

Nederlandse amenvatting

Wereldwijd is de economische schade en het aantal slachtoffers door overstromingen de laatste decennia aanzienlijk gestegen. Ook de Rijn heeft een lange geschiedenis van overstromingen met veel schade en slachtoffers. Bewoners langs de rivier beschermden zich tegen het water door de rivier te kanaliseren en dijken te bouwen, die vaak na een nieuwe overstroming verbeterd werden.

De verwachting is dat het overstromingsrisico in het stroomgebied van de Rijn, dat wil zeggen de kans op een overstroming vermenigvuldigd met het gevolg, zal blijven toenemen. Dit kan worden toegeschreven aan zowel sociaal-economische ontwikkelingen in kwetsbare gebieden, als de toenemende overstromingsfrequentie door klimaatverandering. Klimaatscenario's voor het stroomgebied van de Rijn laten zien dat de neerslag in de winter zal toenemen, met een hogere afvoer tot gevolg. Door globale opwarming zullen afvoerpieken als gevolg van sneeuwsmelt eerder in het jaar plaats vinden dan dat nu het geval is. Bij elkaar genomen resulteert dit in een hogere frequentie van extreem hoge afvoeren. Daarnaast vertonen sociaal-economische scenario's voor het Rijnstroomgebied stijgende trends in bevolkingsdichtheid en welvaart, waardoor de kwetsbaarheid van de maatschappij voor overstromingen verder toeneemt.

Voor het ontwikkelen van hoogwaterbeschermende maatregelen is het noodzakelijk om het effect van klimaatverandering op de afvoer van de Rijn goed te kennen. Doordat de veiligheidsniveau's langs de Rijn relatief hoog zijn (1/200 tot 1/1250 per jaar) is kennis over de grootte en duur van hoogwaterpieken met een dergelijk lage kans van voorkomen relevant voor waterbeheerders. Echter, het schatten van de eigenschappen van deze hoogwaterpieken gebeurt nu door extrapolatie van slechts ~ 110 jaar aan beschikbare meetgegevens, wat resulteert in grote onzekerheden. Er zijn nog meer methodologische obstakels wanneer we het effect van klimaatverandering en hoogwaterbeschermende maatregelen op de afvoer willen bepalen, in het bijzonder wanneer het gaat om extreem hoge afvoeren met een zeer lage kans op voorkomen. Zo bestaan er nog geen stroomgebiedsbrede schattingen in het Rijnstroomgebied over hoe de potentiële schade zal toenemen door sociaal-economische ontwikkelingen.

Dit proefschrift onderzoekt het gecombineerde effect van klimaatverandering en sociaal-economische ontwikkelingen op het overstromingsrisico in het stroomgebied van de Rijn met de nadruk op bovenstroomse gebieden, waarbij beschikbare simulatiemethoden waar nodig verbeterd worden. De focus ligt op het simuleren van extreem hoge afvoeren en op het ontwikkelen van grensoverschrijdende, hoogwaterbeschermende maatregelen.

De resultaten laten zien dat het verbeteren van de simulatiemethode niet zozeer zit in een meer gedetailleerde beschrijving van hydrologische processen, maar in het slim combineren van deels nieuwe en bestaande methoden en modellen. Ten eerste wordt geadviseerd om de intensiteit en duur van zeldzame meteorologische situaties, bij-

voorbeeld extreem hoge en langdurige neerslag, beter te simuleren. Dit kan met behulp van een zogenaamde weergenerator die op basis van statistische parameters lange synthetische meteorologische reeksen genereert. Ten tweede is het van belang de routing processen van afvoergolven beter te simuleren door een hydraulisch model toe te passen.

Een vaak gebruikte aanname in studies naar extreme afvoeren is dat riviersystemen stationair zijn. Deze aanname wijs ik af en ik pas een methode toe die beschreven kan worden als 'proces-georiënteerd modelleren'. In deze verbeterde simulatiemethode wordt zowel de invloed van klimaatverandering als de door de mens veroorzaakte veranderingen in het landgebruik en de geometrie van de hoofdgeul, geparameteriseerd in modellen. Op deze manier kan het effect van deze veranderingen op het afvoergedrag van de Rijn door de tijd heen gesimuleerd worden.

Een modelvergelijking laat zien dat het conceptuele hydrologische model HBV piekafvoeren van de Rijn beter beschrijft dan het meer complexe model VIC, en daarom is HBV gebruikt als hydrologisch model in dit proefschrift. De lange meteorologische tijdreeksen uit de weergenerator (tot 10 000 jaar dagwaarden) worden in het HBV model ingevoerd, dat vervolgens 10 000 jaar afvoerdata simuleert. Als gevolg hiervan wordt de extreme waarden analyse nauwkeuriger dan wanneer alleen de 110 jaar aan historische gegevens gebruikt wordt. Dat de statistische onzekerheid (aangegeven door het 95% betrouwbaarheidsinterval) bij het schatten van extreme waarden met een lage kans van voorkomen (1/200 per jaar of lager) wordt hierdoor verlaagd van $\pm 13\%$ naar $\pm 3\%$.

Om het effect van klimaatverandering op de afvoer te berekenen, is uitvoer van globale klimaatmodellen (GCMs) gebruikt als invoer voor HBV. Om de meteorologische gegevens van GCMs terug te brengen naar de vereiste regionale schaal, preferer ik het gebruik van directe uitvoer na bias-correctie van regionale klimaatmodellen (RCMs) boven de zogenaamde 'delta methode'. RCM uitvoer geeft namelijk beter inzicht in ruimtelijke en temporele variatie van het klimaatsignaal, wat relevant is voor het plannen van hoogwaterbeschermende maatregelen. De simulatie resultaten wijzen op een aanzienlijke toename van de overstromingskans in 2050 in het gehele stroomgebied van de Rijn, vergeleken met de referentieperiode van 1961–1995. Op de Duits-Nederlandse grens, bij Lobith, is de huidige overschrijdingsnorm 1/1250 per jaar. Deze kans zal naar verwachting in 2050 drie tot vijf keer zo hoog zijn.

Voorts wordt geraamd dat de jaarlijks verwachte schade (oftewel het overstromingsrisico) in het stroomgebied van de Rijn tussen de 54% en 230% toeneemt in 2030 ten opzichte van 2000. Hiervan kan ongeveer driekwart van de toename toegeschreven worden aan het effect van klimaatverandering (toenemende overstromingskans), en de rest is het gevolg van sociaal-economische ontwikkelingen, zoals verstedelijking. Resultaten tonen aan dat het gebied met het hoogste overstromingsrisico gelegen is in de Benedenrijn in Nordrhein-Westfalen in Duitsland, en niet in Nederland zoals

vaak wordt gedacht. Dit is vooral het gevolg van verschillende veiligheidsnormen van de waterkeringen in beide gebieden: in Nederland is deze norm relatief hoog waardoor het risico laag is.

In de huidige situatie neemt het veiligheidsniveau van de dijken en andere kunstwerken af langs de Rijn in stroomopwaartse richting. De verschillen vloeien voort uit verschillen in waterbeheers tussen verschillende landen en Duitse *Bundesländer*, en zijn grofweg gerelateerd aan de economische waarde in overstroombare gebieden achter de dijken. Het resultaat is dat de kans op overstromen in Duitsland en Frankrijk (waar de veiligheidsniveaus geschat worden op 1/200 tot 1/500 per jaar) hoger is dan in Nederland (waar de veiligheidsnorm in het bovenrivierengebied 1/1250 per jaar is). Als gevolg hiervan vinden er overstromingen plaats in Frankrijk en Duitsland, bij een afvoer die lager is dan de ontwerpafvoer in Nederland. Dit heeft een vergaand verlagend effect op de piekafvoeren bij Lobith. De afname van de piekafvoer varieert tussen 2–13% in de referentie situatie en tussen 10–19% in het W-plus klimaatscenario in 2050, bij herhalingstijden van 50 jaar en hoger.

De gemiddelde verhoging van de maximale waterstand tijdens piekafvoeren langs de Rijn in 2050 is 50 cm als gevolg van klimaatverandering, maar varieert tussen enkele centimeters en 137 cm. In deze simulaties is het effect van bovenstroomse overstromingen in de Boven- en Benedenrijn in Frankrijk en Duitsland meegenomen. Het in de jaren '90 door de ICBR (Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn) geïnitieerde Actieplan Hoogwater bevat verschillende hoogwaterbeschermende maatregelen die momenteel worden uitgevoerd en gepland zijn tot aan 2020. De resultaten in dit proefschrift laten zien dat zowel de maatregelen in het Actieplan Hoogwater als verscheidene extra maatregelen, zoals meer retentiegebieden, de maximale waterstanden met slechts 5 cm tot 13 cm verlagen voor hoogwatersituaties met middelgrote herhalingstijden tussen de 50 en 100 jaar. De conclusie is dat deze maatregelen ontoereikend lijken om te voorkomen dat de kans op overstromen als gevolg van klimaatverandering toeneemt. Volgens de resultaten in dit proefschrift is de enige maatregel die kan voorkomen dat de Rijn vaker overstroomt in de toekomst een drastische dijkverhoging tussen de 1,30 m en 3,30 m, afhankelijk van de locatie, in de veronderstelling dat deze dijken niet kunnen falen.

Hoewel door dit onderzoek de statistische onzekerheid verlaagd is bij het schatten van dergelijke piekafvoeren, zal er altijd een restonzekerheid door overige factoren zijn. Doordat de afvoer meetreeksen te kort zijn (~110 jaar) vereist het schatten van extreme gebeurtenissen (1/200 per jaar of lager) hetzij statistische, hetzij hydrologische modellering ver buiten het gekalibreerde bereik van deze modellen. Dit introduceert een onbekende fout en zal dus altijd een bepaalde onzekerheid bevatten. Daarnaast draagt het effect van bovenstroomse overstromingen en klimaatverandering bij aan de onvoorspelbaarheid van extreem hoge afvoeren. Het verhogen van de veiligheidsnormen om de overstromingskans te verlagen, zoals nu wordt overwogen in

Nederland, zal ingenieurs dwingen om hun modellen nog verder op te rekken. Dit verhoogt dus de onzekerheid omtrent het schatten van de bijbehorende ontwerpafvoer, ongeacht hoe goed de gebruikte modellen zijn.

Waterbeheerders moeten zich meer bewust zijn van dit feit dat het verhogen van de veiligheidsnormen inhoudt dat de onzekerheid van de gesimuleerde maatgevende omstandigheden toeneemt. Een effectief klimaatadaptief beleid omtrent overstromingsrisicobeheer zal de inherente onzekerheden moeten omarmen, en niet alleen hoogwaterbeschermende maatregelen moeten overwegen, maar ook een breed scala aan adaptatiemaatregelen die de potentiële schade van overstromingen beperken.