



Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, Directie Limburg

DL: 56 337

Voortplantingsnelheid hoogwatergolven in de Maas

Effecten van zomerbedverdieping en winterbedverlaging
op de golfvoortplanting



AH 10314 LB

VVM-rapport nr. 7

januari 2001



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

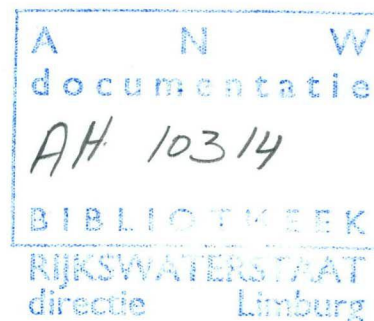
Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling RIZA

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, Directie Limburg

Voortplantingssnelheid hoogwatergolven in de Maas

Effecten van zomerbedverdieping en winterbedverlaging
op de golfvoortplanting

Auteurs: dr. W.T.B. van de Lee
ir. J. Udo
ir. H.J. Barneveld
ir. H.D. Duizendstra



VVM-rapport nr. 7

januari 2001



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling RIZA

Samenvatting

Rijkswaterstaat directie Limburg heeft een onderzoek geïnitieerd naar Verruimingsmaatregelen in de Maas met als hoofddoel het verlagen van de Maaswaterstanden bij hoge afvoer. In het kader van dit onderzoek, "Verkenning Verruiming Maas (VVM), is een beslissing ondersteunend systeem (BOS) ontworpen op basis van een ééndimensionaal SOBEK waterbewegingsmodel van de Maas. Met dit zogenaamde VVM-BOS zijn de waterstandseffecten van diverse maatregelen getoetst. Waaronder verdieping van het zomerbed of het winterbed (Barneveld et al., 2000).

Uit dit VVM onderzoek is naar voren gekomen dat bij zomerbedverdieping de top van de hoogwatergolf vertraagt en dat bij winterbedverlaging de top van de hoogwatergolf versnelt. Dit verschijnsel is eveneens geconstateerd in onderzoek dat momenteel wordt uitgevoerd door de Maaswerken. De profielgemiddelde stroomsnelheid neemt echter toe bij zomerbedverdieping en af bij winterbedverlaging, terwijl volgens de theorie van hoogwatergolven de voortplantingssnelheid van een afvoergolf gerelateerd is aan de stroomsnelheid. Deze tegenstelling kon niet direct worden verklaard. Daarom heeft Rijkswaterstaat RIZA Arnhem aan HKV LIJN IN WATER gevraagd om te onderzoeken waardoor de berekende veranderingen in voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf worden veroorzaakt. Tevens diende te worden getoetst of de door het model berekende verschillen in golfvoortplantingssnelheid ook in werkelijkheid zijn te verwachten.

Met behulp van een vereenvoudigd SOBEK model van de Maas, een schematisch SOBEK model en een theoretische analyse is vastgesteld wat de effecten zijn van o.a. lokale geometrie, zomerkades, stroomberging, ruwheid en de breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed op de voortplantingssnelheden van hoogwatergolven in de Maas. Uit de theoretische analyse en de modelberekeningen bleek dat de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf gelijk is aan 5/3 maal de breedte gewogen stroomsnelheid.

Omdat het winterbed van de Maas veel breder is dan het zomerbed is de stroomsnelheid van het winterbed bepalend voor de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Bij zomerbedverdieping wordt de stroomsnelheid in het winterbed lager waardoor de golfvoortplantingssnelheid afneemt als het winterbed overstroomd is. Door zomerbedverdieping duurt het echter langer voordat het winterbed gaat meestromen. Daardoor zal het front van de hoogwatergolf zich sneller voortplanten. Bij winterbedverlaging gebeurt het omgekeerde.

De voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf hangt sterk af van de geometrie (breedte winterbed ten opzichte van breedte zomerbed) en de breedte van het stroombergende deel van het winterbed. Het is belangrijk dat deze factoren op de juiste wijze zijn geschematiseerd in het SOBEK model van de Maas. Onjuiste of onvolledige schematisatie zal leiden tot onjuiste golfvoortplantingssnelheden in het model.

Inhoud

| | |
|---|------------|
| Samenvatting | i |
| Inhoud | ii |
| Lijst van tabellen | iii |
| Lijst van figuren | iv |
| | |
| 1 Inleiding en probleemstelling | 1 |
| 1.1 Verkenning Verruiming Maas..... | 1 |
| 1.2 Probleemstelling | 4 |
| 1.3 Onderzoeksaanpak en leeswijzer | 5 |
| 1.4 Organisatie | 5 |
| | |
| 2 Theorie voortplanting hoogwatergolven | 6 |
| 2.1 Basisvergelijkingen en voortplantingssnelheid | 6 |
| 2.2 Kinematisch golf model en voortplantingssnelheid hoogwatergolf | 7 |
| | |
| 3 Analyse voortplanting hoogwatergolven in de Maas | 9 |
| 3.1 Inleiding | 9 |
| 3.2 Vereenvoudigde SOBEK modellen van de Maas..... | 9 |
| 3.2.1 Schematisatie vereenvoudigd model van de Maas..... | 9 |
| 3.2.2 Schematisatie testmodel (bakprofiel met uiterwaard)..... | 12 |
| 3.3 Resultaten SOBEK berekeningen | 13 |
| 3.4 Uitsluiten van factoren | 15 |
| 3.4.1 Onvolkomenheden in het SOBEK model..... | 15 |
| 3.4.2 Lokale geometrie | 15 |
| 3.4.3 Effect van zomerkades | 15 |
| 3.4.4 Stroomberging..... | 16 |
| 3.4.5 Veranderingen in zomerbed of winterbed ruwheid..... | 16 |
| 3.5 Golfvoortplantingssnelheid en breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed..... | 18 |
| 3.5.1 Theorie..... | 18 |
| 3.5.2 Voorbeeld berekening op basis van Chézy vergelijking | 19 |
| 3.5.3 Voorbeeld berekeningen met het testmodel (bakprofiel met uiterwaard) ... | 20 |
| | |
| 4 Discussie | 25 |
| 4.1 Beantwoording onderzoeksvragen | 25 |
| 4.2 Implicaties van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor hoogwatergolven in de Maas..... | 25 |
| | |
| 5 Conclusies | 27 |
| | |
| 6 Referenties | 28 |

Lijst van tabellen

| | | |
|-----------|---|----|
| tabel 1-1 | Tijdsverschil, afgerond in uren tussen het arriveren van de top van de hoogwatergolf bij zomerbedverdieping en winterbedverlaging ten opzichte van de referentiegolf..... | 4 |
| tabel 3-1 | Gemiddelde bodemruwheden in het SOBEK model van de Maas | 11 |
| tabel 3-2 | Uitgevoerde berekeningen met het vereenvoudigde Maasmodel | 12 |
| tabel 3-3 | Berekeningen met het testmodel | 13 |
| tabel 3-4 | Toe en afnames van SOBEK uitvoer parameters als gevolg van zomerbed of winterbedverlaging ten opzichte van de referentieberekening | 14 |

Lijst van figuren

| | | |
|------------|--|----|
| figuur 1-1 | Gevolgen van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor een hoogwatergolf in de Maas bij Megen (rivierkilometer 191) | 1 |
| figuur 1-2 | Top van de hoogwatergolven bij Megen, bij verschillende zomerbed en winterbedmaatregelen. De golftoppen zijn gemarkeerd met een* | 2 |
| figuur 1-3 | Gevolgen van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor een hoogwatergolf in de Maas bij Ammerzoden (rivierkilometer 226) | 2 |
| figuur 1-4 | Top van de hoogwatergolven bij Ammerzoden, bij verschillende zomerbed en winterbedmaatregelen. De golftoppen zijn gemarkeerd met een* | 3 |
| figuur 2-1 | Vergelijking van White-Colebrook- en Strickler-formule ter bepaling van de ruwheid van Chézy als functie van de ruwheidswaarde van Nikuradse met hydraulische straal $R = 3.5$ meter (Duits & van Noortwijk, 1999) | 8 |
| figuur 3-1 | Schematische trajecten en bodemverhang van het vereenvoudigde Maasmodel..... | 10 |
| figuur 3-2 | Vereenvoudigde dwarsprofielen van de Maas. B_s is de stroomvoerende breedte en B_t is de totale breedte | 11 |
| figuur 3-3 | Dwarsprofiel van het testmodel | 13 |
| figuur 3-4 | Voortplantingssnelheid voor een schematisch dwarsprofiel van de Maas | 19 |
| figuur 3-5 | Afvoer op rivierkilometer 80 in het testmodel | 20 |
| figuur 3-6 | Waterstand op rivierkilometer 80 in het testmodel | 21 |
| figuur 3-7 | Samengestelde Chézy waarde op rivierkilometer 80 in het testmodel | 22 |
| figuur 3-8 | Profielgemiddelde stroomsnelheid op rivierkilometer 80 in een schematisch SOBEK model | 22 |
| figuur 3-9 | Voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf op rivierkilometer 80 in het testmodel..... | 23 |

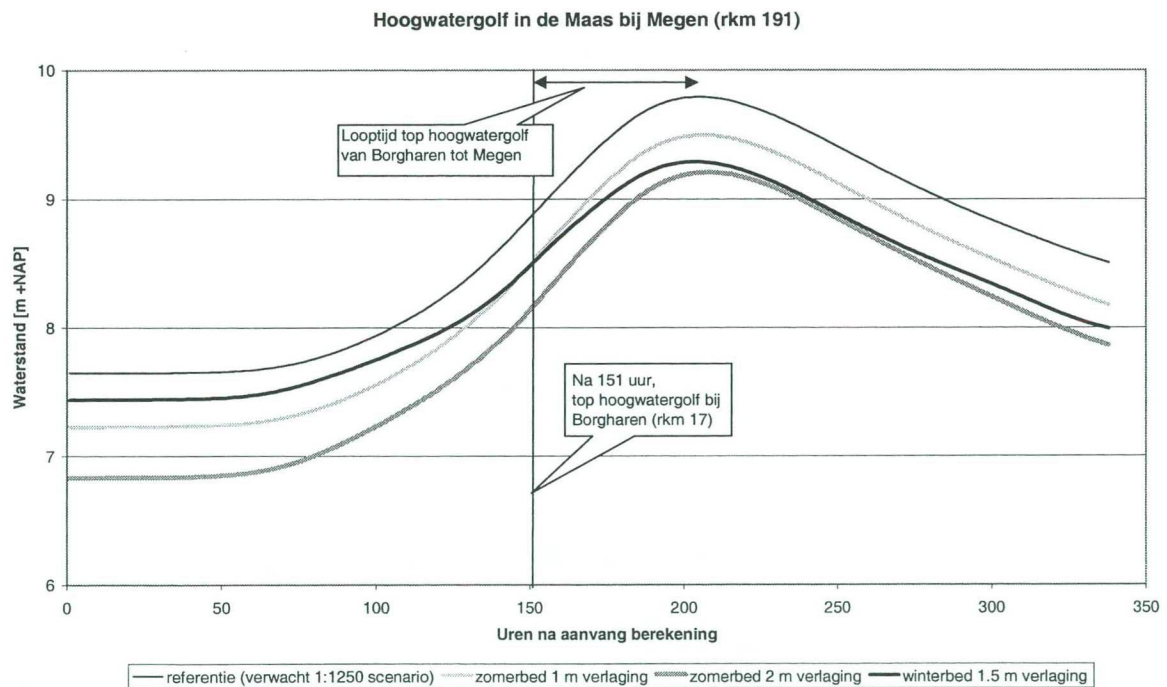
1 Inleiding en probleemstelling

1.1 Verkenning Verruiming Maas

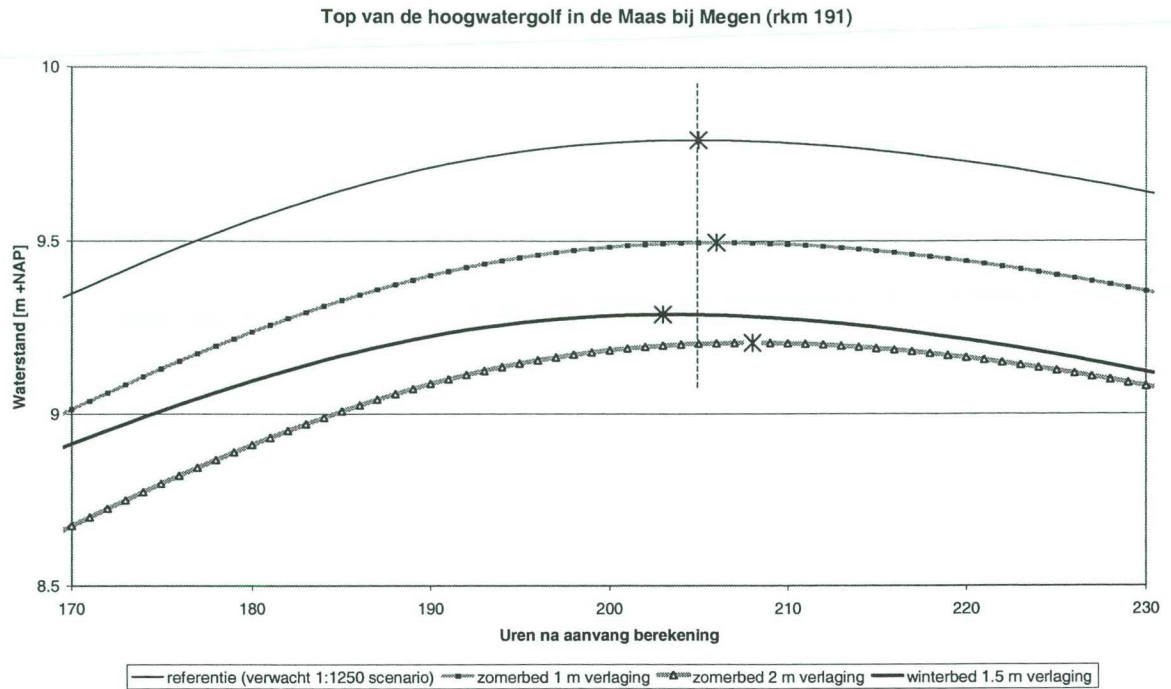
Rijkswaterstaat directie Limburg heeft een onderzoek geïnitieerd naar Verruimingsmaatregelen in de Maas met als hoofddoel het verlagen van de Maaswaterstanden bij hoge afvoer. In het kader van dit onderzoek, "Verkenning Verruiming Maas" (VVM), is een beslissing ondersteunend systeem (BOS) ontworpen op basis van een ééndimensionaal SOBEK waterbewegingsmodel van de Maas. Met dit zogenaamde VVM-BOS zijn de waterstandseffecten van diverse enkelvoudige maatregelen getoetst. Verdieping van het zomerbed of verlaging van het winterbed zijn voorbeelden van dergelijke enkelvoudige maatregelen.

De gevolgen van zomerbedverdieping en winterbedverlaging zijn doorerekend met het VVM-BOS (Barneveld et al., 2000). Daarbij is o.a. gebruik gemaakt van het Maasmodel van de huidige situatie en een verwachte afvoer met een herhalingstijd van 1250 jaar, waarbij rekening is gehouden met een toename van de huidige afvoer met 10% als gevolg van klimaatverandering (1°C temperatuurstijging leidt vermoedelijk tot ca.10% afvoertoeename). Dit betekent een maximaal debiet van 4180 m³/s bij Borgharen-Dorp.

In figuur 1-1 en figuur 1-2 staan de hoogwatergolven bij Megen weergegeven.



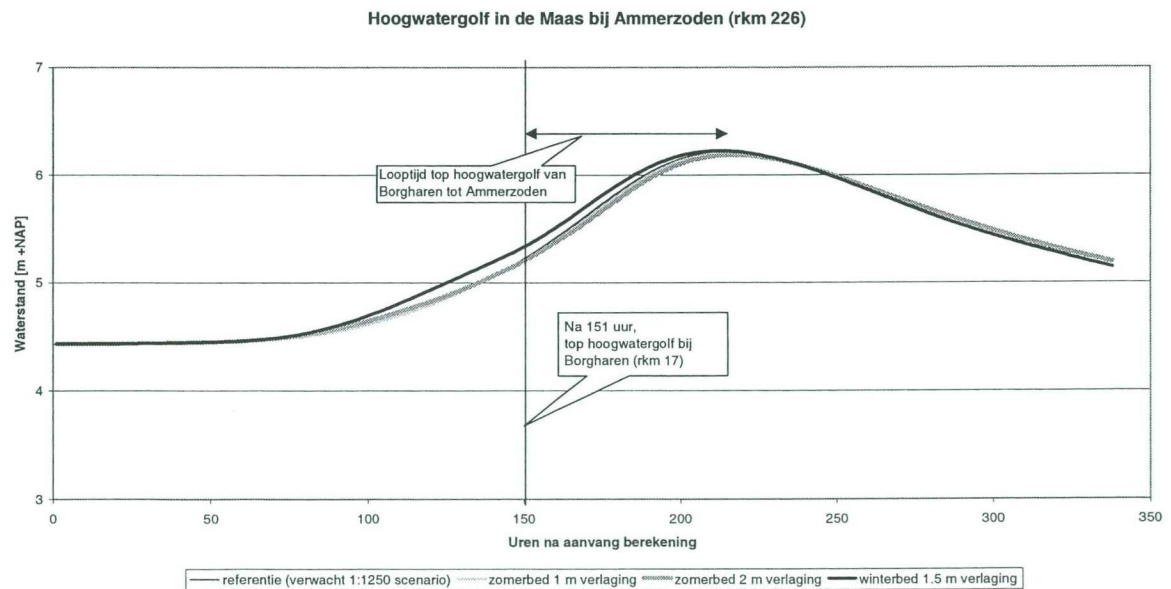
figuur 1-1 Gevolgen van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor een hoogwatergolf in de Maas bij Megen (rivierkilometer 191)



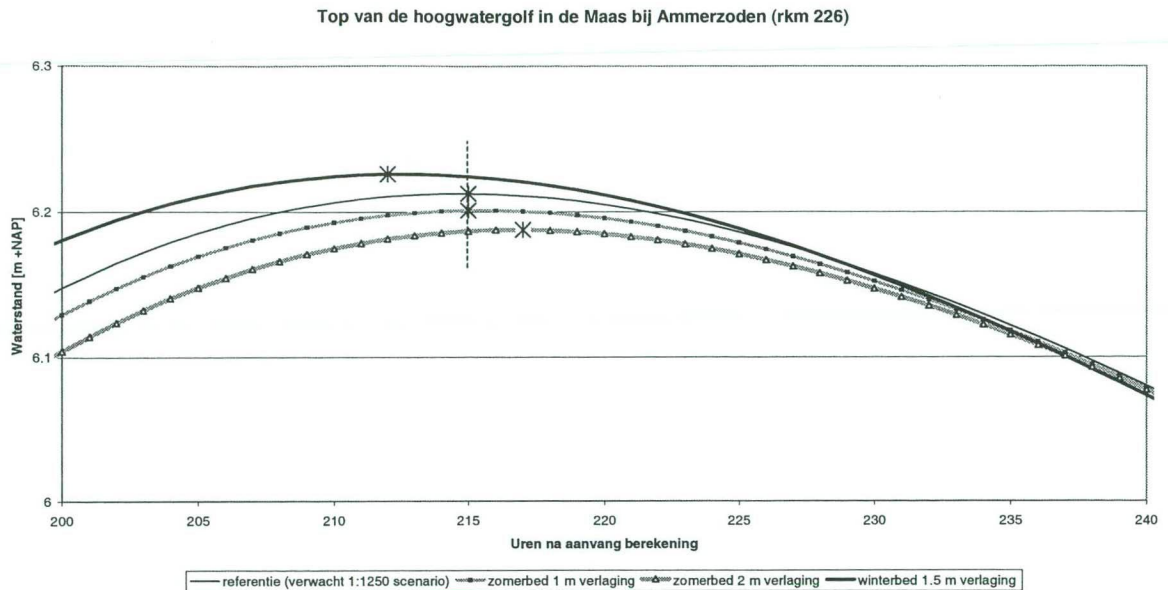
figuur 1-2 Top van de hoogwatergolven bij Megen, bij verschillende zomerbed en winterbedmaatregelen. De golftoppen zijn gemarkeerd met een *

Figuur 1-1 en figuur 1-2 tonen beiden dat zowel zomerbedverdieping als winterbedverlaging leiden tot een verlaging van de waterstanden in de Maas bij Megen. Tevens blijkt de hoogwatergolf bij zomerbedverdieping later in Megen te arriveren (de golf is dus langzamer) terwijl de golf bij winterbedverlaging eerder in Megen arriveert (de golf is dus sneller).

In figuur 1-3 en figuur 1-4 staan de hoogwatergolven bij Ammerzoden weergegeven.



figuur 1-3 Gevolgen van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor een hoogwatergolf in de Maas bij Ammerzoden (rivierkilometer 226)



*figuur 1-4 Top van de hoogwatergolven bij Ammerzoden, bij verschillende zomerbed en winterbedmaatregelen. De golftoppen zijn gemarkeerd met een **

Ook deze figuren tonen dat de top van de hoogwatergolf bij zomerbedverdieping vertraagt en dat de top van de hoogwatergolf bij winterbedverlaging versnelt. Bij Ammerzoden zelf heeft in het model echter geen zomerbedverdieping of winterbedverlaging plaatsgevonden. Deze maatregelen zijn alleen bovenstrooms doorgevoerd. Daardoor is er geen lokaal waterstandsverlagend effect van zomerbedverdieping of winterbedverlaging. Figuur 1-3 en 1-4 tonen dat in Ammerzoden de hoogwaterpiek bij zomerbedverdieping iets lager is dan de referentie. De piek bij winterbedverlaging is echter iets hoger doordat de golf zich sneller heeft voortgeplant en er daardoor minder topvervlakking heeft plaatsgevonden.

Voor zes locaties langs de Maas is de versnelling of vertraging van de top van de hoogwatergolf bij winterbedverlaging en zomerbedverdieping ten opzichte van de referentie situatie berekend. Tabel 1-1 vat dit samen.

| 1/1250 jaar | Verschil in looptijd van de golftop ten opzichte van de referentie situatie [uren] | | | | |
|-------------------------|--|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Winterbed verlaging 0.5 m | Winterbed verlaging 1 m | Winterbed verlaging 1.5 m | Zomerbed verdieping 1m | Zomerbed verdieping 2m |
| Borgharen (rkm 17) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maaseik (rkm 52.5) | 0 | -1 | -2 | -1 | 0 |
| Venlo (rkm 107.5) | -1 | -1 | -2 | 0 | 1 |
| Sambeek (rkm 147.65) | -1 | -1 | -2 | 0 | 1 |
| Megen (rkm 191) | 0 | -1 | -2 | 1 | 3 |
| Ammerzoden (rkm 226) | -1 | -2 | -3 | 0 | 2 |

tabel 1-1 Tijdsverschil, afgerond in uren¹ tussen het arriveren van de top van de hoogwatergolf bij zomerbedverdieping en winterbedverlaging ten opzichte van de referentie golf

1.2 Probleemstelling

Uit het bovenstaande blijkt dat een zomerbedverdieping resulteert in een iets langzamere hoogwatergolf en een winterbedverlaging in een iets snellere hoogwatergolf. Dergelijke resultaten zijn ook geconstateerd in onderzoek dat momenteel bij de Maaswerken wordt uitgevoerd. Deze versnellingen en vertragingen van de hoogwatergolf zijn niet geheel naar verwachting. Men zou in eerste instantie verwachten dat een zomerbedverdieping leidt tot een hogere zomerbedafvoer, waardoor een hoogwatergolf zich sneller kan voortplanten. Bij een winterbedverlaging verwacht men een hogere winterbedafvoer ten opzichte van de zomerbedafvoer. Aangezien het winterbed doorgaans ruwer is dan het zomerbed en de stroomsnelheden in het winterbed daardoor lager zijn, verwacht men dan eerder een vertraging van de hoogwatergolf in plaats van een versnelling.

Omdat een verklaring voor de waargenomen veranderingen in de golfvoortplantingssnelheid niet direct voorhanden was heeft Rijkwaterstaat RIZA Arnhem aan HKV LIJN IN WATER gevraagd om te onderzoeken waardoor de berekende verschillen in golfvoortplantingssnelheid worden veroorzaakt. Tevens dient te worden getoetst of de door het model berekende snelheidsverschillen in golfvoortplanting ook in werkelijkheid zijn te verwachten. Dit leidt tot de volgende onderzoeksvragen:

1. Hoe komen de golfvoortplantingssnelheden tot stand in het SOBEK model dat ten grondslag ligt aan het VVM-BOS?
2. Zijn de door SOBEK uitgerekende verschillen in golfvoortplantingssnelheid ook in werkelijkheid te verwachten, of worden ze veroorzaakt door onvolkomenheden in het model?

¹ Omdat de VVM-BOS uitvoer uit uurlijkse waarden bestond, zijn de tijdsverschillen in tabel 1-1 slechts in gehele uren weergegeven. Deze tijdsverschillen geven dus slechts een indicatie van het werkelijke tijdsverschil.

1.3 Onderzoeksaanpak en leeswijzer

Er zijn een aantal factoren die van invloed kunnen zijn op de snelheid van de hoogwatergolf in het SOBEK model bij zomerbedverdieping of winterbedverlaging:

1. Onvolkomenheden in het SOBEK model.
2. Lokale geometrie.
3. Effect van zomerkades.
4. Stroomberging.
5. Veranderingen in zomerbed of winterbed ruwheid als gevolg van gewijzigde waterdieptes.
6. Breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed.

Op basis van bovenstaande factoren is onderzocht waardoor de snelheid van de afvoergolf in het VVM-BOS wordt bepaald. Daarbij is gebruik gemaakt van een schematisch SOBEK model van de Maas, een summiere vergelijking met WAQUA resultaten en een theoretische analyse betreffende golfvoortplanting. De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in hoofdstuk 3. Eerst zal in Hoofdstuk 2 echter de theorie betreffende golfvoortplanting worden behandeld. Hoofdstuk 4 bevat de discussie waarin bovenstaande onderzoeksvragen zullen worden beantwoord. Tevens zal in hoofdstuk 4 worden ingegaan op de implicaties van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor hoogwatergolven in de Maas. In hoofdstuk 5 zal worden afgerond met de conclusies van het onderzoek.

1.4 Organisatie

Het onderzoek is uitgevoerd door HKV LIJN IN WATER. De betrokken medewerkers waren dr. Willem van der Lee (projectleider) ir. Job Udo (SOBEK berekeningen). Ir. Hermjan Barneveld en ir. Don Duizendstra zijn gedurende het onderzoek enkele malen geraadpleegd voor rivierkundig advies. Hermjan Barneveld heeft tevens als reviewer de technisch-wetenschappelijke kwaliteit van het rapport beoordeeld.

Het onderzoek is namens Rijkswaterstaat RIZA begeleid door dr. Ralph Schielen en ir. Wim Silva. Ralph Schielen was de projectbegeleider. Namens Rijkswaterstaat Directie Limburg is het onderzoek begeleid door ir. Siebolt Folkertsma.

Het onderzoek is bij Rijkswaterstaat bekend onder nummer 37117 / WSR en bij HKV LIJN IN WATER onder nr. PR 408.10.

2 Theorie voortplanting hoogwatergolven

2.1 Basisvergelijkingen en voortplantingssnelheid

De waterbeweging in rivieren kan worden beschreven met de impulsvergelijking en de continuïteitsvergelijking: Uitgaande van een brede rivier ($B \gg h$) met een rechthoekig profiel en constante breedte luiden deze vergelijkingen:

Continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2-1)$$

Dit kan ook geschreven worden als:
$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dQ}{dh} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (2-2)$$

of:
$$\frac{\partial h}{\partial t} + c \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (2-3)$$

deze vergelijking beschrijft een hoogwatergolf met voortplantingssnelheid:

$$c = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh} \quad (2-4)$$

omdat $dh/dt=0$ langs het pad in het $x-t$ vlak voor golven met deze voortplantingssnelheid c (Jansen et al., 1979).

Impulsvergelijking:

$$\frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{C^2 R A_s} - i_b = 0 \quad (2-5)$$

1 2 3 4 5

waarin:

| | | | |
|-------|--|--------|---|
| Q | = afvoer (m^3/s) | c | = voortplantingssnelheid hoogwatergolf |
| h | = waterdiepte (m) | R | = hydraulische straal |
| x | = horizontale coördinaat (m) | i_b | = bodemverhang (-) |
| t | = tijd (s) | term 1 | = versnelling |
| g | = gravitatieversnelling (9.81 m/s^2) | term 2 | = convectie |
| B | = breedte van de rivier | term 3 | = gradiënt in waterdiepte |
| A | = nat oppervlak van het dwarsprofiel ($B \times h$) | term 4 | = bodemwrijving |
| A_s | = stroomvoerend oppervlak | term 5 | = bodemverhang |
| C | = Chézy coëfficiënt ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) | | |

2.2 Kinematisch golf model en voortplantingssnelheid hoogwatergolf

Vergelijking 2-5 kan worden vereenvoudigd en analytisch worden opgelost met het kinematische golfmodel. In dit vereenvoudigde model wordt aangenomen dat bij een hoogwatergolf fluctuaties in de afvoer zo langzaam gaan dat de stroming uniform blijft. Dit betekent dat de versnellingsterm, de convectieterm en de gradiënt in de waterdiepte (term 1,2 en 3) in de impulsvergelijking (2-5) worden verwaarloosd. Hiermee wordt het stelsel van vergelijkingen gereduceerd tot vergelijkingen voor een voortplantende maar niet dempende golf. Met deze uitgangspunten kan een eerste benadering van de voortplantingssnelheid van hoogwatergolven worden bepaald.

Verwaarlozing van term 1,2 en 3 in vergelijking 2-5 reduceert vergelijking 2-5 tot de Chézy vergelijking:

$$\frac{Q|Q|}{C^2 R A_s^2} = i_b \quad (2-6)$$

Indien $A_s = B_s h$ en $R \approx h$ (uitgaande van een rechthoekig dwarsprofiel met ($B \gg h$)) wordt vergelijking 2-6:

$$Q = C B_s h \sqrt{h i_b} \quad \text{en} \quad u = \frac{Q}{B_s h} = C \sqrt{h i_b} \quad (2-7)$$

waarin:

u = stroomsnelheid
 B_s = stroomvoerende breedte

Uit vergelijking 2-4 blijkt dat de golfvoortplantingssnelheid gerelateerd is aan dQ/dh , en uitgerekend kan worden door het differentieren van de Chézy vergelijking (2-7) naar de waterdiepte h .

De Chézy coëfficiënt in vergelijking 2-7 is echter ook afhankelijk van de waterdiepte h en moet dus ook naar h gedifferentieerd worden.

De White Colebrook formule voor hydraulisch ruwe stroming en een rechthoekig dwarsprofiel ($B \gg h$) luidt :

$$C = 18 \log \frac{12h}{k_n} \quad (2-8)$$

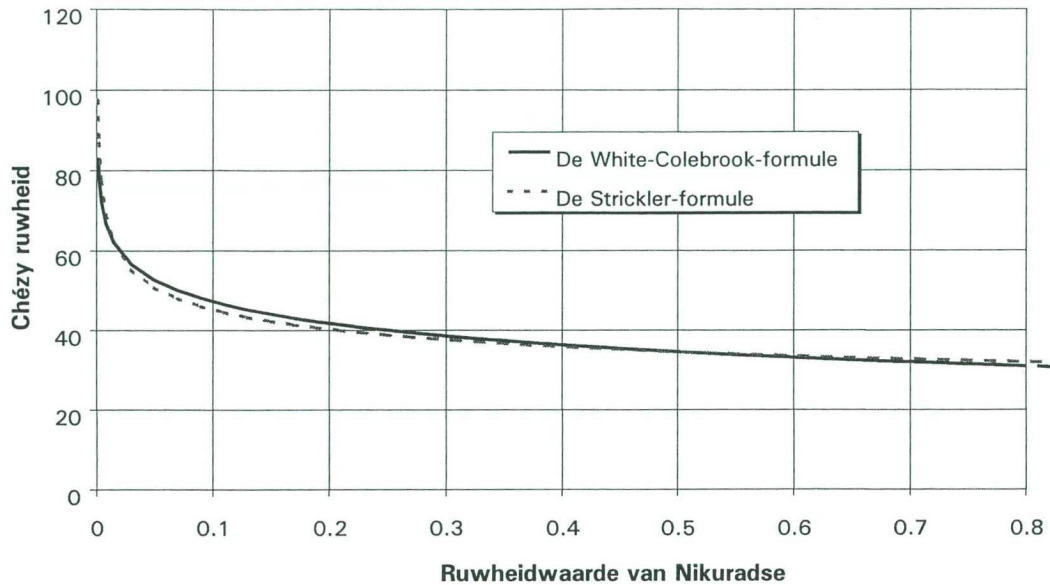
waarin:

k_n Nikuradse ruwheidshoogte (m)

De C waarde kan ook worden berekend met de formule van Strickler:

$$C = 25 \left(\frac{h}{k_n} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2-9)$$

Figuur 2-1 toont dat de formule van Strickler in het in rivieren gebruikelijke ruwheidsbereik vrijwel dezelfde resultaten geeft als de White Colebrook formule .



figuur 2-1 Vergelijking van White-Colebrook- en Strickler-formule ter bepaling van de ruwheid van Chézy als functie van de ruwheidswaarde van Nikuradse met hydraulische straal $R = 3.5$ meter (Duits & van Noortwijk, 1999)

Differentieren naar h is veel eenvoudiger voor de Strickler formule dan voor de White Colebrook formule daarom is in dit rapport de Strickler formule gebruikt. Ofwel:

$$Q = 25 \left(\frac{1}{k_n} \right)^{1/6} B_s i_b^{1/2} h^{5/3} \tag{ 2-10 }$$

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{5}{3} 25 \left(\frac{1}{k_n} \right)^{1/6} B_s i_b^{1/2} h^{2/3} = \frac{5}{3} B_s u$$

Voor de snelheid van een hoogwatergolf geldt dan (zie ook vergelijking 2-4):

$$c = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh} = \frac{5}{3} \frac{B_s}{B} u \tag{ 2-11 }$$

Dit is de voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf uitgaande van een breed rechthoekig dwarsprofiel. In de Maas is echter sprake van een complexer dwarsprofiel met een zomerbed en een winterbed. In paragraaf 3.5 zal worden ingegaan op de voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf in een samengesteld dwarsprofiel.

3 Analyse voortplanting hoogwatergolven in de Maas

3.1 Inleiding

In paragraaf 1.3 zijn een aantal factoren geformuleerd die van invloed kunnen zijn op de snelheid van de hoogwatergolf in het VVM-BOS. Namelijk:

1. Onvolkomenheden in het SOBEK model.
2. Lokale geometrie.
3. Effect van zomerkades.
4. Stroomberging.
5. Veranderingen in zomerbed of winterbed ruwheid als gevolg van gewijzigde waterdieptes.
6. Breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed.

Met een vereenvoudigd SOBEK model van de Maas, de golfvoortplantingstheorie in hoofdstuk 2 en een summiere vergelijking met WAQUA resultaten, is het effect van bovenstaande factoren op de golfvoortplanting geanalyseerd. Op basis daarvan kunnen de in het VVM-BOS geobserveerde voortplantingssnelheden bij zomerbed- of winterbedverlaging worden verklaard. Het blijkt dat de eerste 5 bovenstaande factoren geen verklaring bieden voor de in VVM berekende verschillen in golfvoortplanting bij zomerbed- en winterbedverlaging. De 6e factor, de breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed, biedt wel een verklaring. Alvorens in te gaan op deze verklaring zullen eerst de vereenvoudigde SOBEK modellen van de Maas worden beschreven gevolgd door de resultaten van de berekeningen die met deze modellen zijn uitgevoerd. In paragraaf 3.4 zal worden verklaard waarom de eerste 5 van de bovenstaande factoren geen verklaring bieden voor de in VVM berekende verschillen in golfvoortplanting bij zomerbed- en winterbedverlaging. Paragraaf 3.5 gaat tenslotte in op de breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed en de invloed hiervan op de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf.

3.2 Vereenvoudigde SOBEK modellen van de Maas

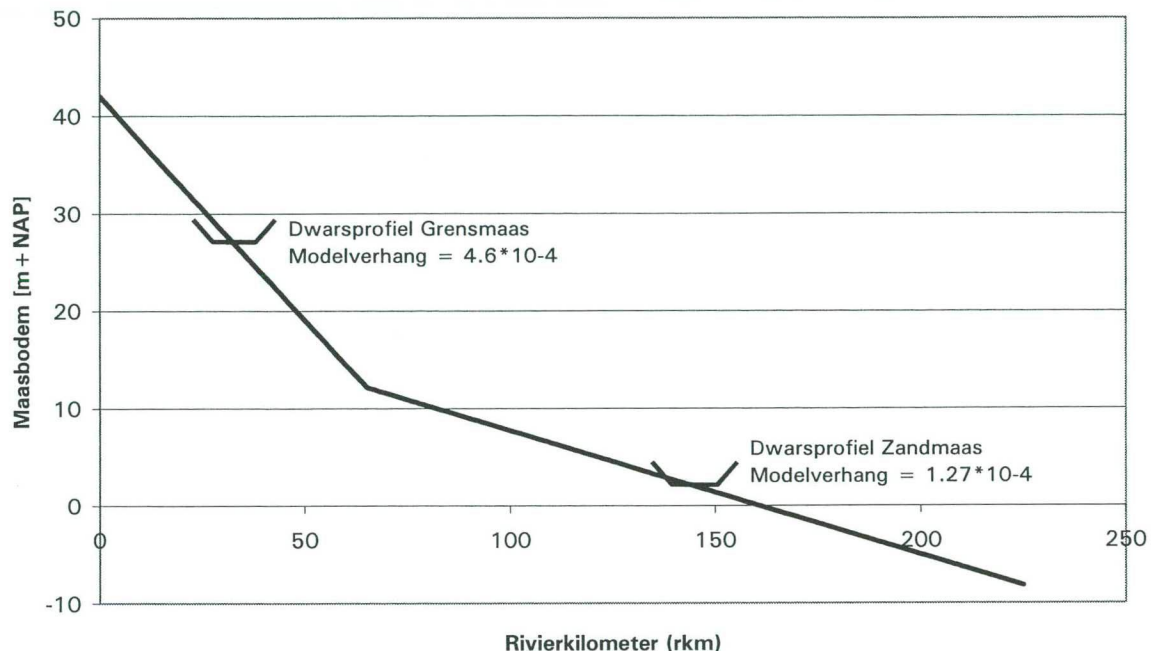
Het bestaande SOBEK model van de Maas is zoveel mogelijk gebaseerd op lokale geometrie en obstakels (stuwen, bruggen) in winterbed en zomerbed. Deze hebben allen interactie met de waterbeweging, zowel lokaal, bovenstrooms en, in geval van niet-stationaire stroming ook benedenstrooms. Door al deze interacties is het niet mogelijk om het effect van afzonderlijke factoren op de golfvoortplantingssnelheid te bepalen. Daarom is een sterk vereenvoudigd model van de Maas ontwikkeld, met een eenvoudige geometrie en zonder obstakels, waarmee de effecten van zomerbedverdieping en winterbedverlaging op de voortplantingssnelheid van hoogwatergolven in de Maas beter kunnen worden begrepen.

3.2.1 Schematisatie vereenvoudigd model van de Maas

De Maas is opgedeeld in twee schematische trajecten:

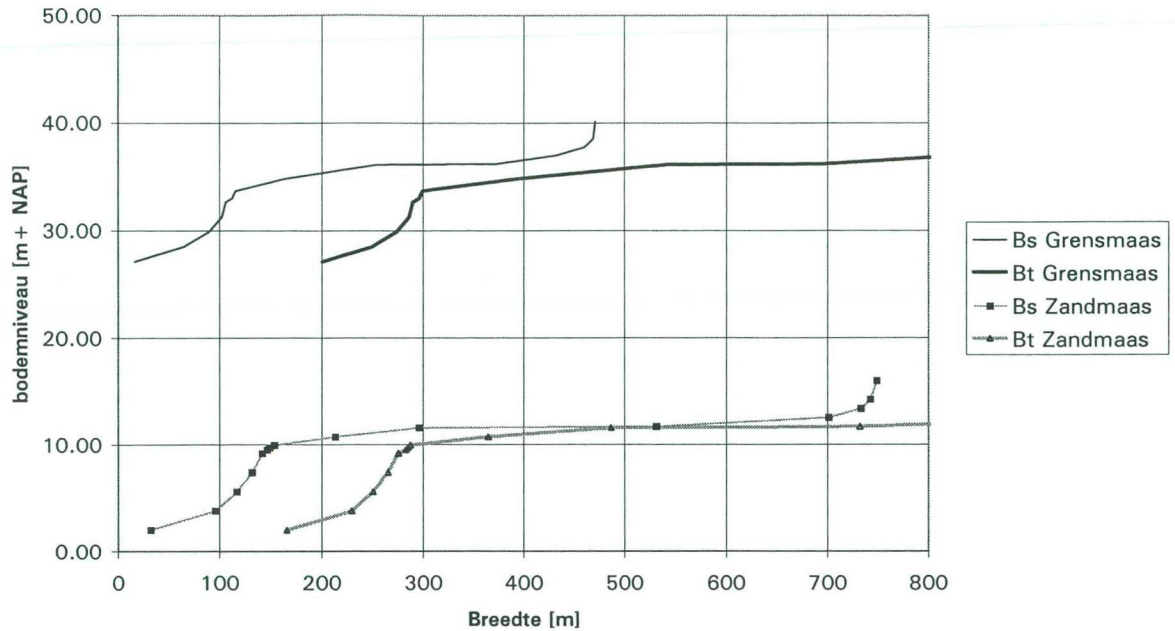
- de Grensmaas, van Eijsden tot Heel (65 km lang)
- en de Zandmaas, van Heel tot Ammerzoden (160 km lang).

Per traject is een gemiddeld verhang gebruikt. Voor de Grensmaas was dit verhang $4,6 \cdot 10^{-4}$ en voor de Zandmaas $1,27 \cdot 10^{-4}$. Deze waarden zijn iets aangepast ten opzichte van het werkelijke gemiddelde verhang, om de overgang tussen de bodemligging van de twee trajecten zo goed mogelijk op elkaar te laten aansluiten. Dit is weergegeven in figuur 3-1.



figuur 3-1 Schematische trajecten en bodemverhang van het vereenvoudigde Maasmodel

Per traject zijn alle dwarsprofielgegevens uit het bestaande SOBEK model (versie 1999.1) gemiddeld, wat heeft geleid tot 2 trajectgemiddelde dwarsprofielen. In het SOBEK model zijn deze profielen geplaatst in het midden van het bijbehorende traject (zie figuur 3-1). De dwarsprofielen zelf zijn weergegeven in figuur 3-2, waarbij de bodemniveaus in figuur 3.2 de bodemniveaus zijn in het midden van het Grensmaas of Zandmaas traject. In boven en benedenstroomse richting volgen deze bodemniveaus het verhang.



figuur 3-2 Vereenvoudigde dwarsprofielen van de Maas. B_s is de stroomvoerende breedte en B_t is de totale breedte

De ruwheden zijn eveneens gemiddeld per traject en weergegeven in tabel 3-1. De gemodelleerde Chézy ruwheden in de hoofdgeul zijn constant bij alle afvoeren en waterstanden. In de oeversectie en de uiterwaard is een Nikuradse ruwheid gebruikt, waardoor de Chézy waarde afhankelijk is van de waterdiepte.

| | Hoofdgeul Chézy [$m^{1/2}/s$] | Oever Nikuradse [m] | Uiterwaard Nikuradse [m] |
|-----------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Grensmaas | 43,7 | 0,5 | 0,4 |
| Zandmaas | 44,3 | 0,5 | 0,36 |

tabel 3-1 Gemiddelde bodemruwheden in het SOBEK model van de Maas

De verwachte MHW-golf (Barneveld, 2000) is als bovenstroomse randvoorwaarde gebruikt. De benedenstroomse randvoorwaarde wordt gegeven door een Q-h relatie gebaseerd op een stroomsnelheid van ca. 1 m/s. De simulatie periode beslaat 15 dagen.

De volgende situaties zijn met dit vereenvoudigde Maasmodel doorgerekend:

1. Referentie, zoals hierboven beschreven.
2. Zomerbedverdieping 1 en 2 meter.
3. Winterbedverlaging 1,5 meter.
4. Bovenstaande situaties zonder zomerkades en bergend gebied.
5. Bovenstaande situaties, waarbij alle ruwheden als Chézy waarde zijn gegeven.

Ad 2 zomerbedverdieping

De dwarsprofiel niveaus h1 tot en met h4 (zomerbed in het model) zijn met dezelfde hoeveelheid (1 of 2 meter) verlaagd.

Ad 3 winterbedverlaging

Niveau h11 is verlaagd tot minimaal hoogte h10 (=kade) + 0.01 m. De overige verlaging is verdisconteerd in het volume achter de zomerkade (binnen SOBEK uitgedrukt in de dAf en dAt).

Ad 4 verwijderen zomerkades en verwijderen berging

De zomerkades en bergende gebieden zijn verwijderd. Winterbedverlaging is verdisconteerd in een verlaging van het winterbedprofiel (h12 tot en met h14). Daarna zijn opnieuw de referentiesituatie , 1 en 2 m zomerbedverdieping en 1,5 m winterbedverlaging berekend.

Ad 5 ruwheden uitgedrukt in Chézy waarden

In het winterbed zijn constante Chézy ruwheidswaarden gebruikt in plaats van Nikuradse waarden. Daardoor wordt de winterbedruwheid onafhankelijk van de waterdiepte en verandert dus niet als gevolg van zomerbed of winterbedverlaging. De invloed op de waterbeweging van ruwheidsveranderingen door gewijzigde waterdieptes wordt hiermee uitgesloten. In de oeversectie is een constante Chézy waarde van $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ gebruikt voor zowel Grensmaas als Zandmaas. Voor de uiterwaardsecties van zowel grensmaas als Zandmaas is een constante Chézy waarde van $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ gebruikt. Daarna zijn opnieuw de referentiesituatie , 1 en 2 m zomerbedverdieping en 1,5 m winterbedverlaging berekend.

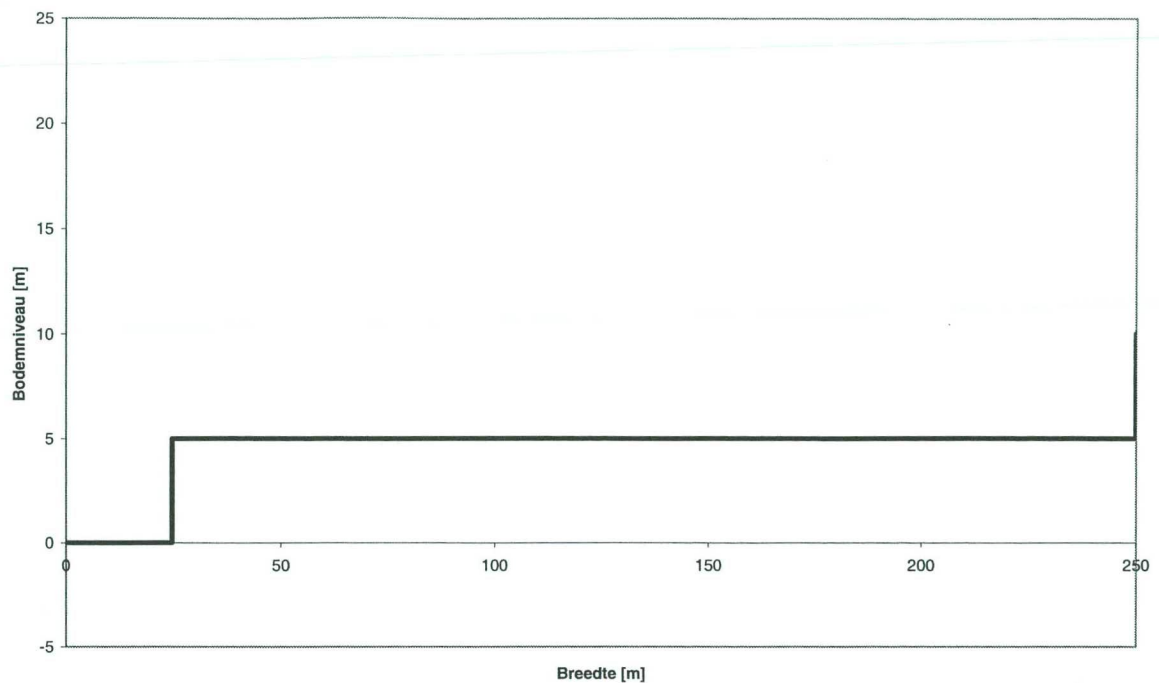
Alle uitgevoerde SOBEK berekeningen met het vereenvoudigde maasmodel zijn weergegeven in tabel 3-2.

| Ad | Vereenvoudigd Maasmodel op basis van model: Grensmaas -Zandmaas, 1999.11 | SOBEK Case nummer |
|----|---|----------------------|
| 1 | Referentie | 2 |
| 2 | Zomerbed verdieping 1m | 10 |
| 2 | Zomerbed verdieping 2m | 3 |
| 3 | Winterbedverlaging 1,5m | 4 |
| 4 | Referentie, geen kades & berging | 5 |
| 4 | Zomerbed verdieping 1m, geen kades & berging | 6 |
| 4 | Zomerbed verdieping 2m, geen kades & berging | 7 |
| 4 | Winterbedverlaging 1,5m, geen kades & berging | 8 |
| 5 | Referentie, met Chézy ruwheid in het winterbed | 9 |
| 5 | Zomerbed verdieping 1m, met Chézy ruwheid in het winterbed | 12 |
| 5 | Zomerbed verdieping 2m, met Chézy ruwheid in het winterbed | 11 |
| 5 | Winterbedverlaging 1,5m, met Chézy ruwheid in het winterbed | 13 |

tabel 3-2 Uitgevoerde berekeningen met het vereenvoudigde Maasmodel

3.2.2 Schematisatie testmodel (bakprofiel met uiterwaard)

Tevens is in SOBEK een nog eenvoudiger model geschematiseerd, namelijk een bakprofiel met rechthoekige uiterwaarden, waarbij het winterbed 10 keer zo breed is als het zomerbed. Hiervoor is een dwarsprofiel gebruikt met een zomerbed van 25 m breed en een winterbed van 225 m breed. Het zomerbed in het model is 5 meter dieper dan het winterbed. Dit dwarsprofiel is weergegeven in figuur 3-3.



figuur 3-3 Dwarsprofiel van het testmodel

Het model heeft een totale lengte van 120 kilometer en bestaat uit 2 takken. Een eerste tak met een lengte van 80 kilometer en een verhang van 1×10^{-4} en een tweede tak met een lengte van 40 kilometer en een verhang van 0. In dit model zijn respectievelijk 1 meter zomerbedverdieping en 1 meter winterbedverlaging uitgevoerd. Dit model zal verder het testmodel worden genoemd. De met dit model uitgevoerde berekeningen zijn weergegeven in tabel 3-3.

| Testmodel (bakprofiel met uiterwaard) | SOBEK case nummer |
|---------------------------------------|-------------------|
| Referentie | 15 |
| Zomerbedverdieping 1m | 14 |
| Winterbedverlaging 1m | 16 |

tabel 3-3 Berekeningen met het testmodel

3.3 Resultaten SOBEK berekeningen

Niet alle resultaten van bovenstaande SOBEK berekeningen zullen hier in detail worden getoond. Het betreft namelijk principesommen waarbij de absolute uitkomsten niet relevant zijn. Het gaat om toenames of afnames van de snelheid van de hoogwatergolf bij zomerbedverdieping of winterbedverlaging voor de verschillende situaties (met of zonder zomerkades, berging of Nikuradse ruwheden).

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de toenames en afnames van verschillende, door SOBEK berekende, parameters. Deze parameters zijn bepaald tijdens de top van het hoogwater op kilometer 160 in het vereenvoudigde Maasmodel en op kilometer 80 in het testmodel. (De benedenstroomse randvoorwaarde lag op respectievelijk 220 km en 120 km).

| Vereenvoudigd Maasmodel (alle berekeningen) | c | \bar{u} | A | R | Ruwheid | Chézy (samengesteld) |
|--|-----|-----------|-----|-----|---------|-------------------------|
| zomerbedverdieping | - | + | - | - | - | + |
| winterbedverlaging | + | - | + | + | + | - |
| Testmodel (bakprofiel met uiterwaard) | c | \bar{u} | A | R | Ruwheid | Chézy (samengesteld) |
| zomerbedverdieping | - | + | - | - | - | + |
| winterbedverlaging | + | - | + | + | + | - |

tabel 3-4 Toe en afnames van SOBEK uitvoer parameters als gevolg van zomerbed of winterbedverlaging ten opzichte van de referentieberekening

waarin:

- = afname
- + = toename
- c = voortplantingssnelheid golftop (m/s)
- \bar{u} = profielgemiddelde stroomsnelheid (m/s)
- A = natte doorsnede (m²)
- R = hydraulische straal \approx waterdiepte (m)
- Chézy = samengestelde ruwheid van hoofdgeul, oeversectie en uiterwaard samen, uitgedrukt als Chézy waarde (m^{1/2}/s)

Uit tabel 3-4 blijkt dat zowel bij het vereenvoudigde Maasmodel als bij het testmodel dezelfde trends worden gevonden als in het VVM-BOS, namelijk:

Winterbedverlaging

Bij winterbedverlaging neemt het afvoeraandeel van het winterbed toe, de ruwheid is daar hoger, waardoor de samengestelde ruwheid (zie par. 3.4.5 voor berekening) ook toeneemt. De Chézy waarde neemt dus af. Ook neemt de natte doorsnede toe. Door de ruwheidstoename en de toename in natte doorsnede neemt de gemiddelde stroomsnelheid af. Dit alles is naar verwachting. Echter, in tegenstelling tot de verwachting, neemt de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf toe.

Zomerbedverdieping

Bij zomerbedverdieping neemt het afvoeraandeel van het zomerbed toe, de ruwheid is daar lager waardoor ook de samengestelde ruwheid afneemt en de Chézy waarde toeneemt. De totale natte doorsnede neemt ook af. In het zomerbed neemt deze weliswaar toe, maar de waterstandsverlaging door zomerbedverdieping zorgt ervoor dat de natte doorsnede van het winterbed afneemt. Deze afname in het winterbed is groter dan de toename in het zomerbed, vandaar een netto afname. Door afname van de ruwheid en natte doorsnede neemt de gemiddelde stroomsnelheid toe. Dit alles is naar verwachting. Echter, in tegenstelling tot de verwachting neemt de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf af.

Het verwijderen van zomerkades, het weglaten van berging en een waterdiepte-onafhankelijke winterbedruwheid heeft ook geen effecten op de waargenomen trends.

3.4 Uitsluiten van factoren

In deze paragraaf zullen een aantal factoren worden behandeld, die van invloed kunnen zijn op de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Geen van deze factoren echter verklaart de berekende verschillen in golfvoortplanting bij zomerbed- en winterbedverlaging.

Behandeld worden:

- Onvolkomenheden in het SOBEK model
- Lokale geometrie.
- Effect van zomerkades.
- Stroomberging.
- Veranderingen in zomerbed of winterbed ruwheid

3.4.1 Onvolkomenheden in het SOBEK model

Aanvankelijk is de mogelijkheid overwogen dat de berekende versnelling en vertraging van de hoogwatergolf, bij respectievelijk winterbed- en zomerbedverlaging, wordt veroorzaakt door onvolkomenheden in het gebruikte SOBEK model. Er zijn echter geen aanwijzingen dat er fouten worden gemaakt bij het modelleren van de waterbeweging in SOBEK. De sterk vereenvoudigde 1D schematisatie kan echter wel gevolgen hebben voor de snelheid van de afvoergolf. Met name de definitie van stroomberging. Dit zal verderop worden behandeld.

Uit nog niet gerapporteerde WAQUA berekeningen in het kader van de Maaswerken waarin zowel oude (1995) als nieuwe (2000) ontwerpen voor Grensmaas en Zandmaas zijn doorgerekend komen dezelfde trends naar voren als in de SOBEK berekeningen. Overigens zijn in deze modellen de DGR-kades, net als in SOBEK, oneindig hoog verondersteld. Beide ontwerpen worden, vooral in de Zandmaas, gedomineerd door zomerbedverdieping en bij beide WAQUA berekeningen wordt benedenstrooms van de Zandmaas een geringe vertraging van de top van de afvoergolf geconstateerd. Hieruit blijkt dat de vertraging van de hoogwatergolf bij zomerbedverdieping niet alleen door SOBEK wordt berekend, maar ook door WAQUA, en dus niet kan worden geweten aan fouten in de SOBEK waterbewegingsberekening of effecten van de 1D schematisatie.

3.4.2 Lokale geometrie

De lokale geometrie van de rivier is natuurlijk van invloed op de voortplantingssnelheid van de afvoergolf en kan verantwoordelijk zijn voor onverwachte verschijnselen bij de modelberekeningen. In dit geval bleek de lokale geometrie niets van doen te hebben met de versnelling en vertraging van de hoogwatergolf bij respectievelijk winterbed- en zomerbedverlaging. Ook in het vereenvoudigde SOBEK model van de Maas, waaruit alle lokale geometrie is verwijderd, werden dezelfde trends waargenomen als in het originele SOBEK model van de Maas (versie 1999.1).

3.4.3 Effect van zomerkades

Zomerkades hebben invloed op de stroomberging en op het moment waarop het uiterwaardgebied erachter gaat meestromen. Daarmee beïnvloeden ze de golfvoortplantingssnelheid. De zomerkades zijn echter niet verantwoordelijk voor de versnelling en vertraging van de hoogwatergolf bij respectievelijk zomerbedverdieping en

winterbedverlaging. Ook in het vereenvoudigde SOBEK model zonder zomerkades werd deze trend namelijk waargenomen.

3.4.4 Stroomberging

De voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf is $c=5/3 B_s/B u$ (vergelijking 2-11). Daaruit blijkt dat stroomberging van groot belang is voor de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Met het vereenvoudigde Maasmodel zijn berekeningen uitgevoerd met stroomberging en zonder stroomberging. In het model zonder berging arriveerde de top van de hoogwatergolf 13 uur eerder op rivierkilometer 160 (met een start op 0 kilometer) dan in het model met stroomberging.

In het model zonder stroomberging treedt echter nog steeds versnelling op bij winterbedverlaging en vertraging bij zomerbedverdieping. Dus stroombergingseffecten zijn niet verantwoordelijk voor de versnelling en vertraging van de hoogwatergolf bij respectievelijk winterbedverlaging en zomerbedverdieping.

3.4.5 Veranderingen in zomerbed of winterbed ruwheid

In het in VVM gebruikte SOBEK model wordt gewerkt met dwarsprofielen bestaande uit drie secties, de hoofdgeul, een oeversectie (floodplain 1) en één uiterwaardsectie waarin de linker en rechteruiterwaard zijn samengevoegd (floodplain 2). Voor het berekenen van de waterbeweging wordt er één samengestelde ruwheid (uitgedrukt als C^2R) uitgerekend. Daarbij wordt uitgegaan van:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = A_s C \sqrt{Ri} \quad (3-1)$$

Indien men veronderstelt $i_0=i_1=i_2$:

$$C^2R = \left(\frac{C_0 A_{s_0} \sqrt{R_0} + C_1 A_{s_1} \sqrt{R_1} + C_2 A_{s_2} \sqrt{R_2}}{A_s} \right)^2 \quad (3-2)$$

Waarin:

- C = Chézy ruwheidswaarde
- R = Hydraulische straal
- A_s = Stroomvoerend oppervlak
- i = Verhang

De indices 0,1,2 staan voor respectievelijk de hoofdgeul, de oeversectie en de uiterwaard

In het vereenvoudigde SOBEK model van de Maas is de oeversectie (floodplain 1) zo smal dat deze nauwelijks van invloed is op de samengestelde ruwheid. Zowel bij zomerbedverdieping als bij winterbedverlaging zijn er geen wijzigingen aangebracht in de bodemligging van de oeversectie. In het testmodel is de oeversectie geheel weggelaten en is er alleen sprake van een hoofdgeul (zomerbed) en een uiterwaard (winterbed).

Zomerbedverdieping

Bij zomerbedverdieping verlagen de waterstanden in zowel zomerbed als winterbed, maar de waterstandsverlaging is kleiner dan de zomerbedverdieping. Dat betekent dat A_{s0} toeneemt en

A_{s2} afneemt. Doordat het winterbed veel breder is dan het zomerbed neemt de totale A_s af. Zie ook tabel 3-4, $A \downarrow$. Ook neemt de profielgemiddelde waterdiepte af, de waterdiepte in het zomerbed neemt weliswaar toe, maar dat weegt niet op tegen de afname van de waterdiepte in het winterbed ($R \downarrow$, zie tabel 3-4, uitgaande van $R \approx h$ bij $B > h$)

Door de lagere waterstand neemt de ruwheid in het winterbed iets toe, ofwel C_2 neemt af. In het zomerbed zal de ruwheid nauwelijks veranderen, maar in het zomerbed is de ruwheid wel lager dan in het winterbed. Tabel 3-2 toont dat de totale samengestelde ruwheid bij zomerbedverdieping afneemt ($C \uparrow$). Daaruit kan worden geconcludeerd dat in het geval van de Maas, de toename van A_{s0} belangrijker is dan de afname van C_2 (toename winterbedruwheid). Bij zomerbed verdieping neemt de profielgemiddelde stroomsnelheid toe (zie tabel 3-4, $u \uparrow$), doordat de samengestelde ruwheid afneemt ($C \uparrow$). Volgens vergelijking 2-11, $c = 5/3 B \downarrow / B u$ zou c ook moeten toenemen als u toeneemt. Dit blijkt echter niet het geval en zal in paragraaf 3.5 worden verklaard.

Winterbedverlaging

Bij winterbedverlaging treedt het tegenovergestelde proces op als bij zomerbedverdieping. Het totale natte oppervlak neemt toe ($A \uparrow$) evenals de waterdiepte en hydraulische straal ($R \uparrow$). De winterbedruwheid neemt af ($C_2 \uparrow$) maar doordat er meer water gaat stromen door het ruwere winterbed neemt de samengestelde ruwheid toe ($C \downarrow$) en de profielgemiddelde stroomsnelheid neemt af ($u \downarrow$). c neemt echter toe.

Waterdiepte en ruwheid zomerbed

Het SOBEK-model van de Maas is gekoppeld met de zomerbedruwheid (Chézy). Per traject is een ruwheid afhankelijk van de rivierwaterstand bepaald. Dit betekent dat binnen een bepaald waterstandsbereik één ruwheid heerst. Het is mogelijk dat tijdens dezelfde periode de waterstand in een ander waterstandsbereik ligt bij zomerbedverdieping, vergeleken met winterbedverlaging. Dit kan leiden tot verschillende zomerbedruwheden, wat weer leidt tot verschillen in de golfsnelheid.

Per ruwheidstraject zijn de berekende waterstanden bekeken. Het bleek dat de waterstanden in de verschillende situaties of in hetzelfde waterstandsbereik vielen, of dat de ruwheden gelijk waren voor de verschillende waterstanden. De ruwheidstabellen zijn dus niet de oorzaak van de verandering in golfsnelheid.

In het zomerbed wordt de ruwheid gedefinieerd met een Chézy waarde (C), en in het winterbed met een Nikuradse waarde (k). Daardoor verandert de ruwheid van het winterbed als de waterdiepte boven het winterbed verandert. Bij het zomerbed blijft de ruwheid constant binnen bepaalde waterstandsbereiken (zie boven). Het effect van deze verschillen in ruwheidsdefinitie is onderzocht door met het vereenvoudigde SOBEK model van de Maas een berekening uit te voeren waarin ook de winterbedruwheid was gedefinieerd als een vaste Chézy waarde. Ook bij deze berekening werd een versnelling van de hoogwatergolf bij winterbedverlaging en een vertraging bij zomerbedverdieping geconstateerd.

Algemeen

Ruwheden beïnvloeden de stroomsnelheden en daarmee ook de golfvoortplantingssnelheid. De veranderingen in ruwheid die optreden bij zomerbedverdieping of winterbedverlaging bieden echter geen verklaring voor de versnelling van de hoogwatergolf bij winterbedverlaging en de vertraging bij zomerbedverdieping.

3.5 Golfvoortplantingssnelheid en breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed.

De breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed blijkt van grote invloed te zijn op de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. In deze paragraaf zal de relatie tussen deze verhouding en de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf analytisch worden verklaard.

3.5.1 Theorie

Om rekening te houden met de breedte verhouding tussen zomerbed en winterbed zal onderscheid moeten worden gemaakt tussen deze beide secties. De golfvoortplantingssnelheid zal worden berekend voor een bakprofiel met een uiterwaard. Zomerbed en winterbed zullen worden aangegeven met respectievelijk de indices 0 en 1.

De totale afvoer door het hierboven beschreven dwarsprofiel wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} Q &= A_{s_0} u_0 + A_{s_1} u_1 = B_{s_0} h_0 C_0 \sqrt{h_0 i_b} + B_{s_1} h_1 C_1 \sqrt{h_1 i_b} \\ &= 25 \left(\frac{1}{k_{n0}} \right)^{1/6} B_{s_0} i_b^{1/2} h_0^{5/3} + 25 \left(\frac{1}{k_{n1}} \right)^{1/6} B_{s_1} i_b^{1/2} h_1^{5/3} \end{aligned} \quad (3-3)$$

tevens geldt:

$$c = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh} = \frac{1}{B} \frac{5}{3} \left(B_{s_0} 25 \left(\frac{h_0}{k_{n0}} \right)^{1/6} \sqrt{h_0 i_b} + B_{s_1} 25 \left(\frac{h_1}{k_{n1}} \right)^{1/6} \sqrt{h_1 i_b} \right) \quad (3-4)$$

ofwel:

$$c = \frac{5}{3} \frac{1}{B} (B_{s_0} u_0 + B_{s_1} u_1) \quad (3-5)$$

De golfvoortplantingssnelheid (c) is dus 5/3 maal de **breedte gewogen** stroomsnelheid.

Aangezien in de Maas de breedte van het stroomvoerend winterbed (B_{s1}) veel groter is dan de breedte van het zomerbed blijkt vooral de stroomsnelheid in het winterbed bepalend te zijn voor de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Bij zomerbedverdieping neemt de waterdiepte in het winterbed af, de ruwheid neemt toe en de stroomsnelheid in het winterbed neemt af. Daardoor neemt de golfvoortplantingssnelheid ook af zodra de uiterwaarden overstroomd zijn. (De stroomsnelheid in het zomerbed neemt weliswaar toe, maar is veel minder belangrijk voor de golfvoortplantingssnelheid, omdat het zomerbed veel minder breed is dan het stroomvoerende winterbed).

Bij winterbedverlaging gebeurt het omgekeerde, de winterbedruwheid neemt af, stroomsnelheid in het winterbed neemt toe en dus ook de golfvoortplantingssnelheid.

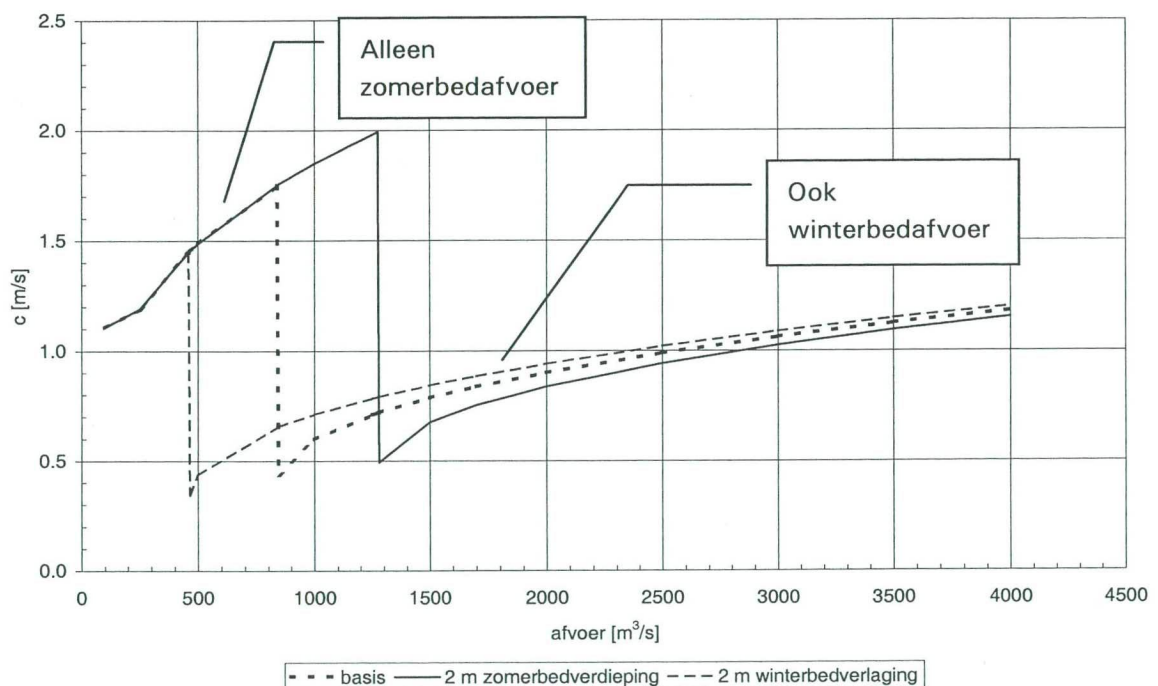
3.5.2 Voorbeeld berekening op basis van Chézy vergelijking

In een Excel spreadsheet zijn voor een schematisch dwarsprofiel van de Maas en bij verschillende afvoeren een aantal hydraulische parameters berekend conform de methodiek die ook in SOBEK wordt gebruikt. Er is uitgegaan van de volgende situatie:

- Bakprofiel met uiterwaard.
- Zomerbed van 120 m breed met een Chézy waarde van $50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.
- Winterbed van 400 m breed met een Chézy waarde van $20 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.
- Verhang van 1×10^{-4} .
- 6 meter hoogteverschil tussen zomerbed en winterbed in de basissituatie.
- 8 meter hoogteverschil tussen zomerbed en winterbed bij 2m zomerbedverdieping.
- 4 meter hoogteverschil tussen zomerbed en winterbed bij 2m winterbedverlaging.

Voor verschillende afvoeren zijn natte doorsnede, hydraulische straal en stroomsnelheden berekend voor zowel winterbed als zomerbed op basis van de Chézy vergelijking. Met behulp van vergelijking 3-5 zijn hieruit golfvoortplantingssnelheden bepaald.

De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven figuur 3-4.



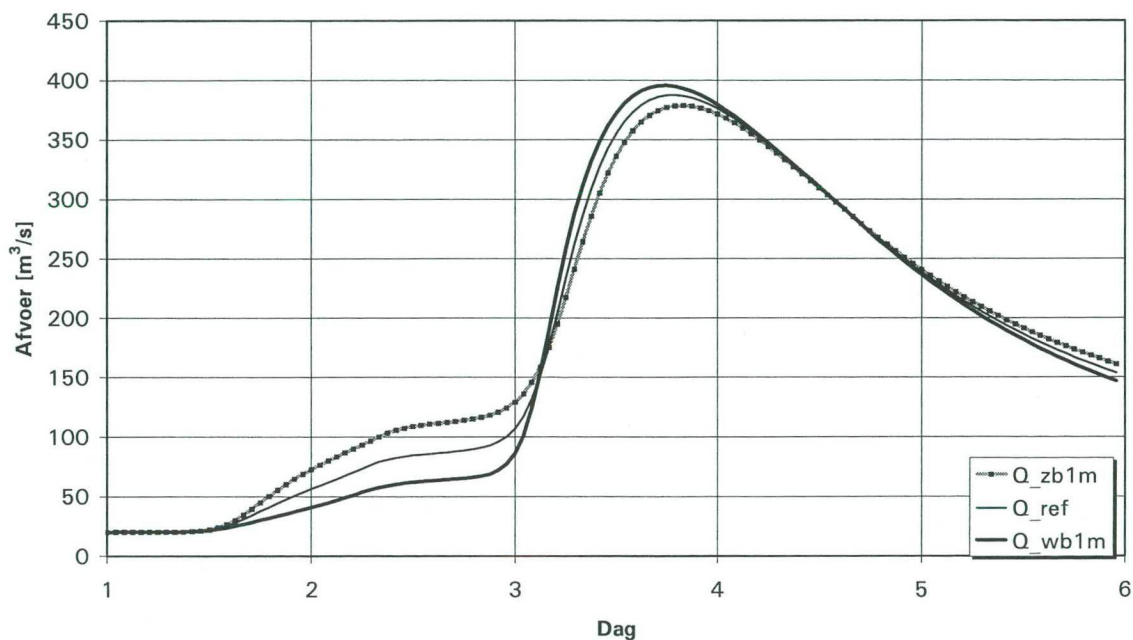
figuur 3-4 Voortplantingssnelheid voor een schematisch dwarsprofiel van de Maas

In figuur 3-4 zijn dezelfde trends zichtbaar als in de vvm berekeningen bij zomerbedverdieping en winterbedverlaging. De figuur toont toenemende voortplantingssnelheden bij toenemende afvoer. In het begin stroomt er alleen water door het zomerbed en zijn alle voortplantingssnelheden gelijk. Op een gegeven moment gaat het winterbed meestromen (eerst bij winterbedverlaging, gevolgd door de basissituatie en als laatste bij zomerbedverdieping) en neemt de golfvoortplantingssnelheid sterk af. Bij 1500 m³/s stroomt er in alle gevallen water door het winterbed. In de situatie met zomerbedverdieping is de stroomsnelheid in het winterbed het laagst en daardoor ook de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Voor de situatie bij winterbedverlaging geldt het omgekeerde.

3.5.3 Voorbeeld berekeningen met het testmodel (bakprofiel met uiterwaard)

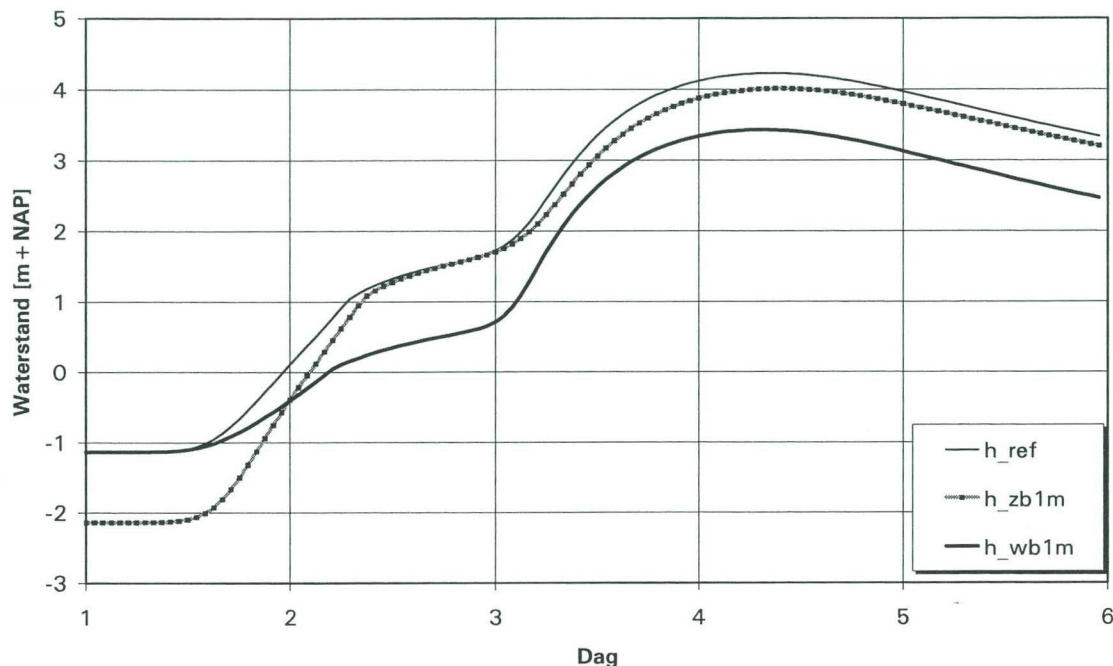
Met het SOBEK testmodel zijn eveneens enige voorbeeld berekeningen uitgevoerd. In onderstaande figuren zijn de modelresultaten op 80 kilometer benedenstrooms van de bovenrand van het model weergegeven.

Figuur 3-5 toont dat de afvoertop het eerst arriveert bij winterbedverlaging (lijn Q_wb 1m) en het laatst bij zomerbedverdieping (lijn Q_zb 1m). In de aanloop van de golf neemt de afvoer eerder toe bij zomerbedverdieping en later bij winterbedverlaging.



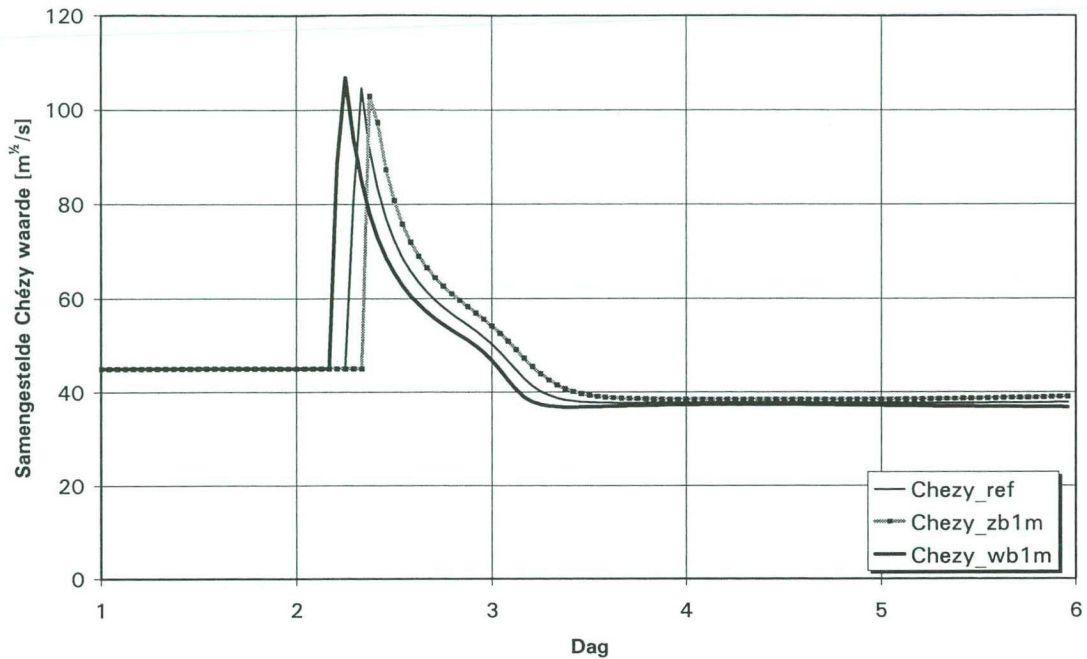
figuur 3-5 Afvoer op rivierkilometer 80 in het testmodel

Figuur 3-6 toont dat zowel bij zomerbedverdieping als bij winterbedverlaging de waterstanden lager worden. De top van het hoogwater arriveert sneller bij winterbedverlaging en later bij zomerbedverdieping, net als bij de topafvoeren. Door hysteresis arriveert de top van het hoogwater bijna een dag later dan de topafvoeren. De aanloop van het hoogwater is sneller bij zomerbedverdieping dan bij winterbedverlaging.

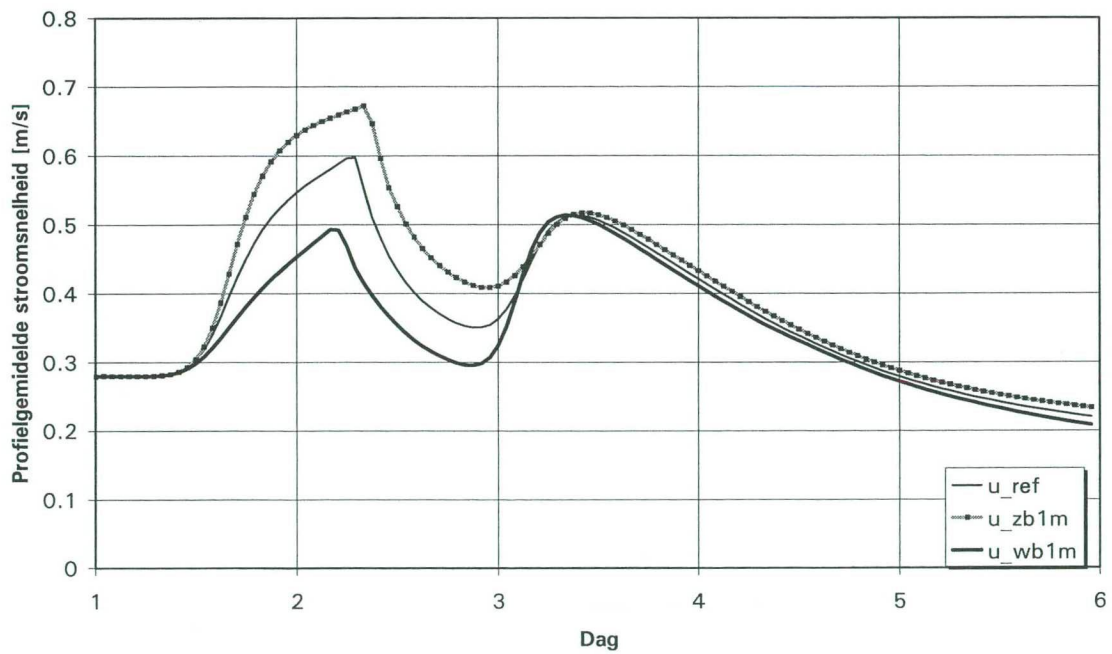


figuur 3-6 Waterstand op rivierkilometer 80 in het testmodel

Figuur 3-7 toont de samengestelde Chézy waarde ter plaatse van rivierkilometer 80 in het testmodel, berekend volgens vergelijking 3-2. Halverwege dag 2 stijgen de waterstanden zo hoog dat het winterbed gaat meestromen. Daardoor neemt de natte omtrek (O) abrupt toe terwijl het natte doorstroomoppervlak (A) geleidelijk toeneemt. De hydraulische straal $R = A/O$ neemt daardoor sterk af en dit resulteert in de abrupte toename van de samengestelde Chézy waarde als het winterbed onderloopt (zie vergelijking 3-2). Bij verdere stijging van de waterstanden neemt de samengestelde Chézy waarde weer af. De samengestelde Chézy waarde hangt niet alleen af van de ruwheden in zomerbed en winterbed maar ook van het stroomvoerende oppervlak en de hydraulische straal in zomerbed en winterbed. Doordat al deze factoren gelijktijdig veranderen is het verloop van de samengestelde Chézy waarde complex en biedt daarom weinig extra inzicht in de processen die plaatsvinden. Voor de volledigheid is de samengestelde Chézy waarde hier toch weergegeven.

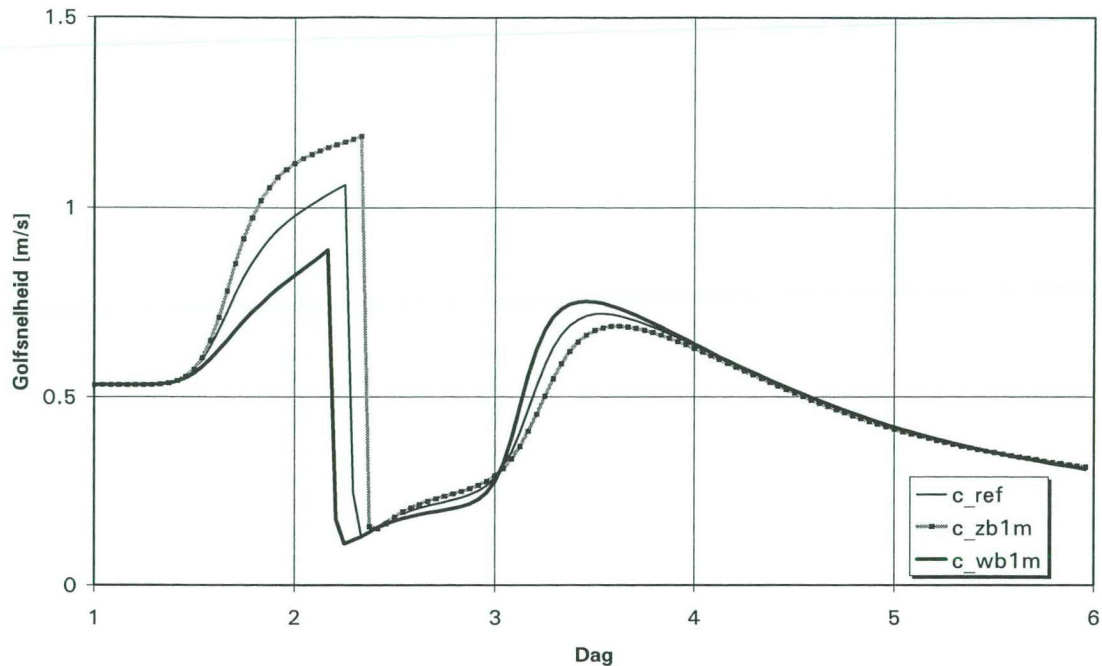


figuur 3-7 Samengestelde Chézy waarde op rivierkilometer 80 in het testmodel



figuur 3-8 Profielgemiddelde stroomsnelheid op rivierkilometer 80 in een schematisch SOBEK model

Figuur 3-8 toont de stroomsnelheden. Halverwege dag 2 stijgen de waterstanden zo hoog dat het winterbed gaat meestromen. Hierdoor nemen de profielgemiddelde stroomsnelheden sterk af. In de was van de hoogwatergolf zijn de stroomsnelheden het hoogst bij zomerbedverdieping, vooral omdat bij zomerbedverdieping de afvoer hoger is in de was van de golf.



figuur 3-9 Voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf op rivierkilometer 80 in het testmodel

Figuur 3-9 toont de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf, berekend met vergelijking 3-5. In de was van de golf als het winterbed nog niet overstroomd is, is de golfsnelheid het grootst bij zomerbedverdieping. Dit komt door de hogere stroomsnelheid en afvoer in de aanloopfase van de golf. Rond de golftop, als het winterbed ook meestroomt, is de golfsnelheid echter het grootst bij winterbedverlaging. De trend van figuur 3-9 is vergelijkbaar met de eenvoudige analyse in figuur 3-4.

Bovenstaande figuren zijn vrij complex doordat behalve de lokale verschillen in golfsnelheid ook de bovenstroomse golfsnelheid een rol speelt. Als bovenstroomse effecten geen rol zouden spelen zouden afvoer, stroomsnelheid en golfsnelheid voor alle situaties gelijk zijn totdat in één van de situaties het winterbed gaat meestromen (zoals in figuur 3-4 waar alleen lokale golfvoortplantingssnelheden zijn weergegeven).

Bij winterbedverlaging zal het winterbed het eerst gaan meestromen. Op dat moment verandert de hoogwatergolf ten opzichte van de referentiesituatie en zomerbedverdieping. Deze verandering plant zich voort in benedenstroomse richting, met de snelheid $u + \sqrt{gh}$ (Ogink, 1995), waarmee verstoringen op het wateroppervlak zich voortplanten. Dit is de stroomsnelheid plus de snelheid van een korte golf in ondiep water. De top van de hoogwatergolf (een zogenaamde lange golf) heeft weliswaar de voortplantingssnelheid c , de voortplantingssnelheid van oppervlakteverstoringen is met $u + \sqrt{gh}$ veel groter.

Bij winterbedverlaging gaat bovenstrooms het winterbed het eerst meestromen. Daardoor ontstaat bij winterbedverlaging het eerst verschil in afvoer, stroomsnelheid en golfsnelheid ten opzichte van de referentiesituatie en zomerbedverdieping (zie figuur 3-5, 3-8 en 3-9). Zomerbedverdieping en de referentiesituatie gaan iets later van elkaar afwijken, doordat het bovenstrooms iets langer duurt voordat in de referentiesituatie het winterbed gaat meestromen terwijl dan bij zomerbedverdieping nog alleen stroming in het zomerbed is.

Bij zomerbedverdieping duurt het langer voordat het winterbed gaat meestromen. Daardoor kan de golf zich ook langer voortplanten in alleen het zomerbed. Dit betekent dat de

voortplantingssnelheid bij zomerbedverdieping langer hoog is en het front van de golf eerder benedenstrooms arriveert dan bij de referentie en bij winterbedverlaging. Zodra aan de bovenrand van het model echter het winterbed gaat meestromen wordt de golf vertraagd. Bij zomerbedverdieping stroomt het minste water door het winterbed en zijn de stroomsnelheden in het winterbed het laagst. Daardoor is de golfsnelheid van de golftop bij zomerbedverdieping het laagst.

4 Discussie

4.1 Beantwoording onderzoeksvragen

In paragraaf 1.2 zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

1. Hoe komen de golfvoortplantingssnelheden tot stand in het SOBEK model dat ten grondslag ligt aan het VVM-BOS?
2. Zijn de door SOBEK uitgerekenende verschillen in golfvoortplantingssnelheid ook in werkelijkheid te verwachten, of worden ze veroorzaakt door onvolkomenheden in het model?

Ad 1. De golfvoortplantingssnelheden in SOBEK zijn gebaseerd op de impulsvergelijking en de continuïteitsvergelijking voor een 1D situatie. Uit de analyse in hoofdstuk 2 en paragraaf 3.5.1 blijkt dat de golfvoortplantingssnelheid (c) gelijk is aan $5/3$ maal de breedte gewogen stroomsnelheid (zie vergelijking 3-5). Aangezien het winterbed van de Maas veel breder is dan het zomerbed zijn vooral de stroomsnelheden op het winterbed bepalend voor de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Bij zomerbedverdieping zijn de snelheden in het winterbed het laagst en dus is ook de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf het laagst. Bij winterbedverlaging geldt het omgekeerde.

Ad 2. De door SOBEK berekende golfvoortplantingssnelheden zijn op juiste wijze berekend met behulp van de impulsvergelijking en de continuïteitsvergelijking voor een 1D situatie. Ook in werkelijkheid mag daarom worden verwacht dat de top van de hoogwatergolf zich sneller zal gaan voortplanten bij winterbedverlaging en langzamer bij zomerbedverdieping. Ook WAQUA berekeningen bevestigen dit (paragraaf 3.4.1). De voortplantingssnelheid van de golf blijkt sterk af te hangen van de geometrie (breedte winterbed t.o.v. breedte zomerbed) en de breedte van het stroombergende deel van het winterbed. Indien deze factoren niet helemaal juist zijn geschematiseerd in het SOBEK model van de Maas zal de golfvoortplantingssnelheid die met dat model wordt berekend ook niet helemaal correct zijn.

4.2 Implicaties van zomerbedverdieping en winterbedverlaging voor hoogwatergolven in de Maas

In hoofdstuk 3 is aangetoond dat zomerbedverdieping leidt tot een tragere voortplanting van de top van een hoogwatergolf, maar een versnelling van het front van een hoogwatergolf. Bij winterbedverlaging gebeurt het omgekeerde.

Deze veranderingen in de hoogwatergolf kunnen gevolgen hebben voor de afwatering van zijrivieren. Een belangrijk voorbeeld vormt de afwatering van de Dommel en de Aa via de Dieze in de Maas bij Den Bosch. De afvoeren van de Dommel en de Aa zijn vaak in dezelfde periode hoog als de afvoer van de Maas. Hoogwater in de Dommel en de Aa loopt echter voor

op het hoogwater in de Maas. Als de snelheid van de afvoergolf in de Maas verandert en de golftoppen van Maas en Dieze meer tegelijkertijd vallen, kan dat gevolgen hebben voor de afwatering van de Dommel en de Aa (Wijbenga, 1999).

De afwatering van de Dieze hangt af van twee factoren:

1. Stagnatie van de afwatering van de Dieze bij passage van de top van de hoogwatergolf door de Maas. Deze golf zal later arriveren bij zomerbedverdieping en eerder bij winterbedverlaging.
2. Afname van de afwatering van de Dieze tijdens de aanloop van het hoogwater in de Maas. (Hoogwater in de Dieze loopt voor op hoogwater in de Maas). Bij zomerbedverdieping arriveert de aanloop van het hoogwater eerder, waardoor de afvoer van de Dieze kan afnemen. Bij winterbedverlaging arriveert de aanloop later waardoor de afvoer van de Dieze juist kan toenemen.

Er zijn dus meerdere effecten die een rol spelen bij de afwatering van de Dieze. Welk van deze effecten het belangrijkste is hangt af van de exacte waterstanden op Maas en Dieze en het tijdsverschil tussen de hoogwaters in Maas en Dieze.

5 Conclusies

Zomerbedverdieping en winterbedverlaging beïnvloeden de snelheid en de vorm van een hoogwatergolf in de Maas. Bij zomerbedverdieping vertraagt de top van het hoogwater, maar de aanloop van de golf versnelt. Bij winterbedverlaging gebeurt het omgekeerde.

Dit kan verklaard worden met vergelijking 3-5:

$$c = \frac{5}{3} \frac{1}{B} (B_{s_0} u_0 + B_{s_1} u_1) \quad (3-5)$$

Hieruit blijkt dat de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf gelijk is aan 5/3 maal de breedte gewogen stroomsnelheid. Omdat het winterbed van de Maas veel breder is dan het zomerbed, is de stroomsnelheid in het winterbed bepalend voor de voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf. Bij zomerbedverdieping wordt de stroomsnelheid in het winterbed lager, waardoor een lagere voortplantingssnelheid ontstaat als het winterbed overstroomd is. Door zomerbedverdieping duurt het echter langer voordat het winterbed overstroomd is waardoor het front van de hoogwatergolf zich sneller kan voortplanten. Bij winterbedverlaging gebeurt het omgekeerde.

De voortplantingssnelheid van de golf hangt sterk af van de geometrie (breedte winterbed ten opzichte van breedte zomerbed) en de breedte van het stroombergende deel van het winterbed. Het is belangrijk dat deze factoren op de juiste wijze zijn geschematiseerd in het SOBEK model van de Maas. Onjuiste of onvolledige schematisatie zal leiden tot onjuiste golfvoortplantingssnelheden in het model.

6 Referenties

- Barneveld, H.J., J. Udo & A.D. Voutsis, 2000. Verkenning Verruiming Maas. Deel 1: Hoofdrapport, Deel 2: Figuren, tabellen en Bijlagen. vvm rapport nr. 5, Rijkswaterstaat RIZA.
- Duits, M.T. & J.M. van Noortwijk, 1999. Nauwkeurighedsanalyse ruimte voor Rijntakken. HKV rapport pr163.
- Jansen, P.Ph, L. van Bendegom, J. van den Berg, M. de Vries, A. Zanen, 1979. Principles of River Engineering. The non-tidal alluvial river. Delft: Delftse Uitgevers Maatschappij.
- Ogink, H.J., 1995, Hydrology 2, dictaat International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering (IHE). Niet gepubliceerd.
- Van Rijn, L.C., 1990. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Oldemarkt: Aqua publications.
- Wijbenga, J.H.A., 1999. Effect van de Maaswerken benedenstrooms. Afwatering van Dommel en Aa. HKV rapport pr107.