

Toekomstige ontwikkelingen GRADE



Toekomstige ontwikkelingen GRADE

M. Hegnauer
J. Beersma
H.F.P. van den Boogaard

1209424-004



Titel
Toekomstige ontwikkelingen GRADE

Opdrachtgever Rijkswaterstaat (WVL)	Project 1209424-004	Kenmerk 1209424-004-ZWS-0015	Pagina's 16
---	-------------------------------	--	-----------------------

Trefwoorden
GRADE, Rijn, Maas, Overijsselse Vecht, Extreme afvoeren, Coïncidenties, Overstromingen, Onzekerheden, Scenarioanalyses, Systeemrelaties, Laagwater

Samenvatting
In de afgelopen jaren is door Deltares en KNMI onder begeleiding van RWS/WvL gewerkt aan de ontwikkeling van GRADE als een nieuwe methode voor het bepalen van de frequentielijnen voor afvoeren van de Rijn en de Maas. Dit ter voorbereiding van het WTI 2017 waarin de ondertussen met GRADE berekende werklijnen voor de afvoer te Lobith en te Borgharen gebruikt zouden kunnen gaan worden. Naast dat genereren van die werklijnen en golfvormen van extreme afvoeren kan GRADE ook worden ingezet en/of uitgebreid voor diverse andere belangrijke praktische toepassingen. In dit document worden een aantal van dergelijke toepassingen of verkenningen geïnventariseerd, en aangegeven welke aanvullende ontwikkelingen aan GRADE daarmee eventueel gemoed zijn.

Referenties
1209424-004-ZWS-0015

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	31 okt. 2014	M. Hegnauer J. Beersma H.F.P. van den Boogaard		F. Sperna Weiland		G. Blom	

Status
definitief

Inhoud

1	Onderwerpen voor verdere ontwikkelingen GRADE	1
1.1	Uitbreiding GRADE voor de Overijsselse Vecht	1
1.2	Uitbreiding GRADE voor zijdelingse instroom	2
1.3	Coïncidenties	2
1.3.1	Coïncidentie Rijn/Maas	2
1.3.2	Coïncidentie Rivier/Zee	3
1.4	Onzekerheden ten gevolge van overstromingen in de Rijn	4
1.5	Overstromingen in de Maas	5
1.6	Laagwater	6
1.7	Een super GRADE	7
1.8	Doorontwikkeling hydrologische en hydraulische modellen binnen GRADE	7
2	Onderwerpen voor verdere GRADE toepassingen	9
2.1	GRADE scenarioanalyses	9
2.2	Systeemkennallen en systeemrelaties	10
3	Samenvatting	13

1 Onderwerpen voor verdere ontwikkelingen GRADE

In de loop van 2014 zijn de ontwikkelingen aan het GRADE-instrumentarium ten behoeve van WTI2017 afgerond. Belangrijke resultaten hiervan zijn dat met GRADE berekende statistiek ten aanzien van extreme afvoeren voor de Rijn (Lobith) en de Maas (Borgharen) binnen WTI2017 gebruikt kunnen gaan worden. Anticiperend op daaropvolgende WTI rondes, maar ook voor praktische toepassingen in andere kaders (beheers-, beleids-, scenario- en andersoortige analyses) kan worden gedacht aan verdere ontwikkelingen van het GRADE instrumentarium. In dit hoofdstuk worden een aantal van dergelijke potentiële ontwikkelrichtingen en/of verkenningen geïnventariseerd.

1.1 Uitbreiding GRADE voor de Overijsselse Vecht

Op dit moment zijn GRADE systemen ontwikkeld voor de instroompunten van de twee grootste Nederlandse rivieren, namelijk de Rijn (Lobith) en de Maas (Borgharen). Dit zijn echter niet de enige rivieren die een significant effect hebben op de waterstanden in het Nederlandse riviereengebied. Er zijn andere (zij-)rivieren die van belang zijn. In het bijzonder betreft dit de Overijsselse Vecht die feitelijk, na de Rijn en de Maas, de 3^e grootste rivier van Nederland vormt. Hoogwaterproblemen zoals die nog onlangs in mei 2014 zijn opgetreden, en het toen moeten treffen van maatregelen om overstromingen te voorkomen, zijn voor de Vecht niet uitzonderlijk. Via een GRADE-systeem voor de Vecht mag worden verwacht dat ook voor deze rivier aanzienlijk betere hoge-afvoerstatistieken gegenereerd kunnen worden.

De meerwaarde van de, via GRADE (in plaats van historische metingen afgeleide) verbeterde, afvoerstatistiek voor de Overijsselse Vecht is alleen daarom al evident aangezien hiermee binnen een WTI-ronde nauwkeuriger schattingen van faalkansen geproduceerd worden, en daarmee een zuiverder toetsing van de veiligheid van het stroomgebied en de delta van de Vecht.

Een belangrijk punt hierbij is ook dat zich in deze rivier diverse primaire waterkeringen bevinden, waarvan de effecten met (het hydro-dynamisch model binnen -, of een ander hydro-dynamisch model buiten) GRADE nauwkeurig in rekening kunnen worden gebracht. Dit geldt eveneens voor het verdisconteren van (eventuele) overstromingen bij zeer extreme afvoeren in dit systeem. Dit nauwkeurig(er) berekenen van extreme stromingen op de Overijsselse Vecht is met name van belang indien de berekeningen met GRADE, die in eerste instantie bovenstrooms van de Nederlandse grenzen plaats vinden, zouden worden voortgezet over de gehele Vecht of heel Nederland (conform het idee van een "super GRADE", ofwel een uitgebreid GRADE instrument voor "heel" Nederland, zie Sectie 1.7 hieronder).

Voor het uitbreiden van GRADE met de Overijsselse Vecht moeten activiteiten worden uitgevoerd die zich vooral focussen op de neerslag en stroming bovenstrooms van de Duits-Nederlandse grens (of althans bovenstrooms van de bovenrand van het Vecht-IJsseldelta model):

- De neerslaggenerator (NG) moet worden uitgebreid voor het gehele stroomgebied van deze rivier. Dat stroomgebied ligt grotendeels in Duitsland. Voor het uitbreiden van de neerslaggenerator dienen de benodigde (gemeten) neerslag, temperatuur en eventueel ook historische verdampingsgegevens beschikbaar te worden gemaakt. Dit kan op drie manieren: (1) Op een passieve wijze, dat wil zeggen op basis van een al bestaande NG-simulatie voor een aangrenzend stroomgebied, of (2) door een actieve simulatie van het

totale stroomgebied (inclusief Rijn en Maas) waarin dit extra stroomgebied is opgenomen, en (3) op een actieve manier maar zonder invloed van het aangrenzende stroomgebied (vergelijkbaar met het verschil in de NG-simulaties zoals nu voor de Rijn en de Maas worden uitgevoerd).

- De hydrologische en hydraulische modellen van de Vecht moeten in GRADE worden opgenomen. Waar deze modellen nog niet bestaan dienen deze te worden opgezet, gekalibreerd en gevalideerd. Behalve voor GRADE zouden deze modellen vervolgens ook gebruikt kunnen worden in het operationeel voorspellingsstelsel (RWSoS) ten behoeve van de afvoervoorspellingen.
- De in GRADE opgezette onzekerheidsanalyses voor de Rijn en de Maas dient (desgewenst) op eenzelfde wijze voor de Vecht te worden uitgevoerd om ook hier betere schattingen voor de onzekerheid in frequentielijnen en golfvormen te verkrijgen.

1.2 Uitbreiding GRADE voor zijdelingse instroom

Naast de Overijsselse Vecht als een derde belangrijkste rivier in Nederland zijn er nog andere zijrivieren die een niet-verwaarloosbaar effect hebben op de waterstanden in het Nederlandse rivieren gebied. Voor het Maasgebied zijn bijvoorbeeld de Niers en de Roer van belang. Ook hiervan liggen de stroomgebieden grotendeels in Duitsland. Conform de motivatie en meerwaarde die hierboven voor de Vecht zijn gegeven zouden ook voor deze (zij-)rivieren de afvoerstatistieken met GRADE afgeleid en/of verbeterd kunnen worden. Om dit te realiseren moeten gelijksoortige werkzaamheden worden uitgevoerd als die in de vorige sectie zijn genoemd (uitbreiding neerslaggenerator, en opzet van de hydrologische en hydraulische modellen in GRADE). Gezien de sterke link tussen deze en de vorige activiteit (Overijsselse Vecht) worden deze twee activiteiten idealiter gelijktijdig opgepakt.

1.3 Coïncidenties

1.3.1 Coïncidentie Rijn/Maas

De term coïncidentie heeft betrekking op het gelijktijdig optreden van twee of meerdere gebeurtenissen. Binnen GRADE, maar ook meer algemeen in het kader van waterveiligheid in Nederland, moet bij coïncidentie in het bijzonder worden gedacht aan het gelijktijdig optreden van hoge afvoeren op zowel de Maas als de Rijn. Op dit moment worden in GRADE lange termijn simulaties voor deze rivieren ontkoppeld uitgevoerd. Correlaties in de tijd (en dus bijvoorbeeld kansen en tijdsduren ten aanzien van het gelijktijdig optreden van extreme events in beide rivieren) kunnen hierna niet worden afgeleid. Om wel kwantitatieve en methodologisch onderbouwde schattingen en uitspraken te kunnen doen over Rijn/Maas coïncidenties moet GRADE verder ontwikkeld worden.

De meerwaarde van GRADE is dan dat solide kwantitatieve schattingen voor willekeurige kentallen ten aanzien van de Rijn/Maas coïncidenties kunnen worden bepaald. Als invoer voor een toekomstige WTI-ronde kan dat dan bijvoorbeeld een veel zuiverdere schatting voor de correlatie tussen (gelijktijdige extreme) Rijn en Maasafvoeren opleveren. Dat geeft in een volgende toetsronde vervolgens verbeterde schattingen van faalkansen voor de betreffende benedenstroomse rivierengebieden. Daarnaast kunnen de met GRADE berekende simultane afvoergolven van de Maas (Borgharen) en de Rijn (Lobith) als randvoorwaarde in waterbewegingsmodellen van die benedenrivieren (al dan niet tot aan de zeeranden) worden gebruikt ten behoeve van willekeurige andere gedetailleerde (scenario-, effect-, ontwerp-, optimalisatie-, etc.) analyses voor de benedenrivieren. In het verlengde van Sectie 1.6

(Laagwater, zie hieronder) is dat niet alleen mogelijk voor hoge afvoercondities maar eventueel ook voor extreme droogtecondities.

Voor het in het GRADE incorporeren van Rijn/Maas coïncidenties moeten de volgende stappen worden gezet:

- De neerslaggeneratoren (NG) van Rijn en Maas dienen samengevoegd te worden tot één systeem. Methodisch is dit zonder meer mogelijk echter het vereist ook een gemeenschappelijke periode voor de historische neerslag en temperatuurdata die de basis voor zo'n gemeenschappelijk NG vormt. Nu hebben de NG's voor de Rijn en de Maas hun eigen basis periode. Het idee van een gemeenschappelijke NG is weliswaar eenvoudig maar aan de uitvoering zitten toch nog wel wat haken en ogen, en het zou nuttig zijn om eerst de mogelijkheden en beperkingen preciezer in kaart te brengen.
- De hydrologische en hydraulische modellen van de stroomgebieden kunnen echter nog steeds als twee losse systemen worden beschouwd, en worden gebruikt zoals dat nu het geval is.
- Een nadere inventarisatie dient plaats te vinden naar welke Rijn/Maas coïncidentiekentallen met GRADE geïdentificeerd moeten kunnen worden en welke additionele ontwikkelingen dat met zich mee kunnen brengen.
- Voor zover van belang moet ook worden nagegaan hoe, en in welke mate, de nu gangbare onzekerheidsanalyses aangepast moeten worden om ook onzekerheden in die coïncidenties af te kunnen leiden.

1.3.2 Coïncidentie Rivier/Zee

Behalve het gelijktijdig optreden van (extreem hoge of lage) Maas en Rijn afvoeren kunnen coïncidenties ook betrekking hebben op gelijktijdige events van enerzijds hoge afvoeren in Lobith en/of Borgharen, en anderzijds hoge waterstanden aan de kust (hoge stormopzet in de mondingen van de rivieren) of hoge meerpeilen (zoals bijvoorbeeld in IJsselmeer). Met name in getij gedomineerde delen van het benedenrivierengebied (zoals in het Noordelijk Deltabekken) kunnen dit soort coïncidenties een wezenlijke additionele 'impact' op extreme waterstanden en/of afvoeren hebben.

Voor de meerwaarde van het onderbrengen van Rivier/Zee-coïncidenties in GRADE kunnen dezelfde aspecten en motivatie worden gegeven als in de vorige sectie t.a.v. de Maas/Rijn coïncidenties. Ook hier ligt die meerwaarde in de representatie van het systeemgedrag in het gehele benedenstroomse rivierengebied.

Voor het in GRADE kunnen verrekenen van rivier/zee coïncidenties moeten de volgende stappen worden gezet.

- Vaststellen of correlaties van opzetten op zee en hoge afvoeren dermate groot zijn (of althans een niet te verwaarlozen invloed hebben op de kansen van optreden) dat het lonend is om daadwerkelijk zee/rivier coïncidenties in GRADE onder te brengen. In het verleden zijn studies naar die correlatie uitgevoerd, en als eerste stap dient hier een evaluatie van de uitkomsten plaats te vinden. De hierna volgende stappen zijn vervolgens alleen aan de orde als blijkt dat hoge afvoeren en zeewaterstanden inderdaad in voldoende grote mate zijn gecorreleerd.

- Voor een GRADE-systeem dat uitspraken kan doen over coïncidenties van hoge afvoeren en hoge zeewaterstanden/meerpeilen lijkt in eerste instantie de huidige GRADE-methodologie minder geschikt. In nader detail moet nog worden vastgesteld hoe het in de tijd kunnen samenvallen van enerzijds hoge afvoeren, en hoge zeewaterstanden (of meerpeilen) anderzijds, in rekening wordt gebracht. Een voor de hand liggende mogelijkheid is een uitbreiding van de NG-procedure door zeewaterstanden (of meerpeilen) mee te sampelen met de resampling van neerslag en temperatuur¹.
- Idealiter worden daarbij ook de hydraulische modellen van de Rijn en de Maas uitgebreid, zodat deze doorlopen tot in het door getij gedomineerde gebied. Op deze manier kunnen afvoergolven die bij Lobith en Borgharen het land binnen komen, op een consistente wijze worden gepropageerd naar afvoergolven in het getij gedomineerde deel van de rivieren, en kan het samenvallen van hoogwater vanuit de rivieren met hoogwater door getij worden gemodelleerd en geanalyseerd.

1.4 Onzekerheden ten gevolge van overstromingen in de Rijn

Een belangrijk voordeel van GRADE voor het berekenen van frequentielijnen van afvoeren is dat expliciet rekening kan worden gehouden met bovenstroomse overstromingen bij zeer extreme afvoeren. Uit de analyses van het GRADE systeem voor de Rijn is gebleken dat overstromingen van dijken in het Duitse gedeelte (Bovenrijn tussen Maxau en Kaub, en Benedenrijn tussen Keulen en Lobith) grote effecten op de afvoer van Lobith kunnen hebben. Binnen GRADE is vervolgens onderzocht wat de gevoeligheid in de uitkomsten van het model is voor de keuze van de overstromingsparameters. Dit is gedaan door een beperkt aantal berekeningen uit te voeren met variaties van overstromingsparameters (dijkhoogten, bresbreedtes, retentievolumes, initiële waterstanden achter de dijk, etc.) in het overstromingsmodel. Aan deze parametervariaties waren nog geen kansen of kansverdelingen toegekend, en in de GRADE-onzekerheidsanalyse zijn onzekerheden in het overstromingsmodel nog niet in rekening gebracht. Vanwege enerzijds de waarschijnlijk relatief grote onzekerheid in overstromingsparameters, en anderzijds het grote effect van overstromingen, zijn derhalve onderschattingen gevonden voor de onzekerheid in de frequentielijn. Het is echter niet duidelijk hoe groot die onderschattingen zijn. Het doel van deze stap is om onzekerheden in de overstromingsmodellering alsnog in het GRADE traject op te nemen.

Hierbij wordt nog opgemerkt dat in 2014/2015 in het kader van het KPP-project "Transnationale Samenwerking" door WvL en Deltares wordt gewerkt aan het opzetten van een overstromingsmodelleringsproject voor NordRhein-Westfalen. Nagegaan moet worden of de potentiële uitkomsten van deze studie mede richting kunnen geven aan de hierboven beschreven onzekerheidsanalyse voor GRADE t.a.v. overstromingen in de Rijn.

De meerwaarde van de hier voorgestelde ontwikkeling bestaat uit verbeterde (kwantitatief onderbouwde) schattingen voor de onzekerheid in de afvoerfrequentielijn van Lobith.

¹ *Hoe dit gedaan moet worden, vergt wel het nodige onderzoek. Idealiter zouden niet slechts neerslag en temperatuur geresampled moeten worden maar de volledige weersystemen die zowel voor de wateropzet aan de kust als de neerslag (en temperatuur) in het stroomgebied verantwoordelijk zijn. Bij wateropzet gaat het om instantane extremen (weersituaties/weersystemen) en bij rivierafvoer om geaccumuleerde extremen (openvolging van weersystemen). Hierbij is het van belang dat de onderlinge afhankelijkheden goed mee worden genomen.*

Hiermee kan bovendien het relatieve belang van overstromingsonzekerheden (ten opzichte van de onzekerheden in het klimaat en de hydrologische modellen) worden vastgesteld.

Voor het in GRADE inbedden/afleiden van onzekerheden t.g.v. overstromingen zijn de volgende stappen voorzien:

- Selectie van relevante (en meest gevoelige) overstromingsparameters en het opstellen van kansen of kansverdelingen voor het kwantificeren van de onzekerheid in het overstromingsmodel.
- GRADE berekeningen voor een aantal selectief of random gekozen trekkingen uit die verdeling(en) van de overstromingsparameters. Deze GRADE berekeningen zijn in principe voor dezelfde 20.000 jaar (en i.h.b. met dezelfde synthetische neerslagreeksen) als waarmee tot nu toe de GRADE-onzekerheidsanalyse voor de Rijn is uitgevoerd. Dit omvat dan een serie nieuwe berekeningen met SOBEK+Flooding.
- De methode voor de GRADE onzekerheidsanalyse moet worden uitgebreid omdat nu naast onzekerheden in de neerslag en de hydrologische modellen, eveneens met onzekerheden in het hydrodynamische model rekening moet worden gehouden, en er dus drie bronnen van onzekerheid gecombineerd moeten worden.

1.5 Overstromingen in de Maas

In tegenstelling tot de Rijn is in het GRADE-systeem voor de Maas op dit moment geen modellering van overstromingen aanwezig. Hierdoor wordt geen rekening gehouden met beperkingen in de stroomvoerende capaciteit van de Maas, en/of inundaties die zich op een aantal plaatsen langs deze rivier kunnen voordoen. Meest uitgesproken geldt dit voor de regio Luik waar de fysisch maximale capaciteit wordt geschat op 4560 m³/s. Bij de met GRADE zonder overstromingen voor *Borgharen* afgeleide afvoerfrequentielijn komt die maximale afvoercapaciteit van 4560 m³/s overeen met een herhalingstijd van 20.000 jaar. Echter, bij deze hoge (maar ook bij de lagere) herhalingstijden is de onzekerheid in de frequentielijn dermate groot dat dat afvoermaximum ook met een veel lagere herhalingstijd al overschreden zou kunnen worden.

Behalve beperkingen in de afvoercapaciteit worden voor de Maas bij hoge afvoeren minstens zo sterke dempende effecten verwacht van de eveneens bij Luik zich aan beide zijden van de rivier bevindende mijnverzakkingsgebieden. Deze verzakkingsgebieden omvatten een oppervlakte van ongeveer 100 km² (Ogink, 2012: Design discharge and hydrograph computation for Meuse and Rhine rivers) met een grote potentie van onderlopen.

Ten aanzien van het modelleren en doorrekenen van deze overstromingen zijn reeds overleg (WvL en Universiteit van Luik) en acties gaande. Echter het daadwerkelijk opzetten van een nauwkeurig hydrodynamisch model (SOBEK) en inbedden in GRADE, en de analyse van de noodzaak hiervan, is nog niet van de grond gekomen. Gezien de impact die overstromen op frequentielijnen kan hebben (zoals met GRADE voor de Rijn al is gedemonstreerd) wordt hier aanbevolen om het modelleren van overstromingen in de Maas, en inbedden in GRADE, meer concreet uit te gaan voeren.

De meerwaarde van deze ontwikkeling voor GRADE bestaat uit een verbeterde frequentielijn voor extreme afvoeren van de Maas te Borgharen, en met name voor herhalingstijden waar bovenstroomse beperkingen in de afvoercapaciteit in werking treden. Behalve voor de frequentielijn 'an sich' geldt dat ook voor de schattingen voor diens onzekerheid en voor de golfvorm.

Op deze manier kunnen voor de Maas, net als nu voor de Rijn, berekeningen met en zonder overstromingen worden uitgevoerd, en de additionele effecten van overstromingen op afvoermaxima en onzekerheid éénduidig in beeld worden gebracht.

Met het in GRADE inbedden van overstromingen in de Maas zijn de volgende stappen en/of ontwikkelingen in de diverse componenten voorzien:

- Voor de neerslaggenerator lijken geen aanpassingen benodigd.
- In principe lijkt dat ook te gelden voor de hydrologische modellen, al moet nog wel nagegaan worden of met het toevoegen van de verzakkingsgebieden alsnog aanpassingen en/of uitbreidingen in de HBV-modellen moet plaatsvinden.
- De geometrische gegevens van de potentiële overstromingsgebieden moeten beschikbaar worden gemaakt en worden gebruikt in de uitbreiding van het hydrodynamische SOBEK model van de Maas. In het bijzonder moet het overstromingsmodel (varianten en instellingen van overstromingsparameters) worden opgezet.
- De onzekerheidsanalyse voor de Maas zal moeten worden uitgebreid en herhaald (nu namelijk voor het combineren van drie componenten met onzekerheid: neerslag, hydrologische model, en hydrodynamische model met overstroming).

1.6 Laagwater

GRADE is specifiek ontwikkeld voor (extreem) hoge afvoeren. De uitkomsten zijn daarmee vooral relevant voor analyses van veiligheid en risico's die geassocieerd zijn met hoogwaters. Echter, extreem lage afvoer condities kunnen in de praktijk eveneens tot aanzienlijke risico's en/of (economische of ecologische) schade leiden. Schadelijke 'events' die (voor de Maas en/of de Rijn) met zeer lage waterstanden gepaard gaan zijn bijvoorbeeld de stremming van de scheepvaart door geringe vaardieptes, benedenstroomse verzilting door te geringe doorspoeling, problemen met inname drinkwater, problemen met stijgende watertemperatuur (zoals het niet kunnen lozen van koelwater) en daarmee verbonden negatieve ecologische effecten, en landbouwschade doordat gewassen niet kunnen worden beregend.

Net zoals nu met GRADE frequenties van hoge(re) afvoeren kunnen worden berekend kan het instrumentarium geschikt worden gemaakt voor het nauwkeurig (re)produceren van frequentiekrommes en/of andere kentallen bij (extreem) lage afvoeren.

De meerwaarde van GRADE is dan dat het op deze manier op velerlei wijze *kwantitatieve* input kan geven voor allerlei (verdere berekeningen in) analyses en studies die met de voornoemde problematiek van doen hebben (verzilting, verdroging, inname drinkwater, etc.). Niet alleen is die input in de vorm van frequentiekrommes van extreem lage afvoeren, maar ook golfvormen en tijdsduren van lage afvoer events.

Voor het toepasbaar maken van GRADE voor lage afvoer condities moeten de volgende activiteiten worden uitgevoerd:

- Omdat GRADE specifiek is ontwikkeld voor hoogwatersituaties moet eerst een analyse worden uitgevoerd naar de kwaliteit van (de componenten in) GRADE voor lage afvoer condities. Zowel de prestaties van de neerslaggenerator als van de hydrologische modellen moeten geverifieerd worden voor lage neerslagintensiteit en lage afvoeren.
- Afhankelijk van de zo gevonden kwaliteit (bij lage afvoeren) moeten de onderliggende modellen worden aangepast, verbeterd, of zelfs vervangen.
- Bij het voorafgaand punt moet nog worden opgemerkt dat parallel aan GRADE er twee initiatieven lopen die potentieel belangrijke input kunnen leveren:
 1. Binnen het project rondom operationele voorspellingen voor de Rijn en Maas is er voor 2015 eveneens de intentie (van WvL en Deltares, in het kader van het project FEWS-Rivieren) om HBV en SOBEK modellen voor laagwater te optimaliseren.

2. Deltares en BfG hebben (met steun van WvL) in 2014 bij het EU onderzoeksprogramma HORIZON2020 een projectvoorstel "IMPRES" ingediend. Binnen dit voorstel is o.a. aandacht voor gedistribueerde hydrologische modellering voor de Rijn. Indien dit project doorgang vindt komen hier mogelijk ook bruikbare resultaten voor een laagwatermodellering binnen GRADE beschikbaar.
 - Ook moet nagegaan worden of, en welke mate, andere bij lage afvoeren relevante variabelen of indicatoren (zoals temperatuur, zout, waterkwaliteit of ecologische parameters) in de modellering meegenomen moeten worden.
 - In dat geval dienen nieuwe/andere modellen in GRADE te worden ingebouwd of ontwikkeld, bijvoorbeeld transportmodellen of temperatuurmodellen.
 - Onzekerheidsanalyse: Qua wiskundig algoritme en rekentechnieken kan waarschijnlijk de voor nu voor hoge afvoercondities gangbare opzet worden gevolgd, maar voor extreem lage afvoercondities moet nog in nader detail worden nagegaan welke (droogte)kennalen nu allemaal relevant zijn.

1.7 Een super GRADE

De diverse ontwikkelingen en verbeteringen die worden voorgesteld in Secties 1.1 en 1.2 (Overijsselse Vecht, en meenemen van zijdelingse instromen) en 1.3 (coïncidenties van extreme Rijn en Maas afvoeren, en eventueel eveneens het samenvallen van hoge rivierafvoeren met hoge waterstanden aan de kust) zouden ook gezamenlijk kunnen worden opgepakt. Met het combineren en verlengen van de modellen van de Rijn en de Maas tot aan de benedenstroomse mondingen ontstaat dan een uitgebreid GRADE instrument voor "heel" Nederland.

In eerste instantie is dat dan voor hoge afvoercondities. Echter door hierin ook de (eventuele) ontwikkelingen ten aanzien van laagwaters aan te laten grijpen (zie de vorige sectie) kan het instrument ook worden ingezet voor allerlei processen die specifiek met (extreem) lage afvoeren te maken hebben.

In zo'n "SuperGRADE" is dan "alles" aan elkaar gekoppeld, en kunnen met dit uitgebreide instrument diverse integrale analyses worden uitgevoerd. De vraag die hier wel gesteld moet worden is of de performance van een dergelijk model vergelijkbaar blijft met de performance van de losse componenten.

Hierbij moet tevens worden opgemerkt dat dit een inspanning van meerdere jaren zal vergen, en qua interesse vooral een ontwikkeling voor de lange(re) termijn is.

1.8 Doorontwikkeling hydrologische en hydraulische modellen binnen GRADE

Bij Deltares zijn ontwikkelingen gaande ten aanzien van "gridded" of "distributed" versies van hydrologische modellen. Het doel bij dergelijke "distributed" modellen is het verkrijgen van componenten die niet alleen onafhankelijk van elkaar kunnen worden ingezet maar ook flexibel onderling gekoppeld kunnen worden met gangbare/standaard procedures zoals OpenMI. Ten aanzien van het opzetten en runnen van gekoppelde modellen (b)lijkt dit diverse voordelen te bieden.

De vraag is of en wat deze voordelen eventueel voor GRADE te bieden hebben, al dan niet in relatie met (het efficiënter kunnen uitvoeren van) de diverse verdere ontwikkelingen die hierboven al zijn genoemd. Die perspectieven, maar ook eventuele nadelen en/of geschiktheid van "distributed" modellering voor GRADE zouden in nader detail moet worden vastgesteld.

2 Onderwerpen voor verdere GRADE toepassingen

Ontwikkelingen en toepassingen van GRADE zijn tot nu toe grotendeels gestuurd door een WTI vraagstelling. Het instrumentarium biedt in de huidige vorm echter meer functionaliteit en mogelijkheden voor analyses en andere toepassingen. In dit hoofdstuk worden een aantal onderwerpen genoemd waarvoor GRADE in theorie nu al ingezet kan worden, of waarvoor slechts kleine aanpassingen van het instrument nodig zijn.

2.1 GRADE scenarioanalyses

Met GRADE zijn in het verleden al scenariostudies uitgevoerd. Als voorbeeld daarvan kan het doorrekenen van de klimaatscenario's (KNMI06) worden gegeven. Behalve voor analyses van effecten van lange termijn klimaatwijzigingen op de afvoeren van grote rivieren zoals de Rijn, kan GRADE ook voor ander typen scenariostudies worden ingezet. Hiervoor wordt het volgende genoemd.

- Overstromingsscenario's voor de Rijn. Oorzaken en effecten van overstromingen kunnen zich op velerlei wijze manifesteren. Dat kan zijn in de vorm van overstromen van dijken in strikte zin, of dijkdoorbraken, variaties in de grootte van daarbij optredende bressen, bergingscapaciteit van de geïnundeerde gebieden, retourstromingen, etc. Ook ten aanzien van eventuele mitigerende maatregelen ten aanzien van overstromingen is er een grote variabiliteit.
Omdat overstromingen op de Rijn al gemodelleerd zijn kan GRADE heel goed als vehicle voor het doorrekenen van overstromingsscenario's worden gebruikt zolang met de bestaande overstromingsmodellering kan worden volstaan. Afgezien van het eigenlijke rekenen is dan het werk dan vooral bevat in het buiten GRADE om definiëren/ontwikkelen van een of meer te evalueren scenario's. Dit definiëren alleen al kan veel werk vergen omdat in de praktijk vele realistische overstromingsscenario's denkbaar zijn. Daarnaast is er het 'gevaar' dat voor bepaalde scenario's ook de overstromingsmodellering zou moeten worden aangepast. Dat moet dan in een ander kader dan GRADE worden gerealiseerd.
- Hydraulische scenario's. Hierbij moet gedacht worden aan de analyse van de effecten die teweeg worden gebracht door (toekomstige/voorzien) hydraulische maatregelen of andere ingrepen in het stroomgebied van de rivier. Voorbeelden van dergelijke maatregelen of ingrepen zijn: creëren van retentiegebieden, inrichting van uiterwaarden, verhogen van dijken, verdiepingen, of afvoerregulering in (zij)rivieren door de aanleg van kunstwerken zoals stuwen.
In eerste instantie kan met GRADE het effect van een ingreep in kwantitatieve vorm worden geïdentificeerd. Dat effect kan kwantitatief aan de hand van willekeurige indicatoren worden afgeleid (enkelvoudige of geaggregeerde kentallen afgeleid van de met GRADE berekende waterstanden en afvoeren). In tweede instantie kunnen op deze manier ook de effecten van verschillende maatregelen (of varianten binnen één maatregel) objectief met elkaar worden vergeleken en afgewogen tegen 'targets' of 'constraints'. Op deze manier kan GRADE zelfs voor optimalisatie van ingrepen van dienst zijn, en/of het afleiden van adequate mitigerende maatregelen.

- Landgebruik scenario's. Net zoals klimaatveranderingen kunnen ook veranderingen in landgebruik (inrichting van landbouw, natuur, bebouwing, etc.) en watergebruik diverse effecten uitoefenen op de stroming in grote rivieren. Ander landgebruik kan bijvoorbeeld tot wijzingen in de aanvoer van regenwater leiden. Effecten van een ander land en watergebruik beperken zich echter niet tot alleen de waterkwantiteit. Zij kunnen ook de verspreiding van stoffen (sediment, organische verontreinigingen, toxische substanties, zware metalen, etc.) beïnvloeden en daarmee de waterkwaliteit en de ecologische balans in het systeem. Voor het doorrekenen van (veranderingen in) land- en watergebruik, en desgewenst daarbij in *combinatie* met klimaatscenario's, biedt GRADE de gewenste mogelijkheden.

De meerwaarde van GRADE als vehicle voor scenarioanalyses conform bovenstaande voorbeelden is evident. Hierbij kan worden aangetekend dat dit in het bijzonder geldt vanwege de grens overschrijdende ruimteschalen die met veel processen (zoals klimaat en land- en watergebruik) zijn gemeoid en in GRADE zijn omvat.

In principe is de huidige versie van GRADE al zeer geschikt als drager voor dergelijke scenarioanalyses. Afhankelijk van het scenario moeten bepaalde componenten in het instrument in meer of mindere mate worden aangepast, of met een andere invoer worden aangestuurd. Zo grijpen klimaatscenario's aan op de neerslaggenerator en moeten conform de voorziene klimaatverandering nieuwe lange termijn neerslagreeksen gegenereerd worden. In de overige componenten van GRADE zijn dan geen aanpassingen nodig. Voor scenario's betreffende hydraulische systeemingenrepen zijn 'slechts' aanpassingen in het hydrodynamisch model noodzakelijk. Deze vergen maar een beperkte inspanning voor zover het eenvoudige ingrepen betreft zoals verhogingen/verlagingen van dijken, en/of invoegen van een 'standaard' kunstwerk. Bij hydraulische scenario's kunnen daarentegen zonder aanpassingen de huidige neerslagreeksen (dat wil zeggen voor het nu geldende weerklimaat) en hydrologische modellen worden ingezet. Echter, bij scenario-analyses waarbij ook transporten van stoffen in de rivier in het geding zijn (zoals bij lange termijn effecten van landgebruik of klimaatverandering op waterkwaliteit en ecologie) zijn aanpassingen en/of uitbreidingen meer substantieel. Dat is niet alleen, of zelfs niet zozeer, voor de hydraulica van de hoofdstroming maar ook op het niveau van sub-basins (infiltratie, veranderde bodems, etc.) waar zelfs in de HBV modellen mogelijk al ingrijpende aanpassingen moeten plaatsvinden.

2.2 Systeemkentalen en systeemrelaties

In de ontwikkeling en toepassingen van GRADE zijn voor WTI qua tijd- en ruimteschalen omvangrijke berekeningen uitgevoerd. In de ruimte betreft dat een over alle (sub)basins gedistribueerde waterbalans. In de tijd betreft dat zeer lange tijdperiodes (20.000 tot 50.000 jaar) met daarin een groot aantal mogelijke variaties van het weer (regenval, temperatuur, evaporatie) en de daaruit volgende afvoerreeksen. Van de diverse modelsimulaties is uiteindelijk maar een zeer beperkt deel gebruikt, namelijk afvoerfrequentielijnen aan de benedenstroomse randen Lobith (Rijn) en Borgharen (Maas). Aan de grote hoeveelheid *data* die in deze simulaties is geproduceerd (en an sich nog beschikbaar is) kan naar verwachting nog veel andere belangrijke *informatie* worden onttrokken. Dat kunnen bijvoorbeeld frequentielijnen voor andere locaties langs de rivieren zijn.

Maar veel meer algemeen moet worden gedacht aan systeemrelaties en statistische kentallen waarmee (kwalitatief of kwantitatief) belangrijke eigenschappen van - en afhankelijkheden in - de onderliggende fysische processen gekarakteriseerd worden. Dat zijn bijvoorbeeld:

- Mate en tijdsverloop waarmee de diverse (sub)basins aan afvoerevents op de hoofdrivier bijdragen.
- Looptijden en duur van afvoergolven langs de rivier.
- Spatiële en temporele correlaties tussen afvoeren van individuele basins
- Afhankelijkheden en correlaties van afvoerevents (of kentallen daarvan zoals grootte, duur, breedte, of nog andere vormparameters) met (kentallen van) de spatio-temporele verdeling van regenval.
- Statistische verdelingen en correlaties van kentallen.
- Tijdsverschuivingen tussen regenval en afvoer events.
- Seizoenafhankelijkheden.
- Geheugeneffecten.
- Pre-event histories. Hierbij is het idee om de aan bepaalde events (bijvoorbeeld een afvoermaximum groter dan een bepaalde waarde) voorafgaand geschiedenissen van neerslag en/of afvoeren van andere locaties te verzamelen. Door een multivariate analyse van zo'n ensemble van pre-event histories kunnen de bepalende actoren of systeemcondities worden afgeleid die als een trigger voor dat event optreden.
- Multivariate patronen of klassen in de regenval-afvoer data.
- Etc.

De meerwaarde van de uitkomsten van zo'n onderzoek bestaat uit een vergroot inzicht in het systeemgedrag, en inzicht in correlaties van - en afhankelijkheden in - de onderliggende fysische processen, en importantie van subsystemen. De resultaten kunnen vervolgens richting geven aan verbeteringen, en toekomstige verdere ontwikkelingen, en verdere toepassingen van het systeem.

Het aldus afleiden van informatie uit de data vergt het toepassen van allerlei soorten "data mining" technieken. Dat omvat een heel scala van eenvoudige empirische methoden (statische kentallen, correlaties), tot multivariate technieken (regressieanalyses of andere data georiënteerde modelleringen, cluster of classificatie technieken, patroonherkenning, etc.).

In principe kan deze data mining worden toegepast op de uitkomsten van al uitgevoerde GRADE berekeningen voor de Rijn en Maas. Er hoeven dan ook geen additionele GRADE-ontwikkelingen of aanpassingen te worden gemaakt. Het werk kan onder begeleiding in het kader van een afstudeeropdracht worden uitgevoerd.

3 Samenvatting

In onderstaande tabel zijn de in het vorige hoofdstuk voorgedragen onderwerpen ten aanzien van verdere ontwikkelingen en verdere toepassingen van GRADE puntsgewijs op een rij gezet. Dat is gedaan in een volgorde van importantie die aan deze onderwerpen kan worden toegekend (van “must have” tot “nice to have”). Dat belang is ontleend aan de urgentie of zelfs een noodzaak die op dit moment door ons wordt voorzien om een betreffende ontwikkeling te realiseren:

- Enerzijds is dat op basis van de ervaringen die in het kader van – en in discussies met - WTI 2017 zijn opgedaan bij het aldaar voordragen van de met GRADE berekende afvoerfrequentielijnen en afvoergolfvormen voor de Maas en de Rijn, en de daarbij afgeleide onzekerheden.
- Anderzijds is dat vanuit het oogpunt van het verder benutten en exploiteren van de grote potentie die GRADE (nu al) biedt voor veel andere belangrijke praktische toepassingen dan alleen statistiek van extreme afvoeren. Bij veel van de in het vorige hoofdstuk genoemde onderwerpen biedt GRADE het geëigende platform om die andere toepassingen of analyses te “lanceren”.
- Hierbij moet ook nog worden opgemerkt dat bij de ranking in zekere mate ook rekening is gehouden met de inspanning die gemoeid zal zijn met de diverse voorgestelde ontwikkelingen. Een raming van die inspanning wordt hier niet gegeven. Veel van de ontwikkelingen zijn namelijk qua omvang en complexiteit dermate omvangrijk dat daarvoor eerst een meer gedetailleerde analyse of verkenning zou moeten worden uitgevoerd naar het geheel van vereisten, en daarmee gemoeide werkzaamheden, en het eventuele tijdpad. Daarbij zou ook rekening moeten worden gehouden met het feit dat diverse activiteiten wederzijds gekoppeld zijn, en/of op elkaar voortbouwen.

In de tabel zijn, waar mogelijk of relevant, dit soort issues derhalve meer kwalitatief verwerkt via pro’s (pluspunten) en con’s (minpunten) scores.

Tabel 3.1 Samenvatting en ranking van voorgedragen GRADE ontwikkelingen en verdere toepassingen, met daarbij enige pro’s en con’s.

	Verdere ontwikkelingen GRADE	Pro’s en Con’s
1	Onzekerheden overstromingen Rijn	Pro’s: Verbeterde schatting voor de onzekerheid in de afvoerstatistiek voor de Rijn. In het bijzonder wordt hiermee tegemoet gekomen aan discussies die binnen WTI-kader hebben plaatsgevonden t.a.v. de vorm en de breedte van de onzekerheid in de huidige GRADE gebaseerde werklijn voor Lobith (met overstromingen, en daar later dijkverhogingen van 50 cm in het Duitse gedeelte van de Rijn aan toegevoegd voor het verkrijgen van een meer conservatieve variant). Con’s: De huidige GRADE onzekerheidsanalyse moet worden uitgebreid omdat nu drie i.p.v. twee bronnen van onzekerheid gecombineerd moeten worden.
2	Overstromingen in de Maas	Pro’s: Verbeterde statistiek voor extreme Maasafvoeren omdat dan (naar verwachting wezenlijke) effecten van bovenstroomse stroombeperkingen en/of overstromingen

		<p>ook in rekening gebracht worden. Bij herhalingstijden vanaf ongeveer 10.000 jaar zal dan bovendien de breedte van de onzekerheidsband afnemen. Dit zou tegelijkertijd een oplossing kunnen bieden voor het 'probleem' dat de breedte van de huidige band rondom de frequentielijn als (te) wijd wordt ervaren (WTI, ENW).</p> <p>Con's: Het SOBEK-model voor de Maas moet worden uitgebreid, en mogelijk via kalibratie (aan de uitkomsten van een 2D model) verder worden aangepast. Het kan nog enige moeite kosten om de hierbij vereiste bovenstroomse geometrische/hoogte gegevens beschikbaar te krijgen.</p> <p>Pro's: De ervaring en functionaliteit die bij het modelleren en toepassen van overstromingen in de Rijn is verworven faciliteert de efficiëntie om dit nu ook voor de Maas te gaan doen.</p>
3	Coïncidentie Rijn/Maas	<p>Pro's: Een uniform en voor de Maas en Rijn consistent GRADE instrument t.a.v. gelijktijdige hoge afvoer events biedt daarmee de randvoorwaarden voor het (in eerste instantie met andere modellen) doorrekenen van de effecten van die simultane Rijn/Maas-events in het benedenrivierengebied.</p> <p>Con's: Aanpassingen van de neerslaggenerator (NG) die nu het gezamenlijke stroomgebied van beide rivieren moet omvatten (al dan niet uitgebreid met dat voor de Overijsselse Vecht, zie 4). Nieuwe lange termijn neerslagreeksen moeten gegenereerd worden. Het aantal basisjaren met historische neerslagmetingen dat daarin voor resampling kan worden gebruikt is lager dan die nu voor de afzonderlijke rivieren, en dus minder representatief voor huidige klimaat. Als gevolg kan de kwaliteit van de statistiek van de daarmee gezamenlijk berekende extreme afvoeren van Rijn en Maas ook minder zijn dan die nu afzonderlijk wordt gevonden.</p>
4	GRADE Overijsselse Vecht	<p>Pro's: Conform Maas en Rijn aanzienlijk verbeterde statistiek voor extreme afvoeren in de Overijssel Vecht en diens delta.</p> <p>Con's. Een aanzienlijke inspanning aangezien in principe het hele GRADE traject, zoals nu doorlopen voor de Rijn en Maas, nu voor de Vecht moet gaan worden ingericht. In het bijzonder omvat dat het beschikbaar maken van historische regenvaldata in het bovenstroomse basin(s), en het opzetten en kalibreren (of GLUE analyses) van de hydrologische HBV- en hydraulische SOBEK-modellen.</p>
5	Zijdelingse Instromingen	<p>Hier gelden eerdere pro's en con's als hierboven genoemd voor de Overijsselse Vecht. Een verschil is dat in dit geval niet zozeer een nieuw GRADE systeem moet worden opgezet dan wel aanpassingen van die van de Maas of Rijn, en daarbij op locaties waar die zijdelingse instromingen plaats vinden. Deze lijken minder ingrijpend of substantieel te zijn.</p>

6	Laagwater	<p>Pro's: Beschikbaarheid van een instrument dat de bovenstroomse randvoorwaarden kan leveren voor allerlei praktijktoepassingen, analyses (statistische, scenario, gevoeligheid, etc.) of andere studies die van doen hebben met extreem lage afvoeren in het gehele Nederlandse riviereengebied. In eerste instantie is dat t.a.v. waterkwantiteit, maar andere bij droogte belangrijke toestandsvariabelen kunnen hierbij worden meegenomen.</p> <p>Con's: Zelfs bij het beperken tot enkel waterkwantiteit moeten alle GRADE-componenten gevalideerd, en zeer waarschijnlijk aanzienlijk verbeterd worden t.a.v. hun performance onder lage afvoercondities. Uitbreidingen met andere toestandsvariabelen (zout, temperatuur, etc.) vereisen nog veel meer inspanning.</p> <p>Pro: In andere kaders zijn er initiatieven t.a.v. laagwatermodellering in de Rijn en Maas. Uitkomsten daarvan kunnen belangrijke input voor GRADE bieden.</p>
7	Coïncidentie Rivier/Zee	<p>Pro's: Voor het benedenriviereengebied kan hiermee de interactie tussen - en daaruit volgende effecten van - gelijktijdige extreme afvoeren en extreme zeewaterstanden consistent en kwantitatief worden weergegeven</p> <p>Con's. Er lijkt nog erg veel onderzoek en ontwikkeling nodig hoe (en òf) dit type coïncidenties te implementeren. Bovendien is het nog de vraag of extreme afvoeren en zeewaterstanden voldoende zijn gecorreleerd om zo'n implementatie überhaupt lonend te maken. Daarnaast is nog allerm minst duidelijk hoe de huidige NG-procedure met extreme zeewaterstanden (of meerpeilen) uit te breiden. Ook zou voor het in GRADE optimaal benutten van correlaties de hydraulische modellen van de rivieren tot aan de monding moeten worden voortgezet.</p>
8	Een SuperGRADE	<p>Pro: Een GRADE waarin een of meerdere van de voorafgaand genoemde ontwikkelingen zouden zijn ondergebracht (met in het bijzonder een verlenging van de hydraulische modellering tot aan de mondingen van Rijn en Maas) biedt een geïntegreerd instrument voor heel Nederland. Dit instrument vormt dan een solide basis of zelfs standaard, voor enerzijds allerlei uitbreidingen en nieuwe ontwikkelingen, en anderzijds voor allerlei praktijktoepassingen, studies, en/of integrale analyses die te maken hebben met de waterhuishouding (kwantiteit en eventueel kwaliteit) in het gehele Nederlandse riviereengebied.</p> <p>Con's: De realisatie en inzetbaarheid hangt sterk af van die de status waarmee de bovenstaande ontwikkelingen (geleidelijk) al dan niet beschikbaar komen. Het geheel omvat derhalve een gefaseerde, en langdurige en ook kostbare ontwikkeling.</p>
9	Doorontwikkeling hydrologische en	<p>Pro's: Eventuele versnelling van de rekenprocessen en betere/flexibelere architectuur voor koppelingen en</p>

	hydraulische modellen	uitbreidingen. Con's: Nog zeer onduidelijk wat de te verwachten perspectieven zijn, en of die met redelijke inspanning zijn te realiseren. Ook onduidelijk of dergelijke doorontwikkelingen in functioneel opzicht een meerwaarde aan GRADE zullen bieden.
	Verdere GRADE toepassingen	
1	Systeemrelaties	Pro's: Met relatief weinig inspanning kan veel additioneel inzicht worden verkregen in - en kwantitatieve informatie over - het systeemgedrag, en karakteristieken van de spatieel/temporele propagatie van extreme afvoeren over het gehele stroomgebied van de Rijn en Maas.
2	Scenarioanalyses	Pro's: Benutten en verder exploiteren van (de grote potentie van) GRADE als drager voor het doorrekenen van vele variaties/varianten binnen klimaatveranderingen, systeemingrepen, of andere ensemble berekeningen zoals bij gevoeligheids- en/of onzekerheidsanalyses. In het bijzonder kan GRADE van dienst zijn voor het optimaliseren van ingrepen, en/of het afleiden van mitigerende maatregelen. Con's: Voor dergelijke scenarioberekeningen zal in veel gevallen additionele functionaliteit vereist zijn die in welk kader dan nog gerealiseerd zal moeten worden.