatiebeheer met variatie in typen wortelstelsels (diepe wortelgroei stimuleren).
- Aanpassen van grondsoorten in taluds voor grotere stabiliteit.

ICARUS-ONDERZOEKSTRAJECT

Een selectie van mogelijke maatregelen uit het ICARUS-onderzoek is weergegeven in Figuur B3.1

Het ICARUS-project richt zich op de vraag hoe Europese wegbeheerders klimaatbestendigheid en veerkracht kunnen verankeren in hun besluitvorming, waarbij een balans gezocht wordt tussen ambities en bewezen praktisch, informatiebehoefte en datatoegang, en gewenste serviceniveaus en beschikbare investeringen. Het project onderzoekt hoe de businesscase voor veerkracht kan worden opgebouwd door de kosten en baten van maatregelen af te wegen tegen de prestaties die het wegennet moet leveren.

Voor een volledig overzicht van de resultaten en maatregelen wordt verwezen naar <https://icarus.project.cedr.eu/icarus-resources/>.

Figuur B3.1 Uitsnede uit de tabel met daarin een selectie van de 10 maatregelen die het meest toepasbaar zijn binnen het kader van dit onderzoek

			Adaptation Measures										Adaptation Outcome
Sub-driver	Type of event (Extreme event or slow-onset process or trend)	Impact on Infrastructure	Adaptation Option	Adaptation Measures							Is the climate impact driver addressed?	Is this a Nature-Based Solution?	
				Applicable Asset Type	Asset Scale (Object / Connection / Network)	Road Project Life Cycle Stage	Impact Chain Stage 1. Hazard 2. Exposure 3. Vulnerability 4. Impact	Disaster Risk Management Cycle Stage Prevention Preparedness Response Recovery	Short/ Long Term Solution				
River Flood	Extreme event	01-1 Flooding of road surface due to failure of flood defence of rivers and canals due to snowmelt or rainfall	Elevate roads above High Water Level	All road infrastructure	Connection - Network	Construction	3. Vulnerability	Prevention	Short term (operational and tactical)	Yes	no		
River Flood	Extreme event	01-1 Flooding of road surface due to failure of flood defence of rivers and canals due to snowmelt or rainfall	Use geosynthetics for improving slope stability and erosion protection	Geotechnics, including landslips and	Object - Connection	Construction	3. Vulnerability	Preparedness	Short term (operational and tactical)	Yes	no		
River Flood	Extreme event	01-1 Flooding of road surface due to failure of flood defence of rivers and canals due to snowmelt or rainfall	Use vegetation for improving slope stability and erosion protection	Geotechnics, including landslips and	Object - Connection	Construction	3. Vulnerability	Preparedness	Short term (operational and tactical)	Yes	no		
Heavy Precipitation and pluvial	Extreme event	02-1 Overloading of hydraulic systems crossing the road causing erosion of road embankments and foundations due to extreme rainfall events (heavy)	Cover road embankment with geotextile	Geotechnics, including landslips and	Object - Connection	Construction	3. Vulnerability	Prevention	Short term (operational and tactical)	Yes	no		
Precipitation and pluvial	Extreme event	02-1 Overloading of hydraulic systems crossing the road causing erosion of road embankments and foundations due to extreme rainfall events (heavy)	Cover slope with rock blanket	Geotechnics, including landslips and	Object - Connection	Construction	3. Vulnerability	Prevention	Short term (operational and tactical)	Yes	no		
River Flood	Extreme event	01-1 Flooding of road surface due to failure of flood defence of rivers and canals due to snowmelt or rainfall	Revised standards for road design, avoiding buildup of water level differences	All road infrastructure	Object - Connection - Network	Initial Proposal Stage	3. Vulnerability	Preparedness	Long term (tactical and strategic)	Yes	no		
Heavy Precipitation and pluvial	Extreme event	01-2 Pluvial flooding (overland flow after precipitation, increase of groundwater levels, increase of aquifer hydraulic heads) due to extreme	Build flood walls to protect the road from flooding	Geotechnics, including landslips and	Network	Construction	3. Vulnerability	Prevention	Long term (tactical and strategic)	Yes	no		
Heavy Precipitation and pluvial	Extreme event	01-2 Pluvial flooding (overland flow after precipitation, increase of groundwater levels, increase of aquifer hydraulic heads) due to extreme	Cleaning out watercourses and structures of flood prone areas ahead of predicted heavy rainfall	Drainage of earthworks and	Object - Connection	Operation and Maintenance	3. Vulnerability	Preparedness	Short term (operational and tactical)	Yes	No		
Heavy Precipitation and pluvial	Extreme event	01-2 Pluvial flooding (overland flow after precipitation, increase of groundwater levels, increase of aquifer hydraulic heads) due to extreme	Prevent the clogging of pipes/culverts on connecting roads	Drainage of earthworks and	Network	Operation and Maintenance	3. Vulnerability	Preparedness	Short term (operational and tactical)	Yes	No		
Heavy Precipitation and pluvial	Extreme event	02-1 Overloading of hydraulic systems crossing the road causing erosion of road embankments and foundations due to extreme rainfall events (heavy)	Establish a guideline for standardized inspection of culverts	Geotechnics, including landslips and	Object - Connection - Network	Initial Proposal Stage	3. Vulnerability	Prevention	Long term (tactical and strategic)	No	no		

INTERNATIONALE ERVARING (BRON: SWECO)

- In het VK, Denemarken en Zweden is het gebruikelijker om bij aanleg van wegen en spoorwegen rekening te houden met overstroming en extreme neerslag.
- Monitoring vormt een essentieel onderdeel van beheer en crisis-voorbereiding.
- Specifiek aandacht voor verschuivingen van grond (landslides zijn daar een van de meest voorkomende faalmechanismen).
- Het actief geleiden van stroming om erosie en schade te beperken.

BIJLAGE 4

GEOHYDROLOGISCHE EN GEOTECHNISCHE ANALYSE EN RESULTATEN

De geohydrologische berekeningen zijn uitgevoerd met een niet-stationaire 2D-modellering met het programma Seep/W. Seep/W is een softwareproduct (www.geoslope.com) voor het modelleren van grondwaterstroming op basis van de eindige elementenmethode in poreuze media, zoals zand, klei en veen. Seep/W kan eenvoudige verzadigde steady-state problemen modelleren of geavanceerde verzadigde / onverzadigde niet-stationaire analyses met atmosferische koppeling op het grondoppervlak.

Met het programma wordt de bodem geschematiseerd, waarbij bodem-parameters aan de verschillende lagen kunnen worden toegekend. De bodemparameters zijn gebaseerd op de parameters van verschillende bodem-types conform STIBOKA. De hydraulische doorlaatfactor van de grond is een functie van de negatieve poriewaterdruk in de onverzadigde bodemlagen. De mate van verandering in watergehalte is afhankelijk van de waterspanning tijdens voorbijgaande processen.

UITGANGSPUNTEN

Onderstaand zijn de gehanteerde waterpeilen vermeld per voorbeeldlocatie.

Zeeland	Spoortalud	Wegtalud
Polderpeil [m NAP] (gelijk aan weerszijden)	-2,5	-0,5
Stijghoogte [m NAP]	-1,0	0,2
Max. opbolling in baanlichaam [m NAP]	-1,5	0,0

Overijssel	Spoortalud	Wegtalud
Polderpeil noordwest [m NAP]	-0,5	-0,85
Polderpeil zuidoost [m NAP]	-0,15	-0,5
Stijghoogte [m NAP] ¹⁾	---	---
Max. opbolling in baanlichaam ²⁾ [m NAP]	---	---

¹⁾ Geen verschil tussen stijghoogte en freatische grondwaterstand vanwege doorlopend zandpakket

²⁾ Zeer beperkte opbolling vanwege goed doorlatend zandpakket

Noord-Brabant	Spoortalud	Wegtalud
Freatische grondwaterstand [m NAP]	3,0	n.v.t.
Stijghoogte [m NAP] ¹⁾	3,0	n.v.t.
Max. opbolling in baanlichaam [m NAP]	3,3	n.v.t.

¹⁾ Geen verschil tussen stijghoogte en freatische grondwaterstand

Utrecht	Spoortalud	Wegtalud
Polderpeil zuidzijde [m NAP]	n.v.t.	-1,6
Polderpeil noordzijde [m NAP]	n.v.t.	-1,7
Stijghoogte [m NAP]	n.v.t.	-1,5
Max. opbolling in baanlichaam [m NAP]	n.v.t.	-1,65

STABILITEIT

Uitgangspunten

Voor de stabiliteitsanalyse zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

De stabiliteitsberekeningen worden uitgevoerd volgens de rekenmethode Bishop met behulp van het programma D-Stability versie 2024.01. De sterkte-parameters, zoals aangehouden in de LNA-aanpak, worden aangehouden (de grondopbouw is reeds besproken in Bijlage 3. De grondwatercondities, zoals hiervoor benoemd, worden toegepast voor de verschillende tijdsstappen;

Voor de verkeersbelasting worden de volgende belastingen aangenomen:

- 13 kN/m² over 2,5 m voor binnenwaartse en buitenwaartse stabiliteit weg;
- 12,5 kN/m² over de breedte van de het ballastbed van het spoor (LNA-aanpak);
- 45,5 kN/m² over 3 m, indien een tijdelijke treinbelasting meegenomen wordt (LNA-aanpak).

Voor elke belasting geldt dat een spreidingshoek van 30° en een consolidatie-percentages van 50% toegepast worden voor de cohesieve grondsoorten (voor tijdelijke belasting, in lijn met LNA-aanpak).

Volgens de LNA-methodiek voldoet een baanlichaam, indien een SF groter dan 0,95 aanwezig is voor glijvlakstabiliteit. Hierbij is een glijvlak aanwezig dat ten minste de aardebaan raakt geforceerd.

Voor de wegen is een glijvlak geforceerd, waarbij de kruin geraakt wordt. Er is voor de wegen geen vereiste SF bepaald.

GEOHYDROLOGISCHE RESULTATEN

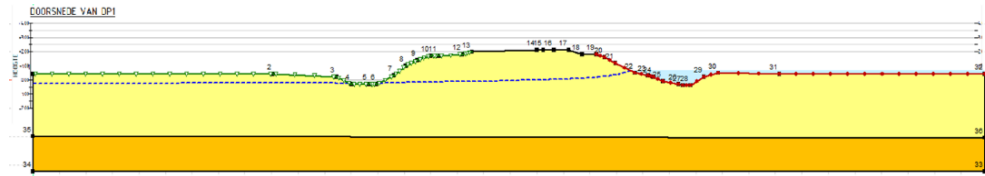
De resultaten uit de SWEEP/W-berekeningen zijn direct overgenomen in de stabiliteitsberekening en daarom niet los als resultaten opgenomen. Hieronder wordt alleen ingegaan op de tijdsafhankelijke analyse en het scenario, waarbij een deklaag is toegepast op het zandige dwarsprofiel.

Tijdsafhankelijke analyse

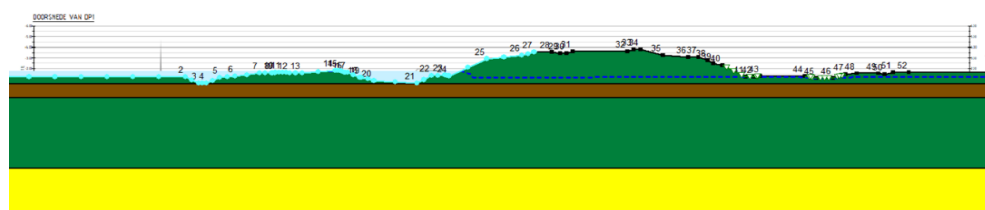
Bij baanlichamen van klei zal het lichaam onder invloed van een overstroming niet direct verzadigen, maar zal de verzadiging geleidelijk over een periode van weken/maanden optreden vanwege een lage doorlatendheid van circa 0,01 m/dag. Voor de tijdsafhankelijke analyse is dan ook gekeken naar het voorbeeldgebied in Overijssel, waarbij zowel het baanlichaam als de ondergrond uit zand is opgebouwd.

Bij een baanlichamen van zand (k -waarde = 5 m/dag) zal de verzadiging in het gehele baanlichaam relatief snel optreden en meelopen met de oploop van het water buiten het baanlichaam. Hierdoor ontstaat een ongunstige situatie ten tijde van een overstroming. Voor het verschil in verzadiging van een baanlichaam, bestaande uit zand dan wel klei, wordt verwezen naar navolgende figuren. (figuur B4.1, B4.4)

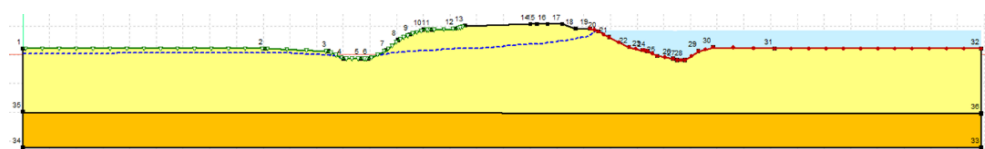
Figuur B4.1 Voorbeeldgebied Overijssel - Spoortalud; oploop buitenwaterstand (T = 12 uur)



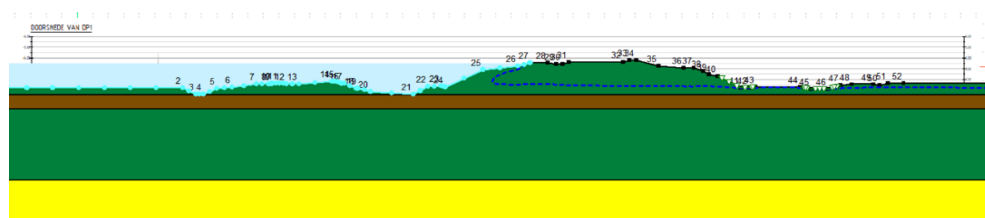
Figuur B4.2 Voorbeeldgebied Zeeland - Spoortalud; oploop buitenwaterstand (T = 12 uur)



Figuur B4.3 Voorbeeldgebied Overijssel - Spoortalud; bereiken maximale buitenwaterstand (T = 36 uur; 1,5 dagen)



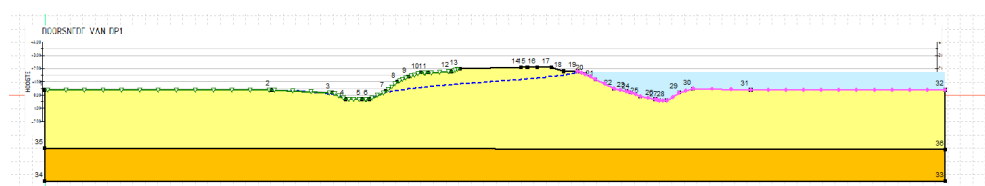
Figuur B4.4 Voorbeeldgebied Zeeland - Spoortalud; bereiken maximale buitenwaterstand (T = 168 uur; 7 dagen)

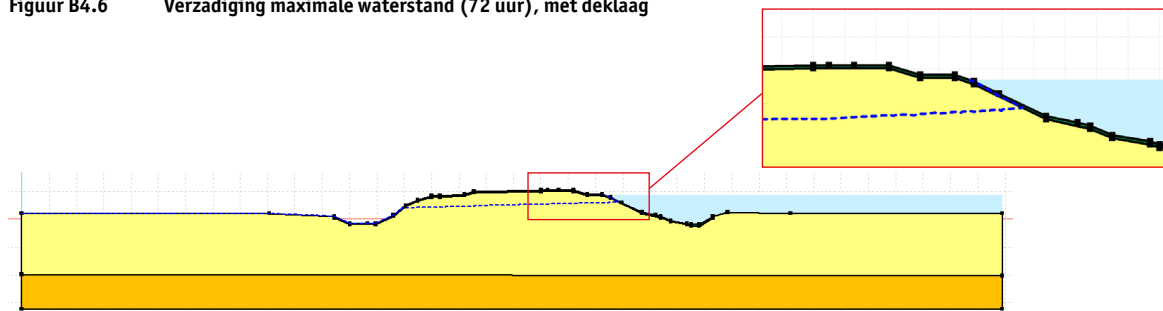


Toepassen deklaag

In Figuur B4.5 is het verzadigde profiel getoond, waarbij geen deklaag is meegenomen in het geohydrologisch model. In Figuur B4.6 is een deklaag van 10 cm geschematiseerd. Hierbij is na 72 uur de waterstand bij het buitentalud circa 60 cm lager dan in de situatie zonder deklaag. In de paragraaf hierna is de invloed van deze verlaging op de stabiliteit van de spoorbaan beschreven.

Figuur B4.5 Verzadiging maximale waterstand (72 uur), zonder deklaag



Figuur B4.6 Verzadiging maximale waterstand (72 uur), met deklaag**STABILITEIT**

Voorafgaand aan de stabiliteitsberekeningen tijdens/na een overstroming, is opgemerkt dat voor bepaalde voorbeeldgebieden in de dagelijkse situatie al lage Safety Factoren aanwezig zijn. Voor de analyse van deze voorbeeld-gebieden zal dan ook voornamelijk gekeken worden naar het relatieve verschil in SF tijdens/na het overstromingsscenario ten opzichte van de dagelijkse situatie en wordt niet specifiek getoetst aan de LNA-methodiek.

In onderstaande secties zijn per voorbeeldgebied de resultaten van de stabiliteitsberekeningen opgenomen.

VOORBEELDGEBIED ZEELAND (KLEI OP KLEI EN DUNNE VEENLAAG)*Spoortalud*

Opvallend is dat de maatgevende hoogwater situatie zonder tijdelijke treinbelasting een hogere SF (en hoger dan 0,95) heeft dan de dagelijkse situatie met tijdelijke treinbelasting (waar SF kleiner dan 0,95 is).

Wegtalud

Door de breedte van het dwarsprofiel heeft verzadiging een verwaarloosbaar effect op de aanwezige SF. Wel is er in de huidige situatie al een lage SF aanwezig (zowel in scenario zonder als met belasting).

	Spoortalud		Wegtalud	
	STBI	STBU	STBI	STBU
Dagelijks	1,400	1,134	0,848	0,827
Maatgevend hoogwater zonder belasting	1,170	-	0,838	-
Val na hoogwater zonder belasting	1,177	0,856	0,841	0,809
Dagelijks met belasting ¹	0,697	0,637	0,800	0,827
Maatgevend hoogwater met belasting	0,456	-	0,787	-
Val na hoogwater met belasting	0,454	0,394	0,780	0,809

¹ Wordt onder dagelijkse omstandigheden al niet voldaan aan vereiste SF van 0,95

VOORBEELDGEBIED OVERIJSSSEL (ZAND OP ZAND)

Voor zowel het spoortalud als het wegtalud geldt dat er relatief hoge Safety Factoren worden gevonden, ook als de spoor of de weg belast wordt.

Spoortalud

Opvallend is dat, indien een deklaag van 10 cm toegevoegd wordt aan het dwarsprofiel van de spoorbaan (scenario met deklaag), er een lagere SF wordt gevonden voor de binnenwaartse stabiliteit onder het scenario met een hoge buitenwaterstand. Dit is te verklaren, doordat

door de aanwezigheid van de deklaag aan het binnentalud het water niet weg kan stromen waardoor hogere waterstanden ontstaan wat de korrelspanning bij het binnentalud naar beneden haalt.

Bij het scenario waarbij de waterstand aan de buitenzijde snel daalt, wordt wel een hogere SF gevonden voor de buitenwaartse stabiliteit aangezien het buitentalud minder verzadigd is geworden als gevolg van de deklaag.

Indien rekening wordt gehouden met tijdsafhankelijke waterstanden (scenario 12 en 36 uur) in het baanlichaam is te zien dat er een hogere Safety Factoren aanwezig zijn.

Voor het dwarsprofiel van de spoorbaan is ook het neerslagsscenario bekeken, waarbij het hele grondlichaam verzadigd is. Dit scenario resulteert voor zowel de binnenwaartse als de buitenwaartse stabiliteit in de laagste aanwezige SF.

	Spoortalud		Wegtalud	
	STBI	STBU	STBI	STBU
Dagelijks	1,639	1,513	2,165	3,329
Maatgevend hoogwater zonder belasting	1,236	-	1,626	-
Val na hoogwater zonder belasting	1,236	1,019	1,626	1,717
Maatgevend hoogwater zonder belasting, met deklaag	1,122	-	-	-
Val na hoogwater zonder belasting, met deklaag	1,122	1,166	-	-
Maatgevend hoogwater 12 uur zonder belasting	1,560	-	-	-
Val na hoogwater 12 uur zonder belasting	1,560	1,464	-	-
Maatgevend hoogwater 36 uur zonder belasting	1,378	-	-	-
Val na hoogwater 36 uur zonder belasting	1,378	1,074	-	-
Neerslag, zonder belasting	0,798	1,034	-	-
Dagelijks met belasting	1,523	1,373	2,175	2,537
Maatgevend hoogwater met belasting	1,236	-	1,626	-
Val na hoogwater met belasting	1,236	1,041	1,626	1,509

VOORBEELDGEBIED NOORD-BRABANT (KLEI OP KLEI)

Spoortalud

Opvallend is dat bij de maatgevende situatie zonder tijdelijke treinbelasting een hogere SF aanwezig is dan bij de dagelijkse situatie met tijdelijke treinbelasting (waar SF kleiner dan 0,95 is).

	Spoortalud	
	STBI	STBU
Dagelijks	1,003	1,027
Maatgevend hoogwater zonder belasting	0,932	-
Val na hoogwater zonder belasting	0,953	0,908
Dagelijks met belasting ¹	0,797	0,789
Maatgevend hoogwater met belasting	0,480	-
Val na hoogwater met belasting	0,483	0,492

¹ Wordt onder dagelijkse omstandigheden al niet voldaan aan vereiste SF van 0,95

VOORBEELDGEBIED UTRECHT (ZAND OP KLEI EN VEEN)*Wegtalud*

Doordat de belasting van het verkeer op enige afstand van de kruin van het grondlichaam aanwezig is, heeft het wel op niet meenemen van de verkeers-belasting geen effect op de aanwezige SF.

Met de val na hoogwater wordt door aanwezigheid van de dikke veenlaag onder het grondlichaam een zeer lage SF gevonden. De grote verlaging zie je ook terug bij een MHW-situatie maar door de hogere SF onder dagelijkse situatie is in de maatgevende MHW-situatie geen zeer lage SF aanwezig.

	Wegtalud	
	STBI	STBU
Dagelijks	2,283	0,936
Maatgevend hoogwater	1,274	-
Val na hoogwater	1,273	0,645

BIJLAGE 5

HANDELINGSPERSPECTIEF PER VOORBEELDGEBIED

In onderstaande perspectieven zijn de reacties vanuit de regio verwerkt zoals die zijn ingebracht tijdens de 2^e werksessie in september 2025 (Dit geldt voor de A28, de spoorlijn Zwolle-Meppel, de A12 en de spoorlijn Nijmegen – Den Bosch).

Handelingsperspectief A28 en spoorlijn Zwolle-Meppel

			
Geen dreiging	Bij dreiging doorbraak	Tijdens doorbraak	Na doorbraak
Handelingsperspectief: • Evacuatiestrategie op orde + communicatie strategie • Monitoren – beheer gericht op stabiliteit bermen & graverij • Zet in op maatregelen op kleine stukken met grote meerwaarde • Toets vitale infrastructuur op Water en bodem aspecten • Meest kwetsbare delen in beeld (focus bij extreme situatie) • Nagaan haalbaarheid afsluiten onderdoorgangen (afsluiten of remmen)	Handelingsperspectief: • Evacuatie vooraf • Onderdoorgangen materiaal paraat om af te sluiten (houd rekening met feit dat dit niet lukt) • Inspectie taluds en graverij (spoor)wegen (bevers / dassen) • Monitoringslocaties in beeld • Houd rekening met Wet Weerbaarheid kritische entiteiten	Handelingsperspectief: • Spoorlijn geen belasting • Verkeer op A28 beperken tot minst kwetsbare deel • Oostzijde A28 rijstrook / parallelweg afsluiten • Geen verkeer naar bedreigd gebied • Verkeer in potentieel diepe delen alleen als aankomsttijd water > 24 uur • Monitoren bermen en wegconstructie	Handelingsperspectief: • Monitoren taluds na zakken water (afschuiven) • Monitoren wegconstructie • Inspectie spoorlijn (taluds) • Focus op beheer en herstel

Handelingsperspectief A12

			
Geen dreiging	Bij dreiging doorbraak	Tijdens doorbraak	Na doorbraak
Handelingsperspectief: • Monitoren – beheer gericht op stabiliteit & graverij • B&O bermen • Meest kwetsbare delen in beeld (focus bij extreme situatie) • Nagaan haalbaarheid afsluiten onderdoorgangen (afsluiten of remmen) • A12 Oost prioriteit – A12 Midden – ARK zwakke schakel • A12 belang groter i.k.v BV NL • Onderdoorgangen verstevigen (zwakke schakels)	Handelingsperspectief: • Onderdoorgangen (ook in N228) materiaal paraat om af te sluiten • Inspectie wegen (bevers / dassen) • A12 Oost zo lang mogelijk open houden • Onderdoorgangen inspecteren (gericht op versteviging) • In kader van HOST Nations Support A12 belangrijke schakel	Handelingsperspectief: • Verkeer op weg beperken tot minst kwetsbare deel – Bij kruisen water oversteek N228 zuidelijke rijstrook A12 afsluiten • Geen verkeer naar bedreigd gebied • Verkeer in potentieel diepe delen alleen als aankomsttijd water > 24 uur • Monitoren bermen en weg	Handelingsperspectief: • Monitoren talud noord- en zuidzijde na zakken water (afschuiven) • Monitoren wegconstructie (en gebruik daarop afstemmen) • Inspectie taluds en wegconstructie A12 • Focus op herstel, nagaan kabels en leidingen • Eerst herstel dan pas mensen terug

Handelingsperspectief spoorlijn Nijmegen – Den Bosch



Geen dreiging

Handelingsperspectief:

- Controle bermen kleiig materiaal (afh. van locatie noord en of zuidzijde)
- Monitoren – beheer gericht op stabiliteit combineren met inzicht graverij
- Nagaan haalbaarheid afsluiten onderdoorgangen
- Verflauwen taluds op strategische plekken (1:3)
- Ook meer oostelijke traject Nijmegen-Oss kansrijk (zuidzijde kerend)



Bij dreiging doorbraak

Handelingsperspectief:

- Wees flexibel – water kan van twee kanten komen
- Onderdoorgangen materiaal paraat om af te sluiten
- Inspectie spoor op dierlijke graverij
- Inspectie taluds (zoals bij dijkwachter)



Tijdens doorbraak

Handelingsperspectief:

- Wees flexibel – water kan van twee kanten komen
- Spoorlijn geen verkeer – remmen van water naar o.a. Oss
- Geen verkeer naar bedreigd gebied
- Verkeer in potentieel diepe delen alleen als aankomsttijd water > 24 uur
- Monitoren bermen spoorlijn



Na doorbraak

Handelingsperspectief:

- Monitoren talud zuidzijde na zakken water (afschuiven)
- Inspectie spoorlijn (taluds)
- Houd rekening met veel verschillende belangen (brede afweging, o.a. veiligheid, economie)

Handelingsperspectief spoor Roosendaal – Vlissingen



Geen dreiging

Handelingsperspectief:

- Monitoren – beheer gericht op stabiliteit – geen graverij
- Controle of bermen zuidzijde bestaan uit kleiig materiaal (of andere kansrijke maatregel)
- B&O bermen
- Check onderdoorgangen (alleen duikers?)
- Nagaan haalbaarheid afsluiten duikers (afsluiten of remmen)



Bij dreiging doorbraak

Handelingsperspectief:

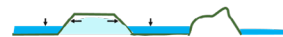
- Onderdoorgangen materiaal paraat om af te sluiten
- Inspectie spoorweg op dierlijke graverij



Tijdens doorbraak

Handelingsperspectief:

- Spoorlijn geen verkeer
- Geen verkeer naar bedreigd gebied
- Verkeer Goes potentieel alleen als aankomsttijd water > 24 uur
- Monitoren bermen en spoorlijn

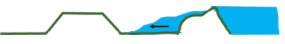


Na doorbraak

Handelingsperspectief:

- Monitoren taluds spoorlijn na zakken water (afschuiven)
- Inspectie spoorlijn (taluds)

Handelingsperspectief N256 Deltaweg

			
Geen dreiging	Bij dreiging doorbraak	Tijdens doorbraak	Na doorbraak
Handelingsperspectief: • Monitoren – beheer gericht op stabiliteit – geen graverij • Check of Oudedijk en onderdoorgangen kerend zijn (of te realiseren) • Controle bermen N256 oostzijde kleiig materiaal • B&O bermen / coupures • Nagaan haalbaarheid afsluiten onderdoorgangen (afsluiten of remmen)	Handelingsperspectief: • Onderdoorgangen (duikers & coupures Oudedijk) materiaal paraat om af te sluiten • Nagaan of N256 barrière vormt (keuze al dan niet opofferen voor remming) • Inspectie bermen van wegen op dierlijke graverij	Handelingsperspectief: • Geen verkeer op weg (vanwege potentieel grote diepte en snelle inundatie) • Geen verkeer naar bedreigd gebied • Controle of Oudedijk voldoende kerend is (onderdoorgang afsluiten) • Monitoren bermen en weg	Handelingsperspectief: • Monitoren talud westzijde N256 na zakken water (afschuiven) • Monitoren wegconstructie N256 en bereikbaarheid vanaf dijken