

Aanvullende berekeningen

Trajectnota/MER Zandmaas/Maasroute

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	3
1.1. Achtergronden aanvullende berekeningen.....	3
1.2. Te beantwoorden vragen.....	4
2. Aanpak en uitgangspunten.....	5
2.1 Modelkeuze.....	5
2.1.1. Overwegingen.....	5
2.1.2. Modelontwikkelingen.....	6
2.1.3. Modelkeuze.....	7
2.2 Aanpak aanvullende berekeningen.....	8
2.3. Uitgangspunten en aannamen.....	9
2.4. Uitgevoerde modelberekeningen.....	12
3. Schematisatieproces en uitgevoerde controles.....	14
3.1. Schematisatieproces.....	14
3.2. Uitgevoerde controles.....	15
4. IJking en Verificatie.....	16
4.1. IJking van WAQUA op de referentiesituatie.....	16
4.1.1. Inleiding.....	16
4.1.2. Inregelen van het WAQUA_model.....	16
4.1.3. Inregelen ruwheid zomerbed.....	17
4.1.4. IJking winterbed en inregelen ruwheid.....	19
4.1.5. Traject Eijsden-Borgharen.....	22
4.1.6. Conclusie.....	22
4.2. Verificatie van WAQUA op grond van situatie 1993.....	23
4.2.1. Verificatie WAQUA-model.....	23
4.2.2. Conclusie.....	24

5. Opstuwend effect door DGR-kaden	24
5.1. Opstuwend effect bij een afvoergolf van 1/50.	24
5.2. Opstuwend effect bij een afvoergolf van 1/250.	25
5.3. Conclusies.	26
6. Veiligheid van de referentiesituatie.	27
6.1. Toetsing van de referentiesituatie aan verhanglijn 2.	27
6.2. Veiligheid van de omkade gebieden.	27
6.3. Conclusies.	28
7. Toetsing inrichtingsalternatieven.	28
7.1. Hoogwaterbescherming Zandmaas (TN/MER)	28
7.2. Vergelijking van de alternatieven.	31
7.3. Conclusies.	33
8. Benedenstroomse effecten.	34
8.1. Inrichtingsalternatieven.	34
8.2. Varianten op het Combinatiealternatief: verhoogde kades.	36
8.3. Conclusies.	37
9. Kwaliteitstoets.	38
10. Bespreking resultaten.	38
11. Conclusies.	42

Bijlagen

1. Beschrijving alternatieven
2. Gemaakte aannamen
3. Uitgevoerde controles
4. Overzicht uitgevoerde berekeningen
5. Kwaliteitstoets schematisaties WAQUA

1. INLEIDING

1.1. Achtergronden aanvullende berekeningen

Op 5 februari 1999 is de Trajectnota/MER Zandmaas/Maasroute ter inzage gelegd. In de trajectstudie Zandmaas/Maasroute worden maatregelen uitgewerkt, die enerzijds leiden tot verlaging van de hoogwaterstanden op de Maas bij hoge afvoeren (conform het advies van de Commissie Watersnood Maas, de zogenaamde Commissie Boertien II) en anderzijds leiden tot een verbetering van de vaarroute (veiligheid, vlotheid en vaarwegcapaciteit voor de scheepvaart). Daarnaast wordt "beperkte natuurontwikkeling" nagestreefd, dat wil zeggen een versterking van de functie van de Maas binnen het landelijk en internationaal samenhangend netwerk van natuurgebieden, de zogenaamde Ecologische Hoofdstructuur.

In het project staat het bereiken van een gewenst veiligheidsniveau tegen overstromingen voorop. Dit kan kort worden samengevat als het bereiken van een bescherming van 1/250 achter de kades (een gemiddelde overstromingskans van eenmaal in de twee honderd vijftig jaar).

De na de overstroming van 1995 aangelegde kades zijn ontworpen op een beschermingsniveau van 1/50. Het bij deze overschrijdingsfrequentie behorende waterstandsniveau is de zogenaamde verhanglijn 2. Voor het berekenen van deze waterstanden is gebruik gemaakt van het eendimensionale waterbewegingsmodel ZWENDL. De kaden zijn zodanig gedimensioneerd dat zij t.o.v. deze lijn een overhoogte hebben van 0,50m. Deze zgn. 'waakhoogte' is conform de afspraken bij dijken en is opgebouwd uit een drietal onderdelen:

- onzekerheden in de berekeningsresultaten
- effecten van golfoploop
- berijdbaar houden van de kruin bij hoge waterstanden

Om het veiligheidsniveau van 1/250 te bereiken in de omkade gebieden zijn in het MER rapport vier alternatieven uitgewerkt:

BA1	Basisalternatief 1 zomerbedverdieping
BA2	Basisalternatief 2 zomerbedverbreding
MMA	Meest Milieuvriendelijk Alternatief zomerbedverbreding in combinatie met natuurontwikkeling
CA	Combinatie Alternatief zomerbedverdieping in combinatie met natuurontwikkeling

Een beknopte beschrijving van deze alternatieven is gegeven in bijlage 1

Op 14 mei 1999 is door de Commissie voor de milieueffectrapportage (m.e.r.) een toetsingsadvies uitgebracht. De belangrijkste conclusie uit dit toetsingsadvies is dat de Commissie op één punt ook voorafgaand aan de standpuntbepaling op hoofdlijnen nog aanvullende informatie noodzakelijk acht. Dit betreft het beperken van de onzekerheidsmarge van de waterstandsvoorspelling door berekeningen uit te voeren met meerdere modellen. Tot dan toe was gerekend met het destijds ook door de Commissie Boertien gebruikte model ZWENDL, dat een onzekerheidsmarge had van ca. 0,5 m, terwijl het beoogd effect van de maatregelen een verlaging van hoogwaterstanden betreft van 0,5 tot 0,8m. Bovendien wees de Commissie m.e.r. er op dat door het aanleggen van de kaden het waterbergend vermogen van het winterbed van de Maas is verminderd, waardoor opstuwingeffecten kunnen optreden, die door het model mogelijk zouden kunnen worden onderschat. Om er zeker van te zijn dat de hoogwaterdoelstelling van 1:250 achter de kaden wordt gehaald acht zij uitkomsten van controleberekeningen noodzakelijk alvorens tot een standpuntbepaling te komen. Op grond hiervan zal zij een aanvulling op het toetsingsadvies uitbrengen. In het genoemde toetsingsadvies is dit als volgt verwoord:

- De Commissie adviseert zo spoedig mogelijk met SOBEK en WAQUA controlerende hoogwaterberekeningen uit te voeren voorafgaand aan de standpuntbepaling op hoofdlijnen. Tevens moet worden aangegeven welke gevolgen dit eventueel heeft voor de in beschouwing te nemen alternatieven uit de Trajectnota/MER en de onderlinge verschillen ertussen op het gebied van de milieugevolgen.

Het voorliggende rapport gaat alleen in op de aanvullende berekeningen voor het verkrijgen van zo betrouwbaar mogelijke informatie over de effecten van de voorgenomen ingrepen op de waterstandsverlagingen de te bereiken veiligheidsniveaus. Voor de consequenties op het gebied van milieugevolgen wordt verwezen naar het betreffende rapport.

Als alternatief voor het model ZWENDL is gekozen voor het tweedimensionale waterbewegingsmodel WAQUA. Met dit model bestaat binnen Rijkswaterstaat reeds jarenlange ervaring. Evenwel voor het dynamisch doorrekenen van een complete rivier duurden tot nu toe de berekeningen te lang (1 berekening per week !). Evenwel recente computerontwikkelingen maken dit nu mogelijk: het parallel rekenen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van supercomputers met diverse parallelle processoren, waardoor vele bewerkingen tegelijkertijd kunnen plaatsvinden. Dit betekent dat de berekeningen tientallen malen sneller kunnen worden uitgevoerd dan tot nu toe mogelijk was.

Hoewel voor rivieren nog geen ervaring beschikbaar was met dergelijke berekeningen, is toch voor dit model gekozen. Immers alleen met een tweedimensionaal model is het mogelijk de bodemtopografie voldoende gedetailleerd in het model weer te geven. Dit met name ook vanwege het goed kunnen weergeven van verschijnselen als topvervlakking van de hoogwatergolf. De berekeningen hebben een voorspoedig verloop gehad en de resultaten worden in dit rapport gepresenteerd. Meer gegevens over het WAQUA model staan vermeld in hoofdstuk 3.

Onderzoek naar de rivierafvoer heeft de afgelopen jaren o.a. geresulteerd in meer inzicht in de topafvoeren. Met name is gebruik gemaakt van verbeterde Q-h relaties. Uiteindelijk hebben deze onderzoeken geleid tot iets lagere topafvoeren bij bepaalde frequentieniveaus. Zo geldt voor de Maas bij Borgharen bijvoorbeeld voor de 1/1250 golf bijvoorbeeld nu een topafvoer van 3800 m³/s in plaats van 3935 m³/s.

Uit vergelijking van overstromingssituaties van 1993 en 1995 blijkt dat ook de vorm van de afvoergolf een belangrijke grootheid is. Was het debiet bij Borgharen in 1995 lager dan in 1993, de waterstanden bij Venlo bleken in 1995 hoger te zijn dan in 1993. Dit werd veroorzaakt door de vorm van de afvoergolf, die 1995 een veel langere duur had. Deze ervaringen hebben geleid tot een nieuwe bredere golfvorm, die ook gehanteerd zal worden bij de berekeningen van de maatgevende hoogwaterstanden (MHW's), welke op grond van de Wet op de Waterkering eenmaal per vijf jaar worden vastgesteld (eerstkomende keer in 2001).

Vanzelfsprekend zijn in de aanvullende berekeningen de nieuwste inzichten m.b.t. topafvoer en golfvorm meegenomen. Wel moet bedacht worden dat hiermee de vergelijking tussen de oude berekeningen met ZWENDL en de nieuwe berekeningen met WAQUA iets geheel anders geworden is dan het vergelijken van uitkomsten uit twee modellen. Ook de bodemschematisatie in de WAQUA modellen overeenkomstig de meest recente uit metingen verkregen gegevens (bijvoorbeeld van de kaden), terwijl die in ZWENDL gebaseerd waren op zo goed mogelijk verkregen expert judgment.

Dit rapport geeft een overzicht van de uitgevoerde modelberekeningen voor zowel de referentiesituatie als de voorgestelde alternatieven. Speciale aandacht zal besteed worden aan de uitgangspunten en gedane aannames, de wijze waarop de rivier in het model is geschematiseerd, welke kwaliteitscontroles zijn uitgevoerd, etc. Behalve aan de onderlinge vergelijking van de alternatieven m.b.t. de te bereiken veiligheid achter de kaden is in het bijzonder ook aandacht besteed aan de zgn. "benedenstroomse effecten".

1.2. Te beantwoorden vragen

Met de nieuwe berekeningen met WAQUA moet primair de vraag van de Commissie m.e.r. beantwoord worden of de uitgevoerde ZWENDL berekeningen voldoende betrouwbaar zijn, of met de voorgestelde alternatieven de toegezegde veiligheid kan worden verkregen, alsmede of de uitkomsten van de nieuwe berekeningen tot dezelfde keuze voor het meest aantrekkelijk alternatief leiden.

Daarnaast zijn, als vermeld in de inleiding, tal van nieuwe ontwikkelingen gesignaleerd, zoals nieuwe topafvoeren, golfvormen en kadegegevens, waarvan de consequenties zichtbaar zullen moeten worden gemaakt. Voorts zijn er nieuwe vraagstukken geïntroduceerd, zoals het niet toelaatbaar zijn van benedenstroomse effecten. Tenslotte zal ook aangetoond moeten worden dat het nieuwe rekenmodel tot betrouwbare resultaten leidt.

Dit leidt tot de volgende te beantwoorden vragen:

- Kan WAQUA de referentiesituatie goed simuleren?
De referentiesituatie is de situatie met de gemeten waterstanden en debieten ten tijde van het hoogwater in 1995. Deze situatie is ook uitgangspunt geweest bij de ZWENDL berekeningen.
- Is WAQUA met dezelfde parameter-instellingen ook in staat om andere situaties met voldoende nauwkeurigheid te voorspellen?
- Wat zijn de werkelijke waterstandsverhogingen als gevolg van de aangelegde kades?
- Treden er verschillen op tussen berekeningen m.b.v. het model ZWENDL en die met het model WAQUA? Zo ja, wat zijn hiervan de oorzaken?
- Wat zijn de gevolgen van de nieuwe randvoorwaarden? (maatgevende hoogwatergolf met lagere topafvoeren en bredere golfvorm)
- Indien WAQUA tot andere uitkomsten leidt, is verhanglijn 2 dan nog een goed uitgangspunt voor de beschouwingen voor de veiligheid tegen overstromingen?
- Tot welk veiligheidsniveau leiden de in de MER gepresenteerde vier alternatieven? Kan hiermee een veiligheidsniveau van 1/250 achter de kaden worden bereikt?
- Bereken voor elk van de alternatieven de eventuele "benedenstroomse effecten"
- Maak een integrale afweging van de vier alternatieven m.b.t. hun bijdrage aan het veiligheidsniveau tegen overstromingen. Leidt dit tot dezelfde afweging van alternatieven als op grond van de uitkomsten van de vroegere ZWENDL-berekeningen?

2. AANPAK EN UITGANGSPUNTEN

2.1. Modelkeuze

2.1. Modelkeuze voor aanvullende berekeningen

Bij het voorbereiden van ingrepen in een rivier is het gebruik van hydraulische rekenmodellen niet meer weg te denken. Bij het onderhavige probleem betreft dit vooral het kwantificeren van de effecten van voorgestelde alternatieven op de waterstanden. Over de status en betrouwbaarheid van deze modellen, alsmede de keuze van het meest wenselijke model, is sinds het uitkomen van de MER Zandmaas/Maasroute veel discussie geweest. Deze paragraaf bedoelt de achtergronden te schetsen van de keuze voor het WAQUA-model.

2.1.1. Overwegingen

Voor het ontwikkelen van alternatieven voor de Trajectnota MER Zandmaas was voorzien dat veel berekeningen in een zeer korte tijd moesten worden uitgevoerd. Bij de keuze van het te gebruiken instrumentarium speelden de volgende overwegingen een rol:

- wijzigingen in de geometrie moeten snel kunnen worden aangebracht,
- het doorrekenen van het effect van ingrepen moet snel kunnen worden uitgevoerd.
- er moet met in de tijd variërende randvoorwaarden kunnen worden gerekend.

Bij de aanvang van de MER-studie kon worden beschikt over:

- een 1-dimensionaal hydraulisch model op basis van het programmapakket ZWENDL
- een groot aantal (orde 20) licht overlappende hydraulische modellen voor de simulatie van de 2-dimensionale horizontale stroming op basis van het programmapakket WAQUA.

Beide modellen (sets) behoorden tot het formele modelinstrumentarium van de Rijkswaterstaat.

Alleen het ZWENDL-model bleek aan voornoemde wensen tegemoet te komen. Overigens moet worden opgemerkt dat het ZWENDL-model (overigens vanuit dezelfde overwegingen) ook het instrumentarium vormde voor de uitwerking van de voorstellen van de Commissie Watersnood Maas (Commissie Boertien II).

Evenwel het programmapakket ZWENDL is in de jaren '70 ontwikkeld en wordt thans als verouderd ervaren. Niet zo zeer vanwege de weergave van de fysische processen, maar vanwege de wijze waarop het te modelleren gebied moet worden geschematiseerd. Er wordt daarom gewerkt aan verbeterde modellen. Dit betreft zowel het eendimensionaal model SOBEK als het tweedimensionale model WAQUA. In het tweedimensionale model wordt de vormgeving van de rivier aanzienlijk realistischer meegenomen dan in een eendimensionaal model. De rekentijden zijn evenwel aanzienlijk langer, en tot voor kort zelfs onacceptabel langer. Nieuwe computer- en softwareontwikkelingen (supercomputers en parallel processing) hebben evenwel nu ook deze toepassingen binnen de mogelijkheden gebracht.

2.1.2. Modelontwikkelingen

Voor de genoemde modellen zijn de ontwikkelingen als volgt:

ZWENDL

Het 1D-model ZWENDL is ontwikkeld in de jaren zeventig voor waterstandsberekeningen in rivieren. De lengte van de geschematiseerde secties varieert van enkele tientallen meters tot 5 à 6 kilometer. Aanpassingen in de geometrie van de rivier, hetzij door menselijke ingrepen dan wel door natuurlijke ontwikkelingen, zijn steeds in het model verwerkt door aanpassing van de geometrie en/of de ruwheid op een zodanige wijze dat er overeenstemming bestaat tussen berekende en uit bij hoogwaters gemeten waterstanden. Deze "aanpassingen" van het model vragen een grote mate van expertise in het afregelen van modellen. Het betekent dat in de loop der jaren het model een belangrijke ontwikkeling heeft doorgemaakt. Het model is getoetst aan hoogwatergolven die sinds 1980 zijn opgetreden, waaronder de hoogwaters van 1993 en 1995. Indien pas opgetreden hoogwaters daar aanleiding toe gaven, zijn in het model wijzigingen aangebracht om de gemeten waterstanden beter te kunnen simuleren. Middels optimaliseren van de ruwheid en hier en daar een geometrische aanpassing lukte het steeds weer om over een adequaat instrument te beschikken, waarmee met voldoende nauwkeurigheid de waterstanden konden worden voorspeld. In de loop der jaren zijn er zoveel ingrepen doorgevoerd dat het zicht op de werkelijkheid zo langzamerhand verloren dreigt te gaan, al hoewel de voorspellingen van de waterstanden in de aanwezige situatie nog steeds een hoge nauwkeurigheid hebben.

SOBEK

Begin jaren '90 is geconstateerd dat het 1D-ZWENDL-model verouderd raakte. Vervanging was nodig. De kennis en het toenmalige inzicht hebben geleid tot het bouwen van een compleet nieuw softwarepakket voor het uitvoeren van 1D-berekeningen. Dit softwarepakket is inmiddels bekend onder de naam SOBEK. Het 1D-SOBEK-model voor de huidige situatie van de Maas is door Rijkswaterstaat-RIZA in 1998 opgeleverd aan de Rijkswaterstaat, Directie Limburg. Het SOBEK-model is gebaseerd op de recente geometrische gegevens, en is daarmee belangrijk anders dan het ZWENDL-model. Ook zijn bij SOBEK andere relaties gebruikt tussen de rivierafvoer en de waterstanden aan de randen van het model. De "ruwheidswaarden", die uit de afregeling volgden, bleken dan ook belangrijk te verschillen tussen ZWENDL en SOBEK. Voor het doorrekenen van een ongewijzigde Maas zal dit niet tot grote verschillen leiden, maar voor berekeningen voor grootschalige ingrepen kan dit wel tot aanzienlijke verschillen leiden. Zo is gebleken dat door de gekozen schematisatie van de dwarsdoorsnede en de wijze van afregelen op ruwheden ZWENDL de zomerbedafvoer lijkt te overschatten en de afvoer in het winterbed te onderschatten. Het effect van verdiepen zou dus kunnen worden overschat en dat van verlagen van het winterbed worden onderschat. Evenwel ook in SOBEK wordt de werkelijkheid sterk geschematiseerd.

WAQUA

Voor de Maas is in 1986 het 2D-model WAQUA gereed gekomen. De geometrie is gebaseerd op de bodemligging van 1984. Aan de bouw van dit model is gedurende circa 4 jaar gewerkt. De onderlinge afstand van de rekenpunten in twee horizontale richtingen bedraagt hierin 25m en is naar de huidige

maatstaven te groot. Doordat ten tijde van de bouw van het 2D-model het beschikbare geheugen van computers beperkt was, moest het gehele gebied in globaal 20 stukken worden verdeeld. Met een in stukken opgeknipt model kunnen alleen de stroomomstandigheden bij constante afvoeren worden bepaald. Met zo'n opgeknipt model de gehele rivier doorrekenen is vanzelfsprekend een zeer tijdrovende bezigheid, omdat al de afzonderlijke berekeningen weer netjes aan elkaar geknoopt moeten worden. Een afvoergolf doorrekenen voor de gehele rivier is in zo'n situatie zelfs een onmogelijkheid.

Geconstateerd werd dat ook de 2D-modellen ondertussen verouderd waren. Ter voorbereiding op het randvoorwaardenboek 2001, dat als basis zal dienen voor de herziening van de Maatgevende Hoog Waterstanden (MHW's), is een database opgezet met riviergegevens, waarmee op relatief eenvoudige wijze nieuwe 2D-WAQUA-modellen gemaakt kunnen worden. Hiermee is aan een essentiële voorwaarde voor vernieuwing voldaan.

Daarnaast is het WAQUA-model geïmplementeerd op een parallelle supercomputer, d.w.z. dat binnen het rekenprogramma allerlei berekeningen parallel aan elkaar worden uitgevoerd. Dergelijke computers zijn in de universitaire wereld thans beschikbaar, bijvoorbeeld bij het CWI in Amsterdam, waar de supercomputer zelfs 256 parallelle processoren bezit. Dit betekent dat de berekeningen thans vele tientallen malen sneller kunnen worden uitgevoerd en dus de opsplitsing in 20 verschillende delen niet langer nodig is. De rivier kan dus nu in één keer worden doorgerekend. Het model WAQUA is daarmee geschikt geworden voor het uitvoeren van berekeningen van de stroomomstandigheden tijdens hoogwater bij in grootte variërende omstandigheden: de hele hoogwatergolf dynamisch doorrekenen voor de gehele rivier.

2.1.3. Modelkeuze

Zoals gesteld moesten voor de MER-Zandmaas veel berekeningen in korte tijd worden uitgevoerd. Er waren bij de aanvang van de MER-Zandmaas twee mogelijkheden om het effect van ingrepen in de rivier te bepalen, namelijk het gebruik van het 1D-ZWENDL-model of de 2D-WAQUA modellen. Andere modellen waren niet beschikbaar. Gekozen is voor het gebruik van het 1D-ZWENDL model, omdat de wijzigingen voor een MER-variant hierin snel aan te brengen en de benodigde rekentijd kort is. Een cyclus van wijzigen en rekenen vergt globaal 3 tot 5 dagen, afhankelijk van de omvang van de ingrepen. Een vergelijkbare exercitie met het 2D-WAQUA-model vergde toentertijd circa 2 maanden. Gegeven de tijdstermijn voor het uitvoeren van de MER-Zandmaas was toepassing van de 2D-modellen praktisch gezien onmogelijk, terwijl het toepassen van het 1D-ZWENDL-model met voldoende vertrouwen werd tegemoet gezien en bovendien overeenkwam met de aanbevelingen van de Commissie Boertien II.

Eind 1998 zijn in het kader van de studie VVM (Verruimings Verkenningen Maas) met het ondertussen beschikbaar gekomen model SOBEK berekeningen gemaakt voor de situatie na de Maaswerken. Ter toetsing van de resultaten van dit model is onderzocht in hoeverre de resultaten van het 1D-SOBEK-model lijken op de resultaten van het 1D-ZWENDL-model, met als belangrijkste conclusie dat er relatief grote verschillen bestonden in de berekende waterstanden van beide modellen. De verschillen werden onder meer veroorzaakt doordat in ZWENDL het effect van de in 1995 aangelegde kaden geen goede afspiegeling waren van de feitelijke situatie, en het feit dat in het ZWENDL-model de afvoer in het zomerbed te groot wordt weergegeven.

Deze resultaten kwamen beschikbaar juist op het moment dat de MER werd uitgebracht en hebben sindsdien tot veel discussie geleid. Vooral ook omdat het vermoeden bestond dat de werkelijkheid beter door SOBEK dan door ZWENDL zou worden gesimuleerd. De belangrijkste reden hiervoor is dat de huidige geometrie in SOBEK beter is ingevoerd dan in ZWENDL, terwijl in SOBEK bovendien de meest recente inzichten verwerkt zijn met betrekking tot de relatie tussen rivierafvoeren en de waterstanden aan de randen van het model. Hoewel deze argumenten zeer aannemelijk waren, bestond daarover tot dan toe eigenlijk geen zekerheid. Alleen berekeningen met het nieuwste WAQUA model zouden dergelijke uitspraken met een grote mate van zekerheid kunnen bevestigen.

Hoewel uit de gevoerde discussie werd geconcludeerd dat de beste resultaten van WAQUA konden worden verwacht, was het wel zo dat de nieuwste versie van WAQUA, het zgn. parallelle WAQUA-model, juist uit z'n experimentele stadium begon te komen en er dus nog allerlei onverwachte tegenslagen zouden kunnen optreden, zoals instabiliteiten in het model, problemen met het werken op de parallelle supercomputer, het snel en adequaat invoeren van grote aantallen riviergegevens, het ontdekken van vreemde piekjes in de berekende resultaten, etc. Niettemin heeft De Maaswerken gekozen voor het WAQUA-model. Ondanks tal van onzekerheden bestonden hiervoor goede gronden, omdat:

- 2D-modellen in het algemeen een betere beschrijving van de werkelijkheid geven;

- de database riviergegevens voor de huidige situatie inmiddels geheel gevuld was en gereed was voor toepassing;
- aan de bouw van een 2D-model voor het Combinatie Alternatief van de MER-Zandmaas reeds was begonnen;
- het merendeel van de riviergegevens voor de overige alternatieven van de MER-Zandmaas betrekkelijk snel waren toe te leveren;
- met de huidige computercapaciteit de gehele Maas in één 2D-model was onder te brengen;
- bij de uitwerking van het voorkeursalternatief toch een 2D-model nodig zou zijn.

De WAQUA berekeningen hebben ondertussen bevestigd dat met het 1D-model SOBEK betrouwbare waterstandsberekeningen te maken zijn. Voor gedetailleerde gegevens blijven evenwel WAQUA berekeningen noodzakelijk.

2.2. Aanpak aanvullende berekeningen

Om de genoemde vragen te beantwoorden is een 9-stappenplan opgesteld, dat als volgt luidt:

1) *IJking van het WAQUA-model*

Regel WAQUA af op de referentie-situatie 1995. Dit is de situatie ten tijde van het hoogwater, waarin de noodkades aanwezig zijn. Ga na of deze afregeling mogelijk is binnen de gestelde nauwkeurigheidsgrenzen of dit resulteert in reële parameters en coëfficiënten (ruwheden).

2) *Verificatie van het model voor hoogwatersituaties*

Om te toetsen of de gekijkte schematisatie ook andere hoogwaters dan dat van 1995 kan simuleren, wordt een verificatie uitgevoerd met het hoogwater van 1993. Hiertoe worden de noodkades uit de schematisatie verwijderd. De golfvorm is veel spitzer dan in 1995. Het model behoudt vanzelfsprekend dezelfde coëfficiënten en parameters. Hiermee dient de voorspellende waarde van het WAQUA-model te worden getoetst.

3) *Opstuwend effect kaden*

In het model worden nu de noodkaden verwijderd. Vervolgens worden de kaden en de compensaties gemodelleerd, die in het kader van de Deltawet Grote Rivieren (DGR) zijn aangebracht. Berekend wordt het opstuwende effect van de kaden bij een golf van 1/250 ($Q=3300 \text{ m}^3/\text{s}$). De uitkomsten worden vergeleken met die van ZWENDL. Middels deze berekeningen wordt inzicht gekregen in de taak waarvoor de Maaswerken staat om bij deze afvoergolf een veiligheid van 1/250 achter de kades te bereiken.

4) *Waterstanden bij 1/50 hoogwatersituatie*

De hoogwatersituatie, die zich eenmaal in de 50 jaar voordoet, is de momenteel achter de kaden gegarandeerde veiligheid. Met behulp van de nieuwste rekenmethoden wordt nu nagegaan welke waterstanden bereikt worden bij deze afvoergolfen of de kaden inderdaad de veiligheid bieden, waarop ze gedimensioneerd zijn.

5) *Veiligheid kaden*

Wanneer de in de vorige stap uitgevoerde berekening uitwijst dat de kaden niet overal de verwachte veiligheid biedt, dient te worden onderzocht welke veiligheid wel aanwezig is. In dat geval wordt dan met behulp van een aantal berekeningen bij diverse overstromingsfrequenties deze veiligheid berekend voor de situatie met de huidige kaden.

6) *Combinatiealternatief (CA)*

Berekeningen zullen worden uitgevoerd voor het Combinatiealternatief (CA). Nagegaan zal worden tot welke waterstandsverlaging dit leidt. Deze uitkomsten zullen worden getoetst aan de zgn. verhanglijn 2. Hiermee wordt de effectiviteit bepaald van dit alternatief voor de te bereiken doelstelling en daarmee wordt een vergelijkingsbasis verkregen met de andere alternatieven.

7) *Basisalternatief2 (BA2)*

Idem als onder stap 6, maar dan voor BA2

8) *Meest Milieuvriendelijke Alternatief (MMA)*

Idem als onder stap 6, maar dan voor MMA

9) *Benedenstroomse effecten*

Aan de alternatieven is de eis gesteld dat zij niet mogen leiden tot verhoging van de waterstanden in het benedenstroomse gebied in het bedijkte deel van de Maas, dan wel dat zulke waterstandsverhogingen zullen worden gecompenseerd. Maatgevend hiervoor zijn de waterstanden bij een afvoergolf met een frequentie van 1/1250. Er zullen daarom voor elk van de alternatieven berekeningen worden uitgevoerd bij een 1/1250 afvoergolf, met name met het doel om de effecten op de waterstanden in het bedijkte deel van de Maas te berekenen. Wanneer de waterstanden hoger komen dan de kaden zullen, in tegenstelling tot de situatie in ZWENDL, ook in het model de gebieden achter de kaden onder water komen te staan.

Er zijn geen berekeningen voorzien voor het Basisalternatief 1, omdat de effecten van dit zomerbedverdiepingsalternatief vergeleken kunnen worden met de uitkomsten van de berekeningen voor het Combinatiealternatief CA.

2.3. Uitgangspunten en aannamen

Voor de berekeningen is uitgegaan van het door Rijkswaterstaat-RIZA ontwikkelde WAQUA-model voor de gehele Maas. Dit model is gebouwd op een kromlijinig orthogonaal rooster met afmetingen van 107x4182 punten, waarvan er 215.000 actief zijn. Het model omvat de Maas tussen Maastricht (km 14.000) en Keizersveer (km 250.230).

Voor de berekeningen is een parallelle versie van WAQUA gebruikt, waarbij gebruik gemaakt is van 16 parallelle processoren. Het rekenwerk is uitgevoerd op de SGI Cray Origin 2000 supercomputer van het academisch rekencentrum SARA te Amsterdam.

Om met het model de gewenste berekeningen te kunnen uitvoeren zijn diverse aanpassingen aangebracht t.o.v. de originele versie. Dit betreft met name de volgende onderdelen:

- *bodemligging*

De hoogteligging van zomer- en winterbed van een rivier bepalen voor een groot deel welk deel van het rivierbed beschikbaar is voor stroming en berging van water. Een gedetailleerde beschrijving van de hoogteligging is dan ook van groot belang voor het vervaardigen van een representatieve schematisatie.

De bodemligging in de modellen die gebruikt is voor de TN/MER Zandmaas/Maasroute stamt uit 1984 of eerder, terwijl in de voorliggende controleberekeningen met WAQUA de bodemligging van 1995 is gebruikt. Deze is gebaseerd op bodempeilingen die zijn uitgevoerd tussen februari en november 1995. De geometrie van het winterbed is gebaseerd op gegevens van het databestand DTB-Rivier (Meetkundige Dienst 1996). De profielen voor het WAQUA model zijn vervaardigd met de Baseline-GIS applicatie, waar in hoofdstuk 3 nader op zal worden ingegaan.

DGR-kaden: kadeligging en kadehoogte

Na het hoogwater van 1993 adviseerde de Commissie Watersnood Maas, de zgn. Commissie Boertien II, dergelijke wateroverlast te voorkomen door zomerbedverdieping, zo nodig aangevuld met het aanleggen van kades. De uitvoering zou over een periode van 20 jaar plaats moeten vinden, zodat het gewenste beschermingsniveau in het jaar 2015 gerealiseerd zou zijn. Het hoogwater van 1995 was voor de regering aanleiding om de reeds ontwikkelde plannen versneld uit te voeren. Voor de Maas betekende dit een versnelde aanleg van kaden op de meest bedreigde plaatsen in Limburg. Dit laatste werd mogelijk gemaakt met de Deltawet Grote Rivieren, vastgesteld als noodwet voor de acute bescherming tegen hoogwater langs Rijn en Maas. De kaden werden zodanig gebouwd dat deze een bescherming boden tegen een rivierafvoer met een frequentie van 1:50. Op de hierbij behorende waterstanden werd een overhoogte van 0,50m aangebracht, de zgn. waakhoogte, waarmee de kadehoogte in ieder geval overal hoger was dan maximale waterstanden uit 1993 en 1995. Door middel van het project De Maaswerken

hoger was dan maximale waterstanden uit 1993 en 1995. Door middel van het project De Maaswerken zou de veiligheid achter deze kaden verhoogd worden tot een frequentie van 1:250.

Deze kaden onttrekken ruimte aan de rivier. Figuur 2.1 brengt dit in beeld, zowel voor het stromend als bergend oppervlak. Er blijken inderdaad grote oppervlakten aan het winterbed van de rivier zijn onttrokken.

In ZWENDL zijn de bekade gebieden ingebracht overeenkomstig de voorgenomen plannen en geschematiseerd met zo goed mogelijk "expert judgement". In WAQUA zijn de werkelijke kadeliggingen ingevoerd. Vanwege het niet beschikbaar zijn van voldoende betrouwbare gegevens, zijn deze kades in 1998 door de Meetkundige Dienst in opdracht van de Directie Limburg opnieuw ingemeten.

In WAQUA is vanzelfsprekend de meest recente informatie over de kaden verwerkt. Het bekade gebied van ca 80 km² blijkt aanzienlijk groter te zijn dan de ca 38 km² die destijds in de ZWENDL-schematisatie op basis van ruwe en beperkte informatie is aangenomen, zodat om die reden bij hoge afvoeren een grotere opstuwing verwacht mag worden dan volgt uit de berekeningen met het ZWENDL model.

Tijdens het hoogwater van 1995 zijn op een groot aantal locaties in het winterbed van de Maas noodkaden (zandzakken, etc.) aangebracht. Deze kaden zijn na het hoogwater weer verwijderd. Voor de berekeningen t.b.v. de verificatie van het WAQUA-model zijn vanzelfsprekend deze noodkades in het model aangebracht.

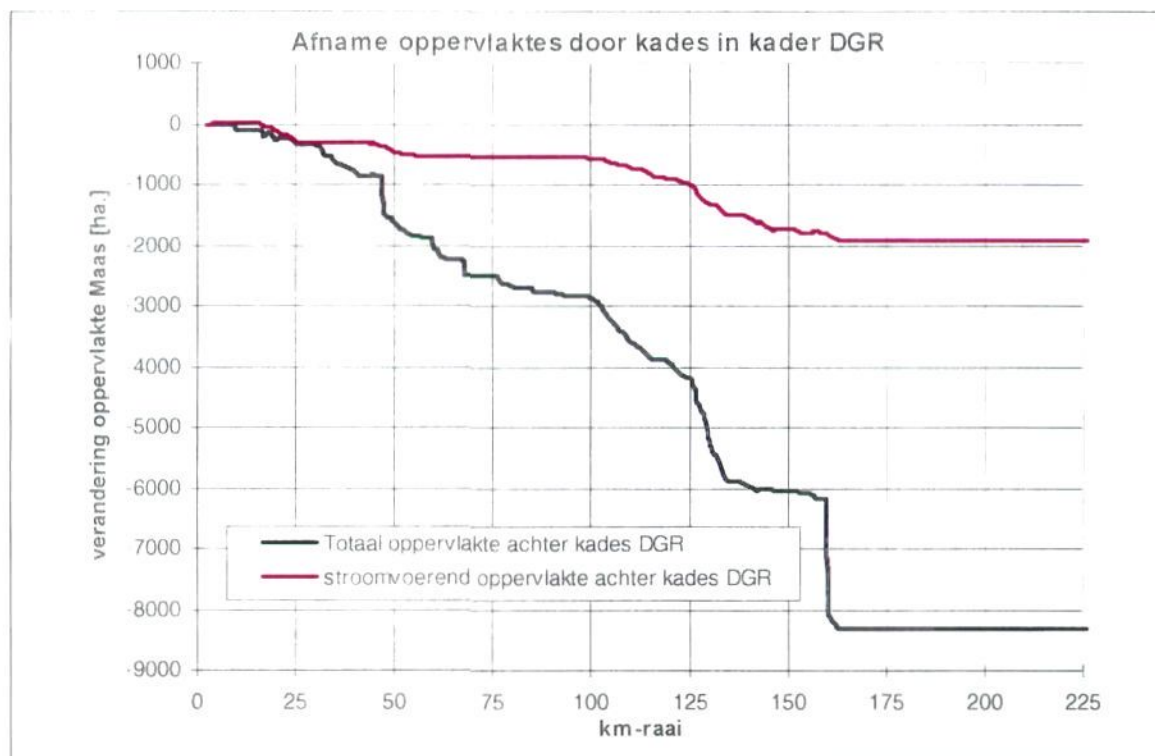


Fig.2.1. Oppervlakten achter de DGR kaden

- *Overstroombare kaden*

In het model ZWENDL is geen rekening gehouden met overstroombare kaden. In feite zijn de kaden als oneindig hoog in het model meegenomen. Dit geldt ook voor het eendimensionale model SOBEK. Dit komt overeen met de wijze van hoogwatervoorspelling, waar als uitgangspunt geldt dat de kaden niet overstromen. Het tweedimensionale model WAQUA biedt evenwel de mogelijkheid om ook het overstromen van de kaden in de berekeningen mee te nemen. In deze 2D-modellering zijn daartoe de kaden aangebracht met de kruinhoogte zoals werkelijk in het veld gemeten.

Bij extreem hoge waterstanden, bijvoorbeeld bij een overschrijdingsfrequentie van 1:1250, zullen kaden overstromen, waardoor benedenstrooms van de overlopende kaden lagere waterstanden zullen

- *Compenserende maatregelen*
Om opstuwings van de waterstanden door de aanleg te voorkomen moesten compenserende maatregelen worden uitgevoerd. In de ZWENDL schematisaties zijn deze compenserende maatregelen niet opgenomen. In de nu gebruikte WAQUA-modellen zijn de werkelijk uitgevoerde compensaties meegenomen.
- *Piekafvoer*
Door de Commissie Watersnood Maas (Boertien II) is onder meer aangegeven dat na elk substantieel hoogwater de frequentieanalyse opnieuw moet worden toegepast. De door de CWM uitgevoerde frequentieanalyse bevat alle hoogwaters vanaf 1911 tot en met het hoogwater van december 1993. Kort na de presentatie van het rapport van de CWM deed zich in de Maas weer een substantieel hoogwater voor. In aansluiting daarop is de maatgevende afvoer opnieuw bepaald. De bij Borgharen gemeten waterstanden zijn voor deze frequentieanalyse door middel van de Q-h-relatie geldig vanaf augustus 1990 omgerekend naar opgetreden afvoeren. In Tabel 2.1 is in kolom 2 een overzicht gegeven van de kans van voorkomen van verschillende hoogwaters op basis van deze frequentieanalyse. De in kolom 2 gegeven afvoeren zijn bij de hydraulische simulaties met het programmapakket ZWENDL gebruikt voor de Trajectnota MER Zandmaas.

Kans van voorkomen [jaar]	afvoer volgens frequentieanalyse en Q-h-relatie Borgharen geldig vanaf augustus 1990 [m ³ /s]	afvoer volgens frequentieanalyse en Q-h-relatie Borgharen geldig vanaf 1 januari 1993.
1/50	2774	2710
1/100	3060	2950
1/250	3382	3275
1/1250	3935	3800

Tabel 2.1. Kans van voorkomen en grootte van bij deze kans horende topafvoer (oude en nieuwe waarden)

Na het optreden van het hoogwater van 1995 en een nieuwe toepassing van de frequentieanalyse bleek dat de afvoer-waterstand-relatie voor Borgharen moest worden bijgesteld, zie Barneveld & Bastings 1998. Vanaf 1 januari 1993 moet met een licht gewijzigde Q-h-relatie voor Borgharen worden gewerkt. Als gevolg hiervan wijzigen de piekafvoeren voor de hoogwaters van onder meer 1993 (januari en december) en van 1995. Wanneer de piekafvoeren wijzigen, dan heeft dit gevolgen voor de frequentieanalyse, omdat deze gebaseerd is op de jaarmaxima of alle golfmaxima. De resultaten van een herhaling van de frequentieanalyse zijn weergegeven in kolom 3 van Tabel 2.1. Dit zijn de waarden, die verder worden gebruikt.

- *Golfvorm*
Het hoogwater van 1995 was, in vergelijking tot de hoogwatergolven in de voorafgaande periode, van uitzonderlijk lange duur. Dit houdt in dat ook in de toekomst hoogwatergolven kunnen voorkomen met een relatief lange duur. Om hiermee rekening te kunnen houden is de vorm van de golf opnieuw geanalyseerd. De analyse resulteert in een methodiek waarmee voor elke piekafvoer een schatting is te maken voor de meest waarschijnlijke vorm van de golf. De nieuwe golfvorm is gelijktijdig met de wijziging door hernieuwde toepassing van de frequentieanalyse (als gevolg van kleine correcties in de Q-h-relatie voor Borgharen) doorgevoerd. In feite betekent dit een veel bredere golf dan tot nu toe als standaardvorm werd toegepast. Fig. 2.2. geeft een overzicht van deze golfvorm. Tevens zijn hierin de hoogwatergolven van 1993 en 1995 weergegeven.

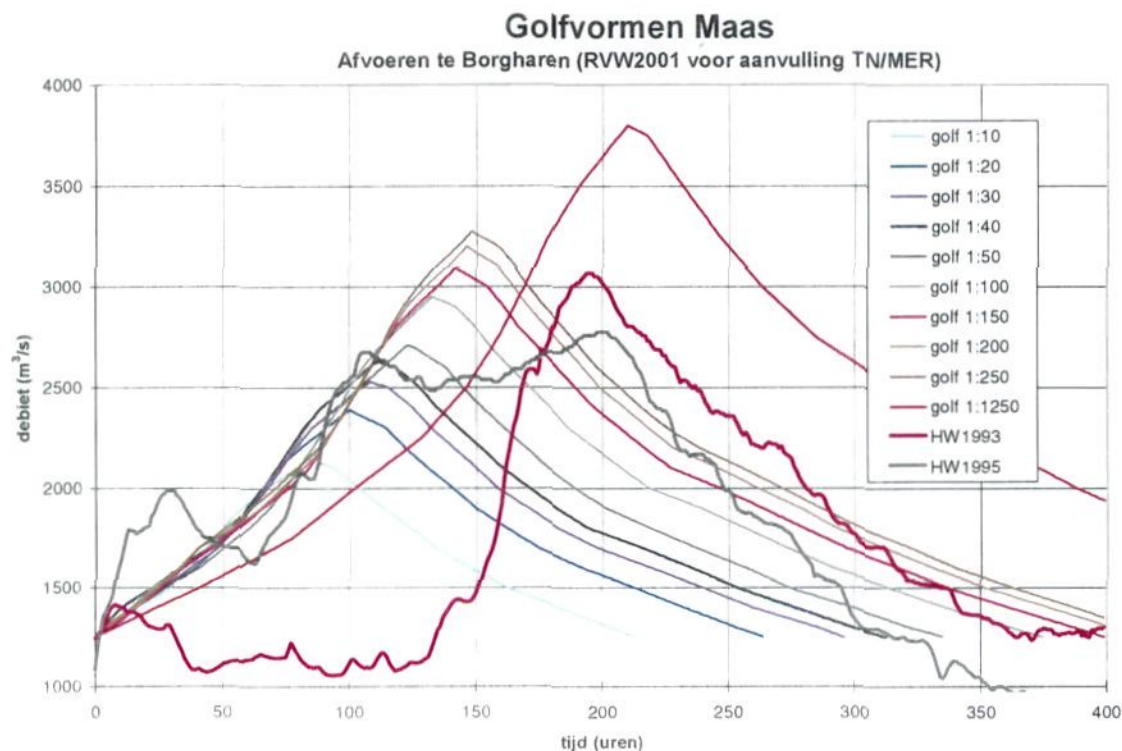


Fig. 2.2 Theoretische golfvormen en hoogwatergolven 1993 en 1995 (Borgharen)

Een belangrijke mijlpaal in het proces van de controleberekeningen was het beschikbaar krijgen van de rekenresultaten op uiterlijk 1 december 1999. Aangezien het model juist zijn experimentele stadium had verlaten bleken er onderweg nog tal van beslissingen genomen te moeten worden, die enerzijds niet leidden tot langdurige onderzoeken maar anderzijds wel tot voor de besluitvorming betrouwbare uitkomsten.

Deze beslissingen staan gerubriceerd in bijlage 2. Deels zijn het beslissingen die ook zo genomen zouden zijn wanneer meer tijd beschikbaar was, zoals het conformeren aan de vastgestelde randvoorwaarden uit het Randvoorwaardenboek voor de maatgevende waterstanden in 2001, maar anderzijds ook beslissingen die genomen zijn om grote tijdsvertragingen te voorkomen. Dit laatste alleen als het niet zodanig andere uitkomsten zouden zijn die de besluitvorming wezenlijk zouden beïnvloeden. Het meest extreme voorbeeld hiervan is de verdieping voor het CA, dat overeenkomstig de in de TN/MER aangegeven te baggeren hoeveelheden op de stuwpanen Grave en Belfeld nog tot een verdere verdieping zou moeten leiden. Dit zou het alternatief CA nog iets effectiever maken dan nu uit de berekeningen blijkt. Immers dit zou aldaar tot een nog verdere verlaging van de waterstand zou kunnen leiden van ca 10 cm. In plaats van resultaten, die 0,20 tot 0,60m boven de zgn. verhanglijn 2 liggen zouden deze getallen 0,10 tot 0,50m kunnen worden. (zie hoofdstuk 7). In de uiteindelijke berekeningen in de OTB-fase zijn dergelijke verschillen niet meer acceptabel en zal het model tot op detailniveau aan de nieuwste gegevens moeten zijn aangepast.

2.4. Uitgevoerde modelberekeningen

Bij het uitvoeren van de berekeningen is een zevental modelschematisaties betrokken. Figuur 2.3 geeft inzicht in de WAQUA-modellen en hun onderlinge samenhang. De pijlen geven het voortbouwen van de modelschematisaties op voorgaande schematisaties weer.

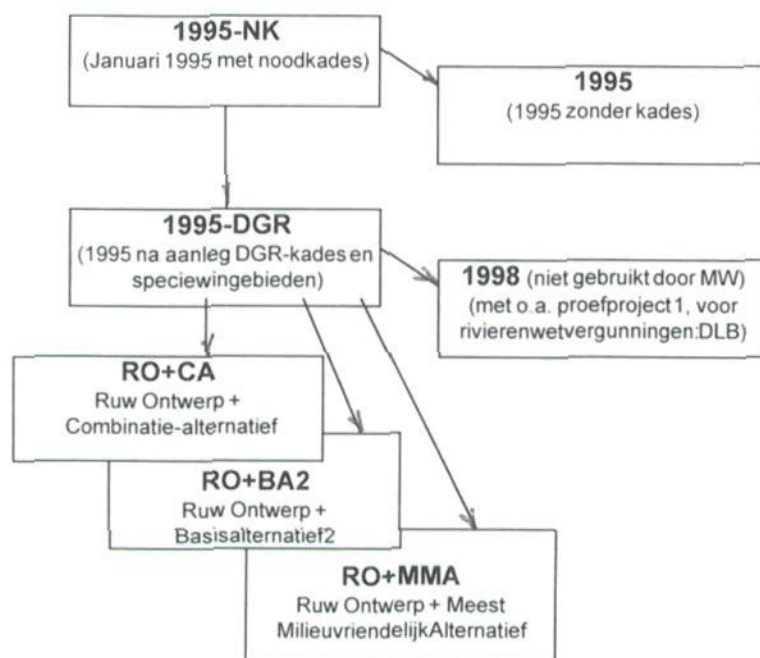


Fig. 2.3 Overzicht WAQUA-modelschematisatiest.b.v. TN/MER Zandmaas/Maasroute

Deze modelschematisaties bestrijken zowel de Grensmaas (vanaf Eijsden) als de Zandmaas (tot Hedel). De bovenste drie modellen (varianten van de toestand in 1995) zijn referentiesituaties. De modelschematisatie '1998' is een actualisatie van '1995-DGR' en wordt voor o.a. door Directie Limburg voor rivierenwetberekeningen gebruikt. Aangezien de situatie na aanleg van de DGR-kades voor De Maaswerken uitgangspunt is, wordt het model '1998' in zijn geheel niet gebruikt. De onderste drie modellen stellen inrichtingsvarianten van De Maaswerken voor, zoals vastgesteld in de Trajectnota/MER (TN/MER, 1999). Voor de Grensmaas wordt het Ruw Ontwerp als uitgangspunt aangehouden.

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de uit te voeren berekeningen.

Stap	WAQUA-model	berekening	doel	verantwoordelijk
1	1995-NK	HW1995	ijking	RIZA
2	1995	HW1993	verificatie (geschiktheid voor meerdere HW's)	RIZA
3	1995	$Q_{1/50}$	vergelijkingsgrondslag voor 4 beoordeling opstuwing DGR-kades met compensatie (moet 0 zijn)	MW
4	1995-DGR			
5	1995-DGR	$Q_{1/x}$	bepaling veiligheidsniveau met DGR- kades en speciewingebieden	MW
6	RO+CA	$Q_{1/250}$	toetsen CA aan VH2	MW
7	RO+BA2	$Q_{1/250}$	toetsen BA2 aan VH2	MW
8	RO+MMA	$Q_{1/250}$	toetsen MMA aan VH2	MW
9	RO+CA ¹⁾ RO+BA2 RO+MMA	$Q_{1/1250}$	toetsen benedenstroomse effecten (vanaf km 150)	MW

¹⁾ hierbij zijn tevens enkele varianten beschouwd

Tabel 2.2 Overzicht WAQUA-modellen en berekeningen t.b.v. TN/MER Zandmaas/Maasroute

Een totaaloverzicht van alle uitgevoerde berekeningen is weergegeven in bijlage 4.

3. SCHEMATISATIEPROCES EN UITGEVOERDE CONTROLES

3.1. Schematisatieproces

Inleiding

Het tweedimensionale stromingsprogramma WAQUA wordt voornamelijk opgebouwd uit de volgende bestanden: het bodembestand, het overlatenbestanden het ruwhedenbestand. De gegevens voor deze bestanden worden op diverse manieren en door diverse instanties ingewonnen en verzameld. De voornaamste aanleverende instanties zijn: Meetkundige Dienst (MD) en de meetdienst van de directie Limburg. De bestanden worden aangeleverd in een bepaald GIS-format zodat ze eenduidig in een grote database (Baseline) geplaatst kunnen worden. Met behulp van het programma BASWAQ worden uit deze database de bodem-, overlaten- en ruwhedenbestanden geselecteerd en omgezet naar bestanden waarmee de WAQUA-modellen aangemaakt worden. Op deze manier is het mogelijk een reproduceerbaar WAQUA model te maken.

Schematisatie situatie medio 1995

Het meest actuele WAQUA model bestaat uit bodem, overlaten en ruwheidgegevens van medio 1995. Dit is de situatie waarin de kades en de compensatiegebieden verwerkt zitten. Dit model wordt als referentiesituatie gebruikt voor de Maaswerkenalternatieven.

Het *bodembestand* bestaat uit hoogtegegevens van de oevers en uiterwaarden, die afkomstig zijn van de door de Meetkundige Dienst geleverde Digitale Topografische Bestanden (DTB). De hoogtegegevens van het zomerbed zijn afkomstig van lodingen van de Maas, die door de directie Limburg gedaan zijn. De combinatie van deze zomerbed- en winterbedhoogten wordt het bodembestand genoemd.

Het *overlatenbestand* bestaat op de eerste plaats uit gegevens, die als zodanig in het DTB gedefinieerd zijn. Verder worden nog overlaten toegevoegd die op grond van veldverkenningen als overlaat aangeduid zijn. En als laatste zijn de kaden, die door de MD ingemeten zijn, aan het overlatenbestand toegevoegd.

Het *ruwhedenbestand* is voornamelijk opgebouwd uit vegetatieruwheid, die verkregen is uit luchtfoto's van de MD. Bovendien zitten in dit ruwhedenbestand ook de ruwheden van gebouwen en dorpen.

Maaswerkenschematisaties

In het kader van Boertien is met behulp van het één dimensionale stromingsprogramma ZWENDL een aantal ingrepen in de Maas gemodelleerd. De Maasschematisatie die in ZWENDL zat was echter alleen geschikt om hoogwaters mee te voorspellen en niet om ontwerpen mee door te rekenen. Aangezien er geen ander alternatief aanwezig was is toen besloten de uitkomsten van ZWENDL toch te gebruiken om tot een verhanglijn te komen waarop de huidige kadehoogten gebaseerd zijn. De ingrepen, die in ZWENDL gemodelleerd zijn, zijn vervolgens omgezet naar profielen en verwerkt in de ontwerpnota. Deze ingrepen zijn daarna met behulp van het ontwerpprogramma MOSS digitaal gemaakt. Met behulp van een conversieprogramma zijn deze MOSS-bestanden omgezet naar GIS-bestanden. Deze GIS-bestanden zijn vervolgens in de Baseline-database gezet. In deze database bevonden zich ook alle bestanden, die de situatie medio 1995 weergeven. Door nu de bestanden van medio 1995 te combineren met de bestanden waarin de Maaswerken-ingrepen staan, zijn nieuwe WAQUA-modellen vervaardigd. Omdat snel over berekeningsresultaten van de Zandmaasvarianten te kunnen beschikken, zijn er in eerste instantie aparte Grensmaas- en Zandmaasmodellen gemaakt. In het Grensmaasmodel is het ruw ontwerp (RO) gemodelleerd. Voor de Zandmaas zijn er drie varianten gemodelleerd, namelijk het Basisalternatief 2 (BA2), het Meest Milieuvriendelijk Alternatief (MMA) en het Combinatie Alternatief (CA). In een later stadium is het RO gekoppeld met de drie Zandmaasmodellen zodat er uiteindelijk drie modellen geschematiseerd zijn: het RO/CA, het RO/MMA en het RO/BA2.

3.2. Uitgevoerde controles

Inleiding

De uitgevoerde controles van de WAQUA-bestanden hebben betrekking op de bodem- en overlatenbestanden. Er zijn twee controleslagen geweest. In de eerste controleslag is door de medewerkers van de Rekengroep van Directie Limburg in grote lijnen nagegaan of de ingrepen op de juiste plaatsen zijn aangebracht en of de verdiepingen de juiste waarden hebben. In deze controleslag is ook gekeken of de overlaten die verwijderd moesten worden ook verwijderd zijn. Bovendien is er gecontroleerd er geen veranderingen in de hoogten van de overlaten zijn aangebracht, waar deze niet horen te gebeuren. In de tweede controleslag zijn de bevindingen van de medewerkers van de Rekengroep besproken met inhoudelijk deskundigen van de Maaswerken. Aangezien deze Maaswerken-medewerkers inhoudelijk op de hoogte waren van de geplande ingrepen hebben zij gedetailleerde controles kunnen uitvoeren.

Controles door de medewerkers van de Rekengroep (zie bijlage 3)

Hieronder volgt een opsomming van controles, die verricht zijn door de Rekengroep van de Directie Limburg, om mogelijke fouten uit de modelschematisatie te halen:

- Van het WAQUA-model dat de situatie medio 1995 weergeeft en het WAQUA-model van de Maaswerkenvariant zijn bodemverschiltekening gemaakt. Aan de hand van deze tekeningen en de ontwerp tekeningen zoals ze bij de trajectnota MER zaten, is bekeken of de geplande ingrepen juist in het model zijn aangebracht.
- Van het WAQUA-model van iedere Maaswerkenvariant is een tekening gemaakt van de absolute waarden van de nieuwe bodemligging. Er is gecontroleerd of de zomerbodemplafond "vloeiend" via een bepaald verhang is aangebracht en of de zomerbedverbreding op de juiste plaats zit.
- Er is een tekening gemaakt van de overlaten, die verdwenen zijn in een Maaswerkenvariant. Hiermee is gecontroleerd of er nog overlaten zitten in een gebied dat afgegraven wordt.
- Er is een tekening gemaakt van hoogteverschillen in de overlaten van het WAQUA-model medio 1995 en het WAQUA-model van een Maaswerkenvariant. Hiermee is gecontroleerd of overlaten terecht of onterecht verhoogd of verlaagd zijn.
- Er is een berekening gemaakt om te kijken of er geen vreemde zaken in het model zitten. Vreemde zaken zijn o.a. gaten in overlaten, vreemde debietverdeling zomerbed / winterbed en te grote snelheden.
- Er zijn verhanglijnen getekend van de referentiesituatie van een Maaswerkenvariant. Er is gecheckt of er onverklaarbare zaken in de verhanglijnen zaten.

Indien er uit de controles naar voren kwam dat er fouten in de modelschematisatie zaten, die de berekeningsuitkomsten zouden beïnvloeden, zijn deze rechtstreeks in het WAQUA-model gecorrigeerd.

Controles met inhoudelijk deskundigen van de Maaswerken (zie bijlage 3)

Bovengenoemde controleresultaten zijn ook besproken met betrokken deskundigen van de Maaswerken. Samen met de medewerkers van de Rekengroep hebben deze deskundigen de controleresultaten bekeken. Door prioriteitstelling zijn echter alleen het RO en het CA bekeken. In grote lijnen was men het eens met de resultaten van de controles, die door de medewerkers van de Rekengroep opgeschreven waren. Wel werd ontdekt dat bij het CA de totale hoeveelheid te baggeren grond minder was dan in TN/MER op grond van ZWENDL-berekeningen was voorgesteld. Het bleek dat in de stuwpanden Belfeld en Grave nog een extra verdieping van ca 1,00 m zou moeten worden aangebracht. Dit zou in deze trajecten tot een extra waterstandverlaging van ca 0,10 m hebben geleid. Gezien het krappe tijdschema en dit in gunstige richting werkende effect op de waterstanden is besloten voor de beslissing op hoofdlijnen de aangebrachte schematisatie te handhaven. Voor berekeningen in de OTB-fase zal de schematisatie moeten worden aangepast. In feite zal dan de schematisatie weer helemaal grondig moeten worden doorgelopen.

4.1. IJking van WAQUA op de situatie hoogwater 1995

4.1.1. Inleiding

Voor betrouwbaar rekenwerk met modellen is het noodzakelijk dat modellen worden ingeregeld (ijking) aan goed bemeten situaties en zo mogelijk worden getoetst aan een ander hoogwater. Voor voorspellingen van extreme afvoeromstandigheden vindt ijking plaats voor metingen tijdens hoge afvoeren. De meest recente hoge afvoeren zijn de hoogwaters van 1993 en 1995. Het hoogwater van 1993 had een piekafvoer van globaal 3000 m³/s en was relatief spits. Het hoogwater van 1995 had een piekafvoer van 2700 m³/s en was relatief breed, zie figuur 4.1. Voor het inregelen van het WAQUA-model zijn de metingen van het hoogwater 1995 gebruikt. Met deze gegevens zijn de ruwheden van het model ingeregeld. De metingen tijdens hoogwater van 1993 zijn benut voor het uitvoeren van de verificatie.

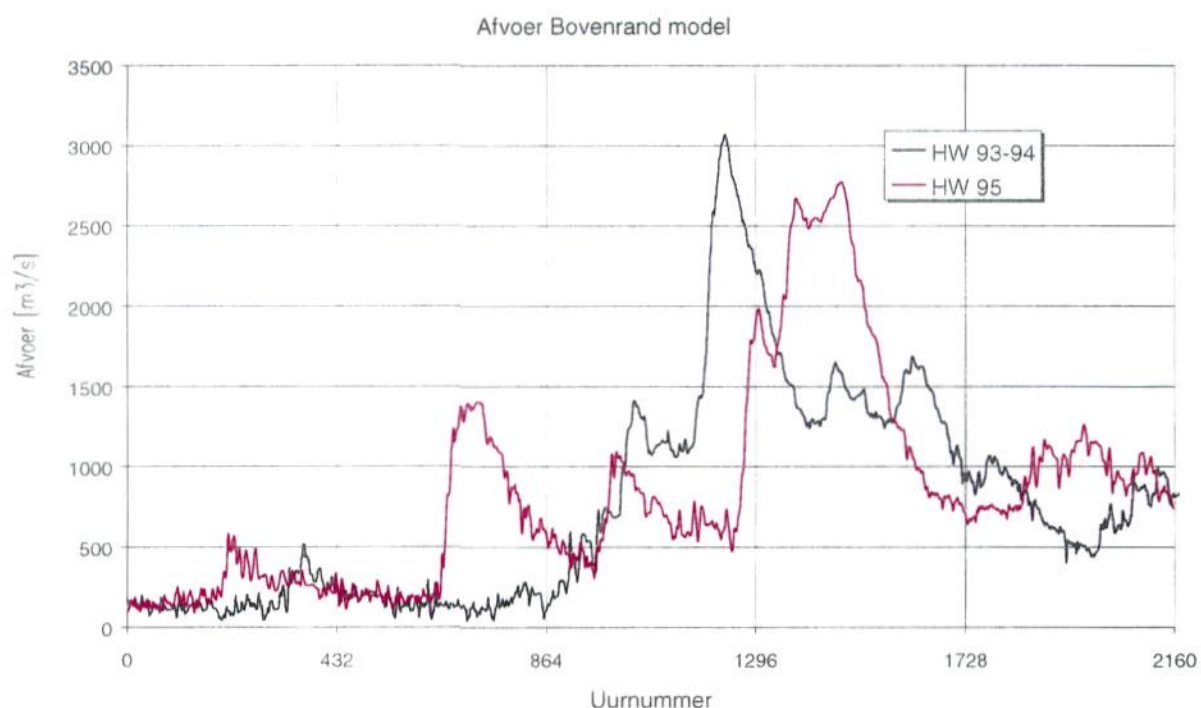


Fig. 4.1. Afvoer verloop tijdens hoogwater 1993-1994 en 1995.

4.1.2. Inregelen van het WAQUA model

Het inregelen is in twee stappen uitgevoerd. Eerst is een ijking uitgevoerd voor de ruwheden voor het zomerbed, bij een min of meer vol zomerbed en betrekkelijk constante afvoeren. Vervolgens zijn de ruwheden van de meest voorkomende ecotopen in het winterbed ingeregeld bij in de tijd variërende afvoeren.

Het model van de Maas beslaat het gebied tussen Eijsden en Keizersveer. De inregeling kan alleen goed worden uitgevoerd indien bekend is hoeveel water door de Maas stroomt en wat hierbij de waterstanden zijn. Voor Eijsden bestaat geen betrouwbare Q-h-relatie (afvoer-waterstand-relatie). Deze is wel beschikbaar voor Borgharen. Als gevolg van golfdemping en onbekendheid van de precieze grootte van zijdelingse in- en uitstromingen tussen Eijsden en Borgharen is de in Borgharen geregistreerde afvoer

zijdelingse in- en uitstromingen tussen Eijsden en Borgharen is de in Borgharen geregistreerde afvoer niet op eenvoudige wijze te herleiden tot een afvoer verloop te Eijsden. De ijking is daarom uitgevoerd voor het traject Borgharen-Keizersveer. Voor Keizersveer zijn gemeten waterstanden beschikbaar. De wijze waarop de ruwheden voor het deel van de Maas tussen Eijsden en Borgharen worden ingevuld wordt aan het eind van de ijkingsprocedure toegelicht.

De ruwheden van ecotopen en het energieverlies door stroomvertraging achter kaden en overlaten is afhankelijk van de stroomomstandigheden. Om daarmee rekening te kunnen houden is het WAQUA-programma geschikt gemaakt voor het berekenen van tijdsafhankelijke afvoeren in rivieren. Het is nu mogelijk het WAQUA-model van de Maas in te regelen bij variërende afvoeromstandigheden. Bij het inregelen van het model met een lengte van globaal 230 km moet dan extra aandacht worden besteed aan de initiële condities en het moment waarop rekenresultaten en metingen met elkaar worden vergeleken. Te meer daar het inregelen in grote mate is geautomatiseerd, zie Wijbenga en Duits (1998) en Duits en Wijbenga (1998). De methodiek maakt gebruik van een directe zoekmethode die is gebaseerd op het simplex-algoritme van Nelder en Mead (1965). De inregeling van het onderhavige model van de Maas op basis van het hoogwater van 1995, is beschreven in Duits en Visser (1999).

Bij het inregelen worden verschillende stappen onderscheiden:

- bepaling van de initiële stroomomstandigheden in de Maas, gebaseerd op constante randvoorwaarden
- het doorrekenen van een inspeelperiode met tijdsafhankelijke randvoorwaarden om de waterstanden in de Maas aan te laten sluiten bij de tijdsafhankelijke afvoeromstandigheden.
- het herhaald en met verschillende ruwheden, doorrekenen van de daarop aansluitende inregelperiode eveneens met tijdsafhankelijke randvoorwaarden. Deze inregelperiode kent twee delen. Het eerste deel van de inregelperiode is bedoeld om de waterstanden aan te laten passen aan de nieuw ingestelde ruwheden. De feitelijke toetsing of de berekende waterstanden voldoende overeenkomen met de gemeten waterstanden geschiedt daarna.

De ijking van het model verloopt nu in grote lijnen als volgt:

1. Verdeel het zomerbed op basis van de meetstations in trajecten
2. Bepaal de ruheidswaarden voor de deeltrajecten van het zomerbed.
3. Bepaal de onderlinge verhouding van de ruheid van het zomerbed voor de deeltrajecten.
4. Ijk de ruwheden voor de ecotopen van het winterbed en de ruheid van het zomerbed onder handhaving van de onderlinge verhouding van de ruwheden van het zomerbed.

4.1.3. Inregelen ruheid zomerbed

Aan de hand van de afvoerregistratie te Borgharen is een periode geselecteerd, waarbij de afvoer gedurende 5 dagen niet veel varieert en het zomerbed vol water staat. In de periode 13 februari 1995 tot 18 februari 1995 varieerde de afvoer globaal tussen 1000 m³/s en 1200 m³/s, zie Figuur 4.2.

De methodiek voor het geautomatiseerd inregelen van het model bleek minder efficiënt te zijn voor het inregelen van de ruwheden van het zomerbed alleen. De inregeling van de zomerbedruwheid is vervolgens verder door interpolatie bepaald. Deze werkwijze is mogelijk doordat de ruwheid van het zomerbed slechts effect heeft in het betreffende deeltraject of het direct bovenstrooms ervan gelegen deeltraject.

In Figuur 4.2 is voor de periode van 13 februari tot 18 februari 1995 het moment, waarop de initiële condities zijn bepaald, de inspeelperiode voor de inregeling en de inregelperiode zelf aangegeven. De toetsing van berekende waterstanden aan gemeten waterstanden heeft plaatsgevonden voor meetgegevens met een interval van 8 uur in de laatste twee dagen. De voor de ijking van de vol zomerbedafvoer resulterende α -waarden zijn weergegeven in Figuur 4.3. Voor een waterdiepte van 4 m varieert de Nikuradse-waarde globaal van 0,11 m tot 0,22 m.

Traject 5 bevat meetlocatie Heel beneden. De ruwheidswaarde bereikte hier de vooraf gedefinieerde minimum waarde en een verdere verlaging om de gemeten waterstanden beter weer te geven leidde tot niet realistische ruwheidswaarden. De ruwheidswaarde voor traject 4 lijken daarentegen aan de hoge kant.

Voor alluviale rivieren verandert over het algemeen de ruwheid van het zomerbed tijdens hoogwater. Door groei van beddingvormen kan de ruwheid toenemen. Om hiermee rekening te kunnen houden wordt op basis van de ijking van het zomerbed een verhouding vastgesteld voor de ruwheden van de verschillende deeltrajecten. De initiële α -waarden waarmee de ijking van het model bij hoge afvoeren is gestart is weergegeven in Figuur 4.3.

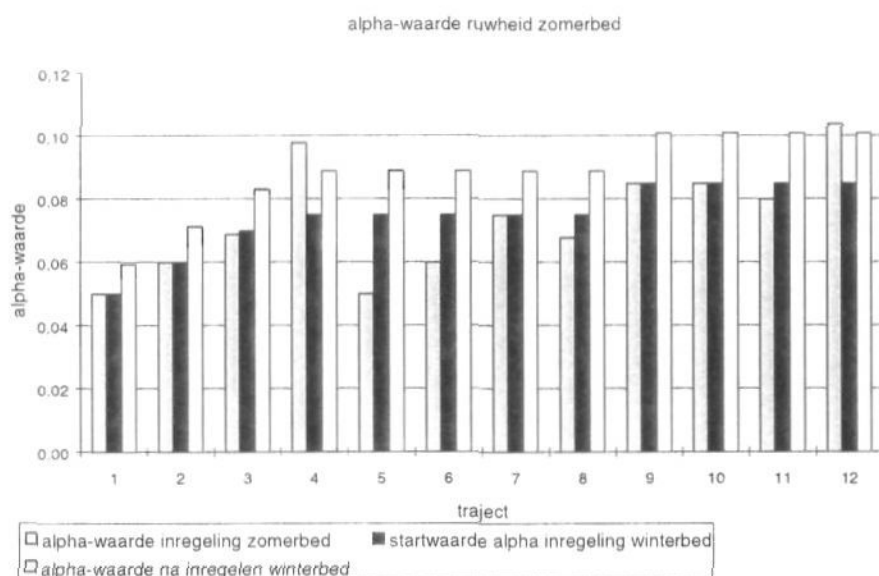


Fig. 4.3. Resulterende α -waarden voor de ijking en initiële α -waarden voor de ijking van het winter.

4.1.4. Ijking winterbed en inregelen ruwheid

Voor de inregeling van de ruwheden van het winterbed is gebruik gemaakt van de recent ontwikkelde methode op basis van de directe zoekmethode volgens Nelder en Mead (1965). Tijdens de ontwikkeling van de methodiek is gebleken dat een gedetailleerde inregeling van alle vrijheidsgraden zeer tijdrovend kan zijn. Voorts zijn meerdere oplossingen mogelijk indien ruwheden, die weinig invloed hebben, als vrijheidsgraad worden aangemerkt. Tabel 4.2 geeft een overzicht van de ecotopen voor de inregeling van het winterbed. De overige ecotopen hebben een vooraf geschatte vaste ruwheid. Een reductie van het in Tabel 4.2 gegeven aantal parameters is gerealiseerd door aanverwante begroeiingen door middel van vermenigvuldigingscoëfficiënten te koppelen. Zo is aangenomen dat normaal gras altijd 2,5 keer zo ruw is

als glad gras en dat ruw gras 5 keer zo ruw is als glad gras. Een verdere reductie van het aantal in te regelen parameters is ontstaan door grassen en ruigten te koppelen. Door deze clustering resteren de volgende variabele ruwheidsparemeters: ruigten&grassen, akkers en zomerbed, waarbij de onderlinge verhouding van de ruwheid van de verschillende deeltrajecten van het zomerbed tijdens de ijking in stand wordt gehouden.

De procedure voor het ijken bij hoge afvoeren is identiek aan die voor de ijking van het zomerbed en behelst, zie Figuur 4.4:

- bepaling initiële waterstanden bij een afvoer van 750 m³/s.
- Het doorrekenen van een periode om de waterstanden te laten inspelen bij de variërende afvoer en startwaarden van de ruwheden.
- Het herhaald berekenen met andere waarden voor de gedefinieerde vrijheidsgraden (ruwheid grassen&ruigten, akkers en zomerbed)

Ruwheidstype	k-waarde start	k-waarde na ijking
default k-waarde	0,20	0,255
glad grasland	0,20	0,255
normaal grasland	0,50	0,637
ruw grasland	1,00	1,274
open ruigte (winter)	1,50	1,911
dichte ruigte (winter)	0,50	0,637
productiegras met maasheggen	0,20	0,255
natuurlijk gras met maasheggen	0,50	0,637
akkers met maasheggen	0,40	0,164
akkers	0,40	0,164

Tabel 4.2: Ruwheidstypen die bij de ijking zijn gevarieerd en de berekende k-waarde na ijking.

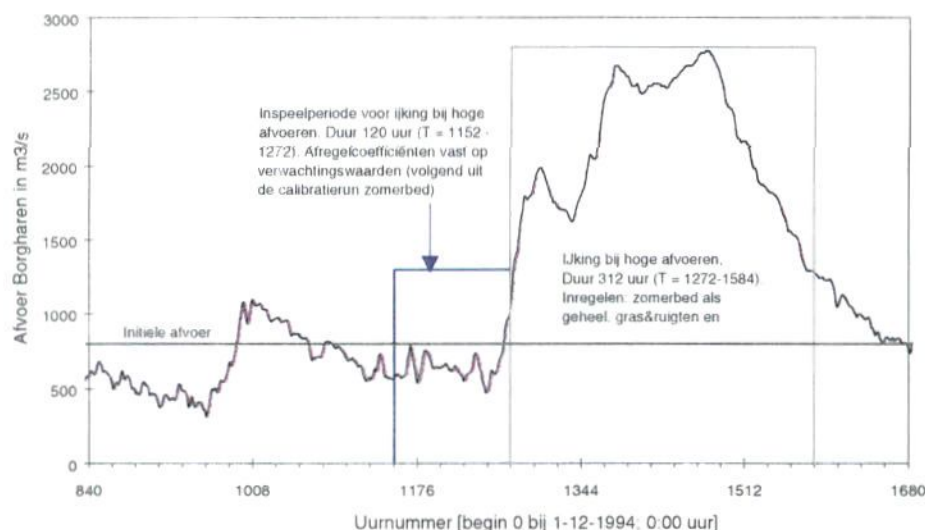


Fig. 4.4. Afvoerverloop voor het inregelen van het model bij hoge afvoeren.

De ijking van het model heeft onder meer tot doel de berekende waterstanden tijdens de piek van het hoogwater zo goed mogelijk weer te geven. De toetsing van berekende en gemeten waterstanden is daarom uitgevoerd voor een periode van 5 dagen rond de top van het hoogwater. Met de voortplanting van de hoogwatergolf door de rivier is rekening gehouden door het venster van 5 dagen op grond van een schatting van de loopsnelheid van de golf te verschuiven.

De directe zoekmethode van Nelder en Mead wordt gestuurd door de grootte van een objectfunctie en tracht deze tijdens de ijking te minimaliseren. De waarde van de objectfunctie is bepaald door de absolute waarde te sommeren van de verschillen in berekende en gemeten waterstanden voor de geselecteerde

meetstations en de waarnemingen binnen het venster van 5 dagen.

Opmerking:

Vaak wordt voor een dergelijke objectfunctie gebruik gemaakt van de som van de kwadraten van de verschillen in berekende en gemeten waterstanden. Hiervan is bewust afgeweken, omdat er onzekerheid bestond over de betrouwbaarheid van enkele meetstations. Bij toepassing van de som van de kwadraten en minimalisatie hiervan zouden (systematische) verschillen voor minder betrouwbare meetlocaties worden uitgesmeerd over de overige meetstations. Hierdoor neemt de nauwkeurigheid van de voorspellende waarde voor de goede stations (het merendeel van de meetlocaties) af, terwijl die van enkele stations (2) toeneemt.

De bepaling van de objectfunctie heeft plaatsgevonden voor 10 meetlocaties, zie Figuur 4.5. De meetlocaties Stevensweert en Heesbeen zijn bij de bepaling van de objectfunctie buiten beschouwing gebleven. Hiervoor zijn de volgende overwegingen aangevoerd:

- Meetpunt Stevensweert ligt in een bocht waar de stroom sterk wordt geknepen. De stroomsnelheden zijn hier zeer hoog en er is een gerede kans dat niet alleen de waterstanden, maar ook een deel van de snelheidshoogte wordt gemeten.
- Het meetpunt Heesbeen wijkt in de berekeningen qua gedrag af van het gemeten waterstandsverloop, vermoedelijk als gevolg van het ontbreken van de Afgedamde Maas in het model.

De procedure voor het ijken is afgebroken op het moment dat geen verbeteringen meer waren te verwachten in de waarde van de objectfunctie.

Het verschil tussen de gemeten en berekende waterstanden voor de verschillende meetstations in het gekozen tijdvenster is weergegeven in Figuur 4.5.

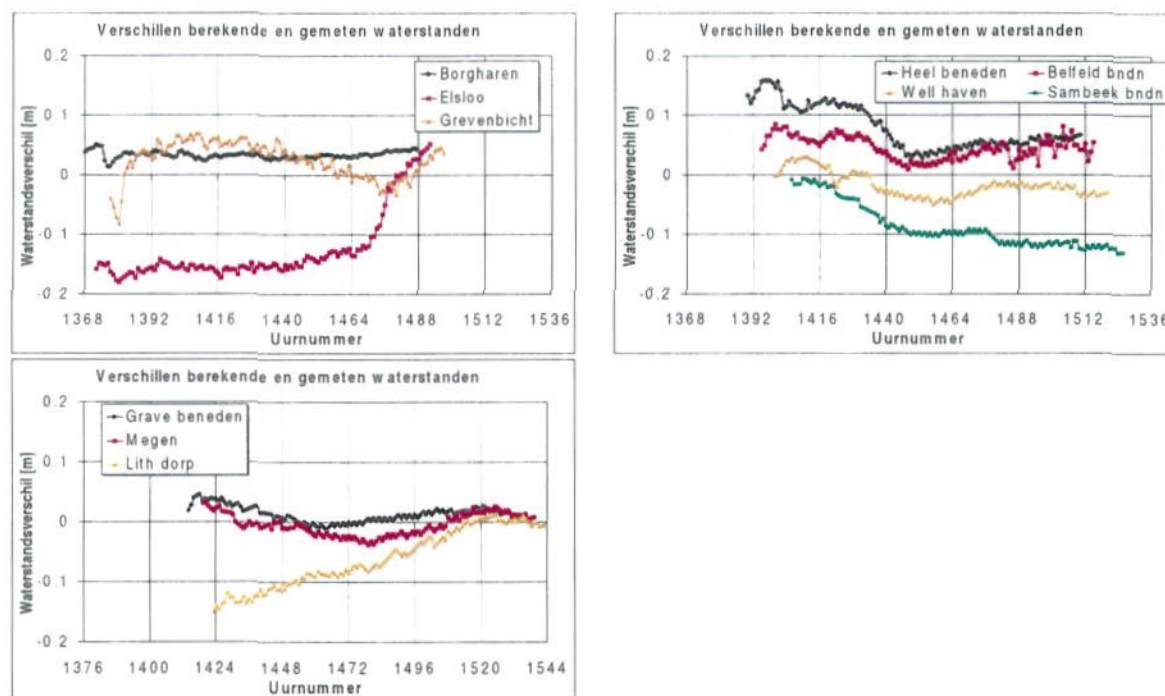


Fig. 4.5. Verschillen tussen berekende en gemeten waterstanden voor het gekozen tijdvenster voor de situatie met de laagste waarde van objectfunctie.

De procedure voor het inregelen van de ruwheid van het model is vooral gebaseerd op de verschillen tussen berekende en gemeten waterstanden tijdens de top van het hoogwater. De verschillen tussen berekende en gemeten waarde zijn over het algemeen kleiner dan 0,1 m, met uitzondering van enkele meetlocaties, zoals Elsloo en voor een deel van de periode Heel beneden, Sambeek beneden en Lith.

Met betrekking tot de afwijkingen tussen de metingen en berekende waarden, zoals weergegeven in

ijking van het zomerbed reeds grote afwijkingen. Een sluitende verklaring daarvoor is nog niet gevonden.

- Ook voor de afwijkingen voor het station Sambeek-beneden is nog geen goede verklaring voor handen.

De resulterende k -waarden voor de verschillende ecotopen zijn vermeld in Tabel 4.2.

De resulterende α -waarden voor de ruwheid van het zomerbed zijn weergegeven in Figuur 4.3. De k -waarde voor het zomerbed varieert bij hoge afvoeren van circa 0,13 tot circa 0,26 m.

4.1.5. Traject Eijsden-Borgharen

Bij de invulling van de ruwheidswaarden voor het traject Eijsden-Borgharen is uitgegaan van de navolgende overwegingen:

- Naar verwachting zal de ruwheid van het zomerbed tussen Eijsden en Borgharen sterk overeenkomen met dat van het eerste traject benedenstrooms van Borgharen en is daarom daaraan gelijk gesteld.
- Voor de ijking van de ruwheden in het winterbed is uitgegaan van een integrale bepaling van de ruwheidswaarden voor de ecotopen die veelvuldig in het winterbed voorkomen (akkers, grassen & ruigten). Er heeft tijdens de ijking geen variatie van de parameters voor de ruwheid van de overige ecotopen plaatsgevonden. Er zijn geen argumenten aan te voeren om voor het traject Eijsden-Borgharen andere waarden voor ruwheid van de ecotopen aan te houden, zodat ook voor dit traject kan worden uitgegaan van de tijdens de ijking voor het traject Borgharen-Keizersveer bepaalde waarden.

4.1.6. Conclusies

De procedure die gevolgd is bij het ijken houdt rekening met

1. variatie van de ruwheid van het zomerbed in stroomrichting onder de aanname dat de bij volzomerbed geldende ruwheidsverhoudingen eveneens geldig zijn bij hoge afvoeren,
2. een mogelijke, zij het integrale, aanpassing van de ruwheid van het zomerbed tijdens hoogwater omstandigheden,
3. voor het gehele model geldende waarden voor de ruwheid van de ecotopen, die in het model slechts beperkt voorkomen en
4. voor het gehele model geldende waarden voor de ruwheid van de ecotopen, die in het model tijdens de ijking zijn gevarieerd.

Uitgaande van bovenstaande kenmerken voor de ruwheden zijn de verschillen tussen berekende en gemeten waarden geminimaliseerd. Voor de top van het hoogwater vallen de verschillen voor het merendeel van de meetlocaties binnen de bandbreedte van $\pm 0,1$ m. Voor enkele stations zijn de verschillen wat groter. Bij de optimalisatie procedure is daarvoor bewust gekozen, omdat daarmee deze locaties nadrukkelijker in beeld komen. Dit biedt de mogelijkheid gericht te controleren of er sprake is van systematische afwijkingen in de meetgegevens of dat de modelschematisatieaanpassing behoeft.

De verschillen in gemeten en berekende waterstanden stemmen tot grote tevredenheid, omdat het model over een lengte van circa 240 km met uniforme waarden voor de verschillende ecotopen gelijkwaardig presteert. Toetsing van gemeten en berekende waarden kan in principe alleen plaatsvinden voor de meetlocaties. Gezien het feit dat voor de ruwheden voor het gehele model identieke waarden zijn gebruikt mag er ook vanuit worden gegaan dat de nauwkeurigheid van het model op de overige locaties in dezelfde orde van grootte ligt.

4.2. Verificatie van WAQUA op het hoogwater 1993

4.2.1. Verificatie WAQUA model

De verificatie van het geijkte model heeft tot doel de voorspellende waarde van het model te toetsen aan een ander hoogwater. De toetsing van het model is uitgevoerd aan de hand van het hoogwater van 1993, waarbij geen wijzigingen zijn aangebracht in de ruwheidswaarden voor het zomerbed en de verschillende ecotopen. Om de verificatie uit te kunnen voeren zijn enkele wijzigingen in de schematisatie van het model aangebracht. De wijzigingen betreffen:

- het verwijderen van de noodkades die in 1995 wel aanwezig waren en tijdens het hoogwater van 1993 niet.
- het aanpassen van begin- en randvoorwaarden
- het aanpassen van laterale instromingen.

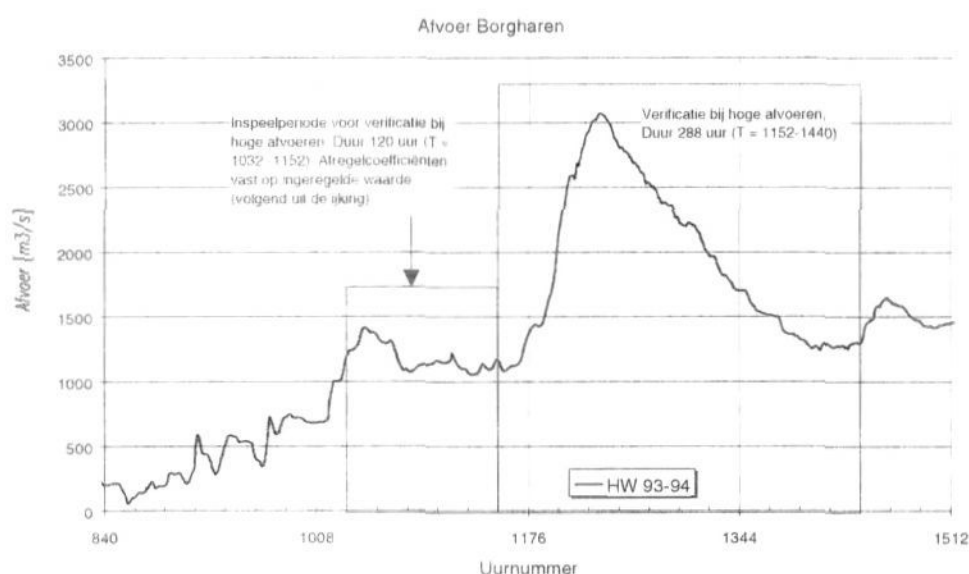


Fig. 4.6. Afvoerverloop tijdens hoogwater van december 1993.

De berekeningsprocedure voor de verificatie verloopt op dezelfde wijze als bij de ijking van het zomerbed en winterbed bestaande uit, zie Figuur 4.6:

- het bepalen van de initiële condities,
- het laten inspelen van het model om de waterstanden in het model aan te laten passen aan de variërende afvoer en
- het simuleren van de waterstanden tijdens de hoogwatergolf.

Voor de initiële condities is uitgegaan van een afvoer van 1000 m³/s. Het inspelen van het model vindt plaats van 14 december tot 19 december 1993 (120 uur tussen urnummer 1032 en urnummer 1152). De verificatie vindt aansluitend plaats voor de periode 19 december tot 31 december 1993 (288 uur tussen urnummer 1152 en urnummer 1440).

Voor de vergelijking van gemeten en berekende waterstanden is een tijdvenster van 120 uur rond de top van het hoogwater gebruikt. De ligging van dit tijdvenster is voor elke meetlocatie anders om rekening te kunnen houden met de looptijd van de hoogwatergolf. In Figuur 4.7 is het verloop van de verschillen tussen berekende waarden en de metingen weergegeven.

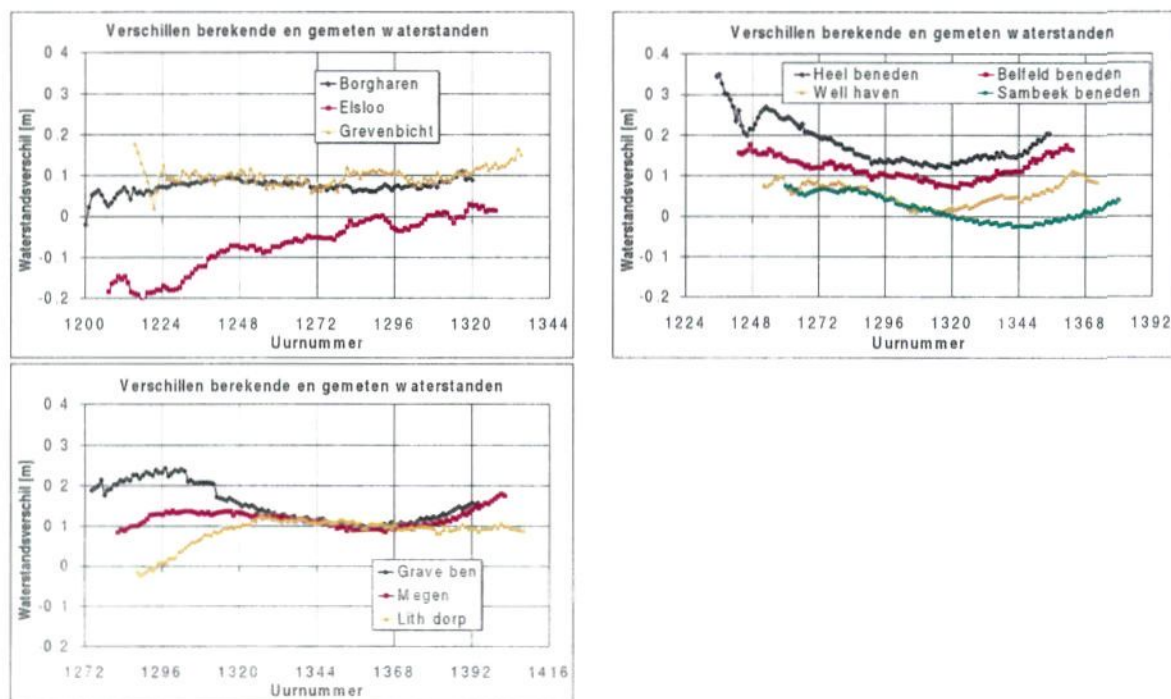


Fig. 4.7. Verschil in berekende en gemeten waterstanden voor het hoogwater van december 1993.

4.2.2. Conclusie

De verschillen tussen gemeten en berekende waarden bedraagt over het algemeen minder dan 0,15 m, met uitzondering van de meetlocaties Elsloo, Heel-beneden en Grave, waar gedurende een deel van de top de verschillen groter zijn.

Zoals gebruikelijk zijn de verschillen bij verificatie van modellen groter dan tijdens de calibratie. Het voorliggende WAQUA-model verschilt daarin niet van andere modellen. Gesteld kan worden dat de verschillen alleszins redelijk zijn in relatie tot de verschillen die bij de ijking over zijn gebleven. Geconcludeerd kan worden dat een betrouwbare ijking en verificatie van het model heeft plaatsgevonden.

5. OPSTUWEND EFFECT DOOR DGR-KADES

5.1 Afvoergolf 1/50 jaar (Borgharen: 2710 m³/s)

Teneinde de opstuwing van de kades te beoordelen in de voor de omkade gebieden maatgevende hoogwatersituatie, is met de WAQUA-schematisaties 1995 en 1995-DGR een simulatie gedaan van de theoretische hoogwatergolf met een herhalingsijd van 50 jaar (piekafvoer te Borgharen: 2710 m³/s). Figuur 5.1 toont de resultaten van deze simulaties.

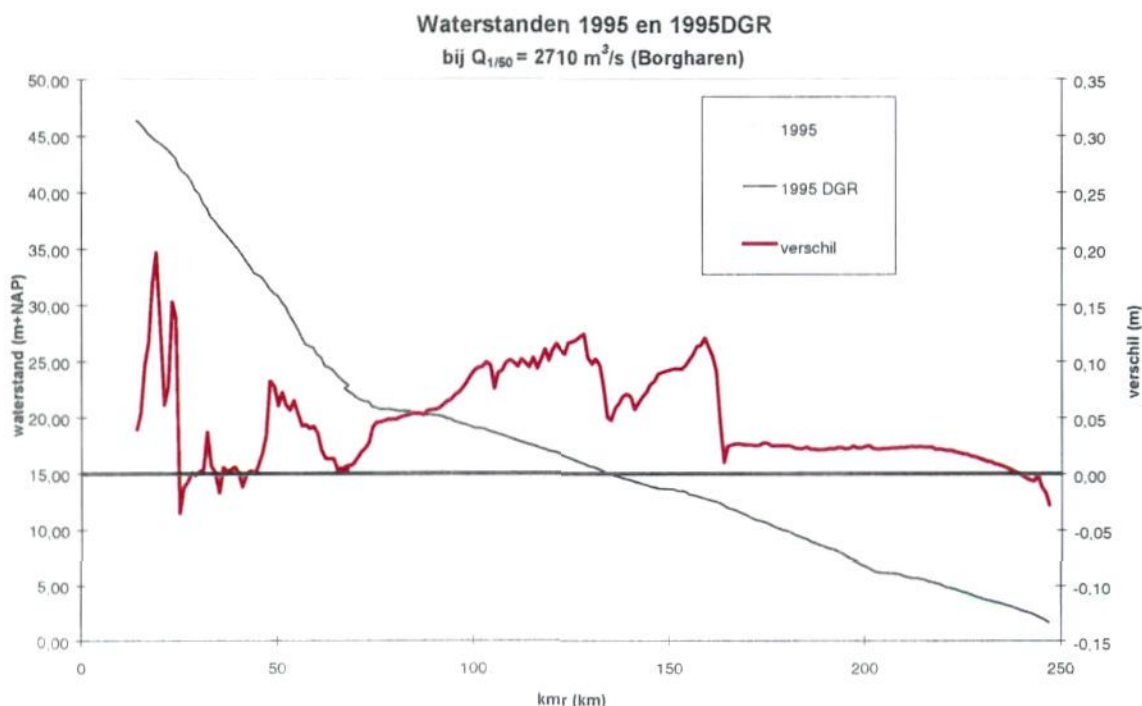


Fig. 5.1. Opstuwing door kades bij een hoogwatergolf met een herhalingsstijd van 50 jaar ($Q_{1/50}$)

De figuur toont beide verhanglijnen over de Maas tot km 250 (Keizersveer). In deze figuur liggen ze evenwel zo dicht bij elkaar, dat ze nauwelijks meer te onderscheiden zijn. De verschillen zijn daarom apart uitgezet: de rode lijn (rechters) toont de opstuwing ten gevolge van de DGR-kades. Dit betekent dat er door de aanleg van de DGR-kades ondanks de speciewingebieden sprake is van opstuwing. Deze opstuwing is te verklaren uit de profielvernauwing die ontstaat doordat delen van het hoogwaterbed niet meer aan de afvoercapaciteit kunnen bijdragen.

Het effect loopt in de Grensmaas lokaal op tot 0,20 m bij Itteren (km 19) en 0,16 m bij Aan de Maas (km 23). In de Zandmaas is de opstuwing 0,05 tot 0,10 m tot Mook (km 162). Benedenstrooms hiervan bedraagt de opstuwing slechts enkele centimeters.

5.2 Afvoergolf 1/250 jaar (Borgharen: $3275 \text{ m}^3/\text{s}$)

Voorts is een simulatie uitgevoerd, met als doel het beoordelen van de opstuwing van de DGR-kades voor de afvoergolf die na uitvoering van De Maaswerken maatgevend is voor de veiligheid van de omkade gebieden (herhalingsstijd van 250 jaar). Bij deze hogere afvoer zal vanzelfsprekend de opstuwing groter zijn. Uit Figuur 5.2. blijkt dat de opstuwing bij Itteren zelfs bijna 0,35 m is. Ook de opstuwing tussen Roosteren en Ohé en Laak (km 49 ~ 61) is nu aanzienlijk (ca. 0,15m - 0,20m).

Opmerkelijk is dat de opstuwing in de Zandmaas geringer is dan bij de kleinere hoogwatergolf. In het gebied tussen km 100 – km 130 bedraagt de opstuwing nog slechts 0,05m, terwijl er benedenstrooms van Well (km 132) er zelfs sprake is van een waterstandsval. De verklaring hiervoor is dat de omkade gebieden in de Zandmaas en een gedeelte van de Grensmaas overstroomd raken. Door het retentie-effect dat hierbij ontstaat, neemt de afvoerpiek snel af in benedenstroomse richting.

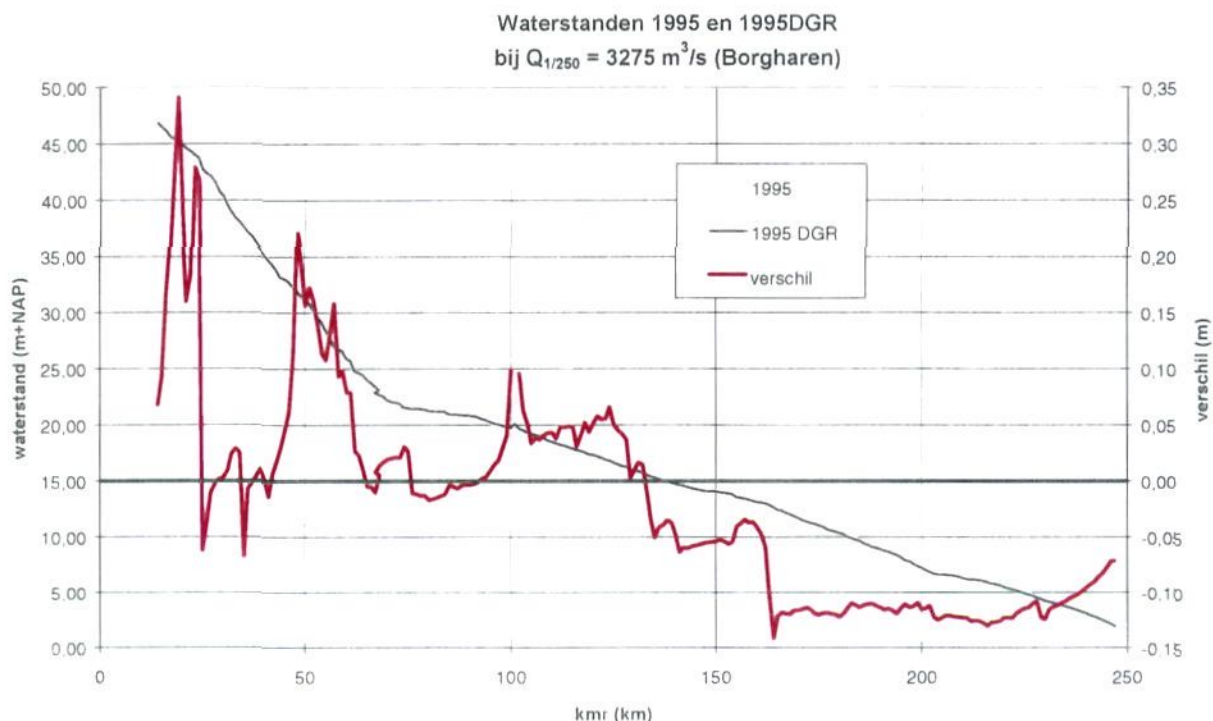


Fig. 5.2 Gedeeltelijke opstuwing (bovenstrooms) en gedeeltelijke waterstandsverlaging (benedenstrooms) na aanleg van kades bij een hoogwatergolf met een herhalingsjijd van 250 jaar ($Q_{1/250}$) door inundatie van de omkade gebieden

5.3 Conclusies

Onderstaand zijn de conclusies van dit hoofdstuk samengevat:

- De DGR-kaden veroorzaken een opstuwing onder hoogwateromstandigheden. Bij een hoogwatergolf met overschrijdingsfrequentie van 1/50 jaar ($Q_{1/50}$) is er in de Grensmaas een opstuwend effect van gemiddeld enkele cm, dat lokaal blijkt op te lopen tot 0,20m (nabij Itteren). In de Zandmaas is deze opstuwing ca 0,10m over het traject km 100 – km 160 en ca 0,03m over het traject km 160 – km 240.
- Bij een afvoergolf $Q_{1/250}$ is de opstuwing van de DGR-kaden in de Grensmaas maximaal zelfs 0,35 m. Benedenstrooms van km 130 is echter een waterstandsvaling merkbaar, doordat de meer bovenstroomse omkade gebieden overstroomd raken en als retentiegebied fungeren. Dit deel van de Maas wordt hierdoor met een lagere piekafvoer belast. Benedenstrooms van km 130 treedt er zelfs een waterstands daling van ca 0,10m op.
- De lokale opstuwingen bij Itteren, Aan de Maas en (in mindere mate) tussen Roosteren en Ohé en Laak verdienen aandacht.
- Het lijkt zinvol de berekening bij 1/250 ook nog te maken voor een situatie zonder overstromende kaden. Immers daarmee ontstaat het inzicht welke extra inspanning de Maaswerken moest leveren ter compensatie van deze opstuwende werking.

6. VEILIGHEID VAN DE REFERENTIESITUATIE

6.1 Toetsing van de referentiesituatie aan verhanglijn 2

Verhanglijn 2 is een aaneenschakeling van waterstanden, die in de referentiesituatie (1995 na aanleg van de DGR-kades) gemiddeld eens per 50 jaar worden overschreden. Verhanglijn 2 is vastgesteld op basis van simulaties met het modelsysteem ZWENDL. De DGR-kades zijn in 1995 op basis van verhanglijn 2 aangelegd waarbij een waakhoopte van minimaal 0,50 m in acht is genomen. Dit betekent dat voor de referentiesituatie een beschermingsniveau moet gelden van 1/50 jaar, waarbij de waakhoopte gereserveerd is voor modelon nauwkeurigheid, opwaaiing en golfoploop.

Berekeningen voor de referentiesituatie (1995 met DGR-kaden) tonen evenwel aan dat de waterstanden aanzienlijk hoger zijn dan deze op basis van ZWENDL vastgestelde verhanglijn 2. In Figuur 6.1 is aangegeven in welke mate de met WAQUA berekende waterstanden hoger liggen dan verhanglijn 2 ((berekeningsresultaten Q 1/50 - VH2). In het Zandmaas gebied blijken de waterstanden 0,20m tot 0,50m hoger te liggen dan oorspronkelijk gedacht. Dit impliceert dat ter hoogte van verhanglijn 2 niet het beoogde veiligheidsniveau wordt gehaald.

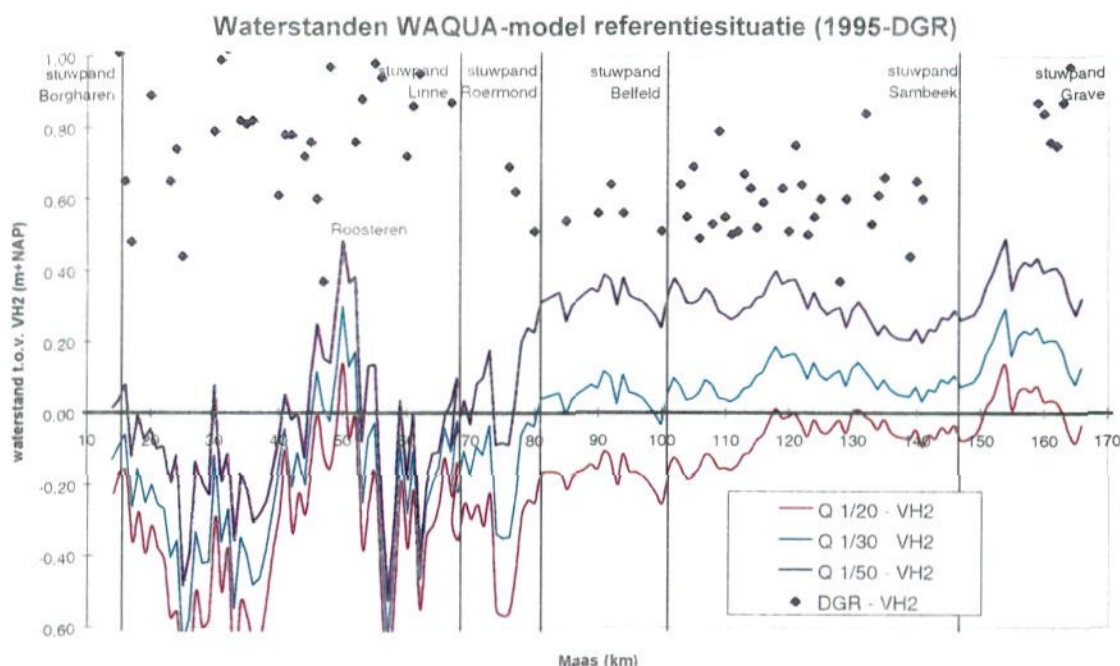


Fig. 6.1 Berekende waterstanden in Zandmaas (WAQUA 1995-DGR) bij theoretische hoogwatergolven (1/20, 1/30 en 1/50 jaar); vergelijking met verhanglijn 2 en kadehoogten

Hoewel de DGR-kadehoogten op verhanglijn 2 gebaseerd zijn, is de waakhoopte in de praktijk vaak groter dan 0,50 m (zie figuur 6.1).

6.2 Veiligheid van de omkade gebieden

De vraag dringt zich op welk beschermingsniveau de DGR-kades in de referentiesituatie (maar dus ook in de huidige situatie) nu wel bieden. Om deze vraag te beantwoorden zijn twee aanvullende simulaties gedaan met kleinere hoogwatergolven, die een theoretische herhalingstijd van 20 respectievelijk 30 jaar hebben. De verschillen met verhanglijn 2 zijn in de figuur weergegeven. Uit de verschillen zijn ruwweg drie zones te onderscheiden:

Maas	van	tot	km	beschermingsniveau ¹⁾
Grensmaas	Borgharen	Linne	0 - 68	1 / 50 jaar (m.u.v. Roosteren)
Zandmaas	Linne	Hasselt	60 - 115	1 / 30 jaar
	Hasselt	Heumen	115 - 168	1 / 20 jaar

¹⁾ bij benadering: uitgedrukt in verwachte herhalingsfrequentie dat verhanglijn 2 wordt overschreden.

Tabel 6.1 Geschatte beschermingsniveau referentiesituatie Maas (1995-DGR) volgens WAQUA-berekeningen

Uitgaande van verhanglijn 2 als referentielijn blijkt de werkelijke bescherming te liggen bij een afvoergolf van 1/20 à 1/30. Evenwel de DGR-kaden zijn in werkelijkheid veelal veel hoger gebouwd dan de afgesproken 0,50m boven verhanglijn 2. Dit blijkt duidelijk uit Figuur 6.1, waar ook de kadehoogten t.o.v. verhanglijn 2 staan aangegeven. In werkelijkheid is de situatie dus gunstiger.

Het verschil tussen verhanglijn 2 en de waterstanden van $Q_{1/50}$ bedraagt globaal 0,30m en lokaal tot 0,50m. Globaal betekent dit een resterende waakhoogte van 0,20m, die lokaal tot nihil zou afnemen, ware het niet dat de kaden hoger zijn gebouwd dan afgesproken. Door deze overhoogte raken de kaden, behalve mogelijk zeer lokaal, niet overstroomd bij een afvoergolf van $Q_{1/50}$. Wel moet hierbij beseft worden dat wel degelijk rekening gehouden moet worden met factoren als meeton nauwkeurigheden, modelon nauwkeurigheid, golfploop en windopzet; een overhoogte blijft dus altijd geboden.

6.3 Conclusies

- De met WAQUA berekende waterstanden bij $Q_{1/50}$ liggen globaal 0,20 – 0,40m hoger dan die berekend met ZWENDL.
- Verhanglijn 2 blijkt overeen te komen met de waterstanden behorende bij een afvoergolf $Q_{1/20}$ tot $Q_{1/30}$.
- De veiligheidssituatie, uitgaande van verhanglijn 2, is in de Grensmaas doorgaans voldoende (met uitzondering van Roosteren), maar in de Zandmaas onvoldoende.
- In de Zandmaas zou de resterende waakhoogte hierdoor reduceren tot globaal 0,20 m en lokaal zelfs tot nihil afnemen. Evenwel de kaden blijken gemiddeld zo'n 0,10m hoger gebouwd dan bedoeld, zodat theoretisch geen overstromingen plaatsvinden. In werkelijkheid moeten hier nog de vereiste onnauwkeurighedsbanden worden bijgeteld, zodat zonder extra maatregelen reële kansen voor overstromingen aanwezig zijn bij de 1/50 golf.

7. TOETSING INRICHTINGSLTERNATIEVEN

7.1. Hoogwaterbescherming Zandmaas (TN/MER)

Doelstelling van de inrichtingsalternatieven in de TN/MER (TN/MER, 1999) is, dat deze zodanig vorm krijgen, dat verhanglijn 2 na uitvoering nog slechts eens in de 250 jaar overschreden wordt, overeenkomstig het beoogde beschermingsniveau na uitvoering van de Maaswerken.

De drie inrichtingsalternatieven Combinatiealternatief, Basisalternatief 2 en het Meest Milieuvriendelijk Alternatief worden in combinatie met het Ruw Ontwerp van de Grensmaas op basis van de WAQUA-schematisaties (RO+CA, RO+BA2 en RO+MMA) getoetst op hun veiligheidsdoelstelling. Hierbij worden de optredende maximale waterstanden bij een hoogwatergolf met overschrijdingsfrequentie van 1/250 jaar ($Q_{1/250}$: maximale afvoer 3275 m³/s te Borgharen) geanalyseerd.

De resultaten worden achtereenvolgens per berekening in een figuur weergegeven:

Figuur 7.1: Basisalternatief 2

Figuur 7.2: Combinatiealternatief

Figuur 7.3: Meest Milieuvriendelijke Alternatief

Figuur 7.3: Meest Milieuvriendelijke Alternatief

In deze figuren wordt weergegeven:

1. de waterstanden volgens verhanglijn2,
2. de waterstanden bij uitvoering van het Ruw Ontwerp (RO) voor de Grensmaas en een van de alternatieven voor de Zandmaas,
3. de hoogte van de DGR-kaden
4. het verschil tussen de DGR-kaden en het niveau van verhanglijn2 en
5. het verschil van Maasalternatief en het niveau van verhanglijn2.

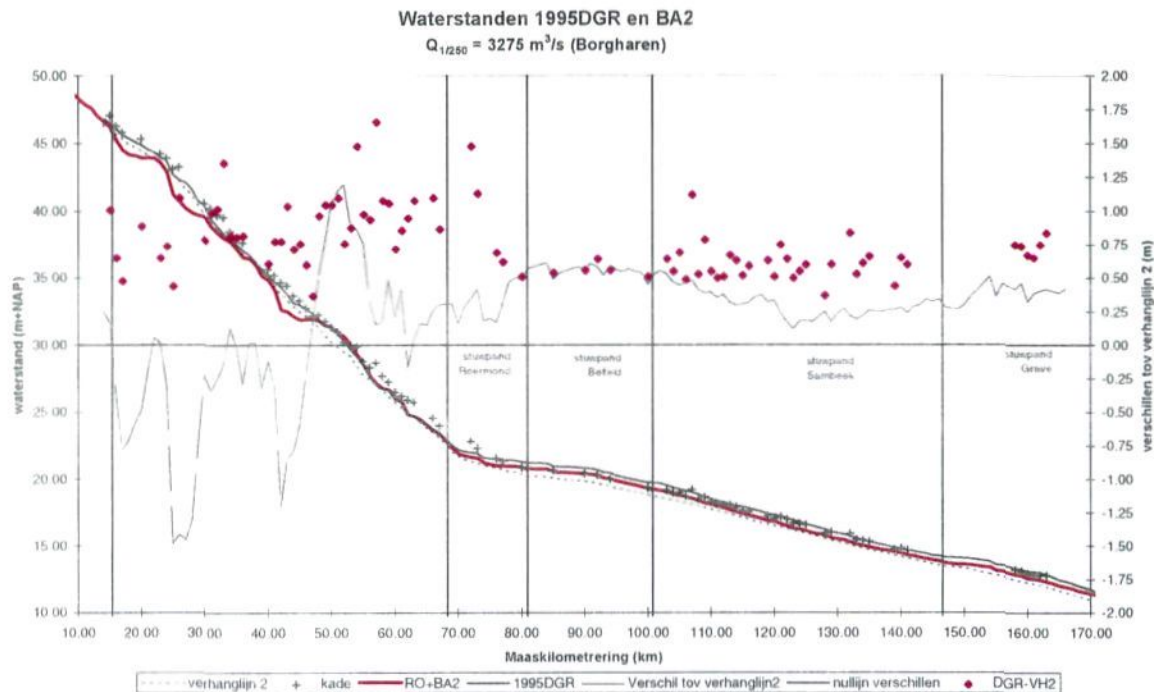


Fig. 7.1. Waterstanden bij hoogwatergolf $Q_{1/250}$; situatie 1995 met DGR-kaden en Basisalternatief 2 en verschillen ten opzichte van verhanglijn2.

Basisalternatief 2

Uit Figuur 7.1 valt het volgende af te leiden:

- Van km 54 tot circa km 67 wordt verhanglijn2 ruim overschreden. In dit deel van de Maas zijn geen rivierverruimende maatregelen gedefinieerd. Verhanglijn2 is bepaald als de waterstand bij de 1/50 jaar afvoer. Na uitvoering van de Maaswerken geldt een beschermingsniveau van 1/250 jaar. In het gedeelte van de Maas waar geen verruiming is gedefinieerd moet de hoogte van de kade daarop zijn afgestemd. Voor het hier bedoelde deel van de Maas mag verhanglijn2 daarom worden overschreden, omdat hier de kade hoogte in principe al aangelegd moet zijn op het niveau van 1/250 jaar voor de huidige geometrie. Volgens Figuur 7.1 is voor een deel van dit traject de kade hoogte ontoereikend.
- Benedenstreams van km 70 liggen de waterstanden circa 0,25 tot 0,50 m boven verhanglijn2. In het stuwpand Roermond is er voldoende waakhogte beschikbaar om de hogere waterstanden op te vangen.
- In de stuwpanden Belfeld, Sambeek en Grave liggen de berekende waterstanden over het algemeen in het gedeelte van de waakhogte. Van globaal km 85 tot globaal km 110 komen de berekende waterstanden overeen met de kruinhogte.

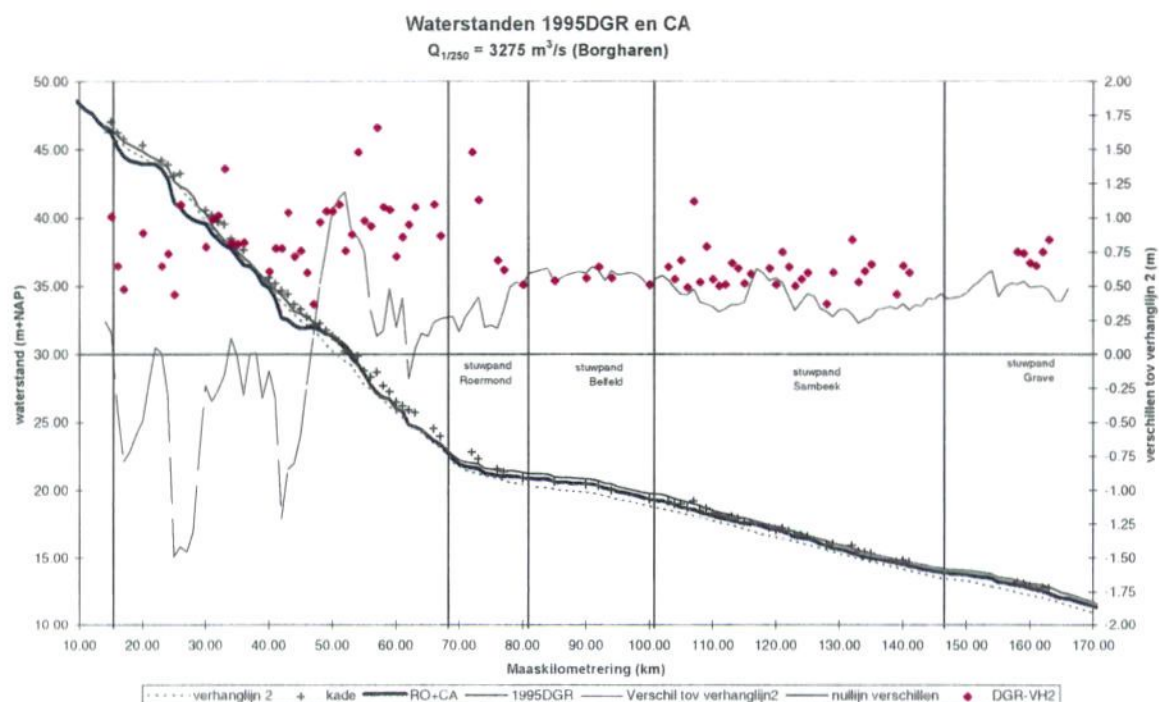


Fig. 7.2. Waterstanden bij hoogwatergolf $Q_{1/250}$; situatie 1995 met DGR-kaden en Combinatie Alternatief en verschillen ten opzichte van verhanglijn2.

Combinatiealternatief

Uit Figuur 7.2 is het volgende af te leiden:

- Zoals verwacht zijn de verschillen tussen BA2 en CA in het deel van de Grensmaas klein.
- In het stuwpannd Roermond, het stuwpannd Belfeld en in het stuwpannd Sambeek tot km 115 zijn de verschillen met BA2 klein, zie ook Figuur 7.4. Pas benedenstrooms daarvan worden de verschillen groter, waarbij de verschillen met verhanglijn2 in het Combinatie Alternatief groter zijn dan bij BA2.
- In stuwpannd Roermond is voldoende waakhogte aanwezig om de hogere waterstanden op te vangen.
- De waakhogte in het stuwpannd Belfeld, Sambeek en Grave is onvoldoende om de hogere waterstanden op te vangen. Lokaal loopt een enkele kade over, maar inspectie laat zien dat het bergend volume achter deze kaden zo gering is dat daarmee geen wezenlijke reductie van de maximale afvoer meer benedenstrooms ontstaat.

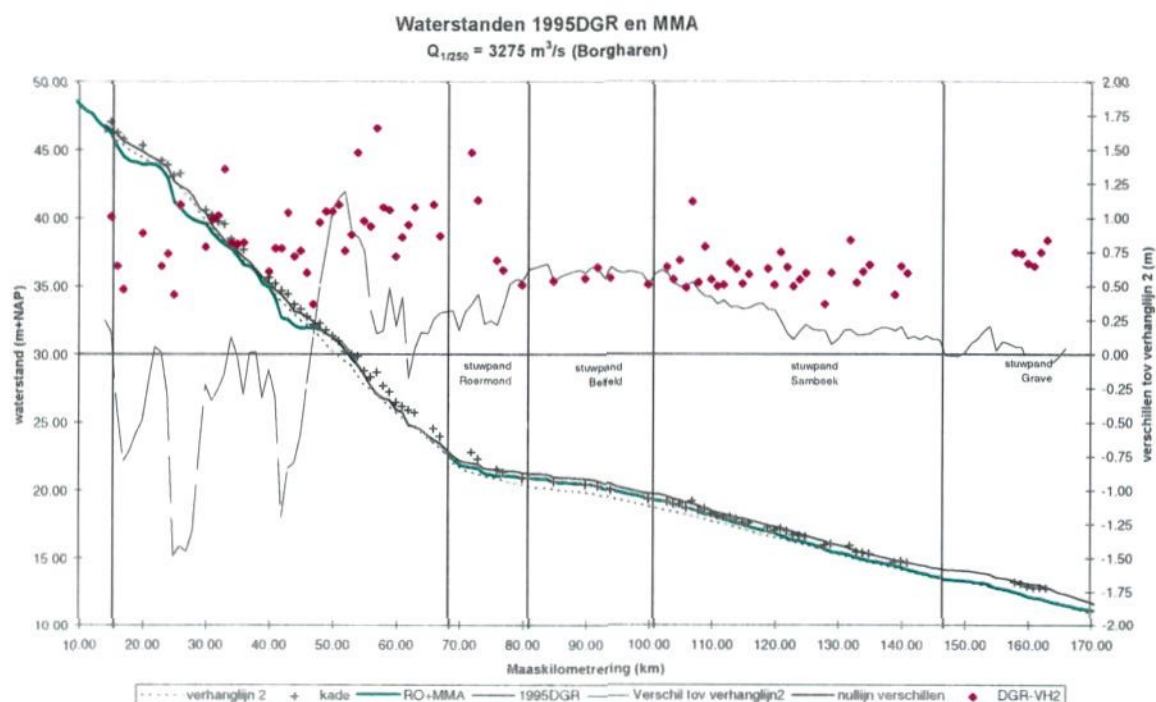


Fig. 7.3. Waterstanden bij hoogwatergolf $Q_{1/250}$; situatie 1995 met DGR-kaden en Meest Milieuvriendelijk Alternatief en verschillen ten opzichte van verhanglijn2.

Meest Milieuvriendelijk Alternatief

Uit Figuur 7.3 is het volgende af te leiden:

- Het verschil tussen het MMA, BA2 en CA in het deel van de Grensmaas klein, zie ook Figuur 7.4
- In het stuwpand Roermond, het stuwpand Belfeld en het stuwpand Sambeek tot aan km 115 zijn de verschillen met BA2 en CA klein. Van km 115 tot km 125 volgt het MMA de verschillen van BA2. Benedenstrooms daarvan worden de verschillen tussen MMA en verhanglijn2 kleiner dan bij het BA2.
- In stuwpand Roermond is voldoende waakhogte aanwezig om de hogere waterstanden op te vangen.
- De waakhogte in het stuwpand Belfeld en Sambeek is over grote trajecten onvoldoende. Benedenstrooms van km 125 bedraagt de waakhogte in het stuwpand Belfeld in het MMA globaal 0,3 a 0,5 m.
- De waakhogte in het stuwpand Grave bedraagt circa 0,5 m.
- In het MMA draagt het winterbed meer bij aan de verlaging van waterstanden dan bij BA2 en CA. Bij de bepaling van verhanglijn2 werd in de ZWENDL-berekeningen het effect van stroming over het winterbed onderschat. Als gevolg hiervan werd ook het effect van maatregelen in het winterbed door het ZWENDL-model onderschat. In het WAQUA-model is dit niet het geval. Maatregelen in het winterbed hebben hierdoor in het WAQUA-model een groter effect. Bij het MMA komt dit tot uiting in geringere verschillen tussen de met WAQUA-berekende waarden en verhanglijn2.

7.2. Vergelijking van de alternatieven

In Figuur 7.4 zijn de verschillen in waterstanden ten opzichte van verhanglijn2 voor het BA2, CA en het MMA in één figuur weergegeven. Tot km 115 zijn er geen significante verschillen tussen de alternatieven m.b.t. hun effect op de waterstanden. Benedenstrooms van dit punt blijken er wel belangrijke verschillen te bestaan. Bij het Combinatie Alternatief zijn de verschillen met verhanglijn 2 het grootst. De verschillen tussen berekende waterstanden en verhanglijn2 zijn het kleinst bij het MMA. Basisalternatief 2 volgt het MMA tot globaal km 125. Vanaf km 125 lopen de verschillen bij het Basisalternatief BA2 op en komen in de buurt van het Combinatie Alternatief.

Wel moet hierbij bedacht worden dat voor het CA er in de stuwpanden Belfeld en Grave in het model te

weinig is verdiept (zie hoofdstuk 2.3), waardoor er bij het CA nog een extra waterstandsverlaging van ca 0,10m te verwachten is. Dit brengt het CA nog dichterbij de buurt van BA2.

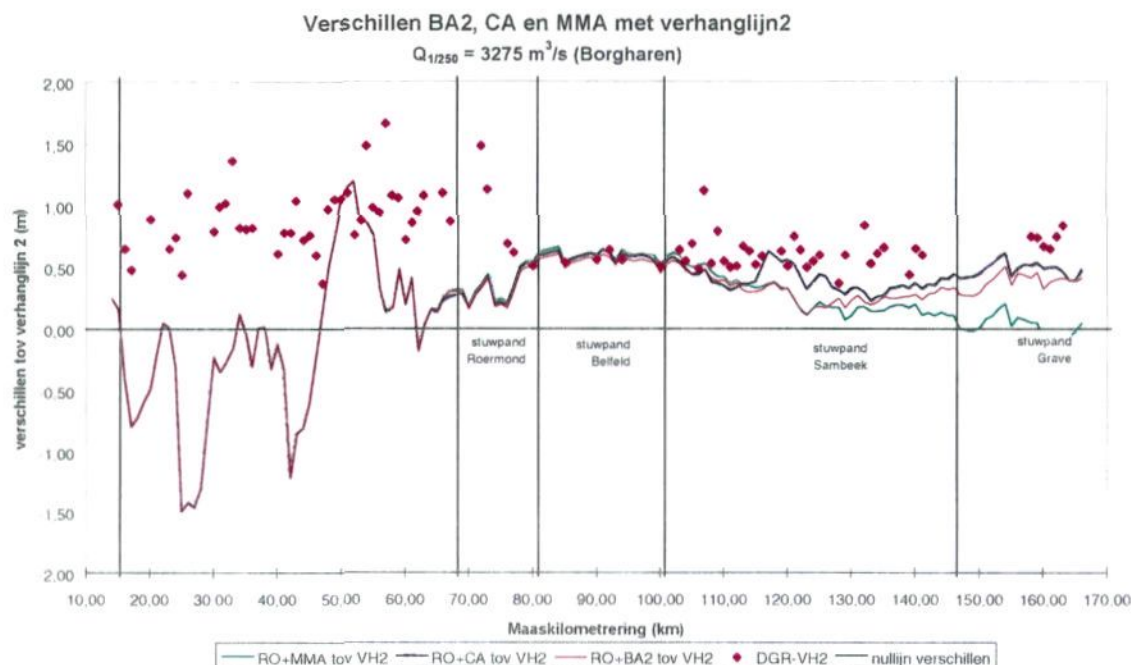


Fig. 7.4. Verschillen van waterstanden voor BA2, CA en MMA ten opzichte van verhanglijn2.

In Tabel 7.1 zijn de afwijkingen (in m) samengevat, gemiddeld over het gehele traject km 66 –168:

relatieve waterstanden in Zandmaas (km 66 - 168)	1995 DGR	CA	BA2	MMA
overschrijding ten opzichte van verhanglijn 2	0,76	0,44	0,37	0,33
gemiddelde overhoogte DGR-kades	-0,06	0,29	0,35	0,40

Tabel 7.1 Waterstanden in de Zandmaas ten opzichte van verhanglijn 2 en DGR-kades

De tabel bevestigt, dat in alle gevallen verhanglijn 2 overschreden wordt. De gemiddelde overhoogte voldoet dan ook in geen van de gevallen aan de vereiste waakhoogte. Tevens blijkt uit de tabel, dat het verschil tussen de kadehoogten en verhanglijn 2 meer dan 0,50 m is: de som van elke kolom bedraagt ca 0,23 m meer dan de vereiste waakhoogte; zie ook Figuur 7.4.

Met betrekking tot de interpretatie van de kadehoogte en bijhorende waakhoogte moet worden opgemerkt dat kaden niet direct naast de as van de rivier liggen. De locatie van kaden wordt gekoppeld aan een rivierkilometreering en dit kan daardoor enige (zij het relatief geringe) onzekerheid met zich meebrengen in de positionering van de kades in de figuren.

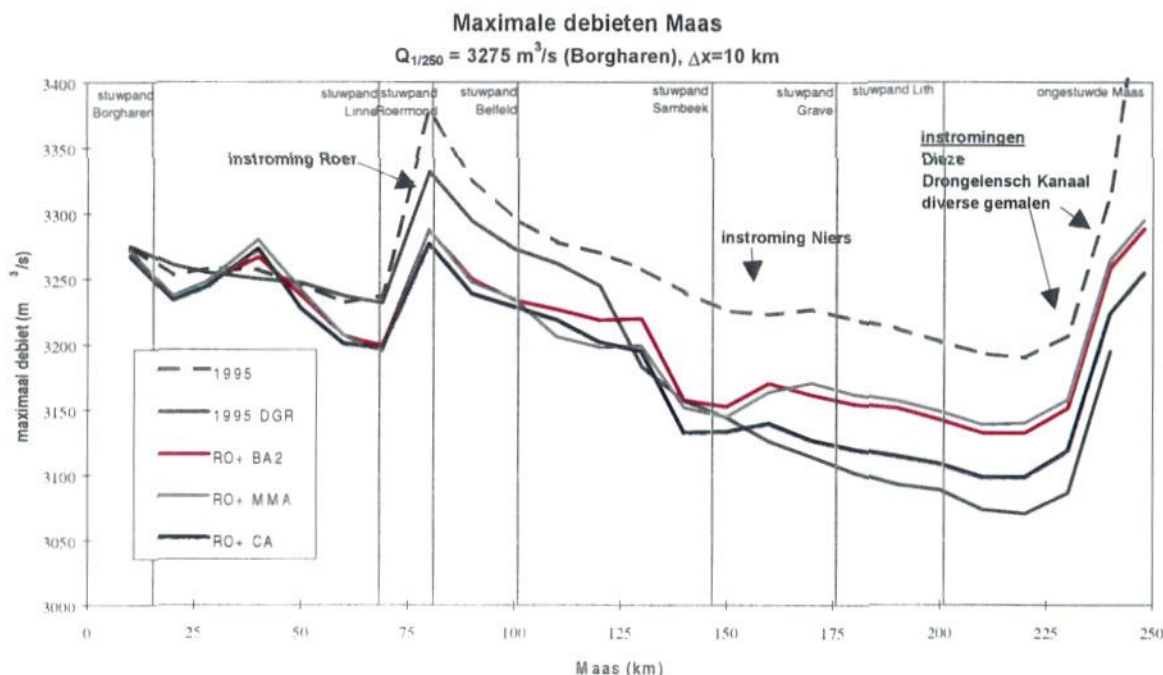


Fig. 7.5 Verloop van de afvoerpiek in de Maas volgens WAQUA (Grensmaas en Zandmaas)

De optredende waterstanden hangen nauw samen met het verloop van de afvoerpiek (figuur 7.5). De ingrepen in de Grensmaas leiden tot enige reductie van de piekafvoer bij Maasbracht.

De referentiesituatie met DGR-kades (1995-DGR) laat bij de 1/250 jaar afvoer tussen km 120 en 160 een sterke daling van de afvoerpiek zien. Dit wordt veroorzaakt door het overlopen van de kaden, waardoor een deel van de afvoer wordt geborgen en niet meer wordt afgevoerd. Dit retentie effect treedt bij de alternatieven voor de Zandmaas niet op.

Voor de drie berekeningen (BA2, CA en MMA) is gecontroleerd in hoeverre de gebieden die onder water zijn komen te staan van elkaar verschillen. Over het geheel genomen verschillen de inundatiegebieden niet van elkaar. Lokaal bestaan er echter wel kleine verschillen in de geïnundeerde oppervlakte doordat de waterstanden in de verschillende alternatieven van elkaar verschillen. Het gaat echter om relatief geringe hoeveelheden water die weinig invloed zullen hebben op de verandering in afvoer in de stroomrichting. Geconcludeerd kan daarom worden dat het effect van retentie bij de referentie situatie (1995-DGR) bij de 1/250 jaar golf wel en bij de alternatieven voor de Zandmaas niet optreedt.

7.3 Conclusies

Onderstaand zijn de conclusies van dit hoofdstuk opgesomd:

- Geen van de inrichtingsalternatieven van De Maaswerken voldoet aan verhanglijn 2 bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 250 jaar. De overschrijding bedraagt globaal 0,20 tot 0,60 m.
- Een vergelijking van de WAQUA-resultaten met de ZWENDL-resultaten (waarop de TN/MER tot nu toe gebaseerd is) heeft impliciet plaatsgevonden doordat verhanglijn 2 op ZWENDL-berekeningen gebaseerd is: de conclusie luidt dat er grote verschillen zijn. Oorzaken hiervoor zijn de verschillen in detailniveau van de modelschematisatie, maar ook verschillen in toegepaste randvoorwaarden. Het beoogde veiligheidsniveau wordt niet gerealiseerd.
- Hoewel de kaden gemiddeld hoger zijn aangelegd dan op grond van verhanglijn 2 noodzakelijk, biedt deze overhoogte (gemiddeld ca 0,23 m) onvoldoende reserve om het tekort op te vangen. Bij de afvoergolf $Q_{1/250}$ blijkt de resterende waakhoogte te variëren van 0,00 m tot 0,50m.
- In alle simulaties staat het water in het stuwpand Belfeld tot de kruin van de kade
- In globaal de bovenstroomse helft van het stuwpand Sambeek is er nauwelijks nog sprake van

waakhoogte. In de benedenstroomse helft van dit stuwpand wordt de waakhoogte geleidelijk groter, afhankelijk van het beschouwde alternatief.

- Onderling verschillen de alternatieven vooral benedenstrooms van Hasselt (km 115). Het MMA scoort hier beduidend beter dan het BA2 en CA. Dit vindt z'n oorzaak in het feit dat winterbedmaatregelen effectiever blijken dan oorspronkelijk op grond van ZWENDL-berekeningen werd gedacht. Wel zal in hoofdstuk 8 blijken dat deze grotere effectiviteit grotere benedenstroomse effecten tot gevolg heeft.
- Kijkend naar de voortschrijdende afvoerpiek in het Zandmaasgebied (figuur 7.5), valt op dat deze in de referentiesituatie (1995-DGR) snel afneemt. Dit heeft te maken met inundatie van omkade gebieden bij de 1/250 jaar golf. In het Combinatiealternatief blijkt de afvoerpiek sneller af te nemen dan bij de overige inrichtingsalternatieven.

8. BENEDENSTROOMSE EFFECTEN

8.1. Inrichtingsalternatieven

Wanneer een traject van de rivier wordt verruimd leidt dit tot een versnelde afvoer en daarmee ter plaatse tot een waterstandsverlaging, maar stroomafwaarts van deze rivierverruiming zal deze afvoergolf, althans wanneer geen compenserende maatregelen worden uitgevoerd, tot verhoging van de waterstand leiden: de zgn. "benedenstroomse effecten". In het benedenstroomse gebied gaat de Maas over van het onbedijkte naar het bedijkte deel. Voor dat laatstgenoemde deel met zgn. primaire waterkeringen gelden strenge eisen m.b.t. de veiligheid. Immers een dijkdoorbraak kan desastreuze gevolgen hebben. De eis is dan ook gesteld dat de ingrepen in het onbedijkte deel van de Maas geen negatieve effecten mogen hebben op de veiligheid in het bedijkte deel van de Maas. In dit hoofdstuk wordt daarom onderzoek gedaan naar mogelijke benedenstroomse effecten van de voorgestelde alternatieven.

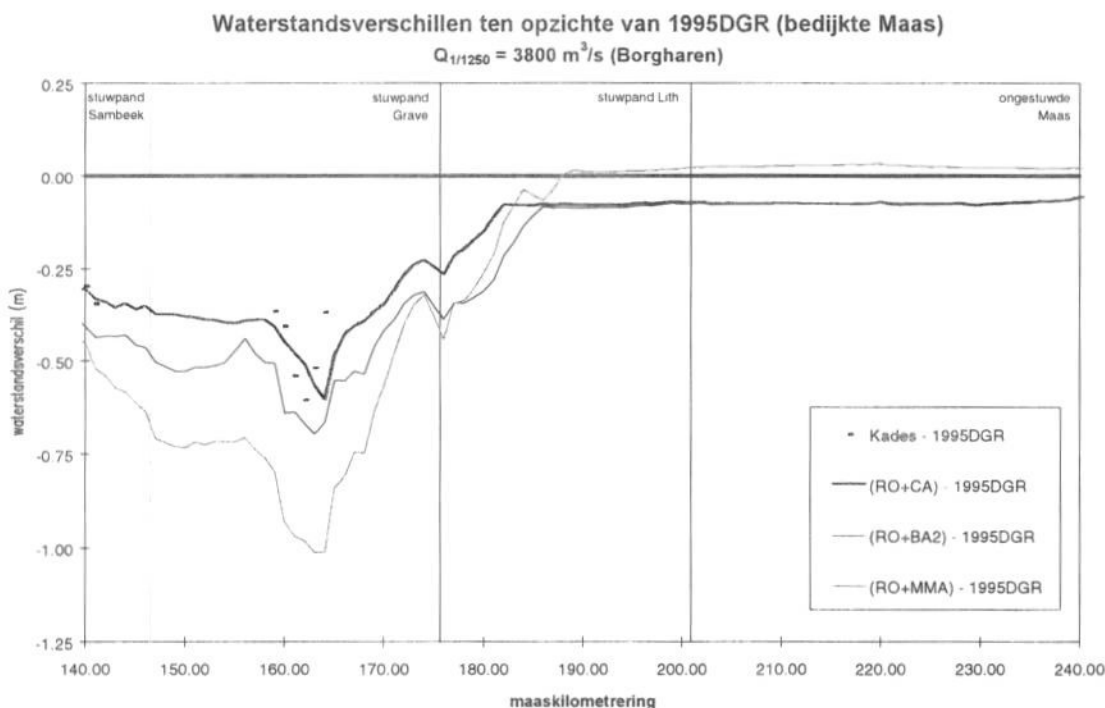


Fig. 8.1. Waterstandsverschillen t.o.v. 1995 DGR in het benedenstroomse deel van de Maas bij een maatgevende afvoer van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Borgharen) voor de alternatieven BA2, CA en MMA..

Om deze effecten te onderzoeken zijn voor elk van de alternatieven berekeningen gemaakt bij een afvoergolf $Q_{1/1250}$ ($3800 \text{ m}^3/\text{s}$). In Figuur 8.1 worden de optredende maximale waterstanden vergeleken met die in de huidige situatie (situatie 1995 met DGR-kaden). Uit de figuur blijkt dat de alternatieven CA en BA2 beide een waterstandsverlaging van 7 cm in het bedijkte gebied tot gevolg hebben, hoewel deze

voor het CA vermoedelijk iets minder zal zijn wanneer in de stuwpanden Belfeld en Grave een grotere verdieping wordt aangebracht. Voor het MMA volgt uit de berekening een benedenstroomse waterstandsverhoging van 2 à 3 cm. Vermoedelijk wordt deze ongunstiger situatie voor het MMA veroorzaakt door de grotere bijdrage aan de waterstandsverlaging in het gebied van km 130 – km 180, waardoor er een nog grotere versnelde afvoer optreedt en bovendien minder overstroomde kaden en daardoor minder effectieve retentie. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat ZWENDL de effectiviteit van de winterbedmaatregelen onderschatte en die van de zomerbedverruiming overschatte.

Voor elk der berekende situaties zijn de afvoergolven bijeengebracht in Figuur 8.2. Behalve verschil in de reeds genoemde maximale waterstanden geeft de figuur ook inzicht in het verschil in looptijden. Zo is te zien in deze figuur dat het CA en BA2 tot ongeveer dezelfde waterstand leiden, maar dat de golf bij BA2 ongeveer 18 uur eerder benedenstrooms arriveert. De oorzaak is niet geheel duidelijk. Mogelijk hebben de verschillen te maken met verschillende wijze van overstroomen van bekade gebieden. Nader onderzoek van de rekenresultaten zou dit moeten kunnen uitwijzen. Het retentie-effect is in figuur 8.2 duidelijk te zien bij vergelijking van de kromme voor 1995 (1995 zonder kaden) en 1995 DGR (1995 met kaden). In het laatste geval is de helling van de kromme veel flauwer tijdens het "vullen" van de bekade gebieden, om vervolgens, als deze gebieden gevuld zijn, weer een helling te krijgen vergelijkbaar met de 1995-lijn. Dat de situatie met kaden tot 7 cm lagere top leidt is evident. Ook is hier te zien dat de (overstromende) kaden er toe leiden dat de top ca 7,5 uur later arriveert in het benedenstroomse gebied. Het retentie-verschijnsel is bij het CA-alternatief pas veel later zichtbaar, omdat dit pas veel later optreedt: eigenlijk pas relatief kort voordat de hoogste waterstand wordt bereikt, en dus wanneer de kromme al duidelijk begint af te buigen. Bij het BA2 en MMA alternatief is dit zelfs niet eens meer te zien. Om meer gevoel te krijgen voor wat er precies gebeurt, verdient de wijze van overstroomen, bij voorkeur aan de hand van overstromingskaarten, nadere aandacht.

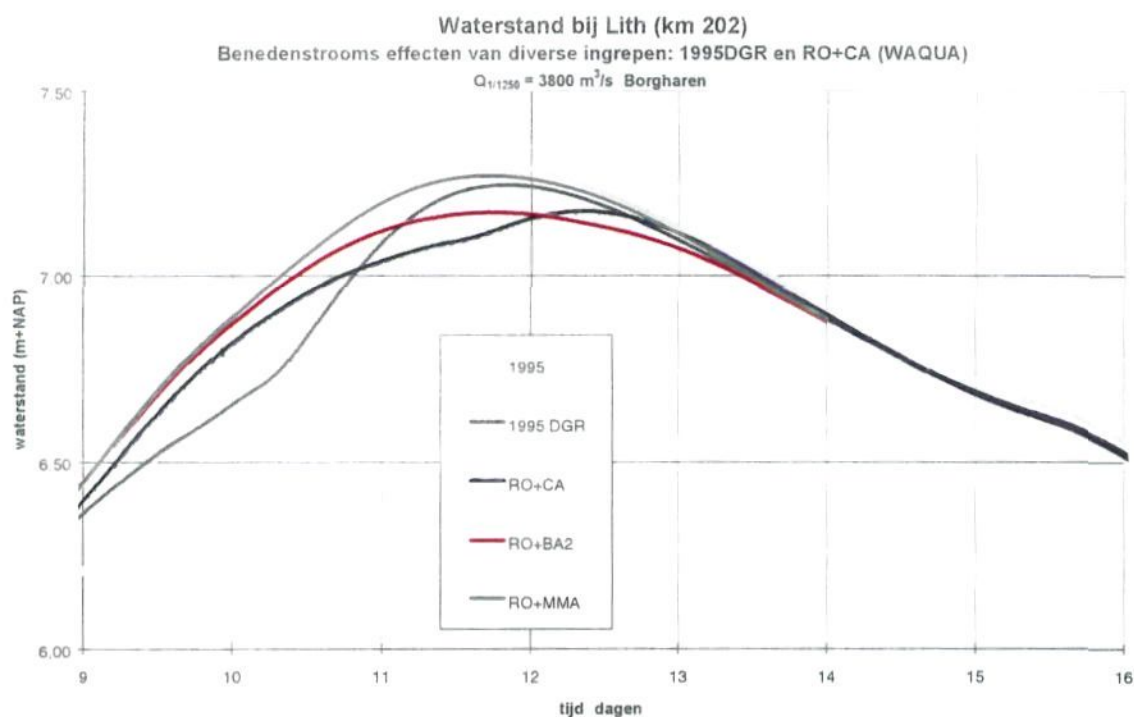


Fig.8.2 Waterstanden bij Lith (km 202) bij een maatgevende afvoer $Q_{1/1250}$ voor diverse situaties (1995, 1995-DGR, BA2, CA, MMA).

In Figuur 8.3. vindt nog een vergelijking plaats van de optredende waterstanden met de situatie van 1995, toen er nog geen kaden waren aangelegd. Uit deze figuur blijkt dat elk der Maaswerken-alternatieven tot lagere waterstanden leidt: het MMA geeft een waterstandsverlaging van 4 cm en het CA en MMA zelfs een waterstandsverlaging van 14 cm. Geconcludeerd kan worden dat wat betreft de zgn. benedenstroomse effecten het opstuwende effect van de kaden ruimschoots wordt gecompenseerd door

de retentie-eigenschappen van de omkade gebieden. De aanleg van de kaden in Limburg heeft daarmee een belangrijke bijdrage geleverd aan de veiligheid in het bedijkte gebied. Wanneer de aanleg van de kaden en de Maaswerken als één Limburgs project zou worden beschouwd kan geconcludeerd worden dat de veranderingen aan de Maas in Limburg geen negatieve effecten hebben op de veiligheid in het bedijkte deel van de Maas, maar hier zelfs een waterstandsverlagende bijdrage leveren.

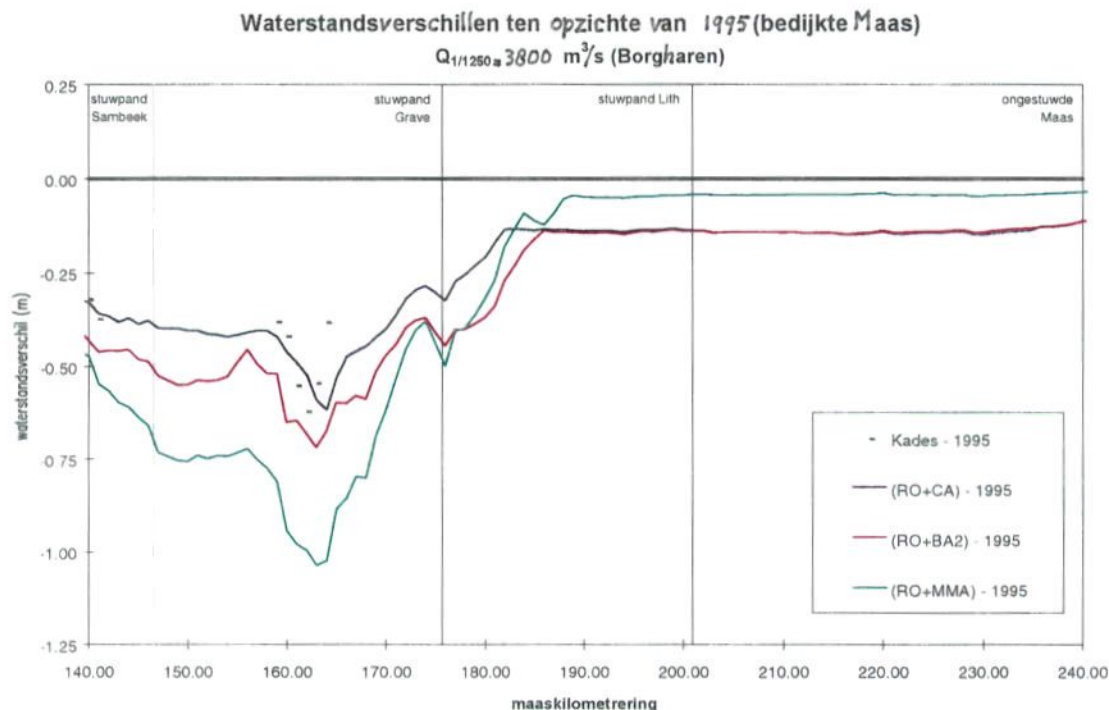


Fig. 8.3. Waterstandsverschillen t.o.v. de 1995-situatie (zonder kaden) in het benedenstroomse deel van de Maas bij een maatgevende afvoer van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Borgharen) voor de alternatieven BA2, CA en MMA..

8.2. Variant op het Combinatiealternatief: verhoogde kaden

Teneinde de gevoeligheid van het benedenstroomse effect voor het overstromen van de bekade gebieden te onderzoeken zijn voor het Combinatiealternatief enkele berekeningen uitgevoerd, waarbij de DGR-kaden zijn verhoogd:

- 0,20m verhoogde DGR-kaden
- extreem verhoogde kaden (niet-overstroombaar)

Figuur 8.4 geeft de resulterende waterstanden bij Lith (km 202). Bij de met 0,20m verhoogde kaden blijkt het CA tot nog 2 cm extra lagere topwaterstanden te leiden, omdat het overstromen van de kaden nog verder wordt uitgesteld. Ook is in deze figuur te zien dat in de situatie dat de kaden niet zouden overstromen dit voor het CA tot een 22 cm hogere waterstand zou leiden in vergelijking met wel overstromende kaden. Geconcludeerd kan worden dat het wel of niet overstromen van kaden een groter effect heeft op de benedenstroomse waterstanden dan elk beschreven Maaswerken-alternatief.

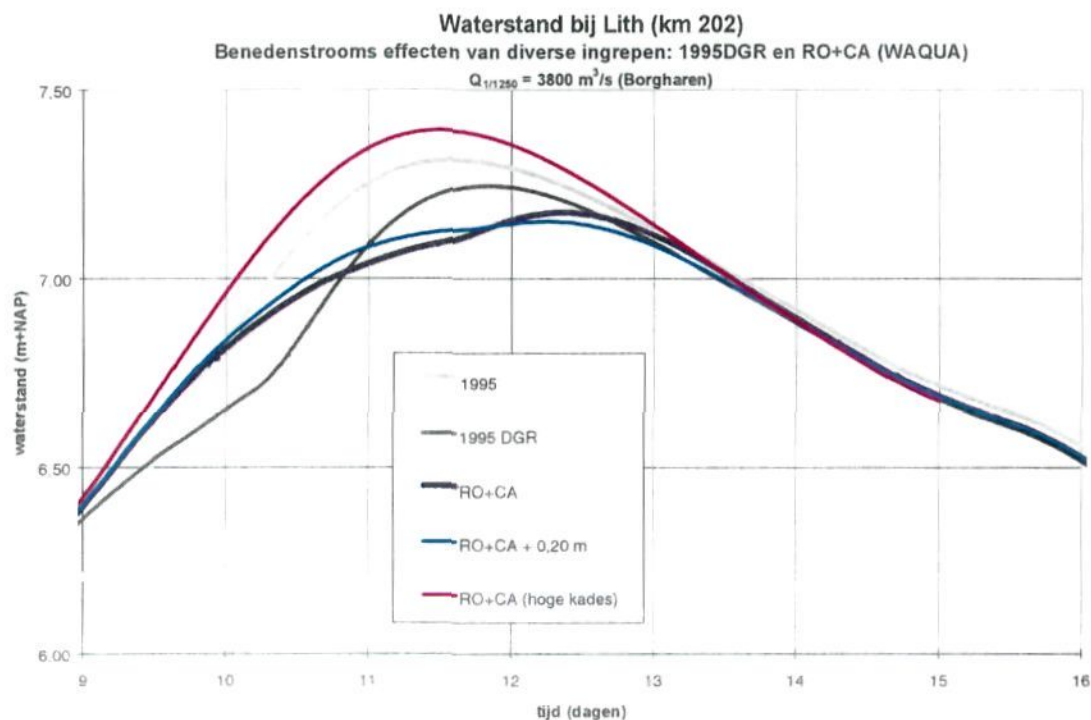


Fig. 8.4. Waterstanden bij Lith bij een maatgevende afvoer $Q_{1/1250}$ voor het Combinatiealternatief bij diverse kadehoogten.

8.3. Conclusies

Onderstaand zijn de conclusies ten aanzien van de benedenstroomse effecten langs de bedijkte Maas samengevat:

- Het overstromen van de kaden bij de afvoergolf $Q_{1/250}$ ($3800 \text{ m}^3/\text{s}$) heeft een groot effect op de benedenstroomse waterstanden in het bedijkte gebied.
- Rekening houdend met het overstromen van de kaden leiden de alternatieven CA en BA2 tot een waterstandsval in het bedijkte gebied van 7 cm, terwijl het voorliggende MMA alternatief hier een waterstandverhoging geeft van 2 à 3 cm.
- Wanneer in het toekomstig beleid rekening gehouden gaat worden met het overstromen van kaden verdient het aanbeveling om aan de hand van overstromingskaarten dit mechanisme verder te onderzoeken. Beseft moet worden dat de gepresenteerde uitkomsten slechts de eerste sommen zijn die ooit met dit mechanisme voor rivieren zijn gemaakt.
- Wanneer het aanleggen van de kaden en de Maaswerken als één gezamenlijke ingreep in de Maas wordt beschouwd is er, uitgaande van overstromende kaden, geen enkel negatief benedenstrooms effect: het MMA geeft in het bedijkte gebied bij $Q_{1/1250}$ een waterstandsval van 4 cm en het BA1 en CA zelfs van 14 cm.
- Wanneer de kaden zouden worden verhoogd met 0,20m geeft het CA nog een extra verlaging van de benedenstroomse waterstanden van 2 cm.
- Het wel of niet overstromen van de kaden heeft een groter effect op de benedenstroomse waterstanden dan de Maaswerken alternatieven. Voor het Combinatie Alternatief leidt dit wel of niet overstromen van de kaden tot een benedenstrooms waterstandsverschil van 22 cm.

9. KWALITEITSTOETS

Door het bureau Lloyd's (Lloyd's Register Management Services) is een "Kwaliteitstoets Schematisaties" uitgevoerd. Hierbij is de kwaliteit van het schematisatieproces getoetst met als uiteindelijke doel een indruk te verkrijgen van de betrouwbaarheid van de uitkomsten van de WAQUA-berekeningen. Het rapport van deze toetsing is als bijlage 5 bijgevoegd.

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een aantal interviews met betrokkenen en deskundigen bij het modelleringsproces. Ook is informatie gehaald uit een aantal ter beschikking gestelde documenten. Er is ingegaan op zowel technisch-inhoudelijke als proces-gerelateerde onderwerpen. Lloyd's ondersteunt de beslissing voor het 2 dimensionale model WAQUA om de volgende redenen:

- WAQUA heeft zich als rekenprogramma in het verleden bewezen;
- de 2 dimensionale effecten worden meegenomen
- de gevolgen van ingrepen kunnen daardoor beter worden voorspeld;
- het model kan in één keer de Zandmaas en de Grensmaas doorrekenen;
- de doorlooptijd van het project wordt bepaald door het verzamelen van meetgegevens en het toetsen van de schematisaties en niet (meer) door de rekentijd (door het gebruik van supercomputers).

Hoewel uit documenten blijkt dat er aantoonbare keuzen zijn gemaakt en beslissingen zijn genomen, alsmede deze beslissingen zijn vastgelegd, is dit niet gebeurd volgens een van tevoren vastgesteld plan. Voor de controles geldt iets dergelijks. Uit de interviews is duidelijk gebleken dat er vele controles zijn uitgevoerd, hetgeen echter niet is gebeurd aan de hand van tevoren bedachte en vastgelegde plannen. Het schematisatieproces bevat een aantal toetsingsmomenten, waarbij m.b.v. visualisatie van bodembestanden, stromingen, waterstanden, kadehoogten, enz. de schematisaties steeds worden vergeleken met de metingen of ontwerpgegevens. Ook deze toetsingen werden niet uitgevoerd volgens een van tevoren opgesteld plan, maar vonden impliciet plaats tijdens de bouw van het model, waarbij de vakkundigheid en expertise van de betrokken medewerkers een belangrijke rol speelt.

De gebruikte methode voor het afregelen van WAQUA op de referentiesituatie werd als een degelijke methode beoordeeld. De verificatie van WAQUA op grond van de situatie van 1993 werd als een correcte wijze van verifiëren gekenschetst.

Bij het modelleren van de ingrepen (Maaswerken alternatieven) met het programma Baseline werd er op gewezen dat dit programma, waarmee de schematisaties worden gemaakt, een pas kortgeleden afgeronde ontwikkeling betreft, die nog enkele onvolkomenheden bevat. Dit was bekend en heeft daarom geleid tot veel aandacht voor de controles en de noodzakelijke handmatige aanpassingen. De invloed van deze onzekere factoren wordt als moeilijk inschatbaar beoordeeld vanwege het feit dat tijdens het schematiseren verschillende mensen fouten en onduidelijkheden ontdekken en vervolgens correcties aanbrengen.

De methode die voor de schematisatie van de ruwheid in zomer- en winterbed is gebruikt werd als zeer gedegen en betrouwbaar beschouwd. Deze methode leidt tot een goede voorspellende waarde van het model, mits de resultaten van de verificatie goed blijken te zijn.

De belangrijkste conclusie van het Lloyd's rapport is dat in het proces "vooraf opgestelde plannen" voor het schematisatieproces ontbreken, waardoor het proces sterk een ad hoc karakter heeft gekregen. Aanbevelingen worden gedaan om het schematisatieproces in de toekomst te verbeteren.

10. BESPREKING RESULTATEN

Hoewel voor het eerst met een parallelle versie van het WAQUA model voor de Maas werd gerekend, en men kan zeggen dat deze eigenlijk net uit z'n experimentele fase kwam, heeft het model goed gewerkt. Ongetwijfeld heeft hier de jarenlange ervaring met het WAQUA model meegespeeld, alsmede de ervaringen die ondertussen zijn opgebouwd met parallel rekenen in kustwateren. Wel moet bedacht worden dat de expertise op dit gebied in Nederland slechts bij enkele personen aanwezig is. Men kan gerust stellen dat het rekenen met de parallelle versie van WAQUA een doorbraak is geweest voor het tweedimensionaal dynamisch doorrekenen van een rivier in z'n geheel. Een jaar geleden werd dat zelfs door deskundigen nog voor onmogelijk gehouden en waren dergelijke tweedimensionale berekeningen alleen mogelijk door de rivier in een aantal stukken op te splitsen, elke sectie apart door te rekenen en

vervolgens, met alle problemen van dien, elk der afzonderlijke stukken aan elkaar te koppelen. Een voorwaarde was wel het kunnen beschikken over een supercomputer met minstens 24 parallele processoren. Dit bleek geen problemen te geven.

Het grootste probleem was niet het werken met het parallele rekenmodel, maar het kunnen beschikken over de juiste topografische gegevens en vervolgens deze gegevens betrouwbaar in het rekenmodel zetten. Beide aspecten hebben de afgelopen periode veel hoofdbreken gekost. Voor de kadegegevens is dankbaar gebruik gemaakt van de meetcampagnes, die in 1998 in opdracht van Directie Limburg door de Meetkundige Dienst zijn uitgevoerd. De 2D-modellen vereisen een geweldige hoeveelheid data: het nu gebruikte WAQUA-model bezit bijvoorbeeld ca 450.000 roosterpunten waar gegevens moeten worden ingevoerd. Al deze gegevens moeten worden verkregen, gecontroleerd en ingevoerd. Dit betreffen zowel bodembestanden, overlatenbestanden en ruwhedenbestanden. Dit is een immense inspanning, die daarom gefaciliteerd wordt met automatische gegevensverwerking. Alle gegevens worden in een bepaald GIS-formaat aangeleverd, en vervolgens in het Baseline databestand geplaatst. Met het programma BASWAQ worden uit deze database de bodem-, overlaten- en ruwhedenbestanden geselecteerd en omgezet naar bestanden waarmee in het WAQUA-model wordt gerekend.

Dit bleek niet altijd vlekkeloos te werken. Veel aandacht is daarom besteed aan de controle tussen de in de WAQUA-model ingevoerde gegevens en kaarten, waarop de werkelijke of geplande situatie was aangegeven. Hierbij zijn deskundigen met veel expertise op het gebied van de lokale topografie ingezet. Vooral ook het gebruik van de zgn. "bodemplaattekeningen" heeft hier zijn waarde bewezen. Op deze wijze werd een voor de huidige doeleinden betrouwbare schematisatie voor de Maas verkregen. Wel blijkt de opgegeven verdieping voor het CA alternatief in de stuwpannen Grave en Belfeld minder diep dan overeenkomt met de te baggeren hoeveelheden uit het MER rapport. Gezien het tijdsproces, de vele weken inspanning die dit zou gaan kosten en de goed te maken afchatting (tevens geverifieerd met een SOBEK berekening) dat dit in de betreffende gebieden zou leiden tot een extra verlaging van de waterstand met ca 0.10m (bij situatie 1/250) is besloten hiervoor op dit moment geen nieuwe databestanden aan te maken.

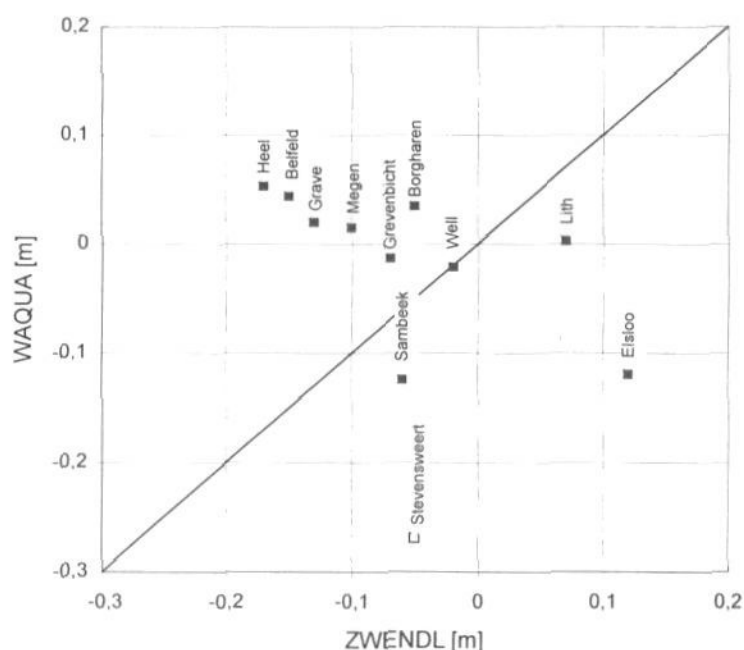


Fig. 10.1. Gemeten en berekende waterstanden voor de modellen WAQUA en ZWENDL voor de situatie hoogwater 1995.

Het WAQUA-model werd geijkt aan de meetgegevens van het hoogwater 1995. Het model met de ruwheden kon zo worden ingeregeld dat de verschillen tussen de berekende en gemeten waterstanden

binnen de opgegeven bandbreedte vielen. Dit was in het verleden ook gedaan voor het model ZWENDL. In Figuur 10.1 is het verschil in berekende en gemeten waarde voor de piek van de hoogwatergolf volgens WAQUA uitgezet tegen het verschil tussen de berekende en gemeten waarde volgens het ZWENDL model. De meetlocatie Stevensweert wijkt in de WAQUA-berekeningen behoorlijk af van de metingen. Op grond van de lokale stroomomstandigheden bestaat onzekerheid over de betrouwbaarheid van de waterstandsmetingen (ligging meetstation in een bocht met hoge stroomsnelheden, waardoor mogelijk ook meting van de snelheidshoogte). Voorts springen de lokaties Elsloo en Sambeek er uit. Dit zou verklaard kunnen worden uit effecten van lokale stroming respectievelijk een onderschatting van de ruwheid (veel meidoornhagen bij Sambeek).

Ondanks dat beide modellen binnen de opgegeven bandbreedte werden ingeregeld, moet worden geconstateerd dat bij ZWENDL de berekende waterstanden gemiddeld wat lager zijn dan gemeten, terwijl bij WAQUA de berekende waarden wat hoger liggen dan gemeten. Hoewel dus voor beide modellen gesteld kan worden dat zij adequaat zijn ingeregeld, is het toch zo dat een verschil van ca 0.10m tussen berekeningen van de beide modellen verklaard kan worden uit de ijking (zie Figuur 10.1). Voorts kan nog worden opgemerkt dat het WAQUA-model wat kleinere verschillen oplevert tussen berekende en gemeten waterstanden dan het ZWENDL-model.

Met dezelfde ruwheden als volgde uit de ijking aan het hoogwater 1995 bleek de hoogwater situatie 1993 goed voorspelbaar. De conclusie is gewettigd dat het model een gezonde fysische basis bezit en ondanks zekere gesignaleerde onnauwkeurigheden in de schematisatie voor beslissingen over het te kiezen alternatief een betrouwbaar rekeninstrument is. Voor detailberekeningen in de OTB-fase, waar meer in detail naar de uitkomsten zal worden gekeken, zal de schematisatie nog eens goed naast de topografische werkelijkheid moeten worden gelegd.

Een directe vergelijking tussen de modellen ZWENDL en WAQUA is eigenlijk niet aan de orde. Immers tegelijk met het verschil in het model zijn tal van nieuwe omstandigheden doorgevoerd, zoals de bodemligging, de reële plaats en hoogten van de kaden, gewijzigde piekafvoeren, andere zijdelingse toestromingen en een nieuwe bredere golfvorm. Vooral de laatste, die voortkomt uit nieuwe inzichten m.b.t. het in 2001 vast te stellen nieuwe Maatgevende Hoogwaters, blijkt vooral stroomafwaarts een grote invloed te hebben op de hoogste waterstanden. De achtergrond hiervan is de geringere topvervlakking bij zulke brede golfvormen.

Een groot verschil tussen ZWENDL en het gebruikte WAQUA is dat laatstgenoemde model de mogelijkheid bezit om ook rekening te houden met het overstromen van de kaden wanneer de waterstanden boven de top van de kade stijgen. Om de berekeningen zo realistisch mogelijk uit te voeren is in principe van dit overstromen uitgegaan. Ook zijn enkele berekeningen uitgevoerd, waarbij de kaden oneindig hoog zijn verondersteld.

Aangezien het oppervlak aan bekaide gebieden aanzienlijk groter blijkt dan toentertijd met ZWENDL was ingeschat, is ook ruimschoots aandacht gegeven aan de opstuwing door deze kaden, zowel bij de situatie van 1/50 als bij 1/250. Bij de situatie 1/50 blijkt opstuwing tot 0,10 à 0,20 m voor te komen. Dit ondanks de gedachte compensatie door speciewinningen. Voor de situatie 1/250 blijken lokaal in het Grensmaasgebied opstuwings tot enige tientallen dm voor te komen. In het Zandmaas gebied blijkt dit niet uit de berekeningen vanwege het dan al overstromen van sommige kaden. Dergelijke opstuwing betekent voor het project De Maaswerken een aanzienlijke extra inspanning dan oorspronkelijk gedacht.

Bij aanleg van de kaden zijn deze 0,50m hoger aangelegd dan de toentertijd met ZWENDL berekende waterstanden bij de 1/50 golf: de zgn. verhanglijn 2. Deze "overhoogte" correspondeert met extra waakhogte zoals die bij dijken is voorgeschreven. Of deze overhoogte bij de kades wel of niet gegandeerd moet worden doet dit rapport geen uitspraak. Gerekend is steeds met de werkelijk in het veld aanwezige kadehoogten. Wel is bij de TAW (technische Adviescommissie Waterkeringen) een advies ingewonnen, waarin gesteld wordt dat dit uiteindelijk een bestuurlijke afweging is. Zij adviseren de waakhogte generiek niet te verlagen, maar wel mogelijkheden te zien voor nuancering van deze maat, wanneer de lokale situatie daar aanleiding toe geeft.

Wanneer de waakhogte van 0,50m als noodzakelijk wordt aangehouden blijkt de huidige veiligheid volgens de nieuwste berekeningen niet 1/50 te zijn, maar op diverse plaatsen 1/20 à 1/30, althans er van

uitgaande dat de bovenkant van de kaden precies op 0,50m boven verhanglijn 2 is aangelegd. Dit blijkt evenwel lang niet overal het geval te zijn: vaak is kadehoogte hoger dan toentertijd was afgesproken. Bovendien stromen de kaden pas over als het water echt de bovenkant van de kade bereikt. Beseft moet worden dat in werkelijkheid deze gegevens omringd worden door een onnauwkeurighedsband, veroorzaakt door modelonnauwkeurigheden, golfoploop, windopzet en onnauwkeurigheden in de opgemeten kadehoogten.

Verhanglijn 2 is een theoretische lijn, die volgde uit de ZWENDL berekeningen. Bij de overschrijdingsfrequentie van 1/50 blijken de waterstanden uit de WAQUA berekening hier belangrijk van af te wijken (globaal 0,30m en lokaal tot 0,50m). De vraag is dan ook gewettigd af te spreken welke rol deze lijn in de toekomst nog moet worden toegedicht dan wel of een andere lijn als maatstaf gaat fungeren.

In hoofdstuk 7 worden de drie alternatieven CA, MMA en BA2, samen met het Ruw Ontwerp van de Grensmaas, getoetst aan de oorspronkelijke veiligheidsdoelstelling van 1/250 achter de kaden, of te wel verhanglijn 2. De maximale waterstanden blijken globaal 0,20 tot 0,60m hoger uit te komen. Op het traject km 70-115 is er geen significant verschil tussen de drie alternatieven. Benedenstrooms van km 130 blijkt het MMA effectiever dan het CA en het BA2. Wel mag van het CA een iets grotere waterstandsverlaging (ca 0,10m) in dit gebied verwacht worden als op de stuwpanden Grave en Belfeld een grotere verdieping wordt aangebracht. De grote waterstandsverlaging benedenstrooms van km 130 bij het MMA wordt veroorzaakt door het feit dat winterbedmaatregelen effectiever blijken te zijn dan oorspronkelijk op grond van ZWENDL-berekeningen werd gedacht.

Wat betreft de zgn. "benedenstroomse effecten" speelt het verschijnsel 'overstroombare kaden' een cruciale rol. Wat betreft invloed op de waterstanden in het bedijkte deel van de Maas compenseren de retentie-eigenschappen van deze omkade gebieden in ruime mate de gevolgen van hun opstuwende werking, althans bij de extreem hoge afvoer van $Q1/1250$. Zowel het CA als het BA2 alternatief dragen bij de maatgevende afvoer van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ (afvoer te Borgharen) bij aan een waterstandsverlaging in het bedijkte deel van de Maas. Het MMA geeft daar een kleine waterstandsverhoging van 2 à 3 cm, die vermoedelijk samenhangt met de veel grotere waterstandsverlagende effectiviteit van winterbedmaatregelen dan op grond van ZWENDL-berekeningen was verwacht. Deze gunstige uitwerking van de diverse alternatieven op de zgn. benedenstroomse effecten wordt veroorzaakt door het later vollopen van de omkade gebieden ten opzichte van de situatie zonder de rivierverruiming.

Wanneer het aanleggen van de kaden en de voorgenomen maatregelen van de Maaswerken als één geheel pakket van maatregelen worden beschouwd voor aanpassing van de Maas kan geconcludeerd worden dat de veranderingen aan de Maas in Limburg geen negatieve effecten hebben op de veiligheid in het bedijkte deel van de Maas, maar daar zelfs een waterstandsverlagende bijdrage leveren.

Samenvattend kan gesteld worden dat in de nieuwe berekeningen de effectiviteit van zomerbedverruiming aanzienlijk minder is dan oorspronkelijk volgde uit de ZWENDL berekeningen, dat de kaden een belangrijke opstuwende werking hebben en dat bovenal de nieuwe randvoorwaarden, m.n. de nieuwe golfvorm, tot aanzienlijk geringere waterstandsverlagingen leiden. Dit leidt er tevens toe dat de benedenstroomse effecten geringer zijn dan oorspronkelijk volgde uit de ZWENDL berekeningen. Berekeningen met overstroombare kaden, die tot nu toe niet mogelijk waren met eendimensionale modellen, werpen weer een geheel nieuw licht op de zaak, met name waar het betreft de zgn. benedenstroomse effecten.

11. CONCLUSIES

IJking en Verificatie

- **Tweedimensionale rekenmodel WAQUA**

Door gebruik te maken van een supercomputer met parallelle processoren is het mogelijk gebleken een gehele rivier met het tweedimensionale rekenmodel WAQUA dynamisch door te rekenen binnen acceptabele rekentijden.

- **IJking**

Het resultaat van de ijking met het hoogwater van 1995 is een verschil tussen de berekende en de gemeten waterstanden op de meetpunten van gemiddeld 5 centimeter.

- **Verificatie**

De verificatie met het hoogwater van 1993 levert een verschil tussen berekende en gemeten waterstanden van gemiddeld 10 centimeter.

- **Simulatie huidige situatie**

Op basis van de ijkings- en verificatieresultaten kan worden geconcludeerd dat het WAQUA-model de huidige situatie goed simuleert.

- **Betrouwbaarheid rekenmodellen**

Op grond van het gebruik van een 2D-model, het gebruik van de meest recente data, en de bevredigende ijkings- en verificatieresultaten, mag worden geconcludeerd dat de uitgevoerde WAQUA-berekeningen betrouwbaarder zijn dan de eerder uitgevoerde ZWENDL of SOBEK berekeningen.

Berekeningsresultaten Referentiesituatie

- **Vergelijking WAQUA, SOBEK, ZWENDL**

De berekeningsresultaten van WAQUA in de situatie 1995 met kades DGR komen goed overeen met de eerdere SOBEK berekeningsresultaten. De berekende waterstanden met zowel SOBEK als WAQUA liggen globaal 20 - 40 cm hoger dan die berekend met ZWENDL.

- **Toets verhanglijn 2.**

Verhanglijn 2 (de met ZWENDL berekende waterstanden bij een afvoergolf $Q_{1/50}$) blijkt overeen te komen met de waterstanden behorende bij een afvoergolf $Q_{1/20}$ tot $Q_{1/30}$ zoals berekend met WAQUA. De WAQUA resultaten zijn ongeveer in overeenstemming met eerdere SOBEK-resultaten.

- **Veiligheid kades.**

- Het verschil tussen verhanglijn 2 en de waterstanden van $Q_{1/50}$ bedraagt globaal 0,30 m en lokaal tot 0,50 m.
- De resterende waakhogte is hierdoor globaal 0,10 - 0,30 m maar neemt lokaal tot nihil af. Verhanglijn 2 correspondeert overigens niet overal met de werkelijke kadehogten.
- Ten gevolge van de waakhogte van 0,50 m raken de kades, behalve zeer lokaal, niet overstroomd bij een afvoergolf $Q_{1/50}$.

- **Opstuwing door kades bij afvoergolf $Q_{1/50}$**

- Grensmaas gemiddeld ca. 5 cm; lokaal 20 cm
- Zandmaas km 100 - km 160: ca. 10 cm
- Zandmaas km 160 - km 240: ca. 3 cm

- **Opstuwing door kades bij $Q_{1/250}$**
 - Grensmaas gemiddeld ca. 10 cm; lokaal 35 cm
 - Zandmaas km 100 - km 130: ca. 5 cm
 - Zandmaas km 130 - km 240: ca. 10 cm verlaging (doordat de meer bovenstroomse omkade gebieden overstroomd raken en als retentiegebied fungeren)

Berekening Alternatieven

RO	: Ruw Ontwerp Grensmaas
CA	: Combinatie Alternatief
BA2	: Basis Alternatief 2
MMA	: Meest Milieuvriendelijke Alternatief

- **Toets verhanglijn 2**
Het verschil tussen verhanglijn 2 (de met ZWENDL berekende waterstanden bij een afvoergolf $Q_{1/50}$) en de waterstanden na de MER ingrepen bij $Q_{1/250}$ zoals berekend met WAQUA bedraagt globaal 0,20 tot 0,60 meter.
- **Veiligheid kades**
De resterende waakhogte bij een afvoergolf $Q_{1/250}$ bedraagt globaal 0,00 - 0,50 meter. In alle simulaties staat in het stuwpand Belfeld het water tot aan de kruin van de kade.
- **Effectiviteit**
De waterstands daling die wordt bereikt als percentage van de beoogde waterstands daling bedraagt globaal 50%. Benedenstrooms van kilometer 130 is de waterstands verlaging bij het MMA aanzienlijk groter dan bij de alternatieven BA2 en CA.

Globale benedenstroomse effecten

De benedenstroomse effecten zijn berekend bij een afvoer met een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar ten opzicht van de referentiesituatie 1995 DGR. In de berekeningen is aangenomen dat (DGR) kaden tijdens een hoogwater niet worden opgehoogd.

- Benedenstrooms kilometer 190 bedraagt de waterstandsverhoging ten gevolge van het MMA 2 à 3 cm. Bij het CA en BA2 dalen de benedenstroomse waterstanden met ca. 7 cm.
- Wanneer het aanleggen van de kaden en de Maaswerken als één gezamenlijke ingreep in de Maas wordt beschouwd is er, uitgaande van overstromende kaden, geen enkel negatief benedenstrooms effect: het MMA geeft in het bedijkte gebied bij $Q_{1/1250}$ een waterstands daling van 4 cm en het BA2 en CA zelfs van 14 cm.

Algemeen

- **Vergelijking ZWENDL, SOBEK en WAQUA**
De in dit rapport gepresenteerde verschillen tussen de uitkomsten van het WAQUA-model en die van het vroeger gebruikte model ZWENDL kunnen niet zo maar worden toegeschreven aan verschillen in de modellen. Ook tal van andere verschijnselen (zie hoofdstuk 2.3) hebben in belangrijke mate bijgedragen aan de nieuwe uitkomsten, zoals bijvoorbeeld de nieuwe vorm van de afvoergolf.
- **Overstroombare kaden**
Het werken met het nieuwe WAQUA-model heeft de mogelijkheid geopend om te rekenen met overstroombare kaden. Dit heeft een geheel nieuw licht op tal van verschijnselen geworpen, en wel in het bijzonder op de consequenties van de Maaswerken voor de zgn. 'benedenstroomse effecten'.

Literatuur

- Barneveld, H.J., W. Immerzeel, R. Passau, R. Agtersloot, 1998. SOBEK-model Maas. Situatie na de Maaswerken. VVM-rapportnr. 2. HKV LIJN IN WATER. en Geodan Geodesie; opdrachtgever Rijkswaterstaat Directie Limburg. november 1998.
- Commissie voor de milieueffectrapportage, 1999. Toetsingsadvies over het milieueffectrapport Zandmaas/Maasroute, Utrecht, 14 mei 1999.
- Duits, M.T. en J.H.A. Wijbenga, 1998: Actualisatie WAQUA Rijntakken/Maas. Inregelen bij variërende afvoer (fase 2), PR106, HKV LIJN IN WATER. Lelystad
- Duits, M.T. en M. Visser, 1999: Inregeling ruwheden WAQUA-model Maas. PR264, HKV LIJN IN WATER. Lelystad
- Haas, A.W. de, 1999: Brief aan W. van Leussen d.d. 26 juli 1999 (randvoorwaarden Maaswerken), WSH-5737, Rijkswaterstaat/ RIZA
- Nelder J.A. en R. Mead. 1965: A simplex method for function minimization, Computer Journal, Vol. 7. pp. 308-313.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) 1999. Advies waakhogte Maaskaden. concept 30 november 1999.
- Van der Veen, R. 1997: Analyse toestroming naar de Maas, werkdocument 97.061X, Rijkswaterstaat/ RIZA
- Van der Veen, R. 1999. De Maas, beïnvloeding van waterstanden door veranderingen in de geometrie. Situatie medio 1999. Rijkswaterstaat RIZA, november 1999 (concept)
- Van Leussen, W. 1999. Keuze rekenmodel voor berekeningen waterstanden in het project De Maaswerken. Memo 06-05-1999.
- Wijbenga, J.H.A. en M.T. Duits, 1998: Actualisatie WAQUA Rijntakken/Maas. Inregelen bij constante afvoer (fase 1), PR106, HKV LIJN IN WATER. Lelystad.
- Wijbenga, J.H.A. en W. van Leussen, 1999. Maaswerken vereist aanpak met nieuwe generatie riviermodellen. Achtergronden, Stand van Zaken en Ontwikkelingen. Notitie Rijkswaterstaat Directie Limburg, 9 september 1999.