Risicobeoordeling van bruggen onder invloed van veranderende natuurlijke gevaren: een vergelijking tussen Nederland en Ecuador



Naam student: Ghofran Mohammed

Naam begeleiders: Eva Lantsoght & Pierre Hoogenboom

Instelling: Civiele Techniek en Geowetenschappen Delft

Datum: 2/02/2026

Voorwoord

Deze bachelor thesis is het laatste onderdeel van mijn opleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Met dit voorwoord wil ik graag iedereen bedanken die mij heeft geholpen en gesteund tijdens het uitvoeren van dit onderzoek.

In het bijzonder wil ik mijn begeleiders, Eva Lantsoght en Pierre Hoogenboom, bedanken voor hun begeleiding en feedback. Hun tips en opmerkingen hebben mij geholpen bij het verbeteren van dit onderzoek.

Daarnaast wil ik mijn familie bedanken voor hun steun en begrip tijdens mijn studie. Tot slot wil ik mijn vriendinnen bedanken, die mij hebben gemotiveerd en gesteund in deze periode.

Samenvatting

Klimaatverandering zorgt er wereldwijd voor dat extreme weersomstandigheden steeds vaker voorkomen, zoals hevige regenval en overstromingen. In sommige gebieden spelen daarnaast ook aardbevingen een rol. Bruggen zijn hierbij kwetsbaar, omdat ze vaak over water lopen en een belangrijke functie hebben binnen het wegennet. Dit onderzoek richt zich op het in kaart brengen van het risico op het falen van bruggen door overstromingen en aardbevingen.

Voor dit onderzoek is een risicobenadering gebruikt die oorspronkelijk is ontwikkeld in Chili en later is toegepast in Ecuador. Deze methode combineert blootstelling, kwetsbaarheid en bedreiging om het risico voor bruggen te bepalen. De methode is toegepast op twee bruggen in verschillende situaties: de Nieuwklapbrug in Nederland en een brug over de Río Blanco in Ecuador. Voor de Nederlandse brug is een praktijkanalyse uitgevoerd, terwijl voor Ecuador gebruik is gemaakt van bestaande onderzoeksresultaten.

De resultaten laten zien dat de Nieuwklapbrug vooral wordt beïnvloed door overstromingen, zoals funderingserosie en verhoogde hydraulische belasting. Door het gereguleerde watersysteem en actief waterbeheer blijft het risico in Nederland in de meeste scenario's laag en wordt het pas onder het meest extreme scenario als middel beoordeeld. Aardbevingen komen in Nederland wel voor, maar zijn het gevolg van gaswinning en hebben een beperkte invloed op de brug. Ze worden daarom meegenomen als een constante, maar niet bepalende belasting. In Ecuador ligt de brug in een natuurlijk en ongereguleerd rivierensysteem en in een gebied met veel seismische activiteit. Hierdoor spelen zowel overstromingen als aardbevingen een belangrijke rol bij de beoordeling van het risicoprofiel, zonder dat dit noodzakelijk leidt tot hogere risicoklassen.

De vergelijking laat zien dat dezelfde risicobenadering gebruikt kan worden in verschillende landen, maar dat de uitkomsten sterk afhangen van de lokale omstandigheden. Dit onderzoek laat zien dat het belangrijk is om per locatie naar de risico's voor bruggen te kijken, zodat zij ook in de toekomst veilig beheerd kunnen worden in een veranderend klimaat.

Inhoudsopgave

..... i

..... i

Voorwoord ii

Samenvatting iii

Inleiding 1

2. Methode 1

3. Evaluatie en diagnose 1

3.1 Nieuwklapbrug - Nederland 1

3.1.1 Geografische locatie 1

3.1.2 Typologische classificatie van de brug 1

3.1.3 Hydrologie van de locatie 1

3.1.4 Klimaatscenario's (SSP) en extreme gebeurtenissen 6

3.2 Río Blanco brug – Ecuador 8

3.2.1 Geografische locatie 8

3.2.2 Typologische classificatie van de brug 8

3.2.3 Hydrologie van de locatie 8

4. Structurele analyse van de Nieuwklapbrug 12

5. Evaluatie van potentiële impact 15

5.1 Faalmechanismen tijdens overstromingen 15

5.1.1 Funderingserosie (Scour) 15

5.1.2 Erosie van oevers en landhoofden 16

5.1.3 Verhoogde hydraulische belasting 17

5.2 Interactie tussen aardbevingen en overstromingen 18

6. Analyse en evaluatie van risico 19

6.1 Kwetsbaarheid - Evaluatie 19

6.1.1 Blootstelling 19

6.1.2 Gevoeligheid en adaptieve capaciteit 20

6.1.3 Ernst van gevolgen 21

6.1.4 kwetsbaarheid beoordelen 22

6.2 Aangepaste bedreiging – Evaluatie 22

6.2.1 Evaluatie van probabiliteit 22

6.2.2 Evaluatie van bedreiging 23
6.2.3 Aangepaste bedreiging beoordelen 23
6.3 Risico - Evaluatie 24
7. Vergelijking: Nederland – Ecuador 25
8. Discussie 28
9. Conclusie 29
Bibliografie 31
Bijlage 1: Dagelijks neerslag (R-codes) 33
Bijlage 2: afvoer (R-codes) 37
Bijlage 3: SSP-scenario's en R-codes 39
Bijlage 4: Tekeningen van de brug 49
Bijlage 5: Materialen eigenschappen 50
Bijlage 6: Formules voor buigmomentcapaciteit 52
Bijlage 7: Formules voor dwarskrachtcapaciteit 54
Bijlage 8: Risico – Evaluatie – Ecuador 55

Inleiding

Bruggen zijn een belangrijk onderdeel van de stedelijke en regionale infrastructuur. Ze zorgen ervoor dat mensen en goederen zich kunnen verplaatsen. Door klimaatverandering veranderen weer- en waterpatronen. Dit leidt onder andere tot hevigere neerslag, hogere temperaturen, grotere verschillen in rivierafvoer en een toename van natuurlijke gevaren (IPCC, 2023). Deze gevaren kunnen bestaan uit hittegolven, overstromingen, stormen en aardbevingen.

Wereldwijd is te zien dat natuurrampen steeds vaker voorkomen en dat de gevolgen van klimaatverandering daardoor groter worden. Sinds 1989 hebben zich wereldwijd meer dan 4.000 grote overstromingen voorgedaan en naar schatting zijn ongeveer 1,8 miljard mensen kwetsbaar voor overstromingsrisico's (Zahra Ahmadi, 2024). Daarnaast vinden er jaarlijks meer dan 1,4 miljoen aardbevingen plaats, waarvan het grootste deel een lage magnitude heeft en niet wordt gevoeld. Tussen 1998 en 2017 hebben aardbevingen wereldwijd veel mensen getroffen, doordat zij gewond raakten, hun huis verloren of zijn overleden. (Zahra Ahmadi, 2024). Deze cijfers laten zien dat zowel overstromingen als aardbevingen op zichzelf al grote risico's vormen voor infrastructuur en steden, en dat de combinatie van deze gevaren het risico nog groter maakt.

Bruggen behoren tot de meest kwetsbare onderdelen van de infrastructuur, vooral door hun ligging boven water en hun belangrijke functie binnen het transportnetwerk. Overstromingen kunnen zorgen voor erosie van de bodem rondom funderingen, extra hydraulische belasting en schade aan constructieve onderdelen van bruggen.

Aardbevingen vormen daarnaast ook een risico voor bruggen. Schade ontstaat hierbij vooral aan opleggingen, pijlers, voegen en funderingen. Deze schade is vaak zichtbaar in verplaatsingen van het brugdek en scheurvorming in constructieve delen van de brug. In veel situaties leidt dit niet meteen tot instorting, maar kan de brug wel haar functie verliezen en tijdelijk of blijvend buiten gebruik raken. Zware schade en instorting komen vooral voor wanneer aardbevingen samengaan met bodemproblemen, zoals bodemvervloeiing. Dit soort verschijnselen kan uiteindelijk leiden tot falen van de fundering. (Eva Lantsoght, 2024)

Dit laat zien dat het belangrijk is om faalmechanismen goed te analyseren en de bijbehorende risico's zorgvuldig te beoordelen.

In deze bachelor thesis wordt onderzocht hoe overstromingen en aardbevingen invloed hebben op het risico dat bruggen falen, binnen de context van klimaatverandering. Hiervoor wordt een risicobenadering gebruikt die oorspronkelijk is ontwikkeld in Chili en later is toegepast in Ecuador (Valeria González Z, 2025). Deze methode combineert verschillende natuurlijke factoren, zoals hydrologische belasting, mogelijke faalmechanismen en de kwetsbaarheid van bruggen, om het risico in kaart te brengen.

Ecuador is gekozen als referentiegebied omdat daar sprake is van sterke hydrologische en seismische activiteit en omdat er al bestaande studies beschikbaar zijn over bruggen en klimaatverandering (Yamile Almeida, 2025). Nederland is gekozen om te onderzoeken of deze risicobenadering ook toepasbaar is in een laaggelegen land met een sterk gereguleerd watersysteem en beperkte seismische activiteit. Door de methode toe te passen op een

Nederlandse brug en de resultaten te vergelijken met die uit Ecuador, wordt inzicht verkregen in hoe goed de methode werkt in verschillende geografische en klimatologische situaties.

Het doel van dit onderzoek is om de invloed van overstromingen en aardbevingen op bruggen in Nederland en Ecuador te analyseren en met elkaar te vergelijken. Daarbij wordt gebruikgemaakt van een risicobenadering die rekening houdt met hydrologische omstandigheden, mogelijke faalmechanismen en klimaatverandering. Op basis hiervan is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

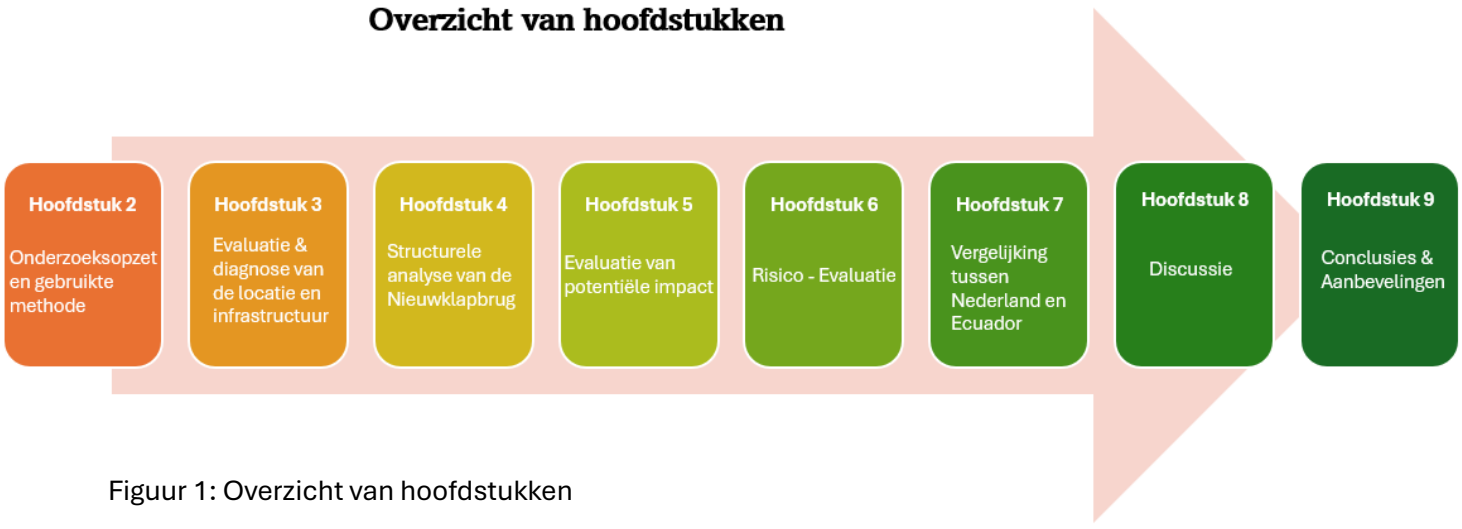
Hoe beïnvloeden overstromingen en aardbevingen het risico op het falen van bruggen in Nederland en Ecuador?

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden is gebruikgemaakt van bestaande onderzoeksresultaten voor Ecuador. Daarnaast is aanvullend onderzoek gedaan naar de Nieuwklapbrug in Nederland. Hoewel deze brug inmiddels is gesloopt en vervangen, is zij geschikt als casestudy omdat zij in de provincie Groningen ligt, een gebied waar aardbevingen voorkomen als gevolg van gaswinning (KNMI, 2024). Ook heeft deze regio in het verleden te maken gehad met overstromingen.

Doordat in dit gebied meerdere risico's samenkomen, is de Nieuwklapbrug een geschikte locatie voor dit onderzoek.

Met behulp van dezelfde risicobenadering zijn de hydrologische omstandigheden, mogelijke faalmechanismen en het bijbehorende risico van beide bruggen geanalyseerd en met elkaar vergeleken.

Dit onderzoek is opgebouwd uit meerdere hoofdstukken, waarvan de onderlinge samenhang schematisch is weergegeven in figuur 1.

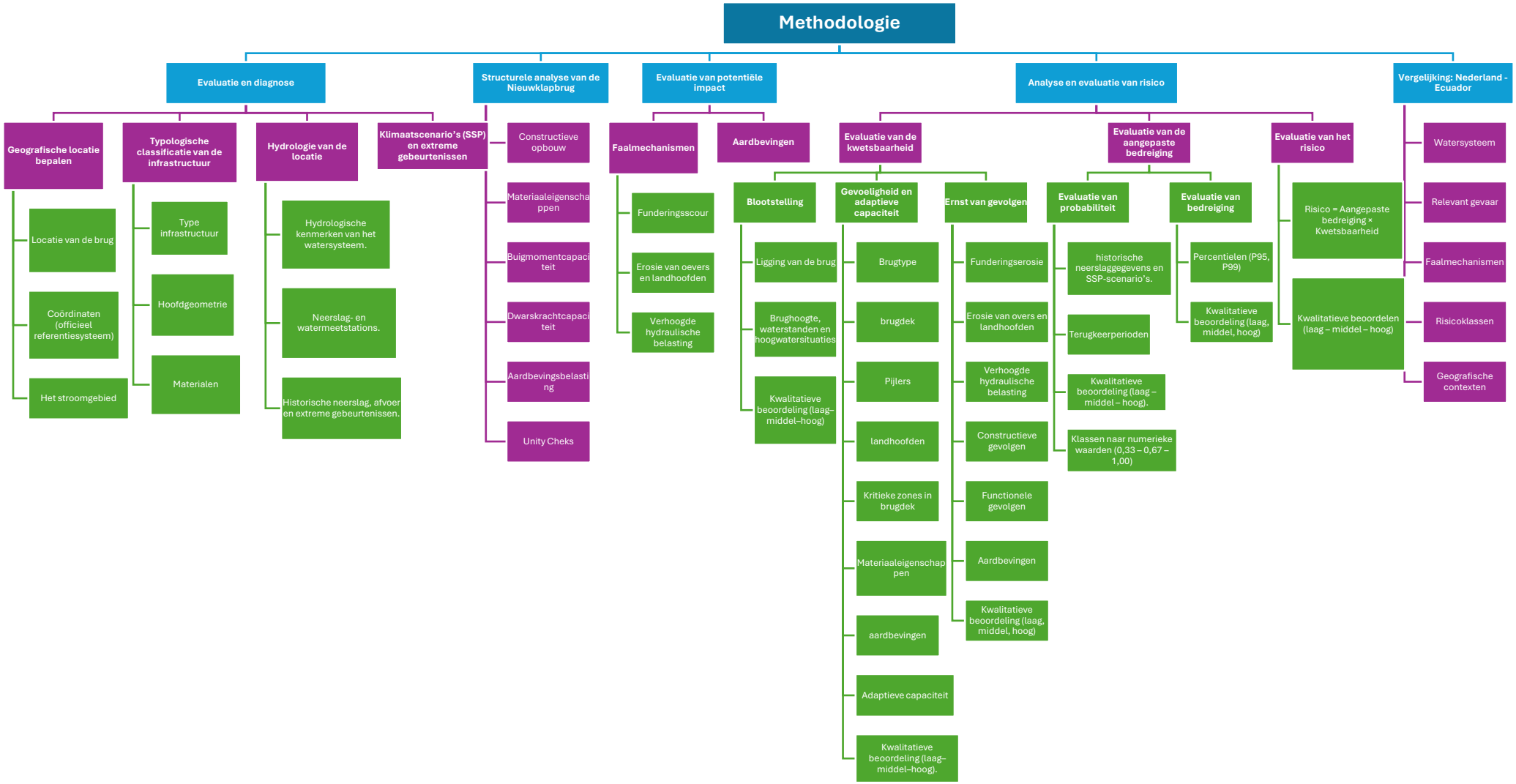


Figuur 1: Overzicht van hoofdstukken

2. Methode

In dit onderzoek is gebruikgemaakt van de *Climate Change Impact Assessment Methodology for Civil Infrastructure*. Deze methode is ontwikkeld in Chili door LIND Engineering en later toegepast in Ecuador (Valeria González Z, 2025). De aanpak is gebaseerd op de bachelor proef van Yamile, waarin het risico van een brug in Ecuador is onderzocht, met aandacht voor overstromingen en aardbevingen. (Yamile Almeida, 2025)

Voor de Nederlandse situatie is gebruikgemaakt van een masterthesis over de Nieuwklapbrug (Tzortzinakis, 2018). In die studie zijn de constructieve eigenschappen en de invloed van aardbevingen op de brug bekeken. Door deze twee onderzoeken te combineren, kon dezelfde risicomethode worden gebruikt voor zowel Nederland als Ecuador. Op die manier zijn de resultaten beter met elkaar te vergelijken. Op de volgende pagina wordt in een flowchart (zie Figuur 2) stap voor stap weergegeven hoe deze methode is toegepast.



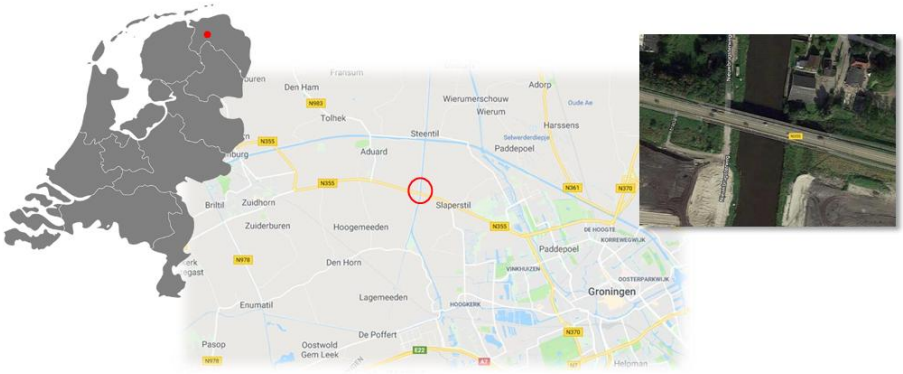
Figuur 2: Flowchart van de toegepaste onderzoeksmethodologie

3. Evaluatie en diagnose

3.1 Nieuwklapbrug - Nederland

3.1.1 Geografische locatie

De Nieuwklapbrug, die inmiddels is gesloopt en vervangen, lag aan de provinciale weg N355, ook wel de Friesestraatweg genoemd, in de provincie Groningen. Deze weg verbindt de steden Groningen en Leeuwarden. De brug ligt ter hoogte van Nieuwklap en overspant het kanaal Aduarderdiep. De ligging van de brug kan worden aangegeven met de coördinaten 53.245005° noorderbreedte en 6.480443° oosterlengte (Google Maps, 2025). In figuur 3 is de exacte locatie van de brug weergegeven.



Figuur 3: Exacte ligging van de Nieuwklapbrug op hat kanaal Aduarderdiep (Tzortzinakis, 2018)

Het Aduarderdiep is geclassificeerd als een primair oppervlaktewaterlichaam en wordt aangeduid als een kanaal (Waterschap Noorderzijlvest, 2025). Volgens beschikbare gegevens heeft het kanaal een breedte van ongeveer 38,8 meter en een lengte van 359,35 meter (Waterschap Noorderzijlvest, 2025).

3.1.2 Typologische classificatie van de brug

De Nieuwklapbrug is uitgevoerd als een betonnen plaatbrug van gewapend beton. De brug heeft een totale lengte van ongeveer 100,70 meter en bestaat uit zeven overspanningen (zie figuur 48 in bijlage 4) (Tzortzinakis, 2018).

Het brugdek heeft een totale breedte van 14,31 meter en bestaat uit twee rijstroken en twee fietsstroken (zie figuur 49 in bijlage 4) (Tzortzinakis, 2018).

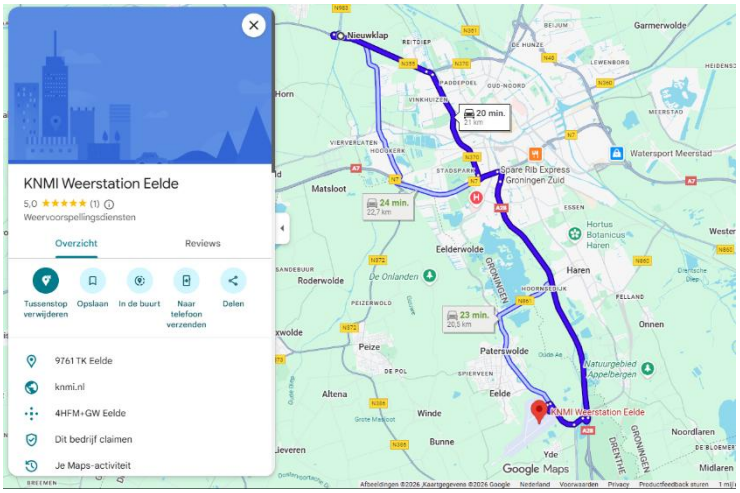
3.1.3 Hydrologie van de locatie

Hydrologische kenmerken van het watersysteem
Het Aduarderdiep maakt deel uit van het watersysteem van de Electraboezem, 1e schil. Dit is een regionaal boezemsysteem dat wordt beheerd door Waterschap Noorderzijlvest. Het watersysteem bestaat uit kanalen en natuurlijke watergangen en wordt volledig gereguleerd met behulp van gemalen.
De afwatering van de 1e schil vindt vooral plaats in westelijke richting via de gemalen Den Deel, aan het Boterdiep, en Usquert, aan het Usquerdermaar. Deze gemalen voeren het water af naar de 2e schil van de Electraboezem. In droge perioden wordt water juist aangevoerd vanuit de 2e schil via dezelfde gemalen. Voor hoger gelegen peilgebieden worden daarnaast extra aanvoergemalen gebruikt.

Door bodemdaling als gevolg van aardgaswinning is vrije afwatering niet meer mogelijk. Hierdoor is binnen de Electraboezem een schillenstructuur ontstaan. Binnen dit systeem vormt de 1e schil het meest oostelijke deel, waarbij waterstanden en stromingsrichtingen volledig afhankelijk zijn van actief peilbeheer en de werking van de gemalen (Waterschap Noorderzijlvest, 2021).

Neerslag- en watermeetstations

Voor de analyse van de neerslaggegevens is gekozen voor het KNMI-meetstation Eelde (zie figuur 4). Dit meetstation ligt relatief dicht bij de Nieuwklapbrug, op een afstand van 14,97 km, en beschikt over een lange, aaneengesloten en goed gecontroleerde meetreeks. Hierdoor zijn de neerslaggegevens representatief voor de regionale omstandigheden en geschikt voor het analyseren van zowel historische als extreme neerslaggebeurtenissen in het studiegebied.

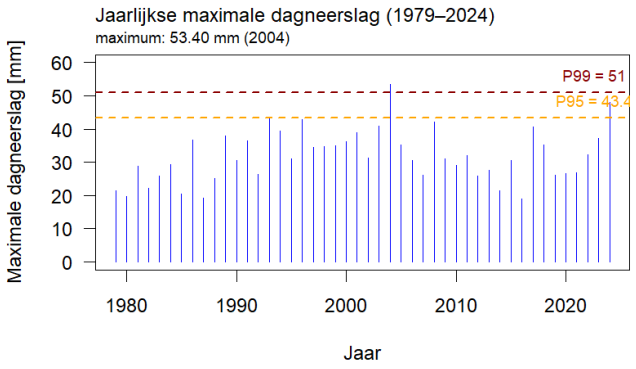


Figuur 4: KNMI-meetstation Eelde (Google Maps, 2026)

Dagelijkse neerslag en extreme neerslaggebeurtenissen

Figuur 5 laat de jaarlijkse maximale dagelijkse neerslag zien over de periode 1979–2024. Uit de figuur blijkt dat de maximale neerslag per jaar sterk kan verschillen. In de meeste jaren blijft de maximale dagneerslag relatief laag, terwijl er in enkele jaren sprake is van opvallend hoge waarden.

Het grootste deel van de jaarlijkse maxima ligt onder het 95e percentiel (P95 = 43,4 mm). Dit betekent dat in 95% van de jaren de maximale dagelijkse neerslag gelijk is aan of lager is dan deze waarde. Neerslaghoeveelheden boven het 99e percentiel (P99 = 51 mm) komen nog minder vaak voor en horen bij de meest extreme neerslaggebeurtenissen binnen de meetreeks. Slechts in 1% van de jaren wordt deze waarde overschreden. De hoogste gemeten maximale dagneerslag bedraagt ongeveer 53 mm en vond plaats in 2004. Dit laat zien dat zeer hoge maximale neerslagwaarden slechts in een beperkt aantal jaren voorkomen. Hoewel de jaarlijkse maximale dagneerslag duidelijke schommelingen laat zien, is er tot ongeveer 2004 sprake van een lichte toename. Daarna volgt een lichte afname. Een echt duidelijke tijdsafhankelijke trend is echter lastig vast te stellen en niet helemaal eenduidig.

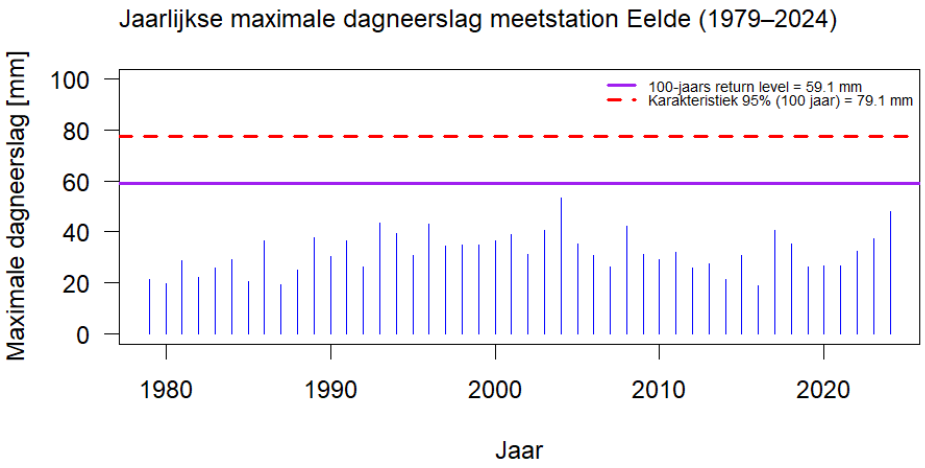


Figuur 5: Dagelijkse neerslag (1979-2024) – Eelde

Voor betonnen en stalen bruggen wordt in de praktijk meestal uitgegaan van een ontwerplevensduur van ongeveer 100 jaar (KNMI, 2025). Om die reden zijn in deze

neerslaganalyse zowel het 100-jaars return level als de karakteristieke 95%-ontwerpwaarde bepaald.

In figuur 6 zijn deze waarden weergegeven. Ze zijn berekend met behulp van een Gumbel-verdeling. De 95%-waarde betekent dat er met 95% zekerheid vanuit kan worden gegaan dat deze hoeveelheid neerslag tijdens de levensduur van de brug niet wordt overschreden (Florentia Kavoura, 2022). In dit onderzoek wordt deze waarde gebruikt als invoer voor de blootstellingsanalyse binnen de risico-evaluatie.

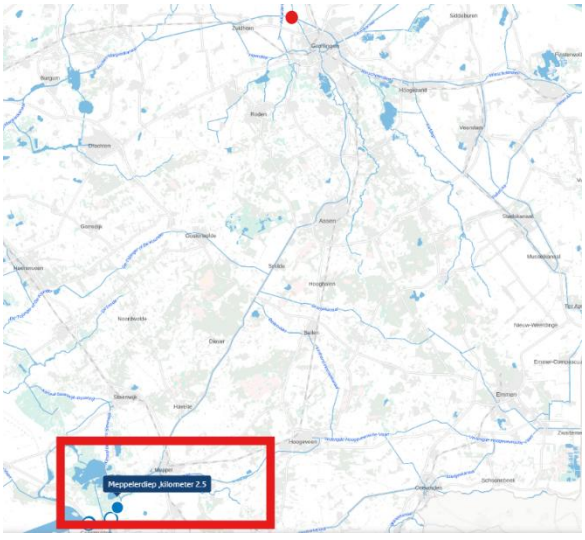


Figuur 6: 100-jaars return level en de karakteristieke waarde (95%)

De neerslaganalyse is uitgevoerd met dagelijkse meetgegevens van het KNMI-meetstation Eelde (KNMI, 2025). Voor het verwerken en analyseren van de gegevens is gebruikgemaakt van het programma R. De gebruikte scripts zijn opgenomen in bijlage 1.

Analyse van afvoer en ontwerpafvoer

Voor de analyse van de afvoer is gebruikgemaakt van het meetstation Meppelerdiep 2.5 km (zie figuur 7). Het Meppelerdiep is een kanaal in de provincie Overijssel en ligt tussen Meppel en Zwartsluis. Het kanaal vormt een verbinding tussen de Drentsche Hoofdvaart, de Hoogeveense Vaart en het Zwartewater. Het Meppelerdiep heeft een lengte van ongeveer 11 kilometer, een breedte die varieert tussen 50 en 110 meter en een diepte van ongeveer −3,35 meter ten opzichte van MP, een hoogtereferentie die in Nederland wordt gebruikt bij waterbouw en waterbeheer. Oorspronkelijk was het Meppelerdiep een natuurlijke waterweg, die vroeger bekend stond als de Sethe. In de loop van de tijd is het kanaal meerdere keren uitgegraven en verbreed (RWS, 2025).



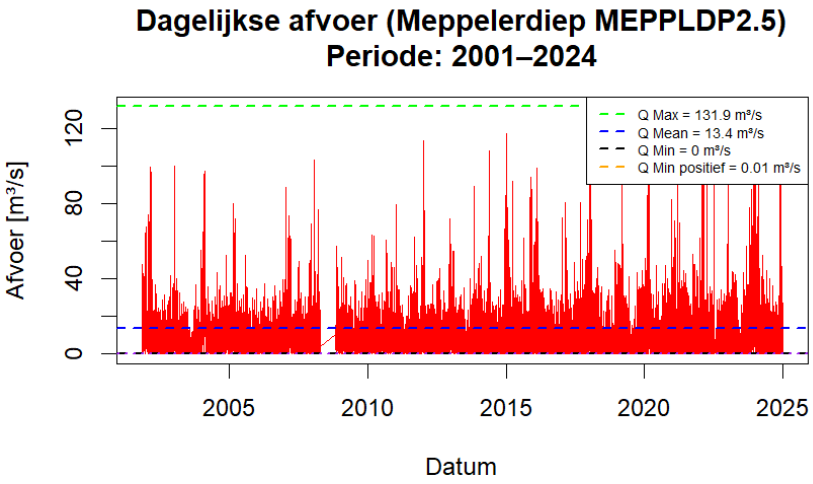
Figuur 7: Afvoermeetstation - Meppelerdiep

De keuze voor dit afvoermeetstation is gemaakt op basis van de beschikbaarheid van meetgegevens. Het gebruikte neerslagmeetstation bevat alleen gegevens over neerslag en geen informatie over afvoer. Het meetstation Meppelerdiep 2.5 km levert juist uitsluitend

afvoergegevens (RWS, 2025). Daarom was het binnen deze analyse noodzakelijk om verschillende meetstations te gebruiken voor neerslag en afvoer.

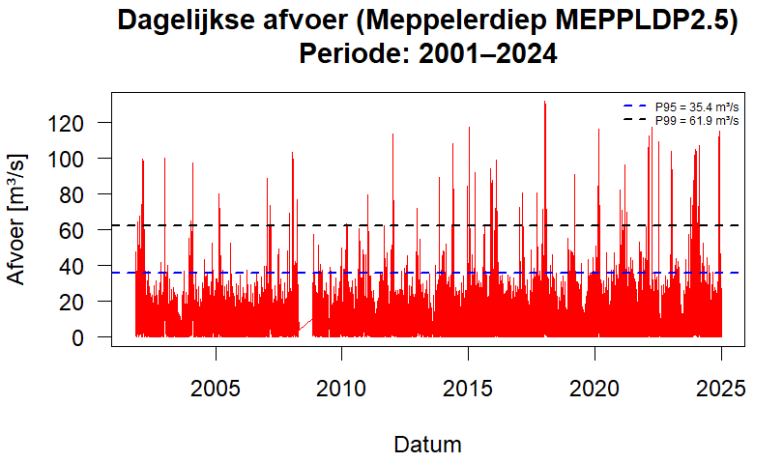
Analyse

Voor de analyse van de afvoer van het Meppelerdiep is gebruikgemaakt van dagelijkse afvoergegevens over de periode 2001–2024. In figuur 8 is de dagelijkse afvoer weergegeven. Hieruit blijkt dat de afvoer sterk varieert in de tijd. Het grootste deel van de metingen bestaat uit lage afvoerwaarden, terwijl hogere afvoeren minder vaak voorkomen en zichtbaar zijn als duidelijke pieken. Het gemiddelde debiet bedraagt ongeveer 13,4 m^3/s. De hoogste gemeten dagelijkse afvoer ligt rond de 131,9 m^3/s.



Figuur 8: Dagelijkse afvoer - Meppelerdiep

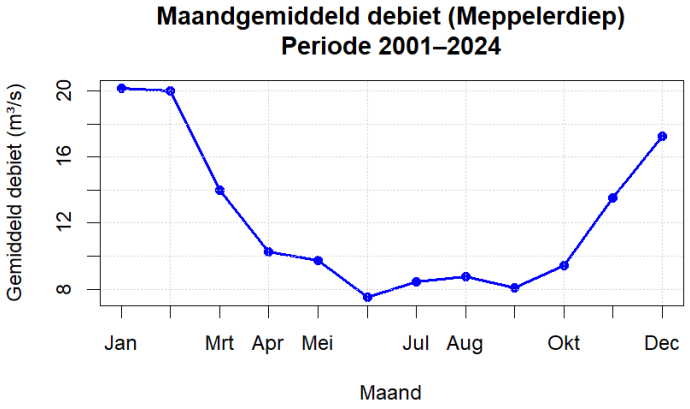
In figuur 9 is te zien hoe de dagelijkse afvoer zich verhoudt tot verschillende percentielwaarden. De waarde van het 95e percentiel ligt rond de 35,4 m^3/s. Dit betekent dat bijna alle gemeten afvoerwaarden lager zijn dan deze waarde. Het 99e percentiel ligt op ongeveer 61,9 m^3/s en geeft de uitzonderlijk hoge afvoeren weer, die maar zelden voorkomen. Uit de grafiek blijkt dat de meeste piekafvoeren zich bevinden tussen het 95e en het 99e percentiel. Slechts in een paar gevallen worden de hoogste afvoerwaarden binnen de meetreeks bereikt.



Figuur 9: Dagelijkse afvoer - percentielwaarden - Meppelerdiep

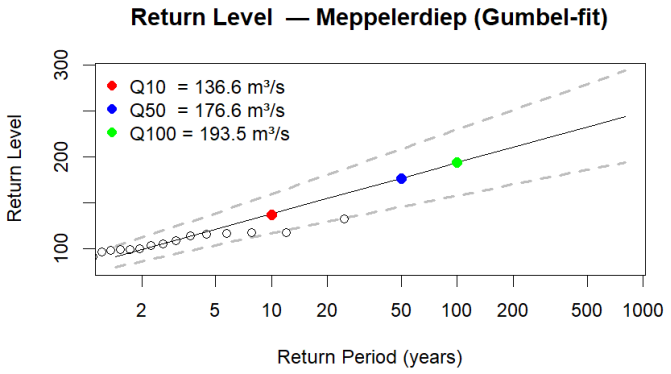
Over de volledige meetperiode komen schommelingen en piekafvoeren op een vergelijkbare manier voor.
Er zijn daarbij geen duidelijke veranderingen te zien in het algemene gedrag van de afvoer.

In figuur 10 is het verloop van de afvoer over het jaar te zien aan de hand van het maandgemiddelde debiet. Hieruit blijkt dat de afvoer in de winter hoger is dan in de zomer. De hoogste gemiddelde afvoeren komen voor in januari en februari. In de zomermaanden, vooral in juni en juli, is de afvoer het laagst.



Figuur 10: Maandgemiddeld afvoer - Meppelerdiep

Figuur 11 laat de resultaten zien van de analyse van extreme afvoeren. Hierbij is gekeken naar hoe vaak bepaalde afvoeren voorkomen, met behulp van de Gumbelverdeling. In de figuur zijn de afvoeren weergegeven die horen bij herhalingstijden van 10 jaar (Q10), 50 jaar (Q50) en 100 jaar (Q100). Te zien is dat hogere herhalingstijden ook horen bij hogere afvoerwaarden.



Figuur 11: Return Level - Meppelerdiep

In de afvoerdata van het Meppelerdiep is een onderbreking te zien tussen ongeveer 2005 en 2010. Dit datagat is ontstaan doordat er in deze periode geen of onvolledige meetgegevens beschikbaar zijn.
Het heeft dus geen relatie met het gedrag van het watersysteem zelf. De volledige analyse van de afvoer is uitgevoerd met het programma R. De gebruikte scripts en stappen zijn opgenomen in bijlage 2.

Neerslag en afvoer zorgen meestal niet direct voor het instorten van een brug. Wel kunnen ze indirect problemen veroorzaken, zoals funderingserosie, erosie bij de landhoofden en een hogere hydraulische belasting. Dit komt door hogere waterstanden en grotere stroomsnelheden in het kanaal. Deze effecten kunnen uiteindelijk leiden tot structurele schade en in extreme gevallen tot instorting. De neerslaganalyse wordt daarom gebruikt om de blootstelling en de bedreiging binnen de risicoanalyse te bepalen.

De afvoer is niet direct meegenomen in de risicoberekening. Hiervoor zijn twee redenen. Ten eerste ligt het gebruikte afvoermeetstation op ongeveer 67 kilometer afstand van de Nieuwklapbrug (Google Maps, 2025). Hierdoor zijn de gemeten afvoerwaarden niet volledig representatief voor de lokale hydraulische situatie bij de brug. Ten tweede wordt het watersysteem tussen het meetstation en de brug sterk beïnvloed door gemalen en actief

peilbeheer. Daardoor is de afvoer ter plaatse van de brug niet één op één gekoppeld aan de gemeten afvoerwaarden.

3.1.4 Klimaatscenario's (SSP) en extreme gebeurtenissen

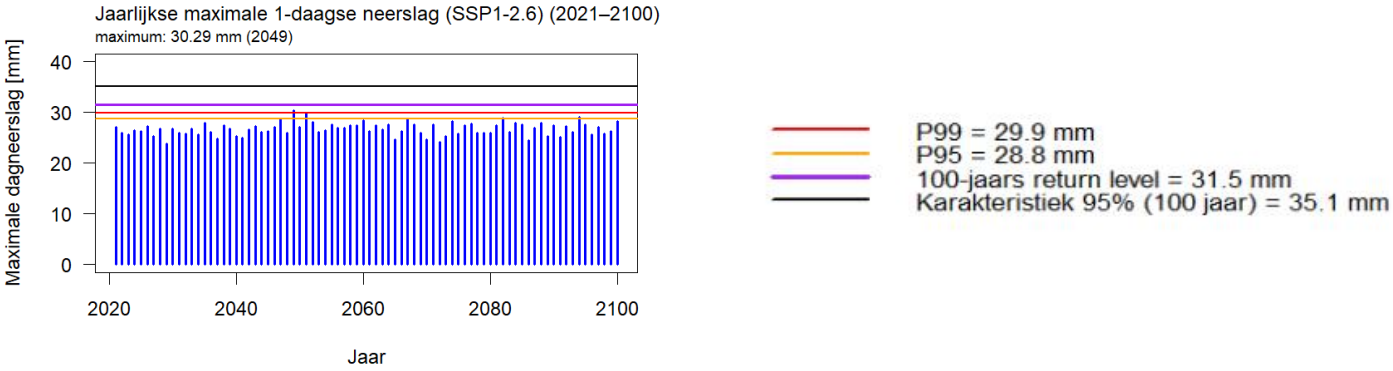
Om de invloed van klimaatverandering op het overstromingsrisico van de Nieuwklapbrug te beoordelen, wordt in dit onderzoek gebruikgemaakt van de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP's). Deze scenario's beschrijven mogelijke toekomstige klimaatomstandigheden en veranderingen in extreme neerslag (zie figuren 33, 34 en 35 in bijlage 3) (Detlef P. van Vuuren, 2017).

In dit onderzoek zijn drie scenario's geselecteerd: SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5. Deze scenario's staan voor respectievelijk een lage, middelmatige en hoge mate van klimaatverandering en geven daarmee een goed beeld van mogelijke toekomstige ontwikkelingen. In onderstaande figuur 12 zijn de belangrijkste karakteristieken van elk SSP-scenario weergegeven.

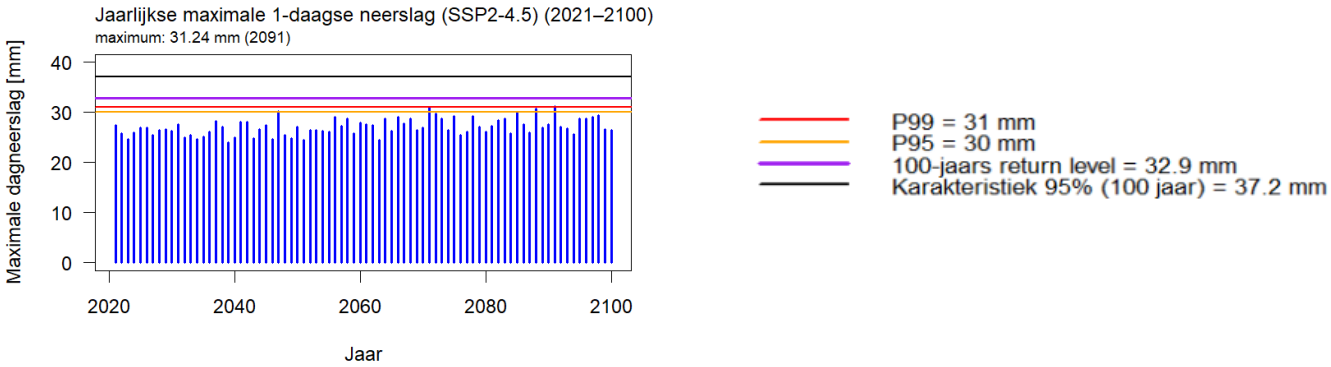


Figuur 12: Karakteristieken van SSP-scenario's

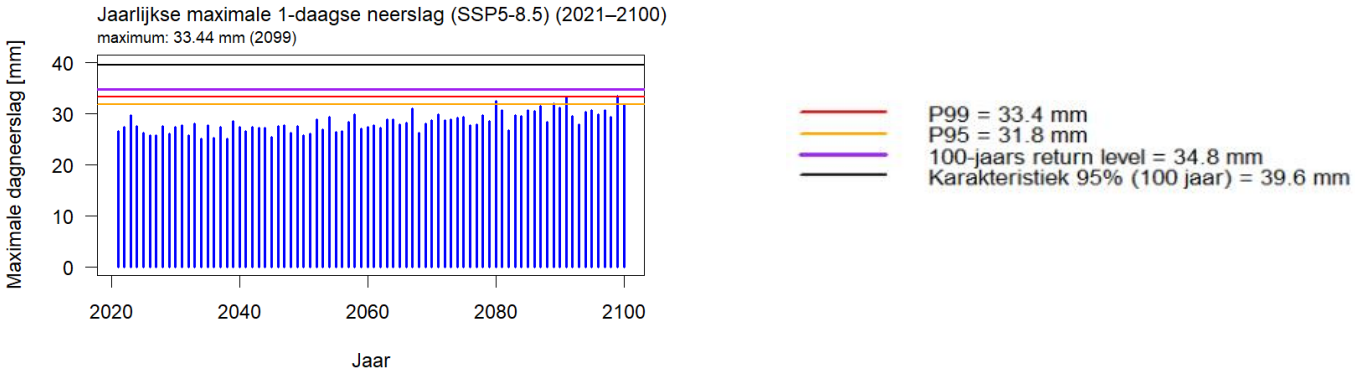
De SSP-neerslaggegevens zijn gebaseerd op meerdere klimaatmodellen. Per jaar is de mediaan van deze modellen gebruikt om tot één representatieve waarde te komen en om te voorkomen dat uitschieters te veel invloed hebben op de resultaten. Op basis van deze gegevens zijn voor de periode 2021–2100 grafieken opgesteld. Voor elk scenario zijn daarbij de P95- en P99-percentielen, het 100-jaars return level en de 95%-karakteristieke waarde berekend (zie figuren 13, 14 en 15).



Figuur 13: Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag en de P95- en P99-percentielen [SSP1-2.6]



Figuur 14: Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag en de P95- en P99-percentielen [SSP2-4.5]



Figuur 15: Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag en de P95- en P99-percentielen [SSP5-8.5]

De extreme neerslagwaarden uit de SSP-scenario's liggen lager dan de gemeten waarden bij meetstation Eelde. Dit verschil ontstaat doordat klimaatmodellen neerslag berekenen over grotere gebieden, terwijl een meetstation neerslag meet op één specifieke locatie. Hierdoor worden lokale, zware buien in klimaatmodellen minder extreem weergegeven (Copernicus Climate Change Service, 2024). De gebruikte R-scripts zijn opgenomen in bijlage 3.

De SSP-scenario's vormen op deze manier een onderbouwde basis voor het beoordelen van de toekomstige bedreiging binnen de risicoanalyse in hoofdstuk 6.

3.2 Río Blanco brug – Ecuador

3.2.1 Geografische locatie

De brug ligt over de rivier Río Blanco in het noordwesten van Ecuador, langs het wegtracé Mitad del Mundo – Calacalí – La Independencia (figuur 16). De locatie van de brug is vastgesteld op basis van geotechnisch onderzoek dat is uitgevoerd in het gebied van het brugtracé. In de directe omgeving van de brug zijn twee sonderingen uitgevoerd, aangeduid als SB-01 en SB-02.

Sondeerpunt SB-01 ligt op de coördinaten 10016807 N en 686250 E en sondeerpunt SB-02 op de coördinaten 10016792 N en 686416 E. De hoogte van het terrein op deze locaties bedraagt respectievelijk 115 en 117 meter boven zeeniveau. De brug ligt binnen het stroomgebied van de Río Blanco, dat onderdeel is van het hydrografische systeem van de Río Esmeraldas (Ministerio de Transporte , 2017).



Figuur 16: Kaartweergave van de brug over de Río Blanco (Yamile Almeida, 2025)

3.2.2 Typologische classificatie van de brug

De brug over de rivier Río Blanco bestond uit twee delen met daartussen een pijler. Het kortere deel aan de linkerzijde was uitgevoerd als een brug van gewapend beton met een overspanning van ongeveer 35 meter. Het langere deel, in de richting van Puerto Quito, had een lengte van ongeveer 60 meter en bestond uit een stalen vakwerkconstructie (zie figuur 17) (Ministerio de Transporte , 2017).



Figuur 17: Zijaanzicht van de brug (Ministerio de Transporte , 2017)

3.2.3 Hydrologie van de locatie

Hydrologische kenmerken van het watersysteem

De Río Blanco maakt deel uit van het stroomgebied van de Río Esmeraldas. De rivier ontspringt in de Andes, in het gebied van de vulkanen Pichincha, Atacazo, Corazón en Ilinizas, op een hoogte van ongeveer 5000 meter boven zeeniveau. De rivier heeft een lengte van ongeveer 260 kilometer en een stroomgebied met een oppervlakte van ongeveer 4532,78 km^2.
Binnen het stroomgebied komen grote hoogteverschillen voor, van bergachtig gebied tot aan de kustvlakte. De gemiddelde helling van de rivier bedraagt ongeveer 2%, terwijl deze bij de bron rond de 8% ligt. In het projectgebied, dat zich in de kustvlakte bevindt, is de helling veel kleiner en bedraagt de gemiddelde rivierhelling ongeveer 0,003%. Het rivierprofiel ter plaatse van de

brug is U-vormig en de oevers bestaan voornamelijk uit alluviale afzettingen (Ministerio de Transporte , 2017).

Neerslag- en watermeetstations

Voor de analyse van de neerslag in het stroomgebied van de Río Blanco is gebruikgemaakt van historische neerslaggegevens van meerdere nabijgelegen meetstations. De analyse is gebaseerd op gegevens van de meetstations La Concordia, Pachijal, Los Bancos, Mindo, Nanegalito, Calacalí (INAMHI), Chontal Bajo en San Antonio de Pichincha. Voor deze stations zijn maandelijkse, jaarlijkse en maximale neerslagwaarden beschikbaar.
Deze meetstations vormen samen de basis voor het beschrijven van de ruimtelijke spreiding en de variatie van de neerslag in de tijd in de omgeving van de brug (Ministerio de Transporte , 2017).

Jaarlijkse neerslag

De analyse van de jaarlijkse neerslag in het stroomgebied van de Río Blanco laat zien dat de hoeveelheid neerslag sterk verschilt per locatie en hoogte van de meetstations. Bij meetstations zoals La Concordia (410 m boven zeeniveau) en Pachijal (560 m boven zeeniveau) ligt de jaarlijkse neerslag rond de 3000 mm. Bij het meetstation Los Bancos, dat hoger ligt op 1115 meter boven zeeniveau, worden zelfs waarden tot ongeveer 4000 mm per jaar gemeten.
Voor het centrale deel van het stroomgebied, dat zich rond 2400 meter boven zeeniveau bevindt, wordt een gemiddelde jaarlijkse neerslag van ongeveer 1500 mm genoemd (zie tabel 1). Ter plaatse van de brug over de Río Blanco bedraagt de gemiddelde jaarlijkse neerslag ongeveer 3000 mm per jaar. (Ministerio de Transporte , 2017)

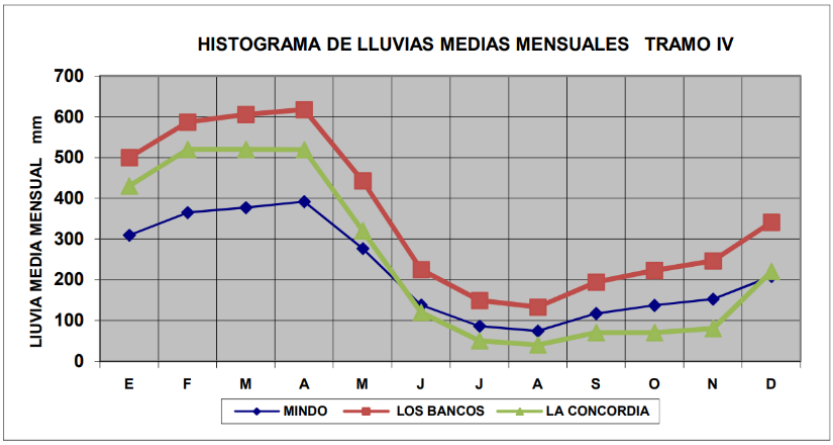
Waarbij: Msnm: meter boven zeeniveau. (Ministerio de Transporte , 2017)

ESTACION		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	ELEVACION
M046	PACHIJAL MASHPI	331,0	370,2	399,1	419,4	292,9	180,9	116,3	100,5	155,7	191,5	216,2	271,7	**3045,4**	**560**
M212	MINDO INECEL	309,7	365,2	377,1	392,1	276,7	137,6	86,5	74,3	117,2	137,3	152,5	208,3	**2634,5**	**1235**
M213	LA PERLA	209,1	229,9	233,3	248,9	180,9	85,7	54,5	45,6	73,6	95,9	112,9	141,1	**1711,4**	**1410**
M216	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	499,6	587,2	606,0	617,9	442,9	225,3	149,6	133,0	194,5	223,3	246,7	341,0	**4267,0**	**1115**
M524	CHONTAL BAJO	260,8	277,6	290,8	284,3	204,2	104,2	79,1	69,9	110,4	159,8	186,0	207,1	**2234,2**	**1300**
M054	QUITO OBSERVATORIO	90,4	117,3	150,2	176,4	111,7	47,9	25,5	31,0	82,3	132,0	125,1	101,2	**1191,0**	**2820**
M339	NANEGALITO	305,8	321,3	319,7	365,6	264,0	133,2	84,8	68,8	115,2	155,5	166,9	202,5	**2503,3**	**1615**
M358	CALACALI INAMHI	92,8	115,5	143,7	140,1	81,2	35,3	21,6	18,5	48,4	79,4	93,5	82,8	**952,8**	**2843**
M335	CHONTAL BAJO	276,0	293,0	296,7	327,7	241,9	119,4	71,2	56,1	93,6	129,4	149,1	187,6	**2241,7**	**596**
M115	SAN ANTONIO DE PICHINCHA	32,6	49,5	51,6	69,9	49,0	23,5	11,3	13,6	36,8	44,2	43,4	34,5	**459,9**	**2430**
M025	LA CONCORDIA	430,0	520,0	520,0	519,0	320,0	120,0	50,0	40,0	70,0	70,0	80,0	220,0	**2959,0**	**410**

Tabel 1: jaarlijkse en maandelijkse neerslag (Ministerio de Transporte , 2017)

Maandelijkse neerslag

De maandelijkse verdeling van de neerslag in het gebied tussen Mindo en het laaggelegen deel van het wegtracé laat een duidelijk seizoenspatroon zien. De hoogste neerslaghoeveelheden komen voor in april, met maandtotalen die kunnen oplopen tot ongeveer 600 mm (zie figuur 18). De laagste neerslagwaarden worden gemeten in augustus.
Op basis hiervan kan een natte periode worden onderscheiden van oktober tot en met mei en een relatief droge periode van juni tot en met september (Ministerio de Transporte , 2017).



Figuur 18: Histogram van de gemiddelde maandelijkse neerslag (Ministerio de Transporte , 2017).

Maximale dagelijkse neerslag (24 uur)

Voor het beoordelen van extreme neerslag is gekeken naar de maximale dagelijkse neerslag, zoals weergegeven in tabel 2. Hierbij is aangenomen dat deze waarde gelijk is aan de maximale neerslag over een periode van 24 uur. De analyse is gebaseerd op jaarlijkse maximale neerslagwaarden uit meetreeksen van verschillende referentiestations over de periode 1964–2010. (Ministerio de Transporte , 2017)
De resultaten laten zien dat in de omgeving van de brug zeer hoge 24-uurs neerslagwaarden kunnen voorkomen. Met name bij de meetstations Los Bancos en La Concordia zijn waarden gemeten die hoger zijn dan 200 mm. (Ministerio de Transporte , 2017)

	M025	M046	M212	M213	M216	M335	M339
AÑO	LA CONCORDIA	PACHIJAL	MINDO	LA PERLA	LOS BANCOS	CHONTAL	NANEGALITO
MAXIMA	215,6	143,0	105,9	163,1	235,6	67,5	77,2
n	20	14	14	17	13	9	9
MEDIA	151,8	95,2	83,0	62,8	116,3	51,8	66,5
DS	28,0	35,9	17,8	28,4	48,0	10,2	8,4
		FRECUENCIA	DE	LAS	LLUVIAS	mm	
Tr2	148	90	80	59	110	50	65
Tr5	178	130	100	90	164	63	75
Tr10	197	157	114	110	200	71	82
Tr20	216	183	126	130	235	78	88
Tr50	241	216	143	155	280	88	97
Tr100	259	241	155	174	314	96	103
Tr200	278	265	167	193	347	103	109
Tr300	287	278	174	203	364	107	112
Tr400	296	291	180	212	381	111	115
		INTENSIDAD		mm/h			
Tr2	6,2	3,8	3,4	2,4	4,6	2,1	2,7
Tr5	7,4	5,4	4,2	3,7	6,8	2,6	3,1
Tr10	8,2	6,5	4,7	4,6	8,3	2,9	3,4
Tr20	9,0	7,6	5,3	5,4	9,8	3,3	3,7
Tr50	10,0	9,0	5,9	6,5	11,7	3,7	4,0
Tr100	10,8	10,0	6,5	7,3	13,1	4,0	4,3
Tr200	11,6	11,1	7,0	8,1	14,5	4,3	4,5
Tr300	12,0	11,6	7,2	8,5	15,2	4,5	4,7
Tr400	12,3	12,1	7,5	8,9	15,9	4,6	4,8

Tabel 2: Maximale dagelijkse of 24-uurs neerslag – Frequentie (Ministerio de Transporte , 2017)

Analyse van afvoer en ontwerpafvoer

Voor de analyse van hoogwaters en piekafvoeren bij de brug over de Río Blanco is gebruikgemaakt van beschikbare gegevens en aanvullende berekeningsmethoden. De informatie over gemeten waterstanden en afvoeren is beperkt en niet altijd volledig, omdat er voor de afgelopen jaren geen complete meetreeksen beschikbaar zijn.
Daarom is de analyse vooral gebaseerd op historische maximale afvoergegevens. Deze gegevens zijn aangevuld met statistische berekeningen en neerslag-afvoermodellen om een beter beeld te krijgen van extreme afvoersituaties (Ministerio de Transporte , 2017).

Analyse

De historische maximale afvoeren zijn afkomstig van het meetstation Blanco DJ Toachi en bestaan uit jaarlijkse maximale afvoerwaarden over de periode 1994–2010. Deze meetgegevens vormen de basis voor de analyse van extreme afvoeren en zijn weergegeven in tabel 3, waarin de gemeten piekafvoeren per jaar zijn opgenomen (Ministerio de Transporte , 2017).
De meetgegevens van het station Blanco DJ Toachi zijn ook gebruikt als referentie bij het ontwerp van de Toachi-Pilatón-stuwdam (Ministerio de Transporte , 2017). Hoewel de meetreeks door beperkt onderhoud van het station niet volledig continu is en zich beperkt tot de periode 1994–2010, wordt dit station beschouwd als een sleutelstation voor de bepaling van maximale afvoeren in het stroomgebied.
Op basis van deze historische maximale afvoeren en de gebruikte berekeningsmethoden is een ontwerpafvoer bepaald die past bij het vastgestelde risiconiveau (Ministerio de Transporte , 2017).

ESTACION BLANCO DJ TOACHI

AÑO	Q PICO m3/s	AÑO	Q PICO m3/s
1994	995	2003	1104
1995	1272	2004	921
1996	1272	2005	674
1997	1057	2006	1457
1998	1200	2007	753
1999	1200	2008	1404
2000	1056	2009	1200
2001	750	2010	1510
2002	1057		

Tabel 3: Jaarlijkse maximale afvoerwaarden over de periode 1994–2010, meetstation Blanco DJ Toachi. (Ministerio de Transporte , 2017)

Voor het ontwerp van de brug is gekozen voor een ontwerpafvoer met een herhalingstijd van 100 jaar (Q100). De bijbehorende ontwerpafvoer bedraagt 3095,5 m^3/s. Deze waarde is een karakteristieke ontwerpafvoer gebaseerd op extreme hoogwatersituaties en vastgesteld op basis van de toegepaste berekeningsmethoden, waaronder statistische analyse en de modellering van hoogwatergolven, zoals beschreven in de gebruikte bron (Ministerio de Transporte , 2017).

4. Structurele analyse van de Nieuwklapbrug

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de structurele analyse van de Nieuwklapbrug beschreven. De analyse richt zich op het draagvermogen van het brugdek, waarbij vooral wordt gekeken naar buigmomenten en dwarskrachten. De gebruikte berekeningen en resultaten zijn overgenomen uit een bestaande analytische studie van de Nieuwklapbrug (Tzortzinakis, 2018).

De structurele analyse wordt in dit onderzoek niet gebruikt om de veiligheid van de brug te controleren. Het doel is om inzicht te krijgen in de plekken in het brugdek waar hoge belastingen optreden en welke belastingen daarbij het meest bepalend zijn. Deze informatie wordt in het volgende hoofdstuk gebruikt als basis voor het beoordelen van mogelijke faalmechanismen.

4.2 constructieve opbouw van de brug

De Nieuwklapbrug is een betonnen plaatbrug van gewapend beton met een totale lengte van ongeveer 100,7 meter. De brug bestaat uit zeven overspanningen. De eindoverspanningen hebben een lengte van ongeveer 11,20 meter en de tussenliggende overspanningen zijn ongeveer 14,14 meter lang. De brug is uitgevoerd met een scheefstand van 82 graden (zie figuur 48 en figuur 49 in bijlage 4).

Het brugdek bestaat uit een massieve betonplaat met een dikte van ongeveer 650 mm en een totale breedte van 14,31 meter. De effectieve breedte van het dragende deel van het brugdek bedraagt 8,25 meter (zie figuur 50 in bijlage 4).

Voor de structurele analyse is het brugdek gemodelleerd als een doorlopende ligger. In dit model zijn de middelste steunpunten gemodelleerd als scharnieren, waarbij alleen rotatie mogelijk is. De overige steunpunten zijn gemodelleerd als schuifopleggingen, waardoor verplaatsing in langsrichting kan optreden (zie figuur 51 in bijlage 4).

4.3 Materiaaleigenschappen

De materiaaleigenschappen van het beton zijn bepaald op basis van kernboringen die zijn uitgevoerd in het brugdek. De gemiddelde druksterkte van het beton bedraagt ongeveer 70 MPa, met een karakteristieke waarde van 60 MPa. Op basis van de verhouding tussen de druk- en treksterkte is een gemiddelde treksterkte van 4,36 MPa vastgesteld (zie tabel 17 in bijlage 5).
De eigenschappen van de wapening zijn gebaseerd op staal van het type QR22. Dit staal heeft een karakteristieke vloeigrens van 220 MPa. Ook de bijbehorende ontwerpwaarden en gemiddelde waarden zijn bepaald. Een overzicht van de gebruikte eigenschappen van de wapening is weergegeven in tabel 18 (bijlage 5).

4.4 Buigmomentcapaciteit van het brugdek

De buigmomentcapaciteit van het brugdek is bepaald voor drie verschillende toestanden: de gescheurde toestand, de toestand waarbij de wapening begint te vloeien en de uiterste grenstoestand. De berekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende posities in de brug, namelijk in de overspanningen en bij de steunpunten.

Het scheurmoment is berekend op basis van de treksterkte van het beton en het traagheidsmoment van de doorsnede. Het buigmoment waarbij de wapening begint te vloeien is bepaald aan de hand van het spannings-rekgedrag van het beton, in combinatie met de rek waarbij de wapening begint te vloeien. Het buigmoment in de uiterste grenstoestand is berekend met een vereenvoudigd rechthoekig spanningsblok voor het beton, waarbij de druksterkte van de wapening niet is meegenomen. Voor elke toestand is de bijbehorende kromming afzonderlijk bepaald. De gebruikte formules zijn opgenomen in bijlage 6. De berekende buigmomentcapaciteiten voor de verschillende posities in de brug zijn samengevat in tabel 4. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen karakteristieke en gemiddelde materiaalwaarden. (Tzortzinakis, 2018)

Bending Moment Capacity				
Input				
Parameters		Span 1	Span 2	Supports
Total slab height	h_{slab} (mm)	631	620	650
Effective depth	d_l (mm)	586	575	605
Reinforcement area	A_s (mm^2/m)	6136	6136	7552
Characteristic material properties				
Position		Span 1	Span 2	Supports
Cracking moment capacity	M_{crd} (kNm/m)	244.67	236.27	257.98
Yielding moment capacity	M_{yd} (kNm/m)	599.39	587.54	755.68
Ultimate moment capacity	M_{ud} (kNm/m)	663.55	650.64	837.22
Mean material properties				
Position		Span 1	Span 2	Supports
Cracking moment capacity	M_{crm} (kNm/m)	354.56	342.39	373.85
Yielding moment capacity	M_{ym} (kNm/m)	752.42	737.57	949.70
Ultimate moment capacity	M_{um} (kNm/m)	851.62	835.29	1077.61

Tabel 4: Buigmomentcapaciteit (Tzortzinakis, 2018)

4.5 Dwarskrachtcapaciteit van het brugdek

De dwarskrachtcapaciteit van het brugdek is bepaald voor de uiterste grenstoestand op basis van de betonsterkte, de effectieve hoogte van de doorsnede en de hoeveelheid langsgerichte wapening.

De berekening is uitgevoerd volgens de voorschriften van Eurocode 2 voor betonnen elementen zonder dwarskrachtwapening.

Daarnaast is de dwarskrachtcapaciteit ook bepaald met een aangepaste rekenmethode voor betonnen plaatbruggen onder geconcentreerde belastingen nabij steunpunten, waarbij gebruik is gemaakt van de ondersteunde lengte van de plaat.

De gebruikte formules zijn opgenomen in bijlage 7. De berekende dwarskrachtcapaciteiten voor zowel karakteristieke als gemiddelde materiaalwaarden zijn samengevat in onderstaande tabel 5.

(Tzortzinakis, 2018)

Shear Capacity			
Parameters		Eurocode 2 (4.14)	Proposal for slabs (4.17)
Effective depth	d_l (mm)	605	605
Reinforcemnt ratio	ρ_l (%)	1.16	1.16
Supported length	l_{sup} (mm)	-	7 · 700
Characteristic material properties			
Formula		Eurocode 2 (4.14)	Proposal for slabs (4.17)
Design shear stress capacity	$v_{Rd,c}$ (MPa)	0.793	1.060
Minimum shear stress capacity	v_{min} (MPa)	1.018	1.018
Design shear capacity	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	615.68	641.38
Mean material properties			
Formula		Eurocode 2 (4.14)	Proposal for slabs (4.17)
Average shear stress capacity	$v_{Rm,c}$ (MPa)	1.109	1.404
Minimum shear stress capacity	v_{min} (MPa)	1.148	1.148
Average shear capacity	$V_{Rm,c}$ (kN/m)	694.58	849.37

Tabel 5: Dwarskrachtcapaciteit (Tzortzinakis, 2018)

4.6 Aardbevingsbelasting

De seismische activiteit in de omgeving van de Nieuwklapbrug wordt veroorzaakt door geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning. Deze aardbevingen verschillen van natuurlijke tektonische aardbevingen en hebben meestal een lage magnitude en een korte duur. Uit de seismische analyse van de Nieuwklapbrug blijkt dat de verwachte aardbevingsbelasting in dit gebied beperkt is en niet maatgevend is voor direct constructief falen. Aardbevingen worden in dit onderzoek daarom beschouwd als een constante externe belasting. Ze kunnen invloed hebben op de uitgangstoestand van de brug, maar worden niet gezien als een zelfstandig primair faalmechanisme (Tzortzinakis, 2018).

In de seismische analyse is de aardbevingsbelasting toegepast op een structureel model van de brug om het gedrag van de constructie te bepalen. Hierbij is gekeken naar de horizontale verplaatsingen van het brugdek, de verticale aardbevingscomponent en de spanningen die in de constructie optreden. De resultaten laten zien dat de horizontale aardbevingsbelasting leidt tot meetbare, maar beperkte vervormingen en dat de verticale belasting een beperkte invloed heeft en daarom niet maatgevend wordt beschouwd. De brug blijft hierbij binnen het elastische gedrag en er treedt geen direct constructief falen op.

4.7 Unity Checks voor aardbevingsbelasting

Uit de uitgevoerde Unity Checks blijkt dat de Nieuwklapbrug voldoende capaciteit heeft om zowel verticale als horizontale aardbevingsbelasting op te nemen. Voor de verticale seismische belasting blijven de Unity Check-waarden voor de buigmomenten onder de 0,50 en voor de dwarskrachten onder de 0,26. Dit geldt zelfs voor de meest ongunstige belastingsposities. Dit betekent dat de optredende belastingen ruim binnen de draagcapaciteit van het brugdek blijven (Tzortzinakis, 2018).

Ook bij horizontale aardbevingsbelasting laten de Unity Checks zien dat de middenpijlers en de pendelsteunen voldoende weerstand hebben tegen zowel buiging als dwarskracht. De resultaten geven aan dat aardbevingsbelasting geen maatgevende belasting is voor de Nieuwklapbrug. De constructie blijft hierdoor binnen het elastische gedrag en er wordt geen blijvende schade verwacht (Tzortzinakis, 2018).

4.8 Conclusie

Uit de analyse blijkt dat het brugdek zowel voor buiging als voor dwarskracht een duidelijk vastgestelde capaciteit heeft. De hoogste buigmomenten treden vooral op in de overspanningen, terwijl de grootste dwarskrachten optreden in het brugdek nabij de pijlers en landhoofden. Deze resultaten geven inzicht in welke delen van de constructie het meest gevoelig zijn voor verhoogde belastingen.

Daarnaast laten de Unity Checks voor aardbevingsbelasting zien dat de Nieuwklapbrug voldoende structurele weerstand heeft tegen seismische belasting. Daarnaast vormen aardbevingen in dit gebied geen maatgevende belasting voor direct constructief falen.

De resultaten van de structurele analyse worden in hoofdstuk 5 gebruikt om te beoordelen op welke manier externe gevaren, zoals overstromingen, kunnen leiden tot schade of mogelijk falen van de brug.

5. Evaluatie van potentiële impact

5.1 Faalmechanismen tijdens overstromingen

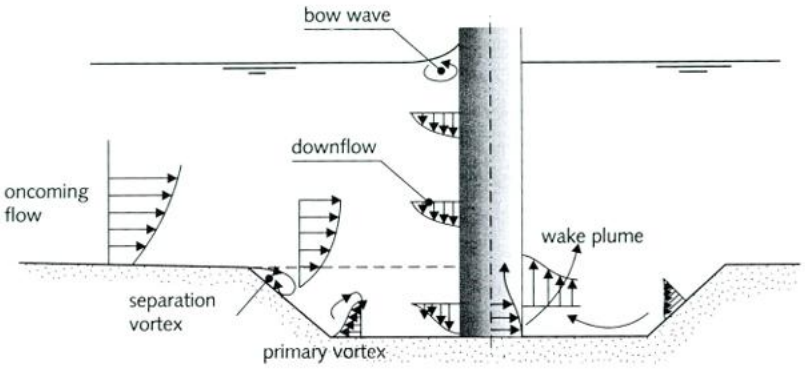
De Nieuwklapbrug ligt over het Aduarderdiep en wordt gedragen door meerdere pijlers. De brug maakt deel uit van een boezemsysteem waarin het waterpeil en de afvoer actief worden beheerd. Doordat dit systeem goed wordt gereguleerd, is de kans op extreem hoge waterstanden relatief klein.

In Nederland kunnen overstromingen vooral ontstaan als gevolg van een dijkdoorbraak. In zo'n situatie kan het boezemsysteem plaatselijk leeglopen of juist extra water ontvangen. Hierdoor kunnen de stroomsnelheden toenemen en kunnen de hydraulische belastingen in watergangen zoals het Aduarderdiep groter worden. Dit soort omstandigheden kan leiden tot funderingserosie, erosie van oevers en landhoofden en een toename van de hydraulische belasting op de brug.

Bij het beoordelen van de mogelijke faalmechanismen wordt uitgegaan van een situatie met hoog water als gevolg van een overstroming. Er wordt gekeken naar hoe deze omstandigheden de krachten en belastingen in de brug beïnvloeden. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van de resultaten uit de structurele analyse die zijn besproken in hoofdstuk 4.

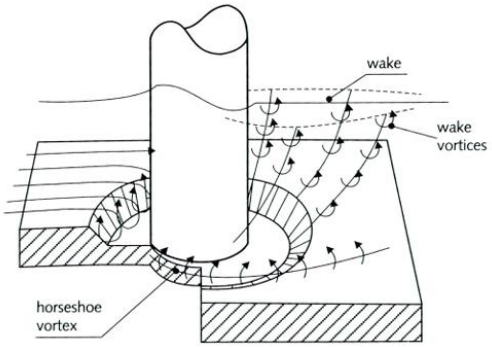
5.1.1 Funderingserosie (Scour)

Bij de Nieuwklapbrug staan de twee middelste pijlers direct in de bodem van het Aduarderdiep. Tijdens een overstroming kan de stroming onder de brug toenemen. Wanneer het water tegen een pijler aan stroomt, wordt de stroming aan de voorkant naar beneden afgebogen. Hierdoor ontstaat een neerwaartse stroming (downflow) en ontstaan er wervels bij de bodem (zie figuur 19). Deze wervels kunnen bodemmateriaal losmaken en afvoeren rondom de voet van de pijler (G.J.C.M. Hoffmans, 1997).



Figuur 19: Stromingsvelden rond een pijler

Rond de basis van de pijler vormt zich daarnaast een zogenoemde horseshoe vortex, die zich om de pijler heen beweegt. Achter de pijler ontstaan wake vortices (zie figuur 20). Door deze verschillende stromingspatronen kan er een erosiekuil ontstaan rondom de pijler. In de eerste fase komt hierbij bodemmateriaal los. Vervolgens kan deze kuil zich verder verdiepen, totdat er een nieuw evenwicht ontstaat tussen de stroming en de weerstand van de bodem (G.J.C.M. Hoffmans, 1997).



Figuur 20: Stromingspatroon rond een brugpijler

Wanneer de erosiekuil verder verdiept, verliest de pijler een deel van zijn ondersteuning. Hierdoor wordt de effectieve funderingsdiepte kleiner. Dit kan zorgen voor grotere vervormingen van de pijler en een afname van de stabiliteit van de constructie (G.J.C.M. Hoffmans, 1997).

Voor de Nieuwklapbrug betekent dit dat vooral de twee middelste pijlers gevoeliger zijn voor funderingserosie dan de andere steunpunten. In de structurele analyse zijn deze pijlers aangenomen als vaste steunpunten. Bij het optreden van scour verandert deze uitgangssituatie. De belasting wordt dan minder goed naar de ondergrond afgevoerd, waardoor hogere krachten kunnen ontstaan in het brugdek, met name ter hoogte van de pijlers.

Om deze reden wordt funderingserosie beschouwd als een belangrijk faalmechanisme voor de Nieuwklapbrug tijdens overstromingssituaties.

5.1.2 Erosie van oevers en landhoofden

Wanneer tijdens een overstroming stromend water langs een landhoofd wordt geleid, kan het water lokaal versnellen. Dit komt door de vorm van de watergang en de aanwezigheid van het landhoofd zelf (G.J.C.M. Hoffmans, 1997).

Door deze versnelde stroming nemen de schuifspanningen op de bodem en de oever toe. Hierdoor kan bodemmateriaal bij de voet van het landhoofd loskomen en worden afgevoerd. Daarnaast kan er plaatselijk wervelvorming ontstaan bij de overgang van oever naar constructie, wat het losmaken van sediment verder versterkt (G.J.C.M. Hoffmans, 1997).

In de eerste fase wordt vooral het oppervlakkige bodemmateriaal weggespoeld. Als de verhoogde stroming langere tijd aanhoudt, kan de erosie zich verder verdiepen. De uiteindelijke erosiediepte wordt bepaald door het evenwicht tussen de stroming en de weerstand van de bodem. Hogere waterstanden en grotere stroomsnelheden zorgen daarbij voor een grotere mate van erosie (G.J.C.M. Hoffmans, 1997).

Wanneer erosie optreedt bij een landhoofd van de Nieuwklapbrug, neemt de ondersteuning van de aansluiting tussen de brug en de ondergrond af. Hierdoor kan de stabiliteit van het brugdeel bij het landhoofd verminderen. In de structurele analyse zijn de landhoofden aangenomen als stabiele opleggingen. Bij oevererosie verandert deze uitgangssituatie, waardoor de krachten

anders over het brugdek worden verdeeld. Dit kan lokaal leiden tot hogere belastingen nabij de uiteinden van de brug.

Om deze reden wordt erosie van oevers en landhoofden beschouwd als een relevant faalmechanisme voor de Nieuwklapbrug tijdens overstromingssituaties.

5.1.3 Verhoogde hydraulische belasting

Tijdens een overstroming stijgt het waterpeil in het Aduarderdiep. Hierdoor neemt de waterdruk op de brug toe naarmate het water dieper wordt. Tegelijkertijd kan de stroming onder de brug sterker worden. Dit zorgt voor extra krachten op de pijlers, de landhoofden en het brugdek (Kabir, 2022).

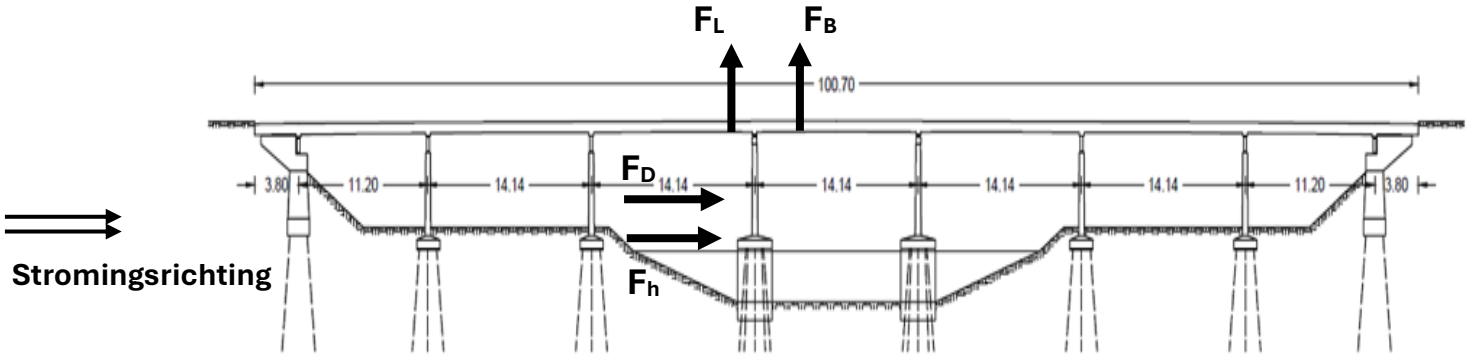
Wanneer het waterpeil begint te stijgen, komt eerst een groter deel van de pijlers in contact met stromend water. Op deze pijlers werkt dan een hydrodynamische weerstandskracht (F_D) in de richting van de waterstroming. Daarnaast neemt ook de hydrostatische waterdruk (F_h) op de zijkanten van de pijlers toe. Deze combinatie zorgt voor een extra belasting van de steunpunten (Kabir, 2022).

Als het water verder stijgt en het brugdek benadert, kan er water onder het dek doorstromen. Hierdoor ontstaan drukverschillen tussen de boven- en onderzijde van het brugdek. Dit leidt tot een opwaartse kracht (F_L) en een drijfkracht (F_B) op de constructie. Door deze krachten wordt het effectieve gewicht van het brugdek kleiner. Tegelijkertijd blijft de hydrodynamische stromingskracht (F_D) in horizontale richting op de brug werken (Kabir, 2022).

Voor de Nieuwklapbrug betekent dit dat vooral de middendelen van de overspanningen extra worden belast door buigkrachten. De zones bij de pijlers en de landhoofden krijgen juist te maken met hogere dwarskrachten. Deze plekken zijn in de structurele analyse aangewezen als kritische zones.

Een verhoogde hydraulische belasting leidt meestal niet direct tot falen van de brug, maar zorgt wel voor een grotere belasting van deze kritische onderdelen. Hierdoor kunnen bestaande zwakke plekken tijdens een overstroming sneller overbelast raken.

In figuur 21 is schematisch weergegeven welke hydraulische krachten tijdens hoogwater op de Nieuwklapbrug werken. Deze schets is bedoeld om inzicht te geven in de richting en werking van de verschillende krachten.



Figuur 21: Hydraulische krachten op de Nieuwklapbrug tijdens overstroming

De drie faalmechanismen zijn ter overzicht samengebracht in onderstaande tabel 6.

Faalmechanisme	Oorzaken	Effect op construction	Kritische zones
Funderingserosie (Scour)	Toename van stroming rond pijlers, neerwaartse stroming (downflow), vorming van horseshoe vortices en wake vortices	Vorming van erosiekuil rond pijlers, afname van effectieve funderingsdiepte, verlies van ondersteuning van pijlers	Zones rondom de middelste pijlers in contact met de kanaalbedding. Hogere krachten ontstaan in het brugdek ter hoogte van de pijlers.
Erosie van oevers en landhoofden	Versnelde stroming langs landhoofden, toename van schuifspanningen op bodem en oever, lokale wervelvorming bij overgang oeverconstructie	Wegspoelen van bodemmateriaal bij landhoofden, verzwakking van de aansluiting tussen brug en ondergrond, veranderde krachtsverdeling in het brugdek	Uiteinden van de brug ter hoogte van de landhoofden
Verhoogde hydraulische belasting	Stijgend waterpeil, toename van hydrostatische waterdruk (Fh), hydrodynamische stromingskracht (FD), opwaartse kracht (FL) en drijfkracht (FB)	Extra belasting op brugdek en steunpunten, verlaging van effectief gewicht van het brugdek, vergroting van belasting in reeds zwaar belaste zones	Middendelen van de overspanningen en zones nabij pijlers en landhoofden

Tabel 6: overzicht van faalmechanismen tijdens een overstroming op Nieuwklapbrug

5.2 Interactie tussen aardbevingen en overstromingen

Hoewel aardbevingen bij de Nieuwklapbrug op zichzelf niet leiden tot direct falen van de constructie, kunnen ze wel invloed hebben wanneer ze worden gecombineerd met overstromingen. Uit de seismische analyse blijkt dat aardbevingen horizontale verplaatsingen en vervormingen in het brugdek en de ondersteunende constructie veroorzaken. Deze vervormingen blijven beperkt en elastisch, maar zorgen wel voor extra interne krachten in de constructie.

Wanneer een overstroming optreedt terwijl de brug al wordt beïnvloed door aardbevingsbelasting, kunnen de effecten van beide belastingen elkaar versterken. Faalmechanismen die tijdens overstromingen optreden, zoals funderingserosie en verhoogde hydraulische belasting, zijn sterk afhankelijk van een goede ondersteuning van de brug. Kleine vervormingen als gevolg van aardbevingen kunnen ervoor zorgen dat deze ondersteuning lokaal minder effectief wordt.

In combinatie met hoge waterstanden kan dit ertoe leiden dat bepaalde delen van het brugdek zwaarder worden belast. Dit geldt vooral voor de overspanningen en de zones nabij de steunpunten. Aardbevingen worden in dit onderzoek daarom gezien als een externe belasting die de gevoeligheid van de brug voor faalmechanismen tijdens overstromingen vergroot, zonder zelf direct het falen van de brug te veroorzaken.

6. Analyse en evaluatie van risico

In dit onderzoek wordt een risicoanalyse uitgevoerd om te bepalen in hoeverre de Nieuwklapbrug risico loopt op structurele schade en mogelijk falen als gevolg van overstromingen en aardbevingen. Het risico wordt hierbij bepaald door de aangepaste bedreiging te combineren met de aangepaste kwetsbaarheid.

De risicobeoordeling is op een kwalitatieve manier uitgevoerd. Dit komt doordat de LIND-methodologie werkt met classificaties en relatieve schalen en niet met exacte faalkansen. Daarnaast zijn voor de Nieuwklapbrug niet alle lokale gegevens beschikbaar, bijvoorbeeld over hydraulische belastingen en faalparameters. Daarom is gekozen voor het werken met drie risicoklassen: laag, middel en hoog.

Om deze klassen met elkaar te kunnen combineren, zijn eenvoudige numerieke waarden toegekend. Hiervoor is een schaal gebruikt van 1/3 voor laag, 2/3 voor middel en 3/3 voor hoog. Met deze schaal kunnen de bedreiging en de kwetsbaarheid met elkaar worden vermenigvuldigd, waarna een relatieve risicoscore ontstaat.

6.1 Kwetsbaarheid - Evaluatie

6.1.1 Blootstelling

De blootstelling van de Nieuwklapbrug wordt bepaald op basis van de 95%-waarde van de maximale dagelijkse neerslag. Voor de huidige situatie is deze waarde berekend met behulp van historische neerslaggegevens van het KNMI-meetstation Eelde. Voor de toekomstige situatie is dezelfde methode toegepast op de neerslaggegevens uit de SSP-klimaatscenario's. Op deze manier is een consistente vergelijking mogelijk tussen de huidige en toekomstige blootstelling (zie tabel 7).

Uit de resultaten blijkt dat de extreme neerslagwaarden uit de SSP-scenario's lager zijn dan de gemeten waarden bij meetstation Eelde. Dit is opvallend, omdat toekomstige klimaatscenario's vaak juist hogere extremen laten zien. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat klimaatmodellen neerslag berekenen over grotere gebieden, terwijl meetstations neerslag registreren op één specifieke locatie. Hierdoor worden lokale piekbuien in modelgegevens minder extreem weergegeven. Daarom worden de resultaten van de blootstellingsanalyse vooral gebruikt om relatieve verschillen tussen scenario's te laten zien en niet als exacte neerslagwaarden.

Blootstelling	**Laag** **0,33**	**Middel** **0,67**	**Hoog** **1,00**
Maximale dagelijkse neerslag (mm/dag)	De blootstelling van de brug aan klimaatbedreigingen is laag < 40 mm/dag	De blootstelling van de brug aan klimaatbedreigingen is middel 40 - 70 mm/dag	De blootstelling van de brug aan klimaatbedreigingen is hoog > 70 mm/dag
Tegenwoordig			X
SSP1-2.6	X		
SSP2-4.5	X		
SSP5-8.5	X		

Tabel 7: Blootstellingsmatrix

6.1.2 Gevoeligheid en adaptieve capaciteit

De gevoeligheid en de adaptieve capaciteit van de Nieuwklapbrug zijn beoordeeld in relatie tot verschillende overstromingsscenario's. Hierbij is niet gekeken naar een toename van de verkeersbelasting, maar naar extra hydraulische belastingen. Het gaat daarbij om hogere waterstanden, sterkere stromingskrachten en mogelijke verzwakking van de fundering.

Uit de structurele analyse blijkt dat de brug onder normale ontwerpsituaties voldoende draagvermogen heeft. In deze stap is daarom onderzocht welke onderdelen van de brug gevoeliger worden wanneer de hydraulische omstandigheden veranderen tijdens een overstroming. De beoordeling richt zich op het type brug, het brugdek, de pijlers, de landhoofden, de kritische zones en de gebruikte materialen. Daarnaast is ook gekeken naar de rol van het gereguleerde boezemsysteem.

De resultaten van deze beoordeling zijn samengevat in tabel 8. Elk onderdeel is daarbij ingedeeld in de categorieën laag, middel of hoog.

Aspect	Analyse	Beoordeling
Brugtype	Betonnen plaatbrug met zeven overspanningen; statisch bepaald als doorlopende ligger • Doorlopend plaatgedrag verdeelt belastingen, maar is gevoelig voor veranderde oplegcondities. • Bij overstroming kunnen opleggingen verzwakken door erosie, waardoor de krachtsverdeling in het brugdek verandert.	Middel
Brugdek	Massief gewapend beton, duidelijke zones met hoge buigmomenten in de overspanningen • Bij verhoogde hydraulische belasting tijdens overstroming worden vooral de overspanningen extra belast.	Middel
Pijlers	Hoge dwarskrachten nabij pijlers • Gevoelig voor verhoogde stromingskrachten en waterdruk tijdens overstroming	Middel
Oevers & Landhoofden	Eindopleggingen, gevoelig voor erosie • Overstroming kan door oevererosie leiden tot een verstoring van de krachtsverdeling bij de eindopleggingen.	Middel
Kritieke zones in brugdek	Overspanningen (buiging) en nabij steunpunten (dwarskracht) • Deze zones zijn al maatgevend in de structurele analyse; extra hydraulische belasting tijdens overstroming vergroot hier het risico op overschrijding	Middel
Materiaaleigenschappen	Relatief hoge betonsterkte en wapening • Relatief hoge beton- en staalsterkte; geen aanwijzingen voor materiaaldegradatie	Laag
Interactie aardbevingen – overstromingen	Beperkte seismische vervormingen in combinatie met overstromingsbelasting • Omdat de geïnduceerde aardbevingen ver van de brug plaatsvinden, blijven de vervormingen klein en elastisch, waardoor de invloed op de brugconstructie niet merkbaar is.	Laag
Adaptieve capaciteit ontwerp	Gereguleerd boezemsysteem, robuust ontwerp • Waterstanden worden actief gereguleerd binnen het boezemsysteem, waardoor normale waterpeilschommelingen	Laag

	worden beperkt, maar bij dijkdoorbraak kunnen alsnog verhoogde waterstanden en stromingen optreden.	
Gevoeligheid & adaptieve capaciteit		**Middel 0,67**

Tabel 8: Gevoeligheid en adaptieve capaciteit matrix

6.1.3 Ernst van gevolgen

De ernst van de mogelijke gevolgen is op een simpele manier ingeschat en terug te zien in tabel 9. Deze inschatting is gemaakt op basis van de faalmechanismen die zijn beschreven in hoofdstuk 5.1 en ook met de uitkomsten van de structurele analyse. Hierbij is er vooral gekeken naar welke soort schade kan optreden en wat dit betekent voor het functioneren van de brug, vooral tijdens een overstroming.

Aspect	Analyse	Beoordeling
Funderingserosie (scour)	Verlies van ondersteuning van pijlers door erosie van de bodem • Verzwakt de fundering, waardoor de belasting minder goed naar de ondergrond wordt afgevoerd en het brugdek extra wordt belast.	Hoog
Erosie van oevers en landhoofden	Verzwakking van eindopleggingen en gewijzigde krachtsverdeling • Verzwakte aansluiting tussen landhoofd en ondergrond leidt tot extra vervormingen en hogere buigmomenten en dwarskrachten nabij de uiteinden	Middel
Verhoogde hydraulische belasting	Extra krachten op brugdek en steunpunten bij hoogwater • Waterdruk en stroming verhogen de belasting op zones waar al hoge buig- en dwarskrachten optreden	Middel
Constructieve gevolgen	Schade aan brugdek en steunpunten mogelijk, maar geen direct falen aangetoond • Structurele analyse toont dat kritieke zones sneller worden aangesproken, zonder dat direct instorten wordt verwacht	Middel
Functionele gevolgen	Beperkingen in gebruik van de brug mogelijk bij schade • Verhoogde belasting en vervormingen kunnen leiden tot tijdelijke verkeersbeperkingen of het uitvoeren van herstelmaatregelen aan het brugdek of de opleggingen.	Middel
Interactie aardbevingen – overstromingen	Aardbevingen verzwaren de effecten van overstromingsmechanismen • Beperkte seismische vervormingen kunnen de effectiviteit van steunpunten verminderen tijdens hoogwater	Middel
Ernst van gevolgen		**Middel 0,67**

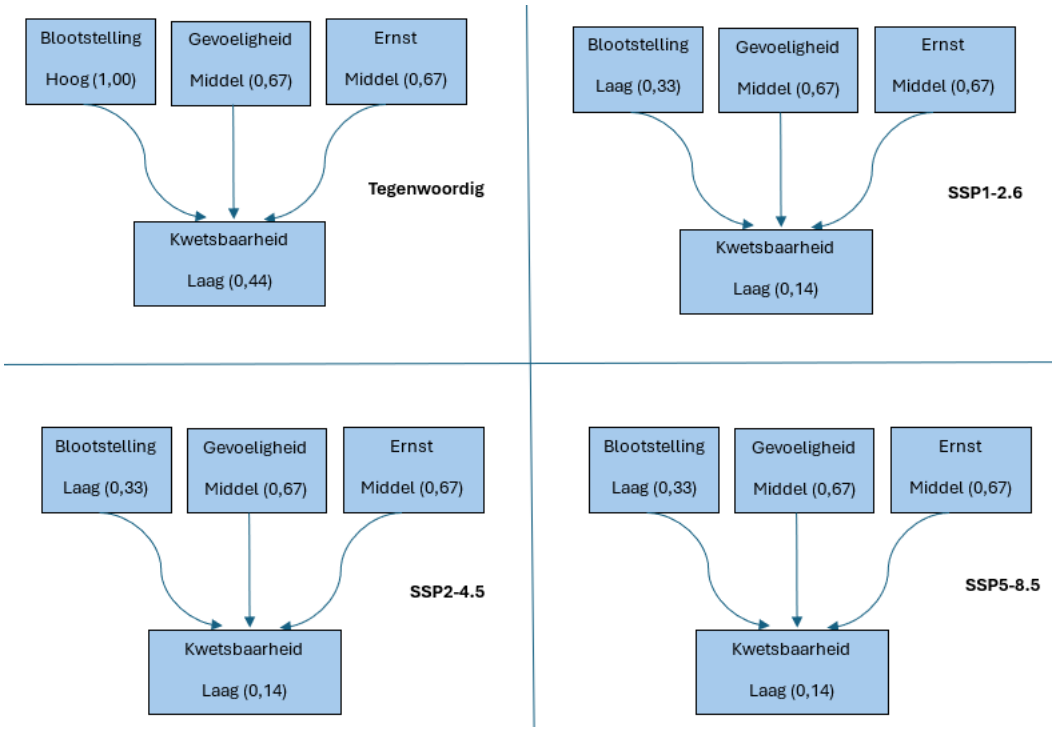
Tabel 9: Ernst van gevolgen matrix

6.1.4 kwetsbaarheid beoordelen

De kwetsbaarheid is bepaald door drie onderdelen met elkaar te combineren: blootstelling, gevoeligheid en ernst. Hiervoor is de volgende relatie gebruikt:

Kwetsbaarheid = Blootstelling × Gevoeligheid × Ernst

In de SSP-scenario's is de blootstelling lager vergeleken met de huidige situatie, wat al eerder is uitgelegd bij de blootstellingsanalyse. Daardoor wordt de kwetsbaarheid in deze situatie vooral bepaald door de gevoeligheid van de brug en ook de ernst van de schade die eventueel kan ontstaan (zie figuur 22).



Figuur 22: Kwetsbaarheid – Evaluatie

6.2 Aangepaste bedreiging – Evaluatie

6.2.1 Evaluatie van probabiliteit

De probabiliteit is bepaald door gebruik te maken van terugkeerperioden. Hiervoor is een Gumbel-verdeling toegepast op de jaarlijkse maximale dagneerslag van meetstation Eelde, zowel voor de huidige situatie (1979–2024) als voor de SSP-scenario's. Aan de hand van de berekende return levels zijn grenswaardes opgesteld voor de verschillende probabiliteitsklassen.

Daarna is per scenario de P99-waarde gebruikt om vast te stellen of de probabiliteit laag, middel of hoog is. Deze klassen zijn vervolgens omgerekend naar relatieve waardes (0,33; 0,67; 1,00), zodat ze gebruikt konden worden binnen de risicoanalyse. In tabel 10 is de probabiliteitsmatrix

weergegeven. De bijbehorende terugkeerperioden van het huidige scenario zijn opgenomen in bijlage 1 en alle toekomstige scenario's zijn terug te vinden in bijlage 3.

Probabiliteit	**Laag 0,33**	**Middel 0,67**	**Hoog 1,00**
Retourperiode	TR2-10 < 45 mm/dag	TR25-50 45 – 55 mm/dag	TR100 > 55 mm/dag
Tegenwoordig		X	
SSP1-2.6	X		
SSP2-4.5	X		
SSP5-8.5	X		

Tabel 10: probabiliteit matrix

6.2.2 Evaluatie van bedreiging

De bedreigingsmatrix in tabel 11 is opgesteld op basis van de analyse van de jaarlijkse maximale dagelijkse neerslag, zowel voor de huidige situatie als voor de verschillende SSP-scenario's. Voor beide situaties zijn de P95- en P99-waarden gebruikt om de intensiteit van extreme neerslag op een eenvoudige manier in te delen in laag, middel en hoog. Daarbij zijn steeds dezelfde grenswaarden gebruikt, zodat de scenario's goed met elkaar vergeleken kunnen worden.

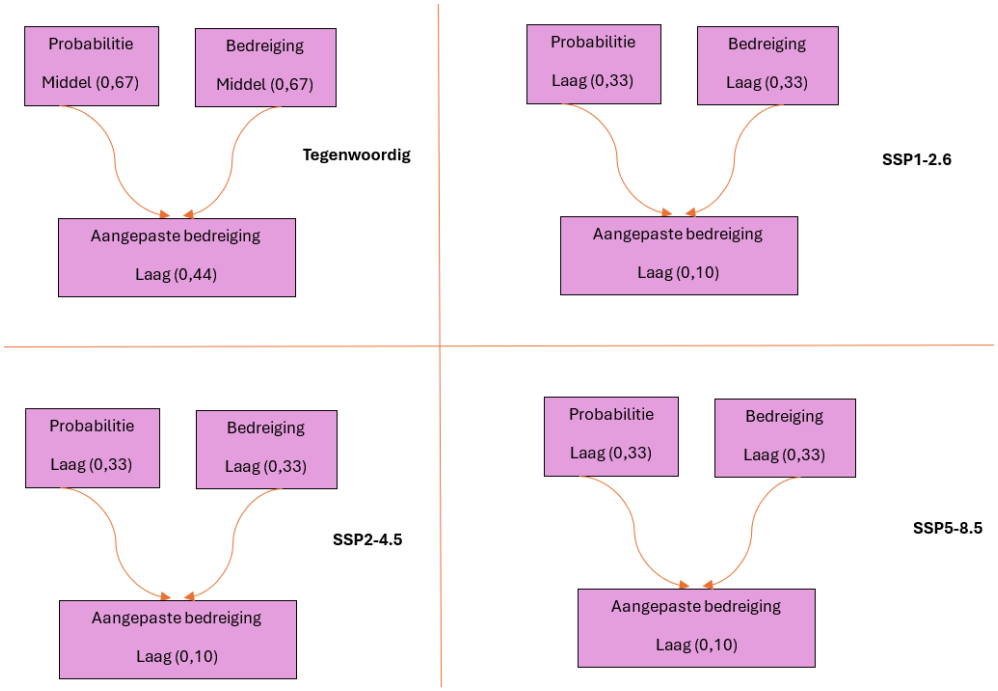
Bedreiging	**Laag 0,33**	**Middel 0,67**	**Hoog 1,00**
Maximale dagelijkse neerslag (mm/dag) P95, P99	< 45 mm/dag	45 - 55 mm/dag	> 55 mm/dag
Tegenwoordig		X	
SSP1-2.6	X		
SSP2-4.5	X		
SSP5-8.5	X		

Tabel 11: Bedreigingsmatrix & Bedreigingsbeoordeling

6.2.3 Aangepaste bedreiging beoordelen

De aangepaste bedreiging is bepaald door twee onderdelen met elkaar te combineren: de probabiliteit en de bedreiging. Hiervoor is de volgende relatie gebruikt:

Aangepaste bedreiging = probabiliteit x bedreiging. In Figuur 23 zijn de resultaten weergegeven.

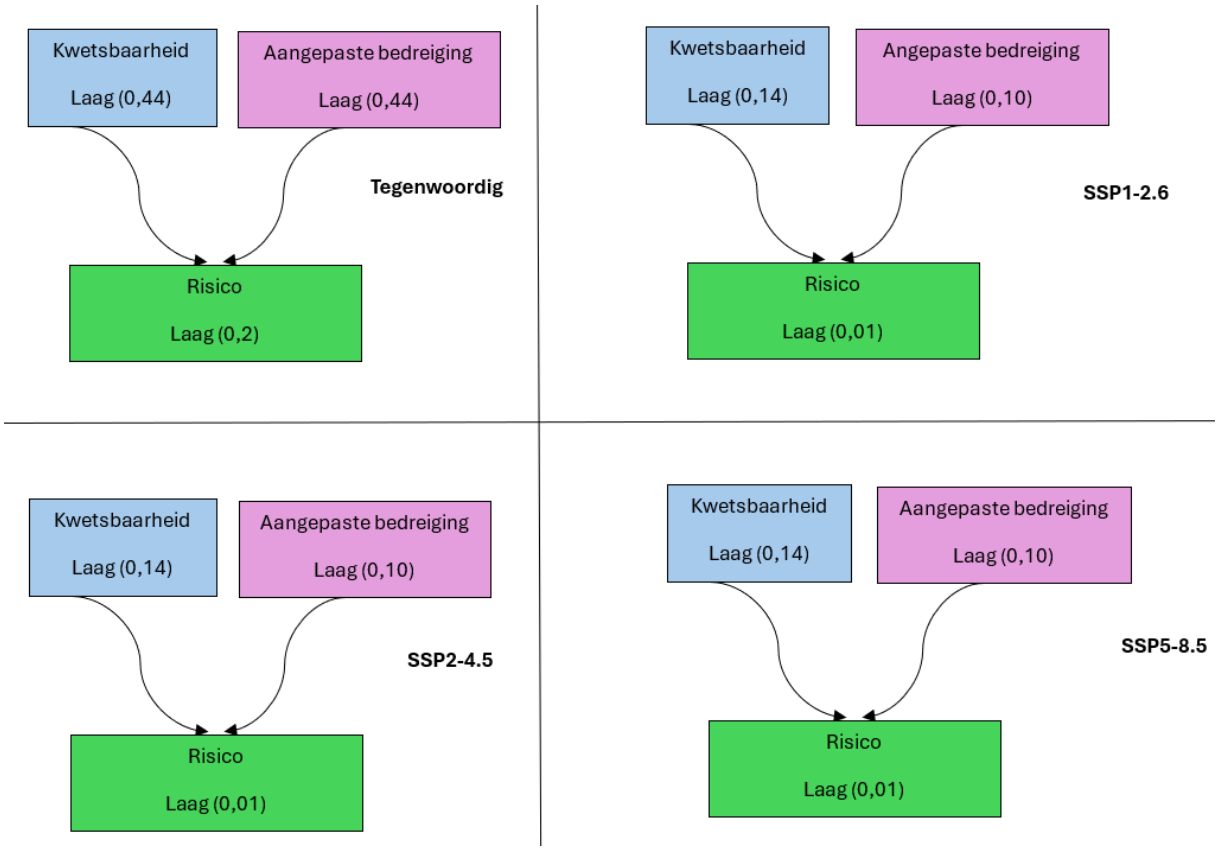


Figuur 23: Aangepaste bedreiging - Evaluatie

6.3 Risico - Evaluatie

De risicoklasse is op een kwalitatieve manier bepaald door de bedreiging en de kwetsbaarheid met elkaar te combineren volgens de relatie:
risico = bedreiging × kwetsbaarheid.

De resultaten in figuur 24 worden vergeleken met de resultaten van Ecuador, waarvoor alle risicogegevens zijn opgenomen in bijlage 8.



Figuur 24: Risico – Evaluatie

7. Vergelijking: Nederland – Ecuador

De risicobeoordeling van de Nieuwklapbrug in Nederland en de brug over de Río Blanco in Ecuador is uitgevoerd om te kunnen vaststellen in hoeverre beide bruggen risico lopen op structurele schade en eventueel falen door overstromingen en aardbevingen. Uit de resultaten komen duidelijke verschillen naar voren. Deze verschillen hangen vooral samen met de ligging van de bruggen en de typen gevaren die daar het meest voorkomen.

De Nieuwklapbrug is gelegen in het Aduarderdiep, wat deel uitmaakt van een gereguleerd boezemsysteem waarin waterstanden en afvoeren actief worden gestuurd door middel van gemalen. Uit de risicoanalyse volgt dat zowel de aangepaste bedreiging als de kwetsbaarheid in alle beschouwde scenario's als laag zijn ingeschat. Daardoor blijft het uiteindelijke risiconiveau voor overstromingen laag, zowel voor de huidige situatie als voor de SSP-klimaatscenario's. Mogelijke faalmechanismen doen zich voornamelijk lokaal voor, zoals funderingserosie en een hogere belasting in kritische zones van het brugdek en rond de pijlers, maar deze effecten blijven beperkt en leiden niet tot systeemfalen van de brug.

In het noorden van Nederland komen aardbevingen voor als gevolg van gaswinning, echter vinden deze plaats op een relatief grote afstand van de Nieuwklapbrug. Hierdoor blijven de seismische vervormingen beperkt en vooral elastisch van aard. Uit de analyse blijkt dan ook dat aardbevingen geen bepalende bijdrage leveren aan de kwetsbaarheid van de brug en blijft de invloed op het totale risico dus laag.

De brug in Ecuador bevindt zich in een totaal andere situatie dan de Nieuwklapbrug in Nederland. Deze brug overspant de Río Blanco, een natuurlijke rivier waar geen sprake is van actief waterbeheer. Tijdens perioden met hoogwater zijn hier meerdere problemen geconstateerd, zoals erosie van de fundering bij de pijlers en landhoofden, sedimentophoping en ook een toename van de hydrodynamische belasting op de constructie.

Uit de bedreigingsanalyse volgt dat de aangepaste bedreiging in de huidige situatie als hoog wordt beoordeeld, met een waarde van 0,8. Het bijhorende risico bedraagt 0,22 en valt binnen de klasse laag. Dit kan in eerste instantie wat tegenstrijdig overkomen, maar het lage risiconiveau is te verklaren door de relatief lage kwetsbaarheid van de brug. Het risico wordt namelijk bepaald als het product van de bedreiging en de kwetsbaarheid, en deze kwetsbaarheid is op dit moment nog beperkt.

Wanneer naar de toekomstige situatie wordt gekeken, laten de verschillende SSP-scenario's een verdere toename van de bedreiging zien. De aangepaste bedreigingswaarden nemen toe van 0,72 bij SSP1-2.6 tot 0,81 bij SSP2-4.5 en lopen zelfs op tot 1,00 bij SSP5-8.5. Tegelijkertijd neemt ook de kwetsbaarheid toe, van 0,28 in de huidige situatie naar 0,35 in het meest extreme scenario. Hierdoor verschuift de risicoklasse van laag, in de huidige situatie en bij SSP1-2.6, naar middel onder SSP2-4.5 en SSP5-8.5.

Daarnaast is Ecuador gelegen in een seismisch zeer actief gebied, namelijk langs de Pacifische Ring van Vuur. Het land bevindt zich op de plaatgrens tussen de Nazca-plaat en de Zuid-Amerikaanse plaat (Reid, 2024). Hierdoor vormt seismische belasting een belangrijke en mogelijk maatgevende factor voor bruggen in deze regio, vooral voor het ontwerp en ook het beheer ervan.

De vergelijking tussen beide bruggen laat zien dat dezelfde risicomethodiek tot verschillende resultaten kan leiden, afhankelijk van de lokale omstandigheden. In Nederland wordt de risicobeoordeling voornamelijk gebruikt om kwetsbaarheden binnen een gecontroleerd watersysteem inzichtelijk te maken en om te bepalen waar extra monitoring en onderhoud nodig is. In Ecuador speelt juist de combinatie van een natuurlijke rivieromgeving en een hoge seismische activiteit een grotere rol, wat vraagt om ontwerp- en beheermaatregelen die meer gericht zijn op robuustheid en het beperken van schade bij extreme gebeurtenissen.

De vergelijking tussen Nederland en Ecuador wordt weergegeven in tabel 12.

Aspect	Nederland – Nieuwklapbrug	Ecuador – Río Blanco-brug
Type riviersysteem	Gereguleerd boezemsysteem	Natuurlijk riviersysteem
Waterbeheer	Actief peilbeheer met gemalen	Geen actief waterbeheer
Rol overstromingen	Niet maatgevend door gereguleerd watersysteem	Maatgevend door extreem neerslag
Rol aardbevingen	Niet maatgevend	Maatgevend
Relevante faalmechanismen	Lokale erosie, verhoogde belasting bij pijlers en brugdek	Funderingserosie, sedimentophoping, verhoogde belasting
Seismische activiteit	Lage magnitude bevingen door gaswinning	Frequente aardbevingen (Pacifische Ring van Vuur)
Kwetsbaarheid	Laag in alle scenario's	Middel in alle scenario's
Aangepaste bedreiging	Laag in alle scenario's	Zeer hoog
Risiconiveau	Laag	Varieert van laag tot middel
Focus van risicobeheer	Monitoring en onderhoud binnen gecontroleerd systeem	Robuust ontwerp en schadebeperking bij extreme gebeurtenissen

Tabel 12: Overzicht van de vergelijking tussen Nederland en Ecuador

8. Discussie

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat het risico op brugfalen niet alleen wordt bepaald door de sterkte van een brug maar ook door de omgeving waarin deze ligt en de manier waarop water en andere natuurlijke gevaren worden beheerd. Bij de Nieuwklapbrug blijkt dat het gereguleerde watersysteem samen met een constructie met voldoende draagvermogen ervoor zorgt dat het totale risico laag blijft. Dit geldt ook wanneer rekening wordt gehouden met toekomstige klimaatscenario's.

Uit de structurele analyse blijkt dat bepaalde delen van de brug gevoeliger zijn voor extra belasting. Dit geldt met name voor de overspanningen waar hoge buigkrachten optreden en voor de zones bij de pijlers en landhoofden waar vooral hoge dwarskrachten voorkomen. Deze uitkomsten zijn belangrijk omdat ze aangeven waar schade waarschijnlijk als eerste kan ontstaan bij extreme omstandigheden. Dit betekent dat juist deze kwetsbare locaties extra aandacht vragen bij inspectie en onderhoud zodat schade eerder wordt opgemerkt en grotere problemen kunnen worden voorkomen.

De analyse laat verder zien dat funderingserosie oevererosie en een verhoogde hydraulische belasting de belangrijkste effecten zijn tijdens overstromingen. Deze processen leiden meestal niet direct tot instorting maar zorgen wel voor een toename van de belasting op kwetsbare onderdelen van de brug. Hierdoor hebben overstromingen vooral een indirect effect op de veiligheid van de brug. Dit laat zien dat niet alleen het brugdek van belang is maar ook de ondergrond en de aansluiting op het watersysteem.

De invloed van aardbevingen is in dit onderzoek beperkt maar wel van belang. Aardbevingen veroorzaken kleine vervormingen in de brug die op zichzelf meestal geen schade geven. Wanneer deze vervormingen echter samengaan met hoge waterstanden kan de brug gevoeliger worden voor schade. Dit laat zien dat het combineren van meerdere gevaren leidt tot een realistischer beeld van het risico op brugfalen tijdens extreme situaties.

Uit de risicobeoordeling blijkt dat zowel de bedreiging als de kwetsbaarheid van de Nieuwklapbrug in alle onderzochte scenario's laag blijven wat resulteert in zeer lage risicoscores. Dit geeft aan dat het huidige ontwerp en het toegepaste waterbeheer goed functioneren en voldoende bescherming bieden tegen extreme omstandigheden. Zonder actief waterbeheer zouden vergelijkbare neerslaggebeurtenissen waarschijnlijk leiden tot hogere belastingen en meer schade.

Daarnaast kent dit onderzoek ook enkele beperkingen. De analyse voor Nederland is grotendeels gebaseerd op bestaande gegevens en op kwalitatieve inschattingen. Er zijn geen experimentele testen uitgevoerd en ook geen uitgebreide numerieke simulaties toegepast. Daarnaast is gekozen voor een gebied met geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning en niet voor een regio met natuurlijke aardbevingen. Hierdoor zijn de resultaten niet één op één te vergelijken met gebieden waar de seismische belasting anders is.

Voor toekomstig onderzoek zijn er verschillende mogelijkheden om de analyse verder uit te breiden. Zo kan worden gekeken naar extreme afvoersituaties bij zware neerslag waarbij de reactie van de brug gedetailleerder kan worden doorgerekend. Hierbij kan worden gedacht aan

vervormingen en krachtsverdelingen in het brugdek en de pijlers. Ook kan de methode worden toegepast op meerdere Nederlandse bruggen bijvoorbeeld in gebieden met natuurlijke seismische activiteit. Op deze manier kan de robuustheid van de methode worden vergroot en kunnen de resultaten beter met elkaar worden vergeleken.

9. Conclusie

In dit onderzoek is gekeken naar de hoofdvraag:
Hoe beïnvloeden overstromingen en aardbevingen het risico op het falen van bruggen in Nederland en Ecuador?

Op basis van de uitgevoerde analyses kan worden geconcludeerd dat overstromingen en aardbevingen het risico op brugfalen op verschillende manieren beïnvloeden. Overstromingen zorgen voornamelijk voor een toename van de hydraulische belasting en kunnen leiden tot processen zoals funderingserosie en het verzwakken van de ondersteuning van bruggen. Hierdoor neemt de belasting op kwetsbare delen van de constructie toe en wordt de kans op structurele schade groter.

Aardbevingen hebben invloed op bruggen door trillingen die vervormingen en extra krachten in de constructie veroorzaken. Deze seismische belasting blijft vaak beperkt, maar kan in combinatie met overstromingen toch een maatgevende rol spelen. Vooral doordat de effecten van hydraulische belasting en funderingsverzwakking elkaar kunnen versterken.

Voor de Nieuwklapbrug in Nederland laten de resultaten zien dat het risico op brugfalen zeer laag blijft. Dit is niet alleen het gevolg van het actieve waterbeheer in het gebied met behulp van gemalen, maar ook doordat de gemeten en verwachte neerslaghoeveelheden relatief laag zijn. Hierdoor is de kans op overstromingen door extreme neerslag beperkt. Overstromingen in dit gebied treden vooral op bij een dijkdoorbraak en niet direct als gevolg van hevige buien.

Daarnaast laten de klimaatmodellen zien dat de toekomstige extreme neerslagwaarden lager zijn dan de waarden die in het verleden zijn gemeten. Dit betekent dat klimaatverandering in dit gebied naar verwachting niet zal leiden tot een hogere neerslagbelasting op de brug. Ook aardbevingen in de omgeving van de Nieuwklapbrug hebben een lage magnitude en vinden plaats op relatief grote afstand van de brug. Hierdoor hebben zij geen merkbare invloed op de kans op falen van de brug.

Voor de brug over de Río Blanco in Ecuador speelt overstroming een veel grotere rol in het risico op brugfalen. In dit gebied komen hoge neerslaghoeveelheden voor wat de kans op overstromingen vergroot. Daarnaast zorgen het hoogteverschil in het stroomgebied en de helling van de rivier ervoor dat tijdens hoogwater hoge stroomsnelheden optreden. Dit leidt tot een hogere belasting op de brug en vergroot de kans op structurele schade.

Ecuador ligt bovendien in een seismisch actief gebied waardoor aardbevingsbelasting een belangrijke factor is binnen het risicoprofiel van de brug. In combinatie met overstromingen kan deze seismische belasting de gevoeligheid van de brug verder vergroten. De risicoberekeningen

laten zien dat het risico in de huidige situatie als laag wordt geclassificeerd, maar in toekomstige klimaatscenario's toeneemt naar een middel risico.

Op basis van dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat de toegepaste risicobenadering op een flexibele manier inzetbaar is in verschillende geografische situaties, mits rekening wordt gehouden met lokale omstandigheden. De resultaten laten zien dat dezelfde methode zowel in een sterk gereguleerd systeem zoals in Nederland als in een natuurlijke en seismisch actieve omgeving zoals in Ecuador bruikbare en onderling vergelijkbare inzichten oplevert. Daarmee vormt de methode een waardevol hulpmiddel voor het ondersteunen van beslissingen rondom beheer en veiligheid van bruggen, vooral in relatie tot natuurlijke gevaren en klimaatverandering.

Bibliografie

Copernicus Climate Change Service. (2024). *Copernicus Interactive Climate Atlas*. Retrieved from Copernicus Climate Change Service: https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas

Detlef P. van Vuuren, K. R. (2017, Januari). The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change. *Global Environmental Change*, pp. 148-152.

Eva Lantsoght, M. M. (2024). Post-earthquake observations of bridge damage. *IABSE CONGRESS SAN JOSE 2024 REPORT* (pp. 1110-1118). IABSE.

Florentia Kavoura, P. d. (2022). *Beton- en Staalconstructies.* Delft: Tu Delft. Retrieved from Brightspace .

G.J.C.M. Hoffmans, H. V. (1997). *Scour Manual.* Nederland : A.A. Balkema.

Google Maps. (2025). *Nieuwklap, 9746 TL Den Horn*. Retrieved from Google Maps: https://www.google.com/maps/place/Nieuwklap,+9746+TL+Den+Horn/@53.2450449,6.4782873,1138m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x47c9cc9b1e1cbf5d:0xd7bff6acde581810!8m2!3d53.2454397!4d6.4805469!16s%2Fg%2F121r6xdb?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MTIwOS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Google Maps. (2025). *Routebeschrijving*. Retrieved from Google Maps: https://www.google.com/maps/dir/Nieuwklap,+9746+TL+Den+Horn/Meppelerdiep/@52.9562195,5.8366476,10z/data=!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x47c9cc9b1e1cbf5d:0xd7bff6acde581810!2m2!1d6.4805469!2d53.2454397!1m5!1m1!1s0x47c873cd825ad24b:0xff7bf086d9c18eb6!2m2!1d6.1267753

Google Maps. (2026). *KNMI Weerstation Eelde*. Retrieved from Google Maps: https://www.google.com/maps/place/KNMI+Weerstation+Eelde/@53.1850441,6.4271972,12z/data=!4m22!1m15!4m14!1m6!1m2!1s0x47c9cc9b1e1cbf5d:0xd7bff6acde581810!2sNieuwklap,+9746+TL+Den+Horn!2m2!1d6.4805469!2d53.2454397!1m6!1m2!1s0x47c82d9db3e5d6ad:0x4d351482616cf

IPCC. (2023). *CLIMATE CHANGE 2023.* Zwitserland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Kabir, S. M. (2022). *HYDRODYNAMIC FORCES ON STREAM-CROSSING BRIDGES – CONSIDERATION OF FLOW PARAMETERS, BRIDGE GEOMETRY, AND DEBRIS*. Retrieved from MavMatrix: https://mavmatrix.uta.edu/civilengineering_dissertations/441/?utm_source=chatgpt.com

KNMI. (2024). *Aardbevingen door gaswinning*. Retrieved from Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut: https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/aardbevingen-door-gaswinning

KNMI. (2025). *Bruggen*. Retrieved from Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut : https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/bruggen

KNMI. (2025, November 20). *Dagwaarden neerslagstations*. Retrieved from Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut: https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen

Ministerio de Transporte . (2017). *Estudio hidrológico hidráulico del puente actual sobre el río Blanco.* Ecuador: SUBSECRETARIA REGIONAL 2, DIRECCIÓN PROVINCIAL DE PICHINCHA.

Reid, K. (2024, augustus 16). *Ecuador earthquake: Facts, FAQs, and how to help*. Retrieved from World Vision USA: https://www.worldvision.org/disaster-relief-news-stories/2016-ecuador-earthquake-facts#common

RWS. (2025). *Meppelerdiep*. Retrieved from Rijkswaterstaat: https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/meppelerdiep

RWS. (2025). *Waterbeheer – Waterinfo Rijkswaterstaat*. Retrieved from Waterinfo Rijkswaterstaat: https://waterinfo.rws.nl/thema/Waterbeheer

Tzortzinakis, M. (2018). *Nieuwklap Bridge Prediction of the Failure Mode under collapse testing.* Delft: Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft.

Valeria González Z, F. S. (2025). *Metodología para evaluación de impacto del cambio climático en infraestructura civil.* Chili: LIND Engineering.

Waterschap Noorderzijlvest . (2025, Juni 19). *Aduarderdiep OAF004311*. Retrieved from GeoWeb: https://geo.noorderzijlvest.nl/Geoweb/index.html?viewer=Waterschapskaart.Waterschapskaart

Waterschap Noorderzijlvest. (2021, Juni 17). *TOELICHTING PEILBESLUIT 1E SCHIL ELECTRABOEZEM*. Retrieved from Officiële Bekendmakingen: https://repository.officiele-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2021-67516/1/bijlage/exb-2021-67516.pdf

Yamile Almeida, F. S. (2025). *Effect of Climate Change on Risk Assessment of Bridges in Flood-Prone Zones: A Comparison of Case Studies from Ecuador and Chile* .

Zahra Ahmadi, M. G.-G. (2024, September). Integrating flood and earthquake resilience: a framework for assessing urban community resilience against multiple hazards. *Journal of Safety Science and Resilience*, pp. 330-343.

Bijlage 1: Dagelijks neerslag (R-codes)

```r
# Meetstation Eelde 161
bestand <- "C:/Users/ghofran/Documents/Hydrologie-Nederland/Bestanden van Nederland/neerslaggeg_EELDE_161.txt"

# gewenste periode
start_datum <- as.Date("1979-01-01")
eind_datum  <- as.Date("2024-12-31")

## Data inlezen

# Eerst alle regels inlezen om te weten vanaf waar de data beginnen
regels <- readLines(bestand)

# Zoek de regel waar de kolomnamen staan (STN,YYYYMMDD,RD,SX)
header_regel <- grep("^STN,YYYYMMDD", regels)[1]

# TOEVOEGEN (nodig voor read.table)
skip_n <- header_regel - 1


# De tabel zelf inlezen
knmi <- read.table(bestand,
                   sep = ",",
                   header = TRUE,
                   skip = skip_n,
                   na.strings = c("", "     "),
                   strip.white = TRUE)

# Datum kolom maken
knmi$Datum <- as.Date(as.character(knmi$YYYYMMDD), format = "%Y%m%d")


# (soms wordt -1 gebruikt voor 'onmeetbaar weinig'; die zetten we op NA)
knmi$RD[knmi$RD < 0] <- NA

# RD is in tiende millimeters -> omrekenen naar mm
knmi$Neerslag_mm <- knmi$RD / 10

## Periode selecteren

sel <- knmi$Datum >= start_datum & knmi$Datum <= eind_datum
data_periode <- knmi[sel, ]

#van dagelijkse data -> maximale dagneerslag per jaar

data_periode$Jaar <- as.integer(format(data_periode$Datum, "%Y"))

# per jaar: hoogste dagneerslag (NA's negeren)
jaarmax <- aggregate(Neerslag_mm ~ Jaar, data = data_periode, FUN = max, na.rm = TRUE)

# datum kolom maken (1 januari van elk jaar) zodat plot-structuur gelijk blijft
jaarmax$Datum <- as.Date(paste0(jaarmax$Jaar, "-01-01"))

# Maximum in de geselecteerde periode

max_val  <- max(jaarmax$Neerslag_mm, na.rm = TRUE)
max_idx  <- which.max(jaarmax$Neerslag_mm)
max_date <- jaarmax$Datum[max_idx]

```

Figuur 25: Neerslagdata van meetstation Eelde inlezen

```r
# Grafiek maken

ylim_max <- ceiling(max_val / 10) * 10

par(mar = c(5, 5, 4, 2) + 0.1, las = 1)

plot(jaarmax$Datum,
     jaarmax$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm]",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# TITEL LINKS
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale dagneerslag meetstation Eelde (%s-%s)",
              format(start_datum, "%Y"),
              format(eind_datum, "%Y")),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# # MAXIMUM LINKS
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, format(max_date, "%Y")),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)
```

Figuur 26: Grafiek tekenen van Jaarlijkse maximale dagneerslag meetstation Eelde

```r
#-----------------------------------------------------------------------
# # Extreme neerslag identificeren (percentielen)
#
P_p95 <- quantile(jaarmax$Neerslag_mm, 0.95, na.rm = TRUE)
P_p99 <- quantile(jaarmax$Neerslag_mm, 0.99, na.rm = TRUE)

P_p95
P_p99


# Drempels tekenen op de grafiek
abline(h = P_p95, col = "orange",  lty = 2, lwd = 1.5)
abline(h = P_p99, col = "darkred", lty = 2, lwd = 1.5)

text(x = max(jaarmax$Datum), y = P_p95,
     labels = paste0("P95 = ", round(P_p95, 1), " mm"),
     pos = 3, col = "orange", cex = 0.8)

text(x = max(jaarmax$Datum), y = P_p99,
     labels = paste0("P99 = ", round(P_p99, 1), " mm"),
     pos = 3, col = "darkred", cex = 0.8)
```

Figuur 27: Percentielen berekenen van meetstation Eelde

```r
# Ontwerpslevensduur (100 jaar) + 95% (Gumbel)

x <- jaarmax$Neerslag_mm
x <- x[is.finite(x)]

# Gumbel fit (MLE)
nll_gumbel <- function(par, x){
  mu   <- par[1]
  beta <- par[2]
  if (beta <= 0) return(Inf)
  z <- (x - mu) / beta
  length(x) * log(beta) + sum(z) + sum(exp(-z))
}

beta0 <- sd(x) * sqrt(6) / pi
mu0   <- mean(x) - 0.5772156649 * beta0

fit <- optim(c(mu0, beta0), nll_gumbel, x = x, method = "Nelder-Mead")
mu_hat   <- fit$par[1]
beta_hat <- fit$par[2]

# Gumbel quantiel functie
qgumbel <- function(p, mu, beta){
  mu - beta * log(-log(p))
}

# 100-jaars ontwerpwaarde (return level, annual exceedance 1/100)
T <- 100
neerslag100 <- qgumbel(1 - 1/T, mu_hat, beta_hat)

# 95% van het maximum over 100 jaar (ontwerpslevensduur)
nlev <- 100
p95 <- qgumbel(0.95^(1/nlev), mu_hat, beta_hat)
```

Figuur 28: 100-jaars return level en de karakteristieke 95%-ontwerpwaarde berekenen van meetstation Eelde (Gumbel fit)

```r
# lijnen tekenen

offset <- 0.8

abline(h = neerslag100,           col = "purple",      lwd = 2, lty = 1)
abline(h = p95 - 2*offset,        col = "red", lwd = 2, lty = 2)


legend("topright",
       legend = c(paste0("100-jaars return level = ", round(neerslag100, 1), " mm"),
                  paste0("Karakteristiek 95% (100 jaar) = ", round(p95, 1), " mm")),

       col = c("purple","red"),
       lty = c(1, 2),
       lwd = c(2, 2),
       y.intersp = 0.8,
       cex = 0.6,
       bty = "n")
```

Figuur 29: 100-jaars return level en de karakteristieke 95%-ontwerpwaarde tekenen.

```r

# Return levels TR2-TR100 (jaarlijkse maxima, Gumbel)
TR <- c(2, 5, 10, 25, 50, 100)

# cumulatieve kans F = 1 - 1/TR
F_TR <- 1 - 1/TR

# return level x_TR
x_TR <- qgumbel(F_TR, mu_hat, beta_hat)

rl <- data.frame(
  TR = TR,
  p_annual_exceed = 1/TR,
  F = F_TR,
  return_level_mm = x_TR
)

# Klassen
# laag: TR2-TR10, Middel: TR25-TR50, hoog: TR100
rl$klasse <- ifelse(rl$TR <= 10, "Laag",
                    ifelse(rl$TR <= 50, "Middel", "Hoog"))

# Matrixwaarden
rl$prob_matrix <- ifelse(rl$klasse == "Hoog", 1.00,
                         ifelse(rl$klasse == "Middel", 0.67, 0.33))

# Rapportklare tabel
rl_rapport <- rl
rl_rapport$return_level_mm <- round(rl_rapport$return_level_mm, 1)
rl_rapport$p_annual_exceed <- round(rl_rapport$p_annual_exceed, 2)
rl_rapport$F <- round(rl_rapport$F, 2)

rl_rapport <- rl_rapport[, c("TR","return_level_mm","p_annual_exceed","F","klasse","prob_matrix")]

rl_rapport
```

Figuur 30: Terugkeerperioden (TR2 – TR100) van meetstation Eelde (Gumbel fit)

Terugkeerperiode	Waarde [mm]
TR2	30,6
TR5	38,2
TR10	43,3
TR25	49,7
TR50	54,4
TR100	59,1

Tabel 13: Waarden van terugkeerperioden voor meetstation Eelde.

Bijlage 2: afvoer (R-codes)

```r
#Packages laden
install.packages("tidyverse")
install.packages("lubridate")
library(tidyverse)
library(lubridate)

# CSV-bestand inlezen
df <- read.csv(
  "C:/Users/ghofran/Documents/Hydrologie-Nederland/Bestanden van Nederland/20251210_059.csv",
  sep = ";",
  dec = ","
)

# Datum + tijd samenvoegen
df$datetime <- paste(df$WAARNEMINGDATUM, df$WAARNEMINGTIJD..MET.CET.)
df$datetime <- dmy_hms(df$datetime)

#Debiet naar numeriek
df$Q <- as.numeric(df$NUMERIEKEWAARDE)


#Foute extreme waarden verwijderen
# (first removal: remove 9.99e+37)
df <- df %>% filter(Q < 1e20)

#Opschonen: verwijder Onrealistische waarden
df_clean <- df

# 1: Verwijder waardes boven 200 m³/s (foutmetingen)
df_clean <- df_clean %>% filter(Q < 200)

# 2: Verwijder negatieve debieten
df_clean <- df_clean %>% filter(Q >= 0)
```

```r
#Jaar toevoegen
df_clean$year <- year(df_clean$datetime)

#Jaarstatistieken (correct en opgeschoond)
annual_stats_clean <- df_clean %>%
  group_by(year) %>%
  summarise(
    Q_mean = mean(Q, na.rm = TRUE),
    Q_max  = max(Q, na.rm = TRUE),
    Q_min  = min(Q, na.rm = TRUE)
  )

annual_stats_clean

#Jaarlijkse max/min grafiek
ggplot(annual_stats_clean, aes(x = year)) +
  geom_line(aes(y = Q_max, color = "Maximale debiet"), linewidth = 1) +
  geom_line(aes(y = Q_min, color = "Minimale debiet"), linewidth = 1) +
  labs(title = "Jaarlijkse maximale en minimale debieten (Meppelerdiep, opgeschoonde data)",
       x = "Jaar",
       y = "Debiet (m³/s)",
       color = "Legenda") +
  theme_minimal()

# Bereken totale statistieken voor de hele periode
Q_max  <- max(df_clean$Q, na.rm = TRUE)
Q_min  <- min(df_clean$Q, na.rm = TRUE)
Q_mean <- mean(df_clean$Q, na.rm = TRUE)

Q_max; Q_min; Q_mean

Q_min_pos <- min(df_clean$Q[df_clean$Q > 0], na.rm = TRUE)
```

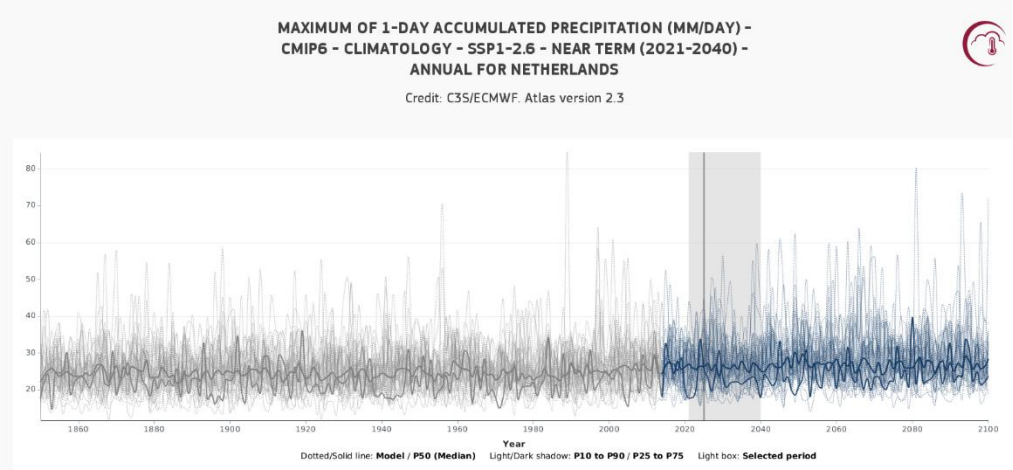
Figuur 31: Afvoerdata inlezen, (maximale, gemiddelde en minimale afvoer berekenen) voor meetstation Mepperldiep

```r
Q_min_pos

# Basis tijdreeksplot
plot(df_clean$datetime, df_clean$Q,
     type = "l",
     col = "red",
     lwd = 0.7,
     xlab = "Datum",
     ylab = "Afvoer [m³/s]",
     main = "Dagelijkse afvoer (Meppelerdiep MEPPLDP2.5)\nPeriode: 2001-2024")

#-------------------------------------------------------------------------------
# EXTREME GEBEURTENISSEN IDENTIFICEREN - AFVOER (MEPPELDERDIEP)

# Percentielen berekenen (extreme drempels)

Q_p95 <- quantile(df_clean$Q, 0.95, na.rm = TRUE)
Q_p99 <- quantile(df_clean$Q, 0.99, na.rm = TRUE)

Q_p95
Q_p99

# Extreme afvoergebeurtenissen selecteren----------------

# Afvoeren boven P95
extreme_Q95 <- df_clean %>%
  filter(Q >= Q_p95) %>%
  arrange(desc(Q))

# Afvoeren boven P99
extreme_Q99 <- df_clean %>%
  filter(Q >= Q_p99) %>%
  arrange(desc(Q))
```

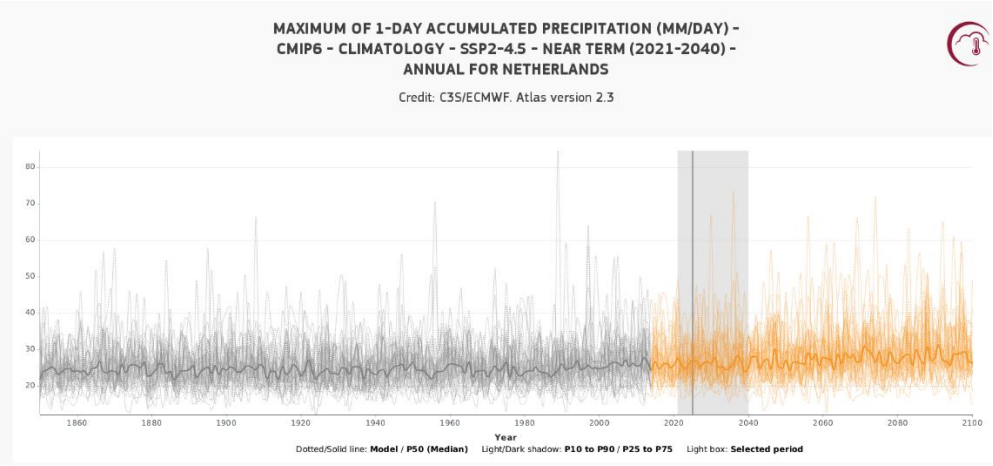
```r
# Extreme drempels toevoegen aan bestaande tijdreeksplot

abline(h = Q_p95, col = "blue", lty = 2, lwd = 1.8)   # P95
abline(h = Q_p99, col = "black", lty = 2, lwd = 1.8) # P99

legend("topright",
       legend = c(
         paste("P95 =", round(Q_p95, 1), "m³/s"),
         paste("P99 =", round(Q_p99, 1), "m³/s")
       ),
       col = c("blue", "black"),
       lty = 2,
       lwd = 1.5,
       cex = 0.5,
       bty = "n")   #  geen rand
```

Figuur 32: Percentielen (p99 en p95) berekenen voor meetstation Meppelerdiep

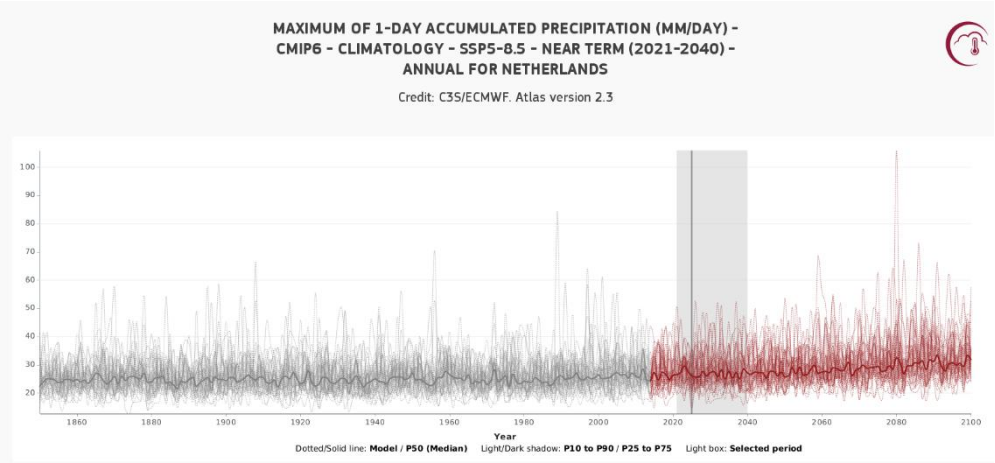
Bijlage 3: SSP-scenario's en R-codes



Figuur 33: SSP1-2.6



Figuur 34: SSP2-4.5



Figuur 35: SSP5-8.5

R-codes: SSP1-2.6

```r
# Bestand
bestand <- "C:/Users/ghofran/Documents/Hydrologie-Nederland/Bestanden van Nederland/rx1day-CMIP6_timeseries. SSP1-2.6.csv"

# Gewenste periode
start_jaar <- 2021
eind_jaar  <- 2100

# Data inlezen
regels <- readLines(bestand)
header_regel <- grep("^Year,", regels)[1]
skip_n <- header_regel - 1

ssp <- read.table(bestand,
                  sep = ",",
                  header = TRUE,
                  skip = skip_n,
                  stringsAsFactors = FALSE,
                  check.names = FALSE,
                  fill = TRUE)

ssp$Year  <- as.integer(ssp$Year)
ssp$Datum <- as.Date(paste0(ssp$Year, "-01-01"))

# Model kolommen -> numeric (en "-" of lege strings naar NA)
model_kolommen <- setdiff(names(ssp), c("Year", "Datum"))
ssp[model_kolommen] <- lapply(ssp[model_kolommen], function(x){
  x[x == "-"] <- NA
  as.numeric(x)
})

# Periode selecteren
sel <- ssp$Year >= start_jaar & ssp$Year <= eind_jaar
data_periode <- ssp[sel, ]

# ---------------------------------------------------------
# 1 "station-achtige" reeks per jaar: ensemble MEDIAAN
data_periode$Neerslag_mm <- apply(data_periode[, model_kolommen], 1, median, na.rm = TRUE)

```

Figuur 36: Neerslagdata van SSP1-2.6 inlezen

```r
# Jaarlijkse maximum in de geselecteerde periode
max_val  <- max(data_periode$Neerslag_mm, na.rm = TRUE)
max_idx  <- which.max(data_periode$Neerslag_mm)
max_date <- data_periode$Datum[max_idx]

# Jaar van maximum
max_year <- format(max_date, "%Y")

# y-limiet
ylim_max <- ceiling(max_val / 10) * 10

# Grafiek maken
par(mar = c(5, 5, 4, 2) + 0.1, las = 1)

plot(data_periode$Datum,
     data_periode$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     lwd  = 2,
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm] (rx1day, ensemble mediaan)",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# TITEL LINKS
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag (SSP1-2.6) (%d-%d)",
              start_jaar, eind_jaar),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# MAXIMUM LINKS (waarde + jaar)
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, max_year),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)

```

Figuur 37: Jaarlijkse maximum dagneerslag berekenen en grafiek maken van jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag SSP1-2.6.

```r
# Empirische percentielen (SSP station-reeks)

P_p95 <- quantile(data_periode$Neerslag_mm, 0.95, na.rm = TRUE)
P_p99 <- quantile(data_periode$Neerslag_mm, 0.99, na.rm = TRUE)


# ----------------------------------------------------------
# Gumbel fit  (jaarlijkse maxima)
x <- data_periode$Neerslag_mm
x <- x[is.finite(x)]

nll_gumbel <- function(par, x){
  mu   <- par[1]
  beta <- par[2]
  if (beta <= 0) return(Inf)
  z <- (x - mu) / beta
  length(x) * log(beta) + sum(z) + sum(exp(-z))
}

beta0 <- sd(x) * sqrt(6) / pi
mu0   <- mean(x) - 0.5772156649 * beta0

fit <- optim(c(mu0, beta0), nll_gumbel, x = x, method = "Nelder-Mead")
mu_hat   <- fit$par[1]
beta_hat <- fit$par[2]

qgumbel <- function(p, mu, beta){
  mu - beta * log(-log(p))
}

# Ontwerpwaarden
T <- 100
neerslag100 <- qgumbel(1 - 1/T, mu_hat, beta_hat)

nlev <- 100
p95_100ymax <- qgumbel(0.95^(1/nlev), mu_hat, beta_hat)
```

```r
# Grafiek tekenen
ylim_max <- ceiling(max(c(max_val, neerslag100, p95_100ymax), na.rm = TRUE) / 10) * 10
par(mar = c(5, 5, 4, 6) + 0.1, las = 1)

plot(data_periode$Datum,
     data_periode$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     lwd  = 2,
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm]",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# Titel links
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag (SSP1-2.6) (%d-%d)",
              start_jaar, eind_jaar),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# Maximum links
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, format(max_date, "%Y")),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)

# Lijnen
abline(h = neerslag100, col = "purple", lwd = 2)
abline(h = p95_100ymax, col = "black",    lwd = 1.8)
abline(h = P_p95, col = "orange", lwd = 1.8)
abline(h = P_p99, col = "red", lwd = 1.8)

legend("topright",
       inset = c(-0.22, -0.5),
       xpd = TRUE,
       legend = c(paste0("P99 = ", round(P_p99, 1), " mm"),
                  paste0("P95 = ", round(P_p95, 1), " mm"),
                  paste0("100-jaars return level = ", round(neerslag100, 1), " mm"),
                  paste0("Karakteristiek 95% (100 jaar) = ", round(p95_100ymax, 1), " mm")),
       col = c("red", "orange", "purple", "black"),
       lty = c(1, 1, 1, 1),
       lwd = c(1.8, 1.8, 2, 1.8),
       cex = 0.7,
       y.intersp = 1,
       bty = "n")
```

Figuur 38: percentielen (p99, p95) berekenen en 100-jaars return level en de karakteristieke 95%-ontwerpwaarde berekenen van SSP1-2.6 (Gumbel fit)

```r
# ---- Return levels TR2-TR100 (SSP1-2.6, Gumbel) ----
TR <- c(2, 5, 10, 25, 50, 100)

# cumulatieve kans
F_TR <- 1 - 1/TR

# return levels
x_TR <- qgumbel(F_TR, mu_hat, beta_hat)

rl_ssp <- data.frame(
  TR = TR,
  p_annual_exceed = 1/TR,
  F = F_TR,
  return_level_mm = x_TR
)

# Klassen
rl_ssp$klasse <- ifelse(rl_ssp$TR <= 10, "Laag",
                        ifelse(rl_ssp$TR <= 50, "Middel", "Hoog"))

# Matrixwaarden
rl_ssp$prob_matrix <- ifelse(rl_ssp$klasse == "Hoog", 1.00,
                             ifelse(rl_ssp$klasse == "Middel", 0.67, 0.33))

# Rapportklare tabel
rl_ssp_rapport <- rl_ssp
rl_ssp_rapport$return_level_mm <- round(rl_ssp_rapport$return_level_mm, 1)
rl_ssp_rapport$p_annual_exceed <- round(rl_ssp_rapport$p_annual_exceed, 2)
rl_ssp_rapport$F <- round(rl_ssp_rapport$F, 2)

rl_ssp_rapport <- rl_ssp_rapport[, c("TR","return_level_mm","p_annual_exceed","F","klasse","prob_matrix")]

rl_ssp_rapport
```

Figuur 39: Terugkeerperioden (TR2 – TR100) van SSP1-2.6 (Gumbel fit)

Terugkeerperiode	Waarde
TR2	26,5
TR5	27,9
TR10	28,7
TR25	29,9
TR50	30,7
TR100	31,5

Tabel 14: Waarden van terugkeerperioden voor SSP1-2.6

R-codes: SSP2-4.5

```r
# Bestand
bestand <- "C:/Users/ghofran/Documents/Hydrologie-Nederland/Bestanden van Nederland/rx1day-CMIP6_timeseries. SSP2-4.5.csv"

# Gewenste periode
start_jaar <- 2021
eind_jaar  <- 2100

# Data inlezen
regels <- readLines(bestand)
header_regel <- grep("^Year,", regels)[1]
skip_n <- header_regel - 1

ssp <- read.table(bestand,
                  sep = ",",
                  header = TRUE,
                  skip = skip_n,
                  stringsAsFactors = FALSE,
                  check.names = FALSE,
                  fill = TRUE)

ssp$Year  <- as.integer(ssp$Year)
ssp$Datum <- as.Date(paste0(ssp$Year, "-01-01"))

# Model kolommen -> numeric (en "-" of lege strings naar NA)
model_kolommen <- setdiff(names(ssp), c("Year", "Datum"))
ssp[model_kolommen] <- lapply(ssp[model_kolommen], function(x){
  x[x == "-"] <- NA
  as.numeric(x)
})

# Periode selecteren
sel <- ssp$Year >= start_jaar & ssp$Year <= eind_jaar
data_periode <- ssp[sel, ]


# 1 "station-achtige" reeks per jaar: ensemble MEDIAAN
data_periode$Neerslag_mm <- apply(data_periode[, model_kolommen], 1, median, na.rm = TRUE)
```

Figuur 40: Neerslagdata van SSP2-4.5 inlezen

```r
# Jaarlijkse maximum in de geselecteerde periode
max_val  <- max(data_periode$Neerslag_mm, na.rm = TRUE)
max_idx  <- which.max(data_periode$Neerslag_mm)
max_date <- data_periode$Datum[max_idx]

# Jaar van maximum
max_year <- format(max_date, "%Y")

# y-limiet (afronden op tientallen)
ylim_max <- ceiling(max_val / 10) * 10

# Grafiek maken
par(mar = c(5, 5, 4, 2) + 0.1, las = 1)

plot(data_periode$Datum,
     data_periode$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     lwd  = 2,
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm] (rx1day, ensemble mediaan)",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# TITEL LINKS
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag (SSP2-4.5) (%d–%d)",
              start_jaar, eind_jaar),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# MAXIMUM LINKS (waarde + jaar)
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, max_year),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)
```

Figuur 41: Jaarlijkse maximum dagneerslag berekenen en grafiek maken van jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag SSP2-4.5.

```r
# Empirische percentielen (SSP station-reeks)

P_p95 <- quantile(data_periode$Neerslag_mm, 0.95, na.rm = TRUE)
P_p99 <- quantile(data_periode$Neerslag_mm, 0.99, na.rm = TRUE)


# Gumbel fit op de station-achtige reeks (jaarlijkse maxima)
x <- data_periode$Neerslag_mm
x <- x[is.finite(x)]

nll_gumbel <- function(par, x){
  mu   <- par[1]
  beta <- par[2]
  if (beta <= 0) return(Inf)
  z <- (x - mu) / beta
  length(x) * log(beta) + sum(z) + sum(exp(-z))
}

beta0 <- sd(x) * sqrt(6) / pi
mu0   <- mean(x) - 0.5772156649 * beta0

fit <- optim(c(mu0, beta0), nll_gumbel, x = x, method = "Nelder-Mead")
mu_hat   <- fit$par[1]
beta_hat <- fit$par[2]

qgumbel <- function(p, mu, beta){
  mu - beta * log(-log(p))
}

# Ontwerpwaarden
T <- 100
neerslag100 <- qgumbel(1 - 1/T, mu_hat, beta_hat)

nlev <- 100
p95_100ymax <- qgumbel(0.95^(1/nlev), mu_hat, beta_hat)

# Grafiek
ylim_max <- ceiling(max(c(max_val, neerslag100, p95_100ymax), na.rm = TRUE) / 10) * 10
par(mar = c(5, 5, 4, 6) + 0.1, las = 1)

plot(data_periode$Datum,
     data_periode$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     lwd  = 2,
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm]",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# Titel links
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag (SSP2-4.5) (%d-%d)",
              start_jaar, eind_jaar),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# Maximum links
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, format(max_date, "%Y")),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)

# Lijnen
abline(h = neerslag100, col = "purple", lwd = 2)
abline(h = p95_100ymax, col = "black",    lwd = 1.8)
abline(h = P_p95, col = "orange", lwd = 1.8)
abline(h = P_p99, col = "red", lwd = 1.8)

legend("topright",
       inset = c(-0.22, -0.5),
       xpd = TRUE,
       legend = c(paste0("P99 = ", round(P_p99, 1), " mm"),
                  paste0("P95 = ", round(P_p95, 1), " mm"),
                  paste0("100-jaars return level = ", round(neerslag100, 1), " mm"),
                  paste0("Karakteristiek 95% (100 jaar) = ", round(p95_100ymax, 1), " mm")),
       col = c("red", "orange", "purple", "black"),
       lty = c(1, 1, 1, 1),
       lwd = c(1.8, 1.8, 2, 1.8),
       cex = 0.7,
       y.intersp = 1,
       bty = "n")
```

Figuur 42: percentielen (p99, p95) berekenen en 100-jaars return level en de karakteristieke 95%-ontwerpwaarde berekenen van SSP2-4.5 (Gumbel fit)

```r

# ---- Return levels TR2-TR100 (jaarlijkse maxima, Gumbel) ----
TR <- c(2, 5, 10, 25, 50, 100)

# cumulatieve kans F = 1 - 1/TR
F_TR <- 1 - 1/TR

# return level x_TR
x_TR <- qgumbel(F_TR, mu_hat, beta_hat)

rl <- data.frame(
  TR = TR,
  p_annual_exceed = 1/TR,
  F = F_TR,
  return_level_mm = x_TR
)

# Klassen
# laag: TR2-TR10, Middel: TR25-TR50, hoog: TR100
rl$klasse <- ifelse(rl$TR <= 10, "Laag",
                    ifelse(rl$TR <= 50, "Middel", "Hoog"))

# Matrixwaarden
rl$prob_matrix <- ifelse(rl$klasse == "Hoog", 1.00,
                         ifelse(rl$klasse == "Middel", 0.67, 0.33))

# Rapportklare tabel
rl_rapport <- rl
rl_rapport$return_level_mm <- round(rl_rapport$return_level_mm, 1)
rl_rapport$p_annual_exceed <- round(rl_rapport$p_annual_exceed, 2)
rl_rapport$F <- round(rl_rapport$F, 2)

rl_rapport <- rl_rapport[, c("TR","return_level_mm","p_annual_exceed","F","klasse","prob_matrix")]

rl_rapport
```

Figuur 43: Terugkeerperioden (TR2 – TR100) van SSP2-4.5 (Gumbel fit)

Terugkeerperiode	Waarde [mm]
TR2	26,8
TR5	28,4
TR10	29,5
TR25	30,9
TR50	31,9
TR100	32,9

Tabel 15: Waarden van terugkeerperioden voor SSP2-4.5

R-codes: SSP5-8.5

```r
# Bestand
bestand <- "C:/Users/ghofran/Documents/Hydrologie-Nederland/Bestanden van Nederland/rx1day-CMIP6_timeseries. SSP5-8.5.csv"

# Gewenste periode
start_jaar <- 2021
eind_jaar  <- 2100

# Data inlezen
regels <- readLines(bestand)
header_regel <- grep("^Year,", regels)[1]
skip_n <- header_regel - 1

ssp <- read.table(bestand,
                  sep = ",",
                  header = TRUE,
                  skip = skip_n,
                  stringsAsFactors = FALSE,
                  check.names = FALSE,
                  fill = TRUE)

ssp$Year  <- as.integer(ssp$Year)
ssp$Datum <- as.Date(paste0(ssp$Year, "-01-01"))

# Model kolommen -> numeric (en "-" of lege strings naar NA)
model_kolommen <- setdiff(names(ssp), c("Year", "Datum"))
ssp[model_kolommen] <- lapply(ssp[model_kolommen], function(x){
  x[x == "-"] <- NA
  as.numeric(x)
})

# Periode selecteren
sel <- ssp$Year >= start_jaar & ssp$Year <= eind_jaar
data_periode <- ssp[sel, ]

# 1 "station-achtige" reeks per jaar: ensemble MEDIAAN

data_periode$Neerslag_mm <- apply(data_periode[, model_kolommen], 1, median, na.rm = TRUE)
```

Figuur 44: Neerslagdata van SSP5-8.5 inlezen

```r
# Jaarlijkse maximum in de geselecteerde periode
max_val  <- max(data_periode$Neerslag_mm, na.rm = TRUE)
max_idx  <- which.max(data_periode$Neerslag_mm)
max_date <- data_periode$Datum[max_idx]

# Jaar van maximum
max_year <- format(max_date, "%Y")

# y-limiet
ylim_max <- ceiling(max_val / 10) * 10

# Grafiek maken
par(mar = c(5, 5, 4, 2) + 0.1, las = 1)

plot(data_periode$Datum,
     data_periode$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     lwd  = 2,
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm] (rx1day, ensemble mediaan)",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# TITEL LINKS
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag (SSP2-4.5) (%d–%d)",
              start_jaar, eind_jaar),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# MAXIMUM LINKS (waarde + jaar)
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, max_year),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)

```

Figuur 45: Jaarlijkse maximum dagneerslag berekenen en grafiek maken van jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag SSP5-8.5.

```r
# Empirische percentielen (SSP station-reeks)

P_p95 <- quantile(data_periode$Neerslag_mm, 0.95, na.rm = TRUE)
P_p99 <- quantile(data_periode$Neerslag_mm, 0.99, na.rm = TRUE)


# ---------------------------------------------------------
# Gumbel fit op de station-achtige reeks (jaarlijkse maxima)
x <- data_periode$Neerslag_mm
x <- x[is.finite(x)]

nll_gumbel <- function(par, x){
  mu   <- par[1]
  beta <- par[2]
  if (beta <= 0) return(Inf)
  z <- (x - mu) / beta
  length(x) * log(beta) + sum(z) + sum(exp(-z))
}

beta0 <- sd(x) * sqrt(6) / pi
mu0   <- mean(x) - 0.5772156649 * beta0

fit <- optim(c(mu0, beta0), nll_gumbel, x = x, method = "Nelder-Mead")
mu_hat   <- fit$par[1]
beta_hat <- fit$par[2]

qgumbel <- function(p, mu, beta){
  mu - beta * log(-log(p))
}

# Ontwerpwaarden
T <- 100
neerslag100 <- qgumbel(1 - 1/T, mu_hat, beta_hat)

nlev <- 100
p95_100ymax <- qgumbel(0.95^(1/nlev), mu_hat, beta_hat)
```

```r
# Grafiek

ylim_max <- ceiling(max(c(max_val, neerslag100, p95_100ymax), na.rm = TRUE) / 10) * 10
par(mar = c(5, 5, 4, 6) + 0.1, las = 1)

plot(data_periode$Datum,
     data_periode$Neerslag_mm,
     type = "h",
     col  = "blue",
     lwd  = 2,
     xlab = "Jaar",
     ylab = "Maximale dagneerslag [mm]",
     ylim = c(0, ylim_max),
     main = "")

# Titel links
mtext(sprintf("Jaarlijkse maximale 1-daagse neerslag (SSP5-8.5) (%d-%d)",
              start_jaar, eind_jaar),
      side = 3, adj = 0, line = 1.2, cex = 1.0)

# Maximum links
mtext(sprintf("maximum: %.2f mm (%s)",
              max_val, format(max_date, "%Y")),
      side = 3, adj = 0, line = 0.3, cex = 0.8)

# Lijnen
abline(h = neerslag100, col = "purple", lwd = 2)
abline(h = p95_100ymax, col = "black",    lwd = 1.8)
abline(h = P_p95, col = "orange", lwd = 1.8)
abline(h = P_p99, col = "red", lwd = 1.8)

legend("topright",
       inset = c(-0.22, -0.5),
       xpd = TRUE,
       legend = c(paste0("P99 = ", round(P_p99, 1), " mm"),
                  paste0("P95 = ", round(P_p95, 1), " mm"),
                  paste0("100-jaars return level = ", round(neerslag100, 1), " mm"),
                  paste0("Karakteristiek 95% (100 jaar) = ", round(p95_100ymax, 1), " mm")),
       col = c("red", "orange", "purple", "black"),
       lty = c(1, 1, 1, 1),
       lwd = c(1.8, 1.8, 2, 1.8),
       cex = 0.7,
       y.intersp = 1,
       bty = "n")
```

Figuur 46: percentielen (p99, p95) berekenen en 100-jaars return level en de karakteristieke 95%-ontwerpwaarde berekenen van SSP5-8.5 (Gumbel fit)

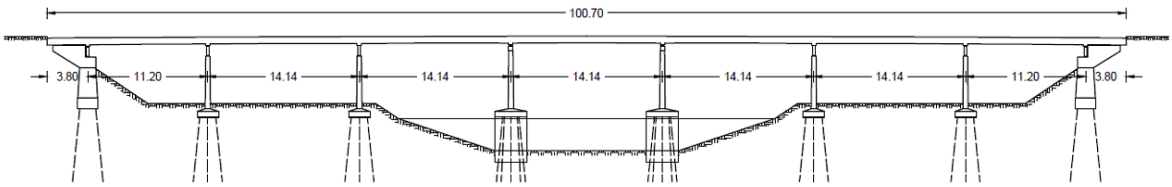
```r

# ---- Return levels TR2-TR100 (jaarlijkse maxima, Gumbel)
TR <- c(2, 5, 10, 25, 50, 100)

# cumulatieve kans F = 1 - 1/TR
F_TR <- 1 - 1/TR

# return level x_TR
x_TR <- qgumbel(F_TR, mu_hat, beta_hat)

rl <- data.frame(
  TR = TR,
  p_annual_exceed = 1/TR,
  F = F_TR,
  return_level_mm = x_TR
)

# Klassen
# laag: TR2-TR10, Middel: TR25-TR50, hoog: TR100
rl$klasse <- ifelse(rl$TR <= 10, "Laag",
                    ifelse(rl$TR <= 50, "Middel", "Hoog"))

# Matrixwaarden
rl$prob_matrix <- ifelse(rl$klasse == "Hoog", 1.00,
                         ifelse(rl$klasse == "Middel", 0.67, 0.33))

# Rapportklare tabel
rl_rapport <- rl
rl_rapport$return_level_mm <- round(rl_rapport$return_level_mm, 1)
rl_rapport$p_annual_exceed <- round(rl_rapport$p_annual_exceed, 2)
rl_rapport$F <- round(rl_rapport$F, 2)

rl_rapport <- rl_rapport[, c("TR","return_level_mm","p_annual_exceed","F","klasse","prob_matrix")]

rl_rapport

```

Figuur 47: Terugkeerperioden (TR2 – TR100) van SSP5-8.5 (Gumbel fit)

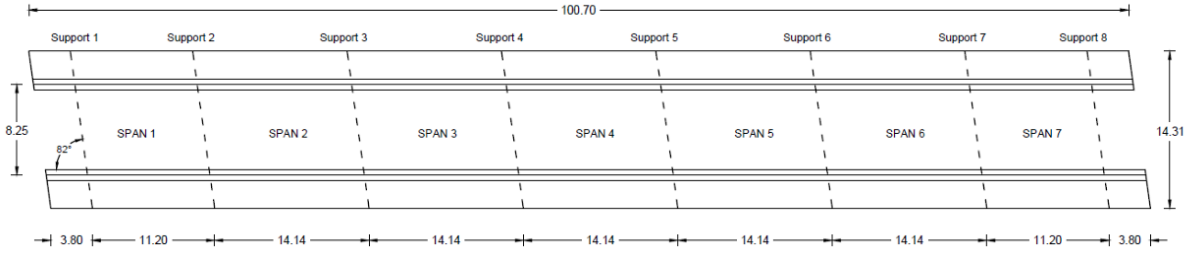
Terugkeerperiode	Waarde [mm]
TR2	28,0
TR5	29,8
TR10	31,0
TR25	32,6
TR50	33,7
TR100	34,8

Tabel 16: Waarden van terugkeerperioden voor SSP5-8.5

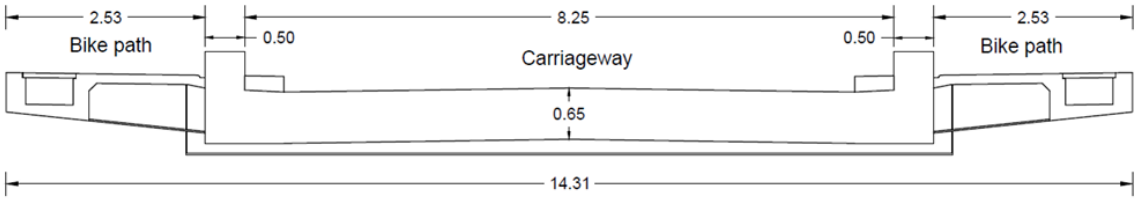
Bijlage 4: Tekeningen van de brug



Figuur 48: Zijaanzicht van de Nieuwklapbrug met afmetingen (m)



Figuur 49: Overzicht van de Nieuwklapbrug met afmetingen (m)



Figuur 50: Dwarsdoorsnede van de Nieuwklapbrug nabij de steunpunten met afmetingen (m)



Figuur 51: Mechanisch schema van de Nieuwklapbrug

Bijlage 5: Materialen eigenschappen

Concrete		
Characteristic compressive strength	$f_{ck,cube}$ (MPa)	60
	f_{ck} (MPa)	50
Mean compressive strength	$f_{cm,cube}$ (MPa)	80
	f_{cm} (MPa)	70
Design compressive strength	$f_{cd,cube}$ (MPa)	40
	f_{cd} (MPa)	33.33
Mean tensile strength	f_{ctm} (MPa)	4.36
Min. characteristic tensile strength	$f_{ctk,min}$ (MPa)	3.05
Design tensile strength	f_{ctd} (MPa)	2.035
Young's Modulus	E_c (MPa)	31570
Partial factor	γ_c (-)	1.5
Specific weight	γ (kN/m^3)	25
Poisson's ratio	ν (-)	0.15

Tabel 17: Materiaaleigenschappen van beton

Reinforcement steel (QR22)		
Characteristic yielding strength	f_{yk} (MPa)	220
Mean yielding strength	f_{ym} (MPa)	242
Design yielding strength	f_{yd} (MPa)	191
Mean ultimate strength	f_{tm} (MPa)	330
Design ultimate strength	f_{td} (MPa)	287
Young's Modulus	E_s (MPa)	200000
Partial factor	γ_s (-)	1.15
Specific weight	γ (kN/m^3)	78.5
Poisson's ratio	ν (-)	0.3

Tabel 18: Materiaaleigenschappen van wapeningsstaal

Input - Parameters		
Concrete initial Young's Modulus	$E_{c,0}$ (MPa)	22000
Steel Young's Modulus	E_s (MPa)	200000
Mean compressive strength	f_{cm} (MPa)	70
Design compressive strength	f_{cd} (MPa)	33.33
Mean yielding strength	f_{ym} (MPa)	242
Design yielding strength	f_{yd} (MPa)	191
Slab width	b (mm)	8250
Slab height	h (mm)	631
Cover	c (mm)	45
Reinforcement diameter	Ø (mm)	25
Bottom longitudinal reinforcement area	$A_{s,bot}$ (mm^2)	6136
Top longitudinalreinforcement area	$A_{s,top}$ (mm^2)	2045

Tabel 19: parameters voor de berekening van het buigend momentvermogen

Input - Parameters		
Mean compressive strength	f_{cm} (MPa)	70
Characteristic compressive strength	f_{ck} (MPa)	50
Mean yielding strength	f_{ym} (MPa)	242
Characteristic yielding strength	f_{yk} (MPa)	220
Slab width	b (mm)	8250
Effective depth	d_l (mm)	605
Reinforcement ratio	ρ_l (%)	1.47
Design calibration factor	$C_{Rd,c}$ (-)	0.12
Average calibration factor	$C_{Rm,c}$ (-)	0.15
Supported length	l_{sup} (mm)	4900

Tabel 20: parameters voor de berekening van de dwarskrachtcapaciteit

Bijlage 6: Formules voor buigmomentcapaciteit

Formule 1: $M_{cr} = f_r \cdot \frac{I_{gross}}{(h_{slab} - C_{cr}).b}$ $[kNm/m]$

Formule 2: $f_r = \frac{7.5}{12} \cdot \sqrt{f_c}$ $[MPa]$

Formule 3: $\kappa_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{h_{slab} - C_{cr}}$ $[1/mm]$

Formule 4: $M_y = \beta_1 \cdot f_{c,th} \cdot c_y \cdot (d_1 - k_2 \cdot c_y)$ $[kNm/m]$

Formule 5: $k_2 = 1 - 2 \cdot \frac{\varepsilon_c/\varepsilon_0 - \arctan(\varepsilon_c/\varepsilon_0)}{(\varepsilon_c/\varepsilon_0)^2 \cdot \beta_1}$

Formule 6: $\beta_1 = \frac{\ln[1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^2]}{\varepsilon_c/\varepsilon_0}$

Formule 7: $\varepsilon_0 = \frac{f_c}{E_c} \cdot (\frac{n_{th}}{n_{th} - 1})$

Formule 8: $n_{th} = 0.8 + \frac{f_c}{17}$

Formule 9: $f_{c,th} = \frac{0.9 \cdot f_c \cdot n_{th} \cdot \varepsilon_c/\varepsilon_0}{n_{th} - 1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^{n_{th}}}$ $[MPa]$

Formule 10: $\kappa_y = \frac{\varepsilon_{sy}}{d_1 - c_y}$ $[1/mm]$

Formule 11: $M_u = 0.85 \cdot f_c \cdot \beta_{ult} \cdot c_{ult} \cdot \left(d_1 - \frac{\beta_{ult} \cdot c_{ult}}{2}\right)$ $[kNm/m]$

Formule 12: $\kappa_{ult} = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_{ult}}$ $[1/mm]$ waarbij ε_{cu}= 0.003

Formule 13:

$$C_{cr} = \frac{b\,.\,\frac{h^2}{2} + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1\right)\,.A_{s,bot}\,.d_1 + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1\right).A_{s,top}\,.d_1\,.(c - \frac{\phi}{2})}{b\,.\,h + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1\right)\,.A_{s,bot} + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1\right).A_{s,top}}$$

Formule 14:

$$c_y = \frac{A_{s,bot}\,.\,f_{yd}}{\beta_1\,.\,f_{c,th}}$$

Symbolen	**Betekenis**
M_{cr}	Scheurmoment
f_r	Buigtreksterkte van beton
I_{gross}	Traagheidsmoment van de ongescheurde doorsnede $I_{gross} = 1.76 \cdot 1011\ mm4$
h_{slab}	Plaatdikte
C_{cr}	Diepte van de drukzone bij het ontstaan van scheurvorming
b	Plaatbreedte
f_c	Cilinderdruksterkte van beton
κ_{cr}	Kromming bij het scheuren van het beton
ε_{cr}	Rek bij het scheuren van het beton
M_y	Moment waarbij het staal in de doorsnede begint te vloeien
β_1	Parameter die de gemiddelde drukspanning in beton bepaalt
$f_{c,th}$	Spanning in het beton volgens het spannings-rekdiagram van Thorenfeldt bij het vloeien van het staal
c_y	diepte van de drukzone bij het vloeien van het trekstaal
d_1	Effectieve hoogte tot de langswapening
k_2	Factor voor het zwaartepunt van de drukspanningsverdeling in het beton
ε_c	Rek in de meest op druk belaste betonvezel
ε_0	Materiaal parameter van het beton
E_c	Elasticiteitsmodulus van beton
n_{th}	Material parameter van beton
κ_y	Kromming bij het vloeien van het staal
ε_{sy}	Rek bij het vloeien van het staal ε_{sy} = 0.010
M_u	Moment dat het verpletteren van het beton in de doorsnede veroorzaakt
β_{ult}	Parameter die de relatie geeft tussen de hoogte van het rechthoekige drukspanningsblok en de diepte van de drukzone
c_{ult}	Diepte van de drukzone in de uiterste grenstoestand
κ_{ult}	Kromming bij het verpletteren van het beton
ε_{cu}	Rek bij het verpletteren van het beton ε_{cu}= 0.003
E_s	Elasticiteitsmodulus van staal
$A_{s,bot}$	Oppervlakte van de onderste langswapening
$A_{s,top}$	Oppervlakte van de bovenste langswapening
ϕ	Wapeningsdiameter
f_{yd}	Ontwerpvloeigrens

Bijlage 7: Formules voor dwarskrachtcapaciteit

Formule 15: $$V_{R,C} = C_{R,C} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot d_l \geq \mathcal{V}_{min} \cdot d_l \quad [kN/m]$$

Formule 16: $$\mathcal{V}_{min} = 1.08 \cdot k^{3/2} \cdot \left(\frac{f_c}{f_y}\right)^{1/2} \quad [MPa]$$

Formule 17: $$k = 1 + \sqrt{d_l/200} \leq 2.0$$

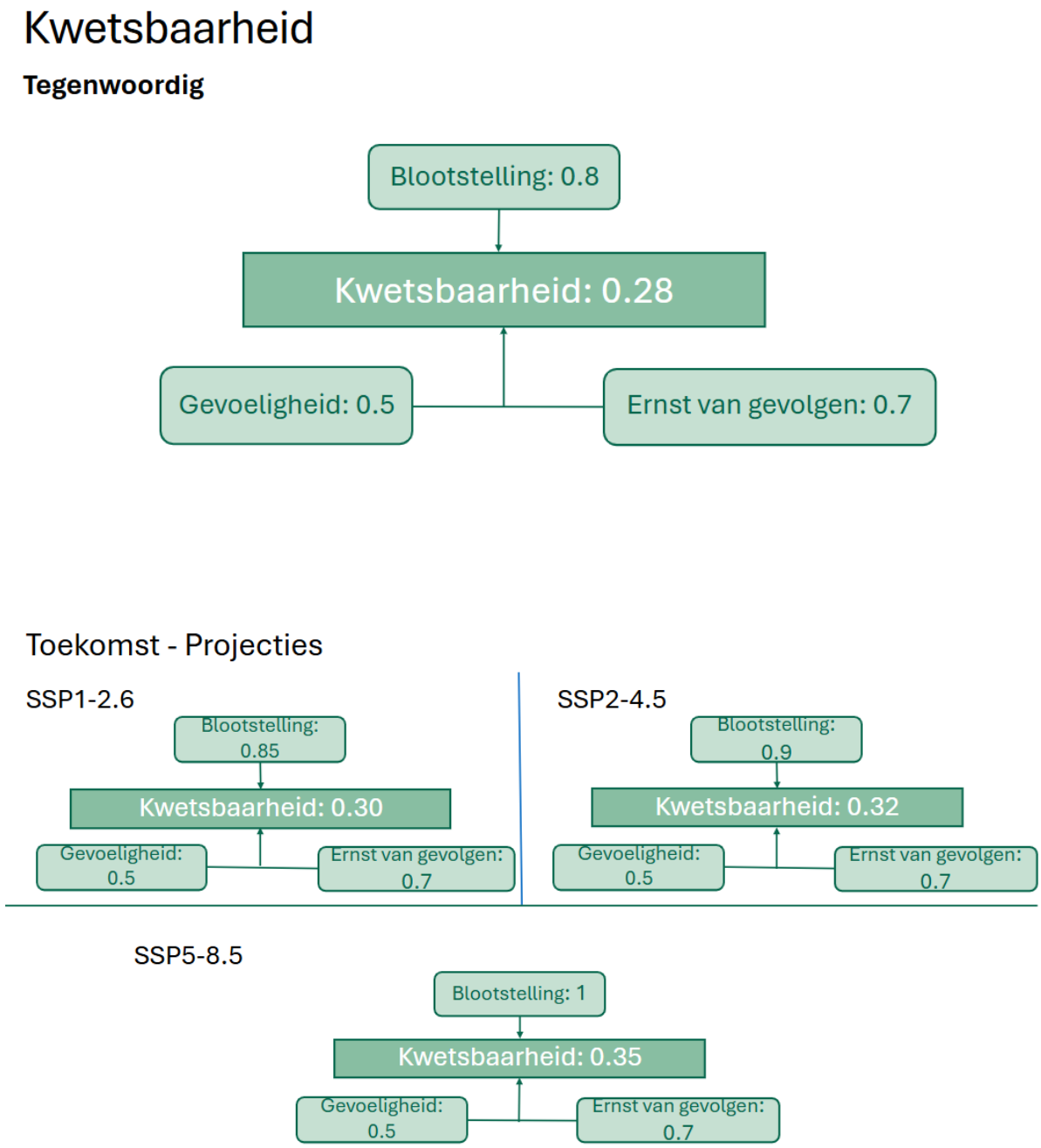
Formule 18: $$V_{R,C,prop} = C_{R,C} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1.9 - \frac{f_c}{225}\right) \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{l_{sup}}{b} + 1\right) \cdot d_l \geq \mathcal{V}_{min} \cdot d_l$$

Formule 19: $$l_{sup} = \sum_{i=1}^{n_{bearings}} l_{bearings,i}$$

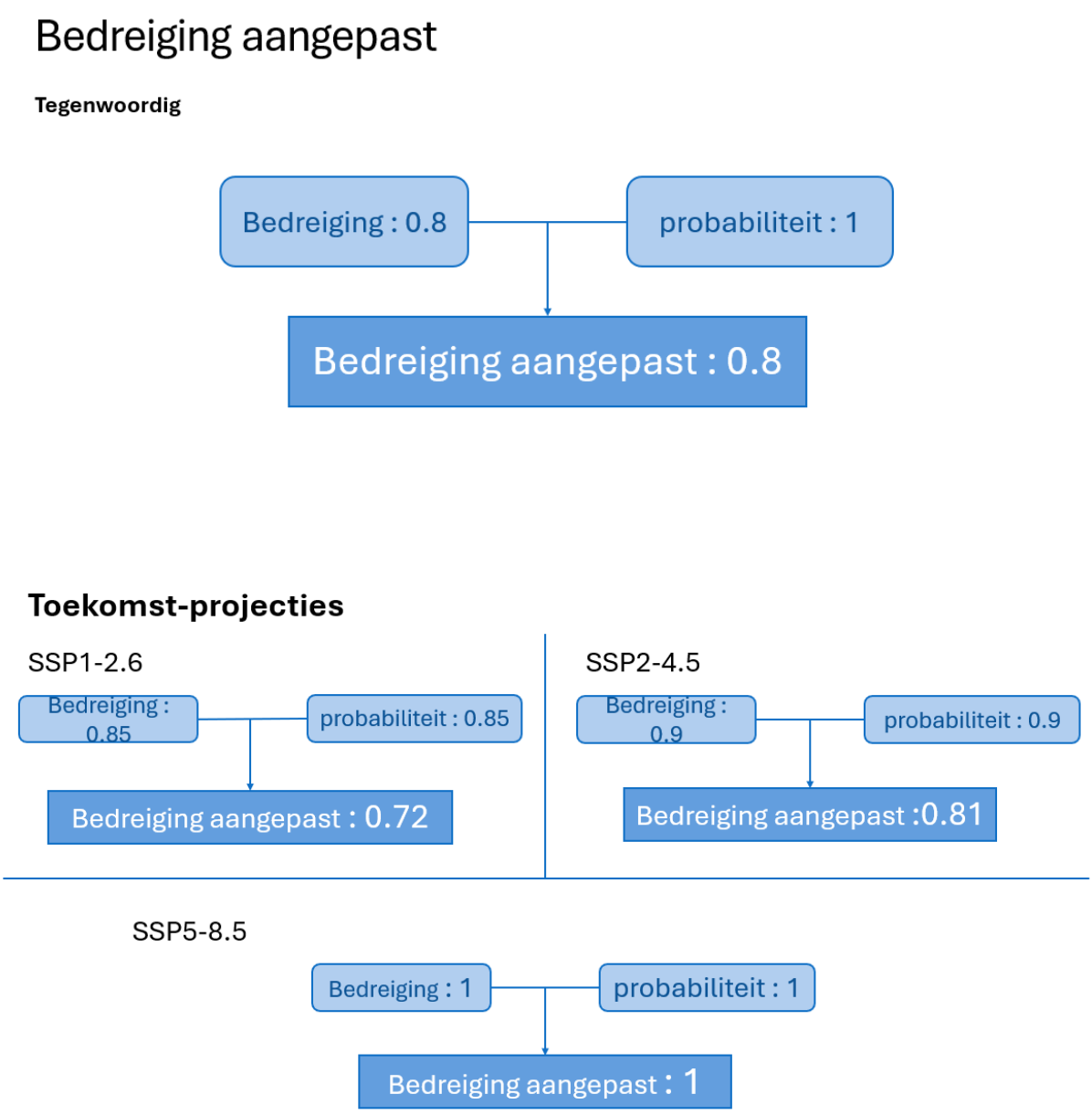
Symbolen	**Betekenis**
$V_{R,C}$	Dwarskrachtcapaciteit
$C_{R,C}$	Kalibratiefactor voor de dwarskrachtcapaciteit
k	Grootteeffectfactor
ρ_l	Langswapeningverhouding
d_l	Effectieve hoogte tot de langswapening
$\mathcal{V}_{min}$	Ondergrens van de dwarskrachtcapaciteit
f_y	Vloeigrens van staal
$V_{R,C,prop}$	Waarde van de dwarskrachtcapaciteit volgens de voorgestelde formule voor betonplaten die worden belast door geconcentreerde lasten nabij opleggingen
l_{sup}	Supported length
$l_{bearings,i}$	Lengte van het i-th oplegpunt langs de oplegging

Bijlage 8: Risico – Evaluatie – Ecuador

Kwetsbaarheid – Evaluatie

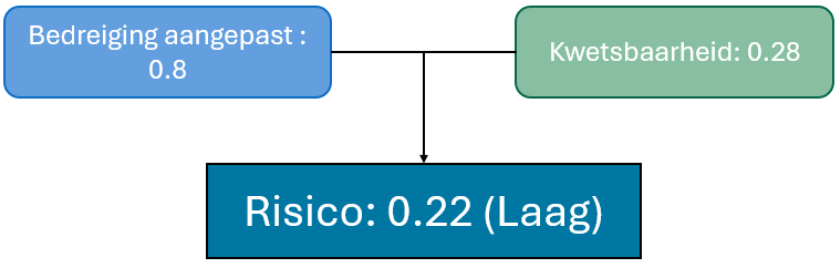


Bedreiging – Evaluatie



Risico – Evaluatie

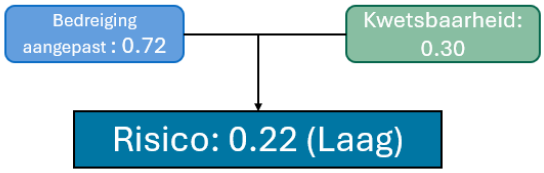
Tegenwoordig (1850 – 2023)



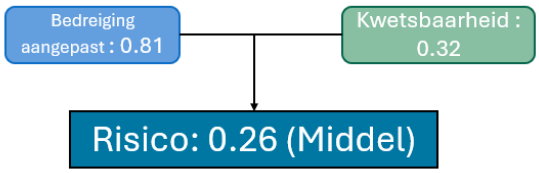
Risicoklasse	Zeer laag	Laag	Middel	Hoog	Zeer hoog
Risico	(0.00 - 0.10]	(0.10 - 0.25]	(0.25 - 0.40]	(0.40 - 0.63]	(0.63 - 1.00]

Toekomst (2024 – 2100)

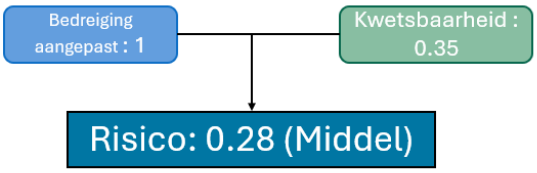
SSP1-2.6



SSP2-4.5



SSP5-8.5



Risicoklasse	Zeer laag	Laag	Middel	Hoog	Zeer hoog
Risico	(0.00 - 0.10]	(0.10 - 0.25]	(0.25 - 0.40]	(0.40 - 0.63]	(0.63 - 1.00]