



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling
Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland

Analyse OLR verhanglijn Waal;

Methode en procedure voor berekening van het Bagger Referentie Vlak (BRV)

RIZA rapport 2001.028
ISBN 9036953820

Dit rapport is te bestellen à f 25,- / € 11 per stuk bij Cabri Mailservice, Postbus 431, 8200 AK Lelystad, Tel. 0320-285333, Fax. 0320-285311, E-mail riza@cabri.nl

Betaling na levering; een acceptgiro wordt bijgevoegd.

Het rapport is gratis voor dienstonderdelen van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

This publication can be ordered at DFL 25,- / € 11 per copy through Cabri Mailservice, PO Box 431, 8200 AK Lelystad, The Netherlands, Tel. +31 320 285333, Fax, +31 320 285311, E-mail riza@cabri.nl
Payment on delivery.



Analyse OLR verhanglijn Waal;

Methode en procedure voor berekening van het Bagger Referentie Vlak (BRV)

RIZA rapport 2001.028

ISBN 9036953820

Auteurs: N. Douben en R. van der Veen

RIZA

Arnhem, juli 2001

Inhoudsopgave

Lijst met figuren	4
Lijst met tabellen	5
Lijst met bijlagen	5
Samenvatting	7
1. Inleiding	11
1.1 Achtergrond	11
1.2 Probleembeschrijving	11
1.3 Doelstelling	13
1.4 Leeswijzer	14
2. Berekening Bagger Referentie Vlak 2000	15
2.1 Inleiding	15
2.2 Beschikbare en gebruikte (meet-)gegevens	15
2.3 Methodiek en analyse	16
2.4 Resultaten	18
2.4.1 Verwerking afvoermetingen	18
2.4.2 Verwerking verhanglijnmetingen	20
2.4.3 Van meetsituatie naar BRV 2000	24
2.4.4 Het Bagger Referentie Vlak (BRV) 2000 voor de Waal	27
3. Laagwatertoets Rijntakkenschematisatie Sobek-Rijn 2000.3	29
3.1 Inleiding	29
3.2 Korte beschrijving Sobek-Rijn 2000.3	29
3.3 Berekeningen en randvoorwaarden	29
3.4 Resultaten	30
4. Geometrietoets Rijntakkenschematisatie Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Korte beschrijving Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2	35
4.3 Berekeningen en randvoorwaarden	35
4.4 Resultaten	35
5. OLR-toets, berekening OLR-verhanglijnen en BRV met Sobek	39
5.1 Inleiding	39
5.2 Berekeningen en randvoorwaarden	39
5.3 Resultaten	40
5.3.1 Simulatie OLR-situatie op basis van meetperiode (nov. 1999)	40
5.3.2 Reproductie van historische OLR-reductievlakken	41
6. Rekenprocedure Bagger Referentie Vlak	45
6.1 Inleiding	45
6.2 Uitgangspunten rekenprocedure	45
6.3 Beschrijving rekenprocedure	46
6.4 Onzekerheden en beperkingen	49
7. Conclusies en aanbevelingen	51
7.1 Conclusies	51
7.2 Aanbevelingen	54
8. Geraadpleegde literatuur	57
Bijlagen	59

Lijst met figuren

Figuur 1.1	Temporele extrapolatie van OLR en ruimtelijke interpolatie van BRV ten behoeve van berekening BRV.
Figuur 2.1	Afvoerverloop bij Lobith tijdens de periode 1 oktober t/m 31 december 1999.
Figuur 2.3	Schematische weergave verwijdering uitbijters uit 100 m gemiddelde data.
Figuur 2.4	Verhanglijnen op basis van 100 m gemiddelde waterstanden en bodemligging.
Figuur 2.5	Kilometer gemiddelde waterstanden, bodemligging, verhanglijnen met bijbehorende standaardafwijking.
Figuur 2.6	Gemeten verhanglijnen en verhanglijn OLR 1996.
Figuur 2.7	Het BRV 2000, tezamen met het OLR 1991, OLR 1996 en het BRV 1999.
Figuur 3.1	Resultaat Sobek berekening (versie 2000.3) op 11-11-1999 om 16.00 uur.
Figuur 3.2	Invloed getij (benedenrand Sobek) op gemiddelde berekeningsresultaten (versie 2000.3).
Figuur 4.1	Resultaat Sobek berekening (versie 2000.1) op 11-11-1999 om 16.00 uur.
Figuur 4.2	Resultaat Sobek berekening (versie 2000.2) op 11-11-1999 om 16.00 uur.
Figuur 4.3	Waterstandsverschillen tussen Sobek berekeningen met verschillende Rijntakkenschematisaties (geometrietoets).
Figuur 5.1	Berekende (Sobek-Rijn 2000.3) en gemeten waterstanden en onderlinge verschillen ten behoeve van OLR-situatie.
Figuur 5.2	Verschillen in waterstanden (OLR-situatie) bij verschillende Rijntakkenschematisaties.
Figuur 5.3	Vergelijking vastgestelde en berekende OLR- en BR-vlakken.
Figuur 5.4	Verschillen tussen OLR- en BR-vlakken en met Sobek berekende verhanglijnen.
Figuur B.3.1.1	Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden Lobith.
Figuur B.3.1.2	Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden Pannerdensche kop.
Figuur B.3.1.3	Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden Nijmegen-Haven.
Figuur B.3.1.4	Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden Tiel-Haven.
Figuur B.3.1.5	Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden Zaltbommel.
Figuur B.3.1.6	Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden Vuren.
Figuur B.5.1.1	Berekende (Sobek-Rijn 2000.1) en gemeten waterstanden en onderlinge verschillen ten behoeve van OLR-toets.
Figuur B.5.1.2	Berekende (Sobek-Rijn 2000.2) en gemeten waterstanden en onderlinge verschillen ten behoeve van OLR-toets.

Lijst met tabellen

Tabel 2.1	Overzicht laseraltimetrie-, vaartuig-, bodem- en afvoermetingen.
Tabel 2.2	Afvoermetingen, waterstanden MSW peilstations en herleidde waterstanden.
Tabel 2.3	Standaardafwijking van 100 m gemiddelde waterstand en kilometer gemiddeld verhang.
Tabel 2.4	Samenvattend overzicht analyses gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen.
Tabel 2.5	Het BRV 2000 ter hoogte van MSW peilstations.
Tabel 2.6	Trajectafhankelijke verhoudingsfactoren (ΔI_w) voor vertaalslag van meetsituatie naar BRV 2000.
Tabel 2.7	Verhangtrajectgrenzen BRV 2000.
Tabel 6.1	Stapsgewijze uitwerking rekenprocedure voor jaarlijkse vaststelling BRV.
Tabel 6.2	Planning en looptijden ten behoeve van vaststelling BRV.
Tabel B.3.1.1	Gemeten en berekende (Sobek) afvoeren.

Lijst met bijlagen

Bijlage 2.1	Schematische weergave methodiek en analyse voor berekening van BRV 2000.
Bijlage 3.1	Waterstanden conform MSW peilstations en Sobek-Rijn 2000.3.
Bijlage 5.1	Berekende (Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2) en gemeten waterstanden en onderlinge verschillen ten behoeve van OLR-toets.

Inleiding en achtergrond

De directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat (DON) heeft medio 1996 gekozen voor een vaargeulverruiming van de Waal door middel van onder andere (onderhouds-)baggerwerkzaamheden. De vaargeul wordt vergroot van 150 * 2,50 m naar 170 * 2,80 m bij OLR.

De vaargeulafmetingen en de bijbehorende baggerdoelstellingen worden gerelateerd aan een Bagger Referentie Vlak (BRV) overeenkomend met het OLR-reductievlak. Het OLR-reductievlak voor de Rijntakken wordt op basis van waterstands analyses elke 10 jaar vastgesteld. Het OLR-reductievlak is aan wijzigingen onderhevig als gevolg van onder andere geometrische veranderingen in, en de (autonome) bodemdaling van het zomerbed.

De tienjaarlijkse vaststelling van het OLR-reductievlak voldoet niet aan de gewenste nauwkeurigheidseisen van het project Baggeren, vandaar dat jaarlijks een BRV wordt vastgesteld met behulp van ruimtelijke interpolatie en temporele extrapolatie van waterstanden. Temporele lineaire extrapolatie vanuit het OLR 1991 heeft met behulp van OLR 1996 geresulteerd in het BRV 1997, BRV 1998 en 1999. De ruimtelijke interpolatie van waterstanden tussen de verschillende peilstations vindt lineair plaats.

Bovenstaand beschreven berekening van het BRV is met veel onnauwkeurigheden omgeven. De aanname met betrekking tot het lineaire verloop van de verhanglijn tussen twee peilstations, alsmede de onafhankelijkheid van de actuele bodemligging staan hierbij ter discussie.

Het RIZA heeft in opdracht van DON een analyse uitgevoerd met betrekking tot het verloop van de OLR-verhanglijn over de Waal. Daarnaast is een laagwatertoets met de Rijntakkenschematisatie van het eendimensionale hydrodynamisch model Sobek uitgevoerd, waarbij tevens wordt ingegaan op een rekenprocedure voor de jaarlijkse berekening van de BRV-verhanglijn met behulp van dit modelinstrumentarium. De analyse, toets en test van de rekenprocedure zijn uitgevoerd op basis van meetgegevens welke medio november 1999 zijn ingewonnen.

Doelstelling

De doelstelling van de 'Analyse OLR-verhanglijn Waal' is tweeledig:

1. (handmatige) berekening van het BRV op basis van waterstands- en afvoermetingen, aangevuld met metingen van de bodemligging;
2. haalbaarheidsonderzoek naar de toepassing van Sobek ten behoeve van de berekening van BRV's.

Conclusies

Voor wat betreft de analyses en berekeningen ten behoeve van de vaststelling van het BRV op basis van waterstands- en afvoermetingen, aangevuld met metingen van de bodemligging kan het volgende worden geconcludeerd:

- het waterspiegelverloop tussen de MSW peilstations wordt met behulp van verhanglijnmetingen goed weergegeven. Verhanglijnmetingen hebben een duidelijke meerwaarde ten opzichte van de rechtlijnige interpolatie tussen twee MSW peilstations.
- de vertaalslag van de meetsituatie ($Q_{\text{Boven-Rijn}} = 1.740 \text{ m}^3/\text{s}$) naar het OLR-niveau ($Q_{\text{Boven-Rijn}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$) heeft plaatsgevonden op basis van Q-h relatie 1996 'gedeeltelijk gestuwd'.

- uit de afvoermeting nabij de Pannerdensche kop kan worden afgeleid dat de afvoer over de Waal tijdens OLR, ten opzichte van Q-h relatie 1996, zal toenemen. Deze toename bedraagt circa 15 m³/s. De OLA over de Waal voor het BRV 2000 bedraagt nu circa 806 m³/s.
- momentane verschillen tussen vaartuigmetingen en MSW peilstations (gemiddeld 0,16 m) zijn groter dan verschillen tussen de laseraltimetrie meting en MSW peilstations (gemiddeld 0,06 m). Deze verschillen worden veroorzaakt door de squat (inzinking) van het meetvaartuig enerzijds en het locale dwarsverhang anderzijds.
- de verschillen zijn voor wat betreft de laseraltimetrie meting niet systematisch van aard, dit in tegenstelling tot de vaartuigmetingen. De vaartuigmetingen geven systematisch een onderschatting van de MSW peilstations. Een mogelijke oorzaak hiervoor is een onjuiste inschatting van de squat van het meetvaartuig. Er dient te worden opgemerkt dat de geconstateerde verschillen sterk indicatief zijn (momentane waarneming), waardoor niet al te veel waarde mag worden gehecht aan de absolute getallen.
- de bodemverandering (daling en/of stijging) van het zomerbed heeft direct invloed op de ligging van het BRV en is ter hoogte van de MSW peilstations gekwantificeerd met behulp van een gewogen gemiddelde waterstandsverandering op basis van een tijdreeksanalyse over de periode 1990 tot en met 1999. Uit de analyse blijkt dat het BRV door het grillige tijdsafhankelijke verloop van waterstanden en bodemligging met grote onzekerheden is omgeven.

Uit het haalbaarheidsonderzoek naar de toepassing van Sobek ten behoeve van de berekening van het BRV, kan het volgende worden geconcludeerd:

- de verschillen in waterstanden tussen Sobek en de laseraltimetrie meting enerzijds en de MSW peilstations anderzijds blijven beperkt tot maximaal +/- 0,1 m.
- de gemeten waterstanden worden door Sobek vrijwel altijd overschat als gevolg van een niet recente Rijntakken schematisatie. De meest recente bodemligging van het zomerbed in Sobek dateert van 1997, terwijl de metingen in november 1999 zijn uitgevoerd. Sobek berekend als gevolg van een hogere bodemligging een dito waterstand, terwijl de bodemdaling in twee jaar tijd de werkelijk optredende waterstanden heeft verlaagd.
- het is bij de interpretatie van verschillen tussen laseraltimetrie metingen, MSW peilstations en Sobek resultaten van belang om stil te staan bij de meetnauwkeurigheid (laseraltimetrie en MSW peilstations), de invloed van het locale dwarsverhang op gemeten waterstanden, de invloed van het getij, de plaatsbepaling van de metingen, geïnterpoleerde modelresultaten, calibratiecriteria van Sobek en de datering van de geschematiseerde zomerbed bodem.
- uit de geometrietoets (invloed van verschillende geschematiseerde zomerbed bodems op berekende waterstanden) blijkt dat de bodemdaling van het zomerbed een relatief grote invloed heeft op de verschillen tussen de berekende (Sobek) en gemeten (laseraltimetrie en MSW peilstations) waterstanden.
- op grond van het 95% betrouwbaarheidsinterval van de OLR-toets kan worden vastgesteld dat de benedenrand van het model bij OLR (theoretisch) tot aan circa kmr. 880 doorwerkt. Getij invloeden hebben bij OLR omstandigheden pas een relatief grote invloed op de waterstanden benedenstrooms van Tiel.
- de verschillen in berekende waterstanden ten gevolge van de geometrische veranderingen kunnen bij OLR oplopen tot circa 0,15 m.

- de relatief grote foutenmarge in een BRV dat is vastgesteld op basis van temporele extrapolatie en ruimtelijke interpolatie (bijvoorbeeld BRV 1997) is aangetoond door een vergelijkende berekening met een Sobek Rijntakkschematisatie uit 1997. Waterstandsverschillen tot circa 0,30 m zijn hierin geen uitzondering.

Voor wat betreft de voorgestelde rekenprocedure ten behoeve van de jaarlijkse vaststelling van het BRV met Sobek kan het volgende worden geconcludeerd:

- het haalbaarheidsonderzoek naar de inzet van Sobek heeft aangetoond dat de toepassing van een dergelijk model mogelijk is.
- de modelschematisatie van Sobek dient voorafgaand aan de vaststelling van het BRV te worden aangepast met de meest recente bodemligging van het zomerbed. De rekenprocedure is hierop afgestemd en verloopt grotendeels zoals beschreven in het Draaiboek Basisgegevens BASELINE.
- om de meerwaarde van de inzet van Sobek (goedkoper en sneller in vergelijking tot verhanglijnmetingen) tot z'n recht te laten komen is een gedegen organisatie en afstemming van werkzaamheden en activiteiten noodzakelijk. De personen en/of afdelingen die in de dagelijkse praktijk met het BRV werken, die het BRV (officieel) vaststellen, die het BRV berekenen en die informatie en/of meetgegevens moeten aanleveren dienen hierbij te worden betrokken.
- een succesvolle jaarlijkse vaststelling van het BRV kan worden vergroot door eerdergenoemde organisatie met samenhangende taken en mandaten op te nemen in het Draaiboek Baggeren.

Voor wat betreft de afweging tussen de verschillende methoden voor de vaststelling van het BRV kan het volgende worden geconcludeerd:

- onzekerheden en nauwkeurigheden spelen een belangrijke rol bij de keuze voor een bepaalde methode. Er kan onderscheid worden gemaakt in drie verschillende methoden:
 1. vaststellen BRV op basis van laseraltimetrie of vaartuigmetingen;
 2. vaststellen BRV op basis van een tijdreeksanalyse van gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen;
 3. vaststellen BRV met behulp van Sobek berekeningen.
- uit een korte analyse van onzekerheden en beperkingen met betrekking tot de verschillende methoden kan worden afgeleid dat de nauwkeurigheid van het BRV bij bepaling met behulp van laseraltimetrie of vaartuigmetingen (1.) en Sobek berekeningen (3.) op hoofdlijnen overeen komt.
- de kosten van een laseraltimetrie meting met bijbehorende analyses zullen beduidend hoger zijn in vergelijking met de toepassing van Sobek. De looptijd zal eveneens langer zijn dan bij het gebruik van Sobek.
- een voordeel van het gebruik van Sobek is dat het modelinstrumentarium ook informatie geeft, weliswaar minder nauwkeurig, op trajecten tussen de MSW peilstations.

Aanbevelingen

Op basis van voorliggende studie kan het volgende worden aanbevolen:

- indien de keuze voor een methode ten behoeve van de bepaling van het BRV wordt gebaseerd op criteria zoals kosten, (loop-)tijd en eenduidigheid komt de toepassing van Sobek als eerste in aanmerking. Hierbij wordt echter aanbevolen om extra aandacht te besteden aan de relatie tussen de afvoer en hydraulische ruwheid (Q-C relatie) bij lagere afvoerniveaus.
- het opstarten en implementeren van een officieel laagwater meetprogramma wordt sterk aanbevolen. Hierdoor kunnen Q-h en Q-C relaties frequenter worden aangepast, welke ook ten goede komt aan de nauwkeurigheid van de OLR-reductievlakken en het BRV.

-
- in het verlengde van het laagwater meetprogramma kan, zoals dit reeds jaarlijks voor hogere afvoerniveaus plaatsvindt, een laagwatercalibratie van Sobek worden uitgevoerd.
 - de vaststelling van een BRV is met vele onzekerheden omgeven. Het is daarom van groot belang een 'dienstbrede discussie' op te starten over de wijze waarop het BRV dient te worden vastgesteld.
 - gezien de relatief grote onzekerheid rond het BRV is het noodzakelijk dit referentievlak tijdens het gebruik gedurende een Baggerprogramma te monitoren (verifiëren). Monitoring en eventuele aanpassing op basis van beheerspeilingen ligt voor de hand. Indien gelijktijdig ook het waterspiegelverhang wordt ingemeten kan gebruik worden gemaakt van de methodiek zoals in voorliggend rapport is beschreven.
 - het verdient aanbeveling om nabij de vaste laag van Sint Andries een (MSW) peilschaal te plaatsen. De vaste laag heeft een grote invloed op de plaatselijke waterstand. Deze invloed wordt als gevolg van het ontbreken van meetgegevens niet correct verdisconteerd in het BRV en de OLR-reductievlakken.

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

De directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat (DON) heeft medio 1996 gekozen voor een vaargeulverruiming van de Waal door middel van onder andere (onderhouds-)baggerwerkzaamheden [Min V&W, 1996]. De vaargeul wordt vergroot van 150 * 2,50 m naar 170 * 2,80 m bij de Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR). Deze verruiming vindt plaats in het kader van het Waalprogramma.

DON heeft in 1997 een project in het kader van het Waalprogramma opgestart, het project Baggeren, waarin de belangrijkste aspecten ten aanzien van het baggeren worden uitgewerkt [Kruitwagen, 1997]. De hoofddoelstelling van het project baggeren is de ontwikkeling en realisatie van een 'Draaiboek baggeren' dat in 2003 aan de waterbeheerder kan worden overgedragen. Het Draaiboek baggeren dient handvatten aan te reiken voor de uitvoering en optimalisatie van jaarlijks terugkerende baggerwerkzaamheden op de Waal [Smedes, 1999].

De ontwikkeling van het Draaiboek baggeren heeft een cyclisch karakter. In de periode tot 2003 wordt elk jaar een nieuwe versie van het Draaiboek opgeleverd, waarna een verfijning en aanpassing plaatsvindt op basis van ervaringen met baggerprogramma's van het voorgaande jaar. Naast de ontwikkeling van het Draaiboek wordt jaarlijks bij wijze van proef op de Waal gebaggerd, zodat enkele trajecten van de rivier reeds (tijdelijk) voldoen aan de norm van 170 * 2,80 m bij OLR.

1.2 Probleembeschrijving

De vaargeulafmetingen en de bijbehorende baggerdoelstellingen worden gerelateerd aan een Bagger Referentie Vlak (BRV) overeenkomend met het OLR-reductievlak. De norm behorend bij dit reductievlak is in 1947 officieel vastgesteld door de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR) en is toentertijd gedefinieerd als de waterstand welke gemiddeld 20 ijsvrije dagen per jaar wordt onderschreden [Koolwijk, 1992]. Tegenwoordig wordt het begrip ijsvrije dagen niet meer gehanteerd en wordt het OLR-reductievlak gekoppeld aan een Overeengekomen Lage Rivierafvoer (OLA) van 984 m³/s bij Lobith.

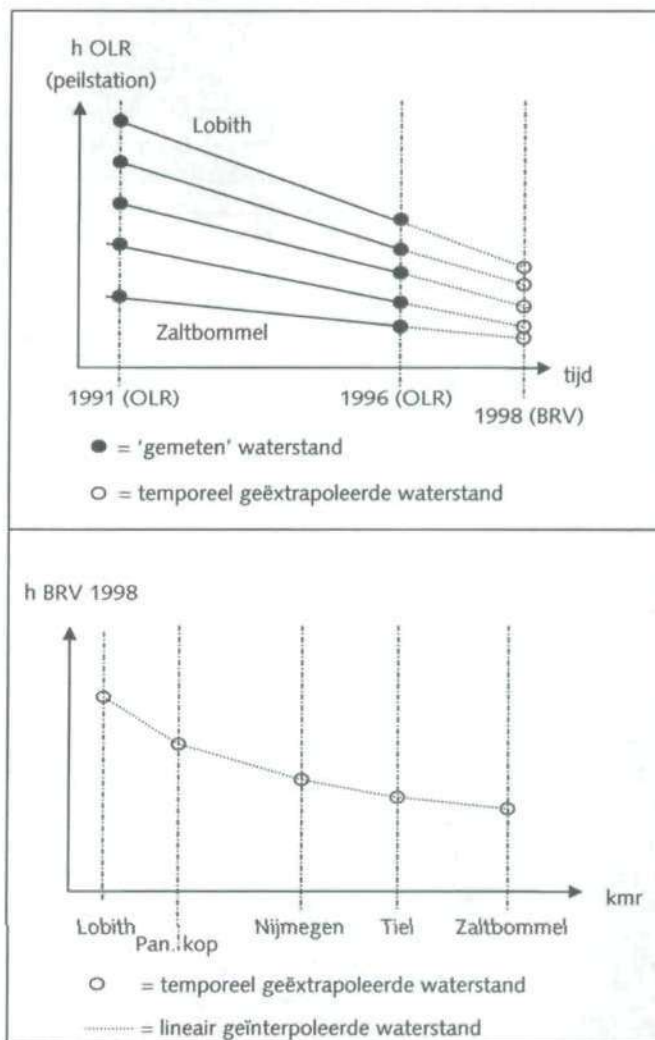
Het OLR-reductievlak voor de Rijntakken wordt op basis van waterstands analyses van DON officieel elke 10 jaar door de CCR vastgesteld. Deze periodieke vaststelling is noodzakelijk vanwege de morfodynamiek van de Rijntakken. Het OLR-reductievlak is aan wijzigingen onderhevig als gevolg van onder andere geometrische veranderingen (zoals bochtmaatregelen en kribaanpassingen) in, en de (autonome) bodemdaling van het zomerbed.

De tienjaarlijkse vaststelling van het OLR-reductievlak voldoet echter niet aan de gewenste nauwkeurigheidseisen van het project Baggeren. Verschillen in bodemligging van 0,1 tot 0,2 m in tien jaar tijd zijn geen uitzondering. Uit [Taal, 1999] blijkt dat bij het gebruik van het officiële OLR-reductievlak de gemiddelde tijd dat het gewenste vaarbaanprofiel niet wordt verwezenlijkt

varieert tussen de 5 en 8%. Daarnaast geldt dat voor de berekende baggervolumina een gemiddelde onderschatting van circa 38% plaatsvindt [Taal, 1999].

Om problemen rond bovengenoemde nauwkeurigheden van het OLR-reductievlak te voorkomen stelt de projectgroep baggeren reeds sinds enkele jaren een zogenaamd Bagger Referentie Vlak (BRV) vast. Het BRV komt overeen met het OLR-reductievlak, maar wordt door ruimtelijke interpolatie en temporele extrapolatie jaarlijks vastgesteld. Temporele lineaire extrapolatie vanuit het OLR 1991 heeft met behulp van OLR 1996 geresulteerd in het BRV 1997, BRV 1998 en 1999. De ruimtelijke interpolatie van waterstanden tussen de verschillende peilstations vindt hierbij lineair plaats (zie voorbeeld in figuur 1.1).

Figuur 1.1 Temporele extrapolatie van OLR en ruimtelijke interpolatie van BRV ten behoeve van berekening BRV.



Een beschrijving van deze tot op heden gehanteerde methodiek voor de bepaling van OLR- en BR-vlakken is uiteengezet in Douben [2000].

De bovenstaand beschreven berekening van het BRV is als gevolg van de extra- en interpolaties met veel onnauwkeurigheden omgeven. De aanname met betrekking tot het lineaire verloop van de verhanglijn tussen twee peilstations, alsmede de onafhankelijkheid van de actuele bodemligging staan hierbij ter discussie.

DON heeft het RIZA verzocht een analyse uit te voeren met betrekking tot het verloop van de OLR-verhanglijn over de Waal. Daarnaast is verzocht een laagwatertoets met de Rijntakkenschematisatie van het eendimensionale hydrodynamisch model Sobek uit te voeren, waarbij tevens wordt ingegaan op een rekenprocedure voor de jaarlijkse berekening van de BRV-verhanglijn met behulp van dit modelinstrumentarium. De analyse, toets en test van de rekenprocedure worden uitgevoerd op basis van meetgegevens welke medio november 1999 zijn ingewonnen.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het project 'Analyse OLR-verhanglijn Waal' is tweeledig en bestaat uit:

1. (handmatige) berekening van een Bagger Referentie Vlak ten behoeve van het baggerprogramma 2000;
2. haalbaarheidsonderzoek naar de toepassing van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek ten behoeve van de toekomstige berekening van Bagger Referentie Vlakken.

Bovenbeschreven doelstelling is vertaald naar een plan van aanpak dat gefaseerd wordt uitgevoerd en op hoofdlijnen vijf onderdelen bevat:

3. bepaling van de BRV-verhanglijn van de Waal op basis van waterstands- en afvoermetingen, aangevuld met metingen van de bodemligging;
4. simulatie van verhanglijnmetingen met de meest recente Rijntakkenschematisatie van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek (laagwatertoets), zoals uitgevoerd in november 1999 (zie paragraaf 2.2);
5. onderlinge vergelijking van berekeningen met verschillende Rijntakkenschematisaties van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek (geometrietoeets). De bodemligging van het zomerbed wordt hierin gevarieerd.
6. berekening van BR-vlakken met verschillende Rijntakkenschematisaties van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek (OLR-toets).
7. opstellen van een rekenprocedure voor de toekomstige jaarlijkse bepaling van de BRV-verhanglijn met behulp van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek;

Het resultaat van de analyse (fase 1) wordt gebruikt voor de vaststelling van het BRV 2000.0 ten behoeve van het Baggerprogramma 2000. Deze analyse heeft reeds plaatsgevonden en is vastgelegd in een RIZA-werkdocument [Douben, 2000].

De laagwatertoets met de meest recente Rijntakkenschematisatie van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek (fase 2) kan uitsluitend geven over de mogelijkheden, het nut en de noodzaak om een dergelijke schematisatie in te zetten voor het jaarlijks vast te stellen BRV. Hiervoor zijn de gewenste nauwkeurigheid (met name in z-richting), de benodigde (meet-) gegevens en relatie tussen bodemligging en waterstanden van belang.

De invloed van de bodemligging van het zomerbed op de berekende waterstanden wordt vastgesteld met een geometrietoeets (fase 3).

Met de berekening van BR-vlakken op basis van verschillende Sobek Rijntakkenschematisaties kan worden nagegaan in hoeverre de modelresultaten afwijken van historische OLR-reductievlakken (fase 4). Met deze OLR-toets wordt een indruk verkregen van de toepassingsmogelijkheid van Sobek voor de vaststelling van het BRV.

Tenslotte wordt een rekenprocedure opgesteld voor de jaarlijkse vaststelling van het BRV (fase 5). Bovengenoemde nauwkeurigheden en meetgegevens spelen hierbij tevens een belangrijke rol.

Voorliggende rapportage geeft een beschrijving van de analyse van meetgegevens en de bepaling van het BRV 2000, de laagwater-, geometrie- en OLR-toets, alsmede de rekenprocedure. DON kan in het vervolg met behulp van de rekenprocedure jaarlijks een BRV vaststellen ten behoeve van het baggerprogramma voor de Waal.

1.4 Leeswijzer

Na de inleiding en probleembeschrijving in hoofdstuk 1, wordt in hoofdstuk 2 de berekening van het Bagger Referentie Vlak 2000 beschreven. Hierbij wordt kort ingegaan op de beschikbare en gebruikte (meet-)gegevens, de gehanteerde methodiek en analyses, alsmede de resultaten.

De laagwatertoets met de meest recente Rijntakkenschematisatie van Sobek (Rijn versie 2000.3) wordt in hoofdstuk 3 beschreven. Hoofdstuk 4 beschrijft de geometrietoets, waarna in hoofdstuk 5 wordt ingegaan op een vergelijking van Sobek berekeningen en OLR-reductievlakken. In hoofdstuk 6 wordt de rekenprocedure voor de bepaling van de OLR-verhanglijn en het BRV uiteen gezet, waarbij ook aandacht wordt besteed aan onzekerheden en beperkingen. In hoofdstuk 7 wordt tenslotte afgesloten met enkele conclusies en aanbevelingen.

2. Berekening Bagger Referentie Vlak 2000

2.1 Inleiding

In het navolgende hoofdstuk wordt de berekening van het Bagger Referentie Vlak (BRV) 2000 beschreven. Hierbij wordt tevens kort ingegaan op de beschikbare en gebruikte (meet-)gegevens en de gehanteerde methodiek en analyses. De berekening van het BRV 2000 is uitvoerig gerapporteerd in RIZA-werkdocument 2000.086X [Douben, 2000].

2.2 Beschikbare en gebruikte (meet-)gegevens

In november 1999 zijn verschillende meetgegevens ingewonnen en verwerkt ten behoeve van de vaststelling van het BRV 2000. Deze meetgegevens bestaan uit (zie ook tabel 2.1):

- laseraltimetrie metingen van de waterspiegel van de Boven-Rijn en Waal [van Heerd, 2000]. De ruwe data zijn in GIS met behulp van enkele ARCINFO en Fortran programma's omgezet [Douben, 2000].
- vaartuigmetingen van de waterspiegel. De hoogte van de waterspiegel (ten opzichte van NAP) is met behulp van meetvaartuigen ingemeten. Deze metingen zijn op twee verschillende dagen uitgevoerd door de Meetdienst van Rijkswaterstaat directie Oost-Nederland (DON). Naast lengteraaian zijn ook enkele dwarsprofielen van de waterspiegel nabij de MSW peilstations ingemeten.
- multi-beam metingen van de bodemligging. Deze metingen zijn gelijktijdig met de vaartuigmeting van de waterspiegel over de as van de rivier uitgevoerd.
- afvoermetingen op de Boven-Rijn, Waal en het Pannerdensch kanaal. Deze zijn uitgevoerd door de Meetdienst van DON met behulp van een akoestische debietmeter (ADCP).

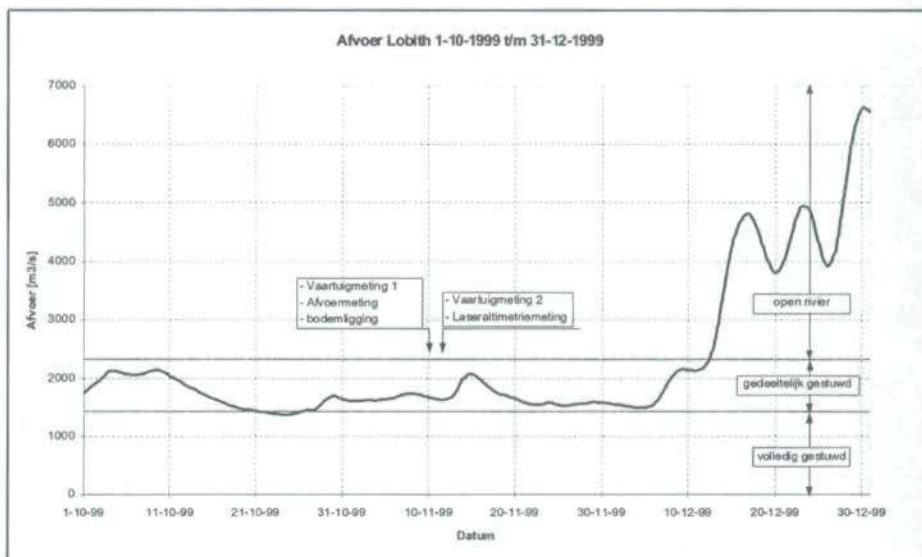
Tabel 2.1 Overzicht laseraltimetrie-, vaartuig-, bodem- en afvoermetingen.

Parameter	Meting	Riviertak	Datum	Traject (kilometerraai)		Tijdstip	Gem. afvoer [m³/s]
				begin	eind		
Waterspiegel	Laseraltimetrie	Boven-Rijn en Waal	11-11-1999	± 854	± 957	15.00-16.20	-
	Vaartuigmeting 1	Waal	10-11-1999	932.207	866.937	9.15-16.15	-
	Vaartuigmeting 2	Waal	11-11-1999	892.812	883.937	9.10-9.55	-
Bodemligging	Multi-beam	Waal	10-11-1999	932.207	866.937	9.15-16.15	-
Afvoer	ADCP	Boven-Rijn	10-11-1999	865.780	-	14.22	1.740,4
		Waal	10-11-1999	868.350	-	10.00	1.311,1
		Pan. kanaal	10-11-1999	868.230	-	12.05	441,8

Verder wordt bij de analyse gebruik gemaakt van data van de peilstations langs de Boven-Rijn en Waal van het Monitoring Systeem Waterhoogten (MSW), windgegevens van de meetstations Deelen en Herwijnen van het KNMI, Q-h relaties en afvoerverdeling 1996 Rijntakken [Koolwijk, 1999], OLR-reductievlakken 1991, 1996 en het BRV 1999. Het OLR-reductievlak 1991 is overigens officieel vastgesteld [Koolwijk, 1992 en 2000], de overige vlakken niet.

Het afvoerverloop bij Lobith tijdens de periode 1 oktober t/m 31 december 1999 is in figuur 3.1 weergegeven. Uit de figuur blijkt dat het afvoerverloop voorafgaand en tijdens de meetperiode weinig dynamiek vertoont. De invloed van de afvoerdynamiek op de meetresultaten is daardoor vrijwel nihil.

Figuur 2.1 Afvoerverloop bij Lobith tijdens de periode 1 oktober t/m 31 december 1999.



2.3 Methodiek en analyse

De methodiek voor de berekening van het BRV 2000 richt zich met name op de vertaling van de in paragraaf 2.2 beschreven meetgegevens naar het OLR-niveau. Met andere woorden, het gemeten waterspiegelverloop bij $Q_{\text{Lobith}} \approx 1.740 \text{ m}^3/\text{s}$ dient te worden omgezet naar een waterspiegelverloop behorend bij de Overeengekomen Lage Rivierafvoer (OLA) van $Q_{\text{Lobith}} \approx 984 \text{ m}^3/\text{s}$.

De te hanteren methode bestaat op hoofdlijnen uit drie opeenvolgende stappen, welke schematisch zijn weergegeven in bijlage 2.1.

Stap 1. Verwerking van de afvoermetingen

De afvoermetingen met bijbehorende gemeten waterstanden worden als 'ijkpunt' gebruikt voor de vertaalslag van de meetsituatie (waterspiegelverloop conform laseraltimetrie- en vaartuigmetingen) naar het OLR-niveau (BRV). De waterstanden tijdens de verhanglijnmetingen zijn immers niet gelijk aan het OLR-niveau. Hierbij zijn vooral de relaties met de MSW peilstations (waterstanden), het bijbehorende stuwregime nabij Driel en de afvoerverdeling over de Pannerdensch kop van belang. Met name de afvoerverdeling over de Pannerdensch kop kan tijdens de verhanglijn- en afvoermetingen sterk afwijken van het OLR-niveau.

De berekening van de sluitfout in de afvoermetingen geeft een indicatie van onnauwkeurigheden en de bijbehorende effecten en invloeden op het verdere verloop van de analyse en de vertaalslag naar het BRV 2000 (OLR-niveau). De sluitfout wordt vastgesteld door na te gaan of de som van de gemeten afvoeren over Waal en Pannerdensch kanaal gelijk is aan de gemeten afvoer over de Boven-Rijn.

Een eventuele invloed van het stuwregime ter hoogte van Driel geeft een indicatie van de 'bruikbaarheid' van de vigerende Q-h relatie (1996). Toetsing

van de meetgegevens aan de Q-h relatie (open, gedeeltelijk gestuwd of volledig gestuwd) geeft hierover duidelijkheid.

Tenslotte kan met de afvoermetingen een eventuele wijziging in de afvoerverdeling over de Pannerdenschekop, welke ook de OLR en BRV waterstanden beïnvloedt, worden vastgesteld.

Stap 2. Verwerking van de verhanglijnmetingen

Er zijn voor de berekening van het BRV 2000.0 verschillende verhanglijnmetingen van de waterspiegel en bodemligging beschikbaar. De meetdata worden (voor zover mogelijk) gevalideerd en uitgemiddeld (verwijdering van uitbijters), getoetst op bruikbaarheid (met behulp van een zogenaamde spike-analyse) en omgezet naar 'hanteerbare' datasets.

Vervolgens worden op basis van het kilometer gemiddelde verhang trajecten bepaald waarover het verhang min of meer constant blijft (verhangtrajecten). Het verloop van de waterstand in de lengte richting van de Boven-Rijn en Waal is immers niet uniform. Het is daarom van belang om trajecten te onderscheiden met een gelijkblijvend verhang. De verhangtrajecten van waterstanden en bodemligging worden tenslotte op elkaar afgestemd.

Stap 3. Vertaalslag van meetsituatie naar OLR/BRV 2000.0

Voor de berekening van het BRV 2000 is het noodzakelijk om de (autonome) bodemdaling van het zomerbed te kwantificeren. De bepaling van het BRV 2000 ter hoogte van MSW peilstations vindt plaats met behulp van het OLR 1996 en de (locatiespecifieke en tijdsafhankelijke) bodemdaling. De waterstand bij OLR wordt immers vrijwel volledig bepaald door de locatiespecifieke bodemligging. Er wordt niet van het OLR-reductievlak 1991 uitgegaan omdat het voorafgaand aan de vaststelling van OLR 1991 en tussentijds verschillende bochtconstructies in het zomerbed van de Waal zijn aangelegd. Deze bochtmaatregelen (vaste laag Nijmegen (1986), bodemkribben Erlecom (1996) en vaste laag Sint Andries (1998)) hebben een grote invloed op de lokale waterstanden bij OLR (zie ook hoofdstuk 3). Voor het BRV 1999 geldt het tegenovergestelde. De gehanteerde methodiek voor de vaststelling van dit BRV-vlak [Douben, 2000], geeft impliciet een overschatting van de bodemdaling. Het BRV 2000 wordt onderschat (komt te laag te liggen) indien het BRV 1999 als uitgangspunt wordt gehanteerd.

Voor wat betreft het verloop van het verhang tussen de verschillende MSW peilstations bij OLR wordt gebruik gemaakt van de bij stap 2 berekende verhangtrajecten. Er dient echter een vertaalslag van de meetsituatie naar het OLR-niveau plaats te vinden. Het waterspiegelverhang tussen de MSW peilstations zal tijdens de meetsituatie afwijken van het OLR-niveau (het verhang neemt over het algemeen toe bij een toenemende afvoer). Deze vertaalslag vindt plaats op basis van de 'verhangverhouding' tussen meetsituatie en OLR ($I_{\text{meting}} / I_{\text{OLR}}$). Een trajectafhankelijke verhoudingsfactor wordt berekend om de eerdergenoemde vertaalslag mogelijk te maken.

Uiteindelijk kan op basis van de OLR waterstanden ter hoogte van MSW peilstations en het verloop van het verhang op tussenliggende trajecten een kilometer gemiddeld BRV 2000 worden vastgesteld.

2.4 Resultaten

De resultaten van de analyses op basis van (historische) meetgegevens (afvoeren, waterstanden en bodemligging) en de daaruit voortvloeiende waterstanden van het BRV 2000 worden in deze paragraaf kort beschreven. Voor een uitvoerige resultaatsbeschrijving wordt verwezen naar Douben [2000].

Onderstaande resultaatsbeschrijving impliceert over het algemeen een grote mate van nauwkeurigheid. Veelvuldig worden getallen gepresenteerd op twee decimalen nauwkeurig, deze zijn statistisch echter niet significant. Deze presentatievorm wordt gehanteerd om uiteindelijke afrondingsfouten te minimaliseren.

Verder blijkt dat de standaardafwijking van de verschillende gemeten parameters (afvoeren, waterstanden en bodemligging) en gehanteerde meetmethoden (laseraltimetrie, vaartuigmetingen en MSW peilstations) nogal uiteen loopt [Kinneking et al., 2000]. Hiermee is bij onderlinge vergelijkingen, voor zover mogelijk, rekening gehouden.

Tenslotte dient te worden opgemerkt dat de afvoeren afgeleid uit DONAR systematisch circa 3 % te laag liggen als gevolg van het feit dat Q-h relaties worden bepaald op basis van historische afvoermetingen, maar worden toegepast op tijdstippen enkele jaren later [van Vuuren et al., 1999].

2.4.1 Verwerking afvoermetingen

Sluitfout

De afvoermetingen van 10 november 1999 vertonen een sluitfout van circa 0,7 % ten opzichte van de gemeten afvoer op de Boven-Rijn. De som van de afvoeren op de Waal ($Q = 1.311 \text{ m}^3/\text{s}$) en het Pannerdensch kanaal ($Q = 442 \text{ m}^3/\text{s}$) bedraagt $1.753 \text{ m}^3/\text{s}$. De gemeten afvoer op de Boven-Rijn bedraagt $1.740 \text{ m}^3/\text{s}$, waardoor de sluitfout circa $13 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Het effect van de sluitfout op de waterstand bedraagt circa 3 cm, maar wordt tijdens de analyse genegeerd.

Invloed stuwregime Driel

Het stuwregime ter hoogte van Driel (Neder-Rijn) beïnvloedt de afvoer en waterstanden nabij Lobith en de Pannerdensch kop tot een bereik van circa $2.400 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{Lobith}). Tijdens de afvoermetingen is dus sprake van een bepaald stuwregime. Het stuwregime heeft invloed op de Q-h relatie welke dient te worden toegepast voor de herleiding van de waterstanden op basis van de gemeten afvoeren. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen 'open rivier', 'gedeeltelijk gestuwd' en 'volledig gestuwd'.

De vertaalslag vanuit de meetsituatie naar OLR wordt, op basis van de in Douben [2000] uitgevoerde analyse, gebaseerd op de Q-h relatie 1996 'gedeeltelijk gestuwd'. De waterstanden van het uiteindelijke BRV 2000 behoren natuurlijk vanzelfsprekend bij het volledig gestuwde regime (OLR-niveau).

Afvoerverdeling Pannerdensch kop tijdens meting en bij OLR

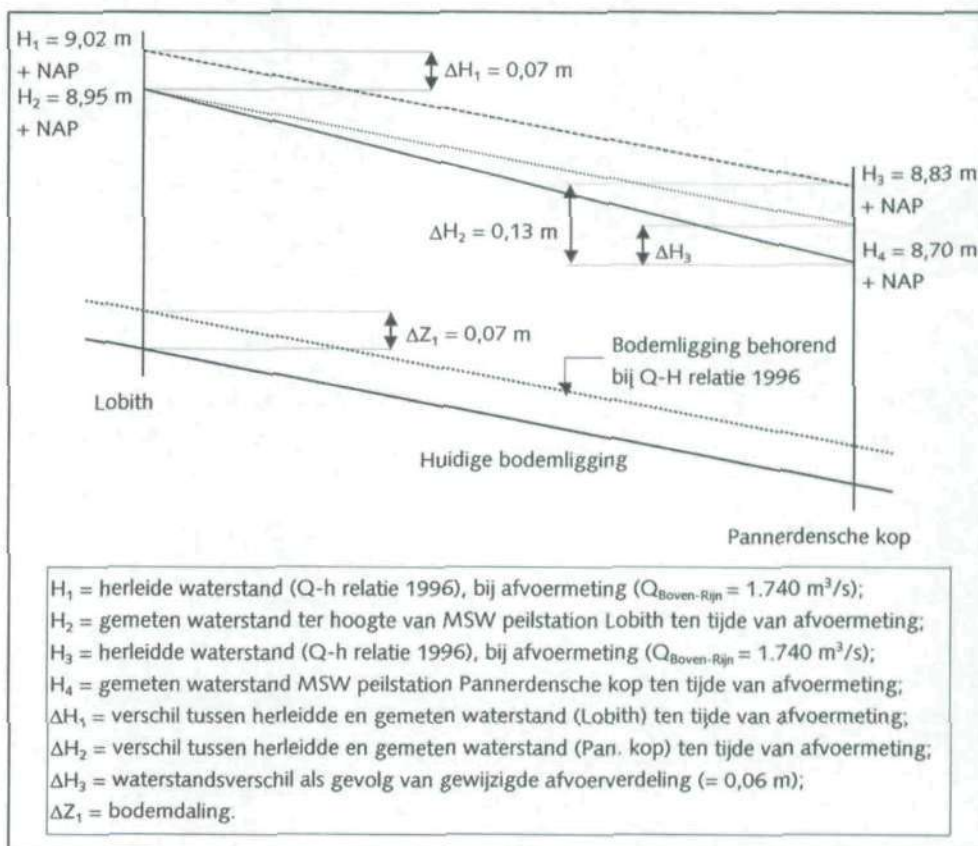
Bij de gemeten afvoeren op de Boven-Rijn ($Q = 1.740 \text{ m}^3/\text{s}$) en Waal ($Q = 1.311 \text{ m}^3/\text{s}$) behoren volgens Q-h relatie 1996 'gedeeltelijk gestuwd' waterstanden van respectievelijk 9,02 m+NAP (Lobith) en 8,84 m+NAP (Pannerdensch kop). De waterstanden ter hoogte van de MSW peilstations ten tijde van de metingen bedroegen respectievelijk 8,95 m+NAP en 8,70 m+NAP (zie tabel 2.2).

De waterstandsverschillen bedragen bij Lobith 0,07 m en 0,13 m nabij de Pannerdenschekop. Het verschil ter hoogte van Lobith is het gevolg van de (autonome) bodemdaling van het zomerbed. Nabij de Pannerdenschekop speelt naast de bodemdaling ook een verandering van de afvoerverdeling een rol (zie figuur 2.2).

Tabel 2.2 Afvoermetingen, waterstanden MSW peilstations en herleide waterstanden.

Riviertak	Q meting [m ³ /s]	h Q-h relatie 1996.0 ' gedeeltelijk gestuwd' [m+NAP]	h MSW peilstation [m+NAP]	Waterstandsverschil [m]
Boven-Rijn	1.740 (14.22 uur)	9,02	Lobith: 8,95 (14.00 uur)	0,07
Waal	1.311 (10.00 uur)	8,83	Pann. Kop: 8,70 (10.00 uur)	0,13

Figuur 2.2 Schematische weergave relatie tussen gewijzigde afvoerverdeling Pannerdenschekop, verandering waterstand en bodemdaling.



De afvoerverdeling bij OLR kan op twee verschillende manieren worden vastgesteld:

- door gebruik te maken van de relatie tussen de verandering van gemeten waterstanden en afvoeren (ΔQ - Δh) als gevolg van de bodemdaling;
- met behulp van Q-h relatie 1996 en de verhouding in afvoerverdeling tijdens de meetsituatie en OLR.

Uit een analyse op basis van bovenstaand beschreven methoden [Douben, 2000] kan worden afgeleid dat de afvoer over de Waal tijdens OLR, bij een gelijkblijvende Boven-Rijn afvoer van $984 \text{ m}^3/\text{s}$ en gestuwde situatie, zal toenemen. De toename bedraagt circa $15 \text{ m}^3/\text{s}$, met een bovengrens van $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij de analyse ten behoeve van het BRV 2000 wordt een OLA over de Waal gehanteerd van $806 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.4.2 Verwerking verhanglijnmetingen

Beïnvloeding metingen door scheeps- en windgolven

Bij de verwerking van de waterspiegelmetingen is het van belang vooraf na te gaan in hoeverre de mogelijkheid bestaat dat externe factoren als wind en scheepvaart de waarnemingen kunnen beïnvloeden.

Er dient hierbij overigens onderscheid te worden gemaakt tussen de laseraltimetrie- en vaartuigmetingen. De vaartuigen zijn uitgerust met een zogenaamde 'motion sensor'. Deze sensor corrigeert de metingen voor golfbewegingen als gevolg van scheepvaart en wind [Oosterhof, 2000]. Zowel de toppen als dalen van golfvormen worden bij de laseraltimetrie meting impliciet in de meetdata opgenomen.

Met een gemiddelde waterdiepte van 5,2 m en worst-case omstandigheden voor windrichting, -snelheid en bijbehorende strijklengte wordt tijdens de waterspiegelmetingen een significante golfhoogte berekend van maximaal 0,6 m. De daadwerkelijke beïnvloeding van de metingen zal echter minder groot zijn (worst-case).

Onder gemiddelde (gemeten) omstandigheden bedraagt de significante golfhoogte, met een gemiddelde windsnelheid van 5,4 m/s, een gemiddelde strijklengte van 6.200 m en een gemiddelde waterdiepte van 5,2 m circa 0,25 m [Douben, 2000].

Voor de golflengte wordt een maximale golfperiode van $T = 5$ sec gehanteerd [TAW, 1985]. De maximale golflengte bedraagt dan circa 40 m.

Uit de laseraltimetrie metingen wordt overigens een gemiddelde golfhoogte van 0,25 m met een maximum van 0,8 m afgeleid en een bijbehorende golflengte van circa 10 m [van Heerd, 2000].

Golfvorming als gevolg van scheepvaartbewegingen zijn tijdens de vaartuigmetingen met behulp van een 'motion sensor' gecorrigeerd [Oosterhof, 2000]. Deze correctie voldoet voor golven met een periode $T < 20$ sec. Primaire en secundaire scheepsgolven hebben over het algemeen een golfhoogte $H_s < 0,5$ m [TAW, 1999]. De golfperiode loopt voor verschillende scheepstypen uiteen. Korte golven hebben een golfperiode van $T = 2 - 5$ sec, terwijl golven als gevolg van duweenheden een waterspiegeldaling over een periode van 20 tot 60 sec kunnen veroorzaken [TAW, 1999]. De bijbehorende golflengtes variëren dus van circa 5 tot 560 m.

Voor een gemiddelde situatie kan worden uitgegaan van een significante golfhoogte van circa 0,25 m en een bijbehorende gemiddelde golflengte van circa 50 m.

Kilometer gemiddelde waterstanden en verhangtrajecten

Voordat wordt overgegaan tot de berekening van kilometer gemiddelde waterstanden en verhangtrajecten, wordt eerst kort ingegaan op enkele gevoeligheden en aspecten welke invloed kunnen hebben op de meetresultaten.

Naast beïnvloeding door scheeps- en windgolven geldt voor de middeling van meetdata ook het criterium van bruikbaar- en toepasbaarheid. Het vaststellen van verhangtrajecten over een lengte van enkele tientallen meters is weinig zinvol omdat deze afstanden in de dagelijkse (bagger-)praktijk niet werkbaar zijn. Bovendien wordt bij dergelijke afstanden een schijnnaauwkeurigheid geïntroduceerd. De nauwkeurigheid van gemiddelde waterstanden en verhang neemt dus niet toe indien over een kleiner traject wordt uitgemiddeld.

De verschillen tussen de vaartuigmetingen en de MSW peilstations (gemiddeld 0,16 m) zijn groter dan de verschillen tussen de laseraltimetrie meting en de MSW peilstations (gemiddeld 0,06 m). De geconstateerde verschillen worden met name veroorzaakt door de squat van het meetvaartuig enerzijds en het lokale dwarsverhang anderzijds. De metingen zijn op de as van de rivier uitgevoerd, terwijl de MSW peilstations nabij de oever zijn gesitueerd. De afwijking tussen oever en as van de rivier bedraagt met een gemiddeld dwarsverhang van $I_d = 6,06 \cdot 10^{-4}$ m/m en een gemiddelde normaalbreedte van $B_n = 260$ m circa 0,08 m [Douben, 2000].

De verschillen zijn voor wat betreft de laseraltimetrie meting niet systematisch van aard, dit in tegenstelling tot de vaartuigmetingen. De vaartuigmetingen geven systematisch een onderschatting van de MSW peilstations (waterstanden bij vaartuigmetingen zijn lager). Een mogelijke oorzaak hiervoor is een onjuiste inschatting van de squat (inzinking) van het meetvaartuig, welke kan oplopen tot circa 0,30 m [Kinneging et al., 2000].

Voor het vervolg van de analyse is gezien het bovenstaande gekozen voor een middeling van gemeten waterstanden (en dus ook verhangtrajecten) over een traject van één kilometer. Hieraan voorafgaand is eerst een 100 m gemiddelde waterstand berekend om na te gaan in hoeverre uitbijters het gemiddelde over een kilometer beïnvloeden.

100 m Gemiddelde waterstanden en bodemligging

De ruwe meetdata van de laseraltimetrie-, vaartuig- en bodemmetingen zijn over trajecten van 100 m gemiddeld. Tevens is de bijbehorende standaardafwijking berekend (zie tabel 2.3).

Tabel 2.3 Standaardafwijking van 100 m gemiddelde waterstand en kilometer gemiddeld verhang (over gehele traject beschouwd).

Parameter	Standaardafwijking			
	Laseraltimetrie	Vaartuigmeting 10 november 1999	Vaartuigmeting 11 november 1999	Bodemligging (as van de rivier)
100 m gemiddelde waterstand	0,032 m	0,012 m	0,017 m	0,21 m
kilometer gemiddeld verhang	0,04 m/km	0,07 m/km	0,06 m/km	0,14 m/km

De relatief hoge standaardafwijking van de laseraltimetrie meting kan worden verklaard door de hoge resolutie van de meting (1 meetpunt/m²) en de impliciete beïnvloeding door scheeps- en windgolven. De standaardafwijking van de gemiddelde bodemligging komt overeen met reguliere metingen.

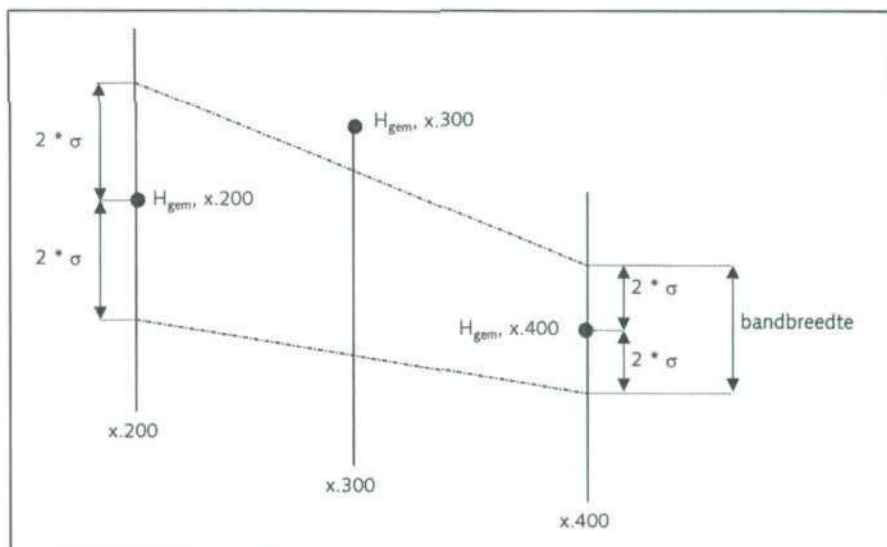
Voor de vaartuigmetingen is ook de gemiddelde offtrack berekend. De offtrack is een maat voor de afwijking van de gevaren koers ten opzichte van de ideale raai. De ideale raai bestaat hierbij uit de as van de rivier. De waterspiegelmetingen kunnen worden beïnvloed door het lokale dwarsverhang indien ver van deze ideale raai wordt afgeweken.

Op basis van een analyse met de gemiddelde offtrack [Douben, 2000] kan worden vastgesteld dat geen van de meetwaarden uit de ruwe dataset worden verwijderd.

Tenslotte zijn, voordat kan worden overgegaan tot de berekening van kilometer gemiddelde waterstanden, uitbijters uit de 100 m gemiddelde data verwijderd. Hiervoor is een criterium gehanteerd van 2 maal de standaardafwijking tussen drie opeenvolgende 100 m gemiddelde waterstanden ('spike-analyse'). Het principe van deze verwijdering is in figuur 2.3 weergegeven. In figuur 2.3 wordt de 100 m gemiddelde waterstand ter hoogte van kilometerraai x.300

verwijderd, omdat het gemiddelde buiten de bandbreedte van $2 \cdot \sigma$ van kilometerraai x.200 en x.400 valt.

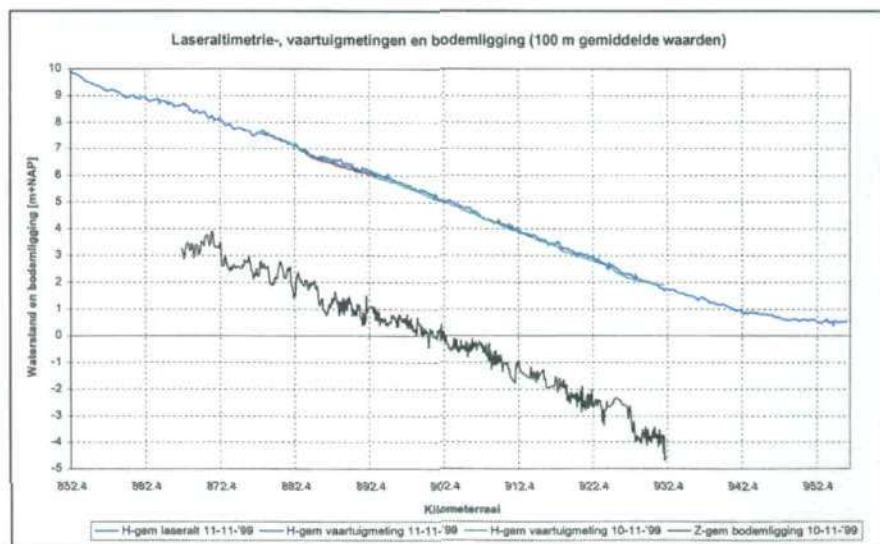
Figuur 2.3 Schematische weergave verwijdering uitbijters uit 100 m gemiddelde data.



Opvallend is het feit dat geen van de 100 m gemiddelde data van de vaartuigmetingen verwijderd dient te worden. Het percentage verwijderde data van de laseraltimetrie meting is relatief groot (circa 10%). Uit de dataset van 100 m gemiddelde bodemligging is circa 6% verwijderd. De relatief grote afwijkingen in de laseraltimetrie metingen kwamen ook reeds tot uiting in de standaardafwijking van het gemiddelde (zie tabel 2.3).

De waterstanden, bodemligging en bijbehorende verhanglijnen op basis van de 100 m gemiddelde waarden zijn in figuur 2.4 weergegeven.

Figuur 2.4 Verhanglijnen op basis van 100 m gemiddelde waterstanden en bodemligging.

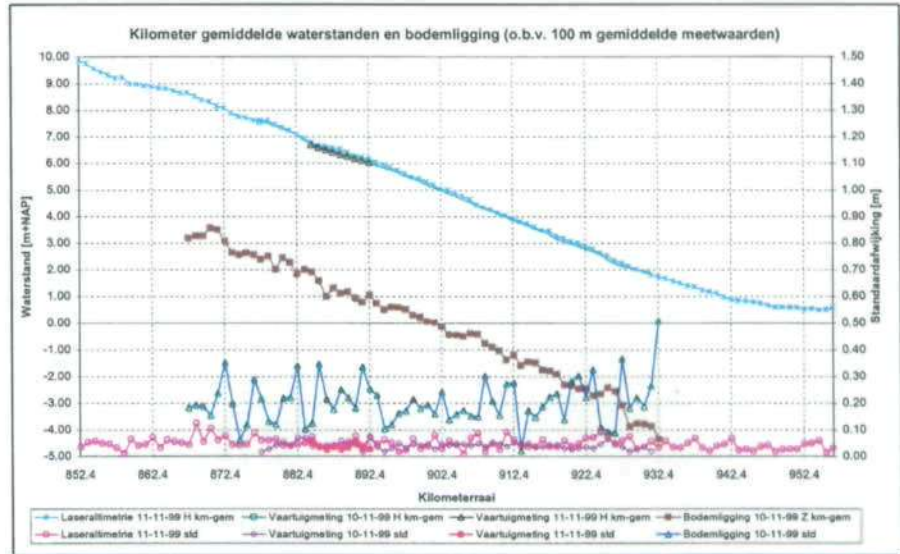


De gemiddelde waterdiepte op basis van 100 m gemiddelde waarden bedraagt bij de laseraltimetrie meting 5,25 m, bij de vaartuigmeting op 10 november 5,18 m en op 11 november 5,16 m. De absolute waterstandsverschillen tussen laseraltimetrie- en vaartuigmetingen bedragen op 10 november gemiddeld 0,08 m en op 11 november 0,13 m. De verschillen tussen de vaartuigmetingen onderling bedragen gemiddeld 0,02 m.

Kilometer gemiddelde waterstanden en verhanglijnen

In figuur 2.5 zijn de kilometer gemiddelde waterstanden en bodemligging met bijbehorende verhanglijnen weergegeven. Daarnaast is op de rechter y-as de standaardafwijking op basis van de 100 m gemiddelde waarden weergegeven.

Figuur 2.5 Kilometer gemiddelde waterstanden, bodemligging, verhanglijnen met bijbehorende standaardafwijking.



Het (kilometer gemiddelde) waterstands- en bodemverhang is met behulp van de kilometer gemiddelde waterstanden berekend. Het kilometer gemiddelde waterstands- en bodemverhang wordt gebruikt als basis voor de vaststelling van trajecten met een min of meer gelijkblijvend verhang. De definitie van verhangtrajecten vindt plaats op basis van de standaardafwijking van het gemiddelde, zoals in tabel 2.3 weergegeven. Voor de vaststelling van trajectgrenzen zijn in eerste instantie drie verschillende criteria opgesteld. De criteria zijn gebaseerd op de verhangverschillen tussen twee aaneengesloten trajecten ($\Delta I_{w \text{ of } b}$). Het maximale toegestane verschil is gerelateerd aan de standaardafwijking van het gemiddelde:

- $\Delta I_{w \text{ of } b} > 1 * \sigma$;
- $\Delta I_{w \text{ of } b} > 1,5 * \sigma$;
- $\Delta I_{w \text{ of } b} > 2 * \sigma$;

Bij de keuze voor de uiteindelijk te hanteren verhangtrajecten is getoetst op overeenkomsten tussen de verschillende metingen. Er is met name getoetst op trajectgrenzen, het absolute verhang en verschillen tussen aaneengesloten trajecten. Daarnaast is vanuit praktische toepasbaarheid het uitgangspunt gehanteerd dat trajecten zo lang mogelijk dienen te zijn (overeenkomend met $2 * \sigma$), zonder dat significante verhangveranderingen verloren gaan.

De volgende verhangtrajecten worden voor de vaststelling van het BRV 2000 gehanteerd:

- laseraltimetrie meting: trajecten op basis van $2 * \sigma$, met uitzondering van kmr. 937.5 - 952.5 ($1,5 * \sigma$);
- vaartuigmeting 1 (10-11-1999): trajecten op basis van $1 * \sigma$ in verband met het benodigde onderscheidend vermogen;
- vaartuigmeting 2 (11-11-1999): het gemeten traject wordt als één verhangtraject beschouwd;
- bodemligging: trajecten op basis van $2 * \sigma$, met uitzondering van kmr. 894.5 - 903.5 ($1 * \sigma$).

2.4.3 Van meetsituatie naar BRV 2000.0

Kwantificering van de bodemverandering

De bodemverandering (daling en/of stijging) van het zomerbed heeft direct invloed op de OLR en BRV waterstanden langs de Boven-Rijn en Waal en dient derhalve te worden gekwantificeerd. Hiervoor zijn, op basis van de beschikbare meetgegevens, drie verschillende mogelijkheden voorhanden:

- 1. kwantificering met behulp van verschillen tussen de waargenomen waterstand ter hoogte van de MSW peilstations ten tijde van de afvoermetingen en de waterstand volgens Q-h relatie 1996 behorend bij de gemeten afvoer. Hieraan dient een analyse te worden toegevoegd op basis van een tijdreeks van gemeten waterstanden ter hoogte van de MSW peilstations voor het lage afvoerbereik (nabij OLR). Een eventuele veranderende trend kan hierdoor nauwkeuriger worden vastgesteld.
- 2. idem 1, aangevuld met een analyse op basis van een tijdreeks van gemeten waterstanden ter hoogte van de MSW peilstations voor het afvoerbereik overeenkomend met de gemeten afvoeren ($Q_{Lobith} = 1.740\text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{Waal} = 1.311\text{ m}^3/\text{s}$);
- 3. kwantificering met behulp van de verandering van OLR-reductievlakken over een bepaalde tijdsperiode.

In tabel 2.4 is een samenvattend overzicht opgenomen van de analyse-resultaten met betrekking tot de gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen ter hoogte van de MSW peilstations.

Tabel 2.4 Samenvattend overzicht analyses gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen.

MSW peilstation	Waterstandsverandering									
	Afvoer- metingen		OLR- reductievlakken		Tijdreeks					
	gem. [cm/jr]	σ [cm]	gem. [cm/jr]	σ [cm]	Laag afvoerbereik		Hoog afvoerbereik		Gem. (laag:hoog afvoerbereik)	
					gem. [cm/jr]	σ [cm]	gem. [cm/jr]	σ [cm]	1:1 [cm/jr]	1:2 [cm/jr]
Lobith	-1,75	-	-2,76	0,25	-1,00	2,45	-1,92	1,50	-1,5	-1,6
Pann. kop	-1,75	-	-2,73	0,70	-1,40	2,53	-2,03	1,95	-1,7	-1,8
Nijmegen	-3,75	-	-3,12	0,13	0,02	4,73	-2,97	3,91	-1,5	-2,0
Dodewaard	-	-	-1,95	2,13	-0,36	5,20	-2,13	5,16	-1,2	-1,5
Tiel	0,25	-	-0,96	3,58	1,18	5,25	-0,47	4,97	0,4	0,1
Sint Andries	-	-	-0,97	1,90	-0,41	5,92	0,43	3,24	0,01	0,2
Zaltbommel	0,03	-	-0,78	1,48	-1,35	10,33	0,32	3,22	-0,5	-0,2
Vuren	0,02	-	-2,20	4,16	-3,25	15,60	0,05	6,83	-1,6	-1,1

Uit tabel 2.4 blijkt dat de berekende gemiddelde jaarlijkse waterstandsverandering volgens de verschillende analyses nogal uiteenloopt. Over het algemeen kan het volgende worden geconcludeerd:

- de waterstand ter hoogte van de MSW peilstations Lobith en Pannerdensch kop vertoont in alle vier de analyses een dalend verloop;
- dit geldt eveneens voor het peilstation Nijmegen, met uitzondering van het lage afvoerbereik, waar de waterstand min of meer constant blijft;
- de waterstandsveranderingen benedenstrooms van Tiel blijken bij een onderlinge vergelijking van de analyses met afvoermetingen en OLR-reductievlakken enerzijds en het lage en hoge afvoerbereik anderzijds allen tegengesteld aan de analyse met OLR-reductievlakken (daling);

- het wordt niet aanbevolen om de waterstands- en bodemdaling vast te stellen op basis van de analyses met afvoermetingen en OLR-reductievlakken, gezien het kleine aantal waarnemingen;
- het is evenmin verstandig om alleen uit te gaan van de analyse op basis van het lage afvoerbereik, gezien de relatief grote standaardafwijking op het benedenstrooms gelegen riviertraject, de relatief grote gevoeligheid voor laterale toestromingen en/of afleidingen en de relatief grote getij invloed.

Gezien de invloed van het grillige tijdsafhankelijke verloop van waterstanden en bodemligging op OLR en BRV, blijkt dat vaststelling van deze waterstanden ter hoogte van MSW peilstations met grote onzekerheden is omgeven. In voorliggende rapportage is daarom gekozen voor de vaststelling van de gemiddelde waterstandsverandering ter hoogte van de MSW peilstations op basis van een gewogen gemiddelde van de tijdreeksanalyses. Het gekozen gewicht (lage afvoerbereik : hoge afvoerbereik) van 1:2 is arbitrair, maar geoorloofd gezien de genoemde beperkingen van de analyse op basis van het lage afvoerbereik. De te hanteren waterstandsveranderingen zijn, als maat voor de bodemverandering, in tabel 2.4 in de meest rechtse kolom opgenomen.

Uit een vergelijking met Struijk [1994] en Taal [1994], waarin eveneens onderzoek is uitgevoerd naar de verandering van OLR-reductievlakken en bodemligging in de tijd, blijkt dat de gewogen gemiddelde waterstandsveranderingen qua ordegrrootte overeenkomstig zijn. Een uitzondering hierop vormt de daling benedenstrooms van Sint Andries.

BRV 2000 ter hoogte van MSW peilstations

De vaststelling van het BRV 2000 ter hoogte van de MSW peilstations vindt plaats met behulp van de gewogen gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen. Het OLR-reductievlak 1996 wordt hierbij als uitgangspunt gehanteerd.

Het BRV 2000 wordt overschat (komt te hoog te liggen) indien van het OLR-reductievlak 1991 wordt uitgegaan. De periode waarover wordt geëxtrapoleerd (circa 10 jaar) is erg lang, temeer omdat net voor de vaststelling van OLR 1991 en tussentijds verschillende bochtconstructies in het zomerbed van de Waal zijn aangelegd. Deze bochtmaatregelen hebben een grote invloed op de lokale waterstanden bij OLR. Voor het BRV 1999 geldt het tegengestelde [Douben, 2000].

Tabel 2.5 Het BRV 2000 ter hoogte van MSW peilstations.

MSW peilstation	OLR-reductievlakken [m+NAP]			Gewogen gem. waterstandsverandering [cm/jr]		BRV-vlak 2000 [m+NAP]
	1991	1996	1999	jaarlijks [cm/jr]	t.o.v. 1996 [cm]	
Lobith	7,70	7,55	7,45	-1,6	-6	7,49
Pann. Kop	7,52	7,35	7,27	-1,8	-7	7,28
Nijmegen	5,71	5,56	5,43	-2,0	-8	5,48
Dodewaard	4,10	3,90	3,91	-1,5	-14 (t.o.v. 1991)	3,96
Tiel-Waal	2,70	2,48	2,59	0,1	($H_{BRV\ 2000} = H_{BRV\ 1999}$)	2,59
Sint Andries	1,45	1,31	1,35	0,2	1	1,32
Zaltbommel	0,90	0,79	0,82	-0,2	-1	0,78
Vuren	0,40	0,49	0,23	-1,1	-4	0,45

De waterstanden ter hoogte van de MSW peilstations behorend bij het BRV 2000 zijn in tabel 2.5 weergegeven en geëxtrapoleerd vanuit OLR 1996. De peilstations Dodewaard en Tiel-Waal vormen hierop een uitzondering.

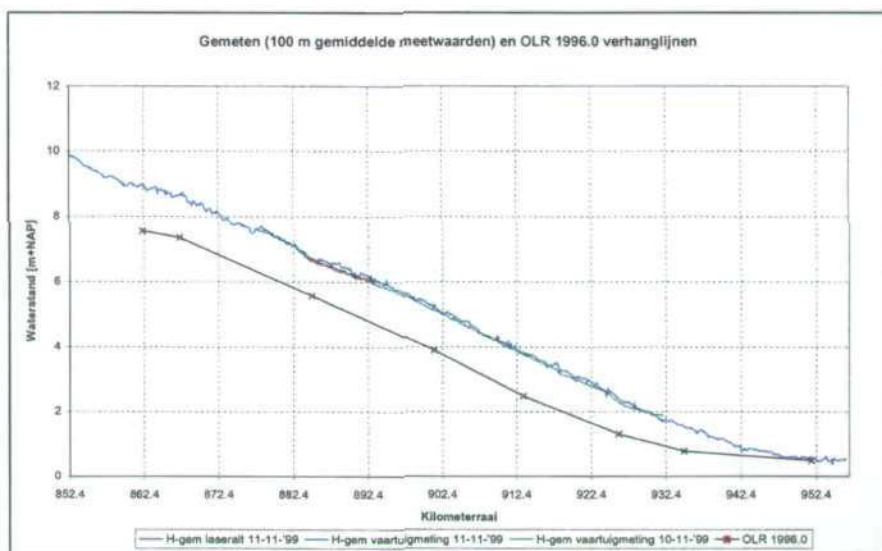
Het peilstation Dodewaard maakt sinds 1991 geen deel meer uit van het MSW meetnet. Het BRV 2000 ter hoogte van Dodewaard is derhalve berekend op basis van het OLR-reductievlak 1991.

Het BRV 2000 ter hoogte van Tiel-Waal is gelijk gehouden aan de waterstand van het BRV 1999. De invloed (opstuwing) van de in 1998 aangebrachte vaste laag nabij Sint Andries wordt in de tijdreeksanalyse vrijwel geheel verwaarloosd. De trendbreuk in de waterstanden bovenstrooms van de vaste laag wordt in de tijdreeksanalyse namelijk uitgemiddeld.

Trajectafhankelijke verhangverhouding

Naast de vaststelling van het BRV 2000 ter hoogte van de MSW peilstations is ook het verloop van het waterstandsverhang tussen deze meetstations van belang. Het waterstandsverhang bij OLR is namelijk niet gelijk aan de situatie zoals gemeten in november 1999, maar wordt ook niet nauwkeurig bepaald met een rechte lijnige interpolatie tussen de MSW peilstations. Een indicatie van de verschillen in waterstanden en het verloop van de verhanglijnen is weergegeven in figuur 2.6.

Figuur 2.6 Gemeten verhanglijnen en verhanglijn OLR 1996.



Bij de vertaalslag van meetsituatie naar OLR (BRV) dient nadrukkelijk rekening te worden gehouden met genoemde verschillen.

De vertaalslag kan worden uitgevoerd met behulp van een trajectafhankelijke verhoudingsfactor (ΔI_w) waarin zowel het verhang op basis van de waarnemingen ter hoogte van de MSW peilstations tijdens de afvoermetingen als het verhang bij OLR volgens Q-h relatie 1996 zijn opgenomen. Voor de berekening van de trajectafhankelijke verhoudingsfactor wordt verwezen naar [Douben, 2000].

De trajectafhankelijke verhoudingsfactoren (ΔI_w) voor de vertaalslag vanuit de meetsituatie naar het BRV 2000 zijn in tabel 2.6 weergegeven.

Uit tabel 2.6 blijkt dat alleen op de trajecten Nijmegen - Dodewaard en Dodewaard - Tiel een negatieve verhoudingsfactor wordt berekend (MSW-verhang tijdens de afvoermeting is kleiner dan bij OLR 1996). Dit kan een implicatie zijn voor een onderschatting van de OLR stand 1996 ter hoogte van Dodewaard (zie ook [Taal, 1999]). Daarnaast speelt tevens de invloed van de vaste laag bij Sint Andries een rol, deze is na vaststelling van OLR 1996 aangebracht.

Tabel 2.6 Trajectafhankelijke verhoudingsfactoren (Δl_w) voor vertaalslag van meetsituatie naar BRV 2000.

Traject tussen MSW peilstations	Afvoermeting (10 november 1999)				OLR 1996			Δl_w [m/km]
	Q [m³/s]	h MSW 14.00 uur	h MSW 10.00 uur	l_w [m/km]	Q [m³/s]	h OLR	l_w [m/km]	
Lobith - Pan. Kop	1.740	8,95 - 8,69	-	0,052	984	7,55 - 7,35	0,031	0,021
Pan. kop - Nijm.	1.311	-	8,70 - 6,85	0,105	806	7,35 - 5,56	0,101	0,003
Nijm. - Dodew.	1.311	-	6,85 - 5,34	0,091	806	5,56 - 3,90	0,101	-0,01
Dodewaard - Tiel	1.311	-	5,34 - 3,95	0,118	806	3,90 - 2,48	0,120	-0,002
Tiel - St. Andries	1.311	-	3,95 - 2,57	0,107	806	2,48 - 1,31	0,091	0,016
St. Andr. - Zaltbom.	1.311	-	2,57 - 1,80	0,089	806	1,31 - 0,79	0,060	0,029
Zaltbom. - Vuren	1.311	-	1,80 - 0,92	0,052	806	0,79 - 0,49	0,018	0,034

2.4.4 Het Bagger Referentie Vlak (BRV) 2000 voor de Waal

De kilometer gemiddelde waterstanden van het BRV 2000 kunnen met behulp van de waterstanden ter hoogte van de MSW peilschalen, de verhangtrajecten en de trajectafhankelijke verhoudingsfactoren worden berekend.

De verhangtrajecten voor het BRV 2000 zijn in tabel 2.7 weergegeven en zijn op basis van overeenkomsten in verhang, 'geometrische begrenzingsen' (harde constructies zoals vaste lagen) en de ligging van de MSW peilstations samengesteld.

Naast de MSW peilstations heeft het BRV 2000 tussenliggende verhangbegrenzingsen ter hoogte van Erlecom (bodembakken), Dodewaard, Dreumel en Haften. Meer detail levert slechts schijnnaauwkeurigheden op. De genoemde trajectbegrenzingsen zijn evenwel eenvoudig te koppelen aan geometrische verschillen en/of overgangen van het zomerbed.

Tabel 2.7 Verhangtrajectgrenzen BRV 2000.

Verhangtrajectbegrenzing		Kilometerraai		Gem. waterstandsverhang [m/km]
Begin	Eind	Begin	Eind	($Q_{Lobith} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$)
Lobith	Pannerdensche kop	862.18	867.22	0,042
Pannerdensche kop	Erlecom	867.22	876.0	0,113
Erlecom	Nijmegen-haven	876.0	884.87	0,090
Nijmegen-haven	Dodewaard	884.87	901.375	0,092
Dodewaard	Tiel-Waal	901.375	913.25	0,115
Tiel-Waal	Dreumel	913.25	917.0	0,096
Dreumel	Sint Andries	917.0	926.12	0,101
Sint Andries	Zaltbommel	926.12	934.78	0,062
Zaltbommel	Haften	934.78	938.0	0,077
Haften	Vuren	938.0	951.78	0,003

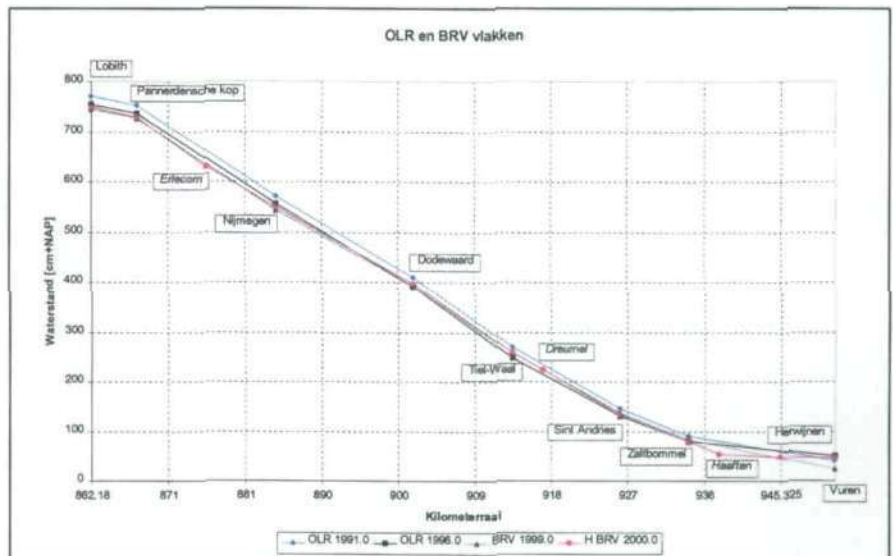
De opvallendste verschillen en overeenkomsten tussen de genoemde referentievlakken kunnen als volgt worden samengevat:

- het BRV 2000 is ten opzichte van OLR 1991 over de gehele Boven-Rijn en Waal, met uitzondering van MSW peilstation Vuren, (flink) gedaald;
- het BRV 2000 ligt over het traject Lobith - Pannerdensche kop lager dan OLR 1996, maar hoger dan BRV 1999;
- de lokale afname van het verhang bovenstrooms van Dodewaard, zoals het OLR 1991 en 1996 te zien geven, is ook in het BRV 2000 opgenomen. Het BRV 2000 ligt op het traject Nijmegen - Dodewaard iets hoger dan OLR 1996 en BRV 1999.

- het BRV 2000 is over het traject Tiel - Zaltbommel gedaald ten opzichte van OLR 1991, gestegen ten opzichte van OLR 1996 en vrijwel gelijk aan het BRV 1999. De opstuwing van de vaste laag nabij Sint Andries speelt hierbij een belangrijke rol.
- Benedenstrooms van Zaltbommel treden in het BRV 2000 sterke verschillen op ten opzichte van de overige referentievlakken.

Het BRV 2000 is tezamen met het OLR 1991, OLR 1996 en het BRV 1999 in figuur 2.7 weergegeven.

Figuur 2.7 Het BRV 2000, tezamen met het OLR 1991, OLR 1996 en het BRV 1999.



Slotopmerking

Het is van groot belang dat stil wordt gestaan bij de wijze waarop in de dagelijkse praktijk met het BRV (2000) wordt omgegaan. Uit de voorgaand beschreven analyse blijkt dat de onzekerheden rond het BRV groot zijn. Bij toepassing van het BRV in de praktijk dient men zich nadrukkelijk bewust te zijn van deze onzekerheidsmarge.

Een mogelijk hulpmiddel hierbij kan een periodieke toets van het BRV zijn. Met andere woorden, een toetsing van de berekende BRV waterstanden aan gemeten waterstanden (en bijbehorende waterdiepten). Deze toets kan als tussenstap worden beschouwd naar een volgend nieuw vast te stellen BRV.

3. Laagwatertoets Rijntakkenschematisatie Sobek-Rijn 2000.3

3.1 Inleiding

Het haalbaarheidsonderzoek naar de toepassing van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek ten behoeve van de toekomstige berekening van Bagger Referentie Vlakken wordt in de hoofdstukken 3 tot en met 5 beschreven.

De laagwatertoets, zoals in dit hoofdstuk beschreven, bestaat uit een simulatie van verhanglijnmetingen zoals uitgevoerd in november 1999 (zie paragraaf 2.2) met de meest recente Rijntakkenschematisatie van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek.

De laagwatertoets kan uitsluitel geven over de mogelijkheden, het nut en de noodzaak om een dergelijke schematisatie in te zetten voor het jaarlijks vast te stellen BRV.

De laagwatertoets is uitgevoerd met de Rijntakkenschematisatie 'Sobek-Rijn versie 2000.3'. Een korte beschrijving van deze schematisatie is opgenomen in paragraaf 3.2.

3.2 Korte beschrijving Sobek-Rijn 2000.3

De Rijntakkenschematisatie 'Sobek-Rijn versie 2000.3' kan worden omschreven als een model voor de 'huidige' situatie met een zomerbed bodem uit 1997 en een winterbed situatie conform het Digitaal Terrein Bestand (DTB-rivier) van 1995.

Het zomerbed bevat, naast de vaste laag te Nijmegen, de bodemkribben bij Erlecom en de vaste laag nabij Sint Andries. De herinrichtingsplannen in uiterwaarden die na 1994 zijn uitgevoerd (bijvoorbeeld Gameren, Varik, Afferdensche en Deetsche waarden en op het stuweiland Driel) zijn niet geschematiseerd. Dit is overigens voor de vaststelling van het BRV niet noodzakelijk.

Een nadere en zeer gedetailleerde beschrijving, alsmede de calibratie van deze schematisatie, is opgenomen in van der Veen [2001].

3.3 Berekeningen en randvoorwaarden

Ten behoeve van de laagwatertoets zijn enkele dynamische berekeningen (tijdsafhankelijke boven- en benedenranden) uitgevoerd. De Sobek berekeningen zijn dynamisch uitgevoerd ter wille van voldoende inspeeltijd voor het model (uitsluiten van numerieke effecten), afvoerfluctuaties in de periode waarover alle metingen zijn uitgevoerd en afvoerfluctuaties als gevolg van de invloed van het getij.

Hiervoor is een bovenrandvoorwaarde opgelegd met waterstanden te Lobith van 8 november 1999 00.00 uur tot 12 november 1999 23.00 uur. De metingen ten behoeve van de vaststelling van het BRV 2000 (laseraltimetrie-, vaartuig-, bodem- en afvoermetingen) vallen allen binnen deze periode (zie tabel 2.1). Voor de benedenrandvoorwaarde zijn waterstanden ter hoogte van

Werkendam opgelegd (8 november 1999 00.00 uur tot 12 november 1999 23.00 uur).

De berekeningen zijn uitgevoerd zonder laterale toestroming (bijvoorbeeld van gemalen en/of beken). Het minimum debiet ('spoeldebiet') over de Neder-Rijn bedraagt 25 m³/s.

De periode van 8 en 9 november 1999 worden beschouwd als inspeelperiode voor het model. Beïnvloeding van de berekeningsresultaten als gevolg van eventuele (numerieke) instabiliteiten wordt hiermee voorkomen.

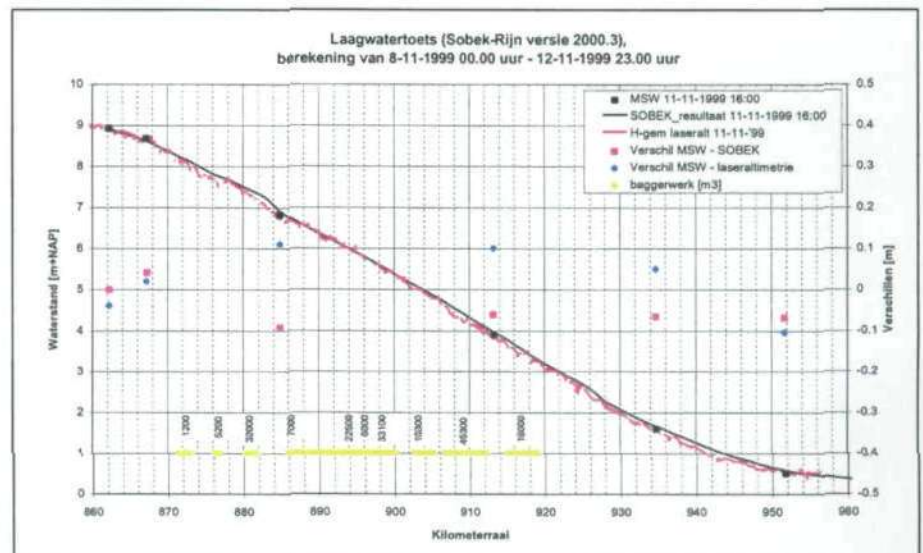
3.4 Resultaten

De berekeningen met Sobek-Rijn 2000.3 zijn vergeleken met:

- gemeten waterstanden ter hoogte van MSW peilstations op de Waal;
- waterstanden conform de laseraltimetrie metingen;
- de bandbreedte rond de gemiddelde waterstanden gedurende de rekenperiode. Hiermee kan een indruk worden verkregen over de afstand waarover de invloed van het getij zich uitstrekt.

In Figuur 3.1 is het resultaat van de Sobek berekening op 11 november 1999 om 16.00 uur weergegeven. Dit komt overeen met het tijdstip waarop de laseraltimetrie meting is uitgevoerd (zie tabel 2.1).

Figuur 3.1 Resultaat Sobek berekening (versie 2000.3) op 11-11-1999 om 16.00 uur.



Uit figuur 3.1 blijkt dat de verschillen in waterstanden tussen Sobek en de laseraltimetrie meting enerzijds en de MSW peilstations anderzijds beperkt blijven tot maximaal +/- 0,1 m. De geringe overschatting van Sobek ten opzichte van de laseraltimetrie meting kan worden verklaard als gevolg van verschillen in bodemligging. De bodemligging van het zomerbed in Sobek dateert van 1997 (zie paragraaf 3.2) en ligt als gevolg van de autonome bodemdaling gemiddeld hoger (ten opzichte van NAP) in vergelijking met de bodemligging ten tijde van de metingen (november 1999). Hierdoor komen ook de door Sobek berekende waterstanden hoger te liggen.

Bij de interpretatie van de geconstateerde verschillen tussen laseraltimetrie metingen, MSW peilstations en Sobek resultaten kunnen een aantal

opmerkingen worden geplaatst. De belangrijkste worden onderstaand kort beschreven.

MSW peilstations

- Als meest betrouwbare (en veelvuldig geverifieerde) metingen gelden de waarnemingen van de MSW peilstations. Daarvan zijn (thans) momentane uurwaterstanden beschikbaar. Deze momentane waterstand op het hele uur wordt bepaald als centraal gemiddelde waterstand van 60 waarnemingen in een tien minuten periode rond het hele uur (elke 10 seconden een waarneming). Door het RIKZ wordt op deze gemiddelde waterstand in het algemeen een foutenmarge van $\pm 0,025$ m gehanteerd. Door scheeps- en windgolven vertonen de 10 seconden waarnemingen een zekere spreiding rond dit gemiddelde. Uitschieters tot 0,10 m zijn niet onmogelijk [van der Made, 1987].
- De gemeten waterstand bij de MSW peilstations kan door het locale dwarsverhang en/of de ligging van het meetpunt ten opzichte van de as van de rivier afwijken. In Douben [2000] zijn op basis van vaartuigmetingen dwarsverhangen berekend, variërend van 0,06 tot 0,22 m over de *normaalbreedte van de Waal*. Gemiddeld kan worden uitgegaan van een dwarsverhang van 0,08 m (zie paragraaf 2.4.2).
- De MSW meetwaarden representeren momentane gemiddelden, terwijl de laseraltimetrie metingen enige tijd hebben geduurd (circa anderhalf uur, zie tabel 2.1).
- Tenslotte dient benedenstrooms van het MSW peilstation Tiel tevens rekening te worden gehouden met beïnvloeding door het getij.
- Samenvattend kan worden gesteld dat bij de interpretatie van verschillen tussen gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden minimaal rekening dient te worden gehouden met de door het RIKZ aangehouden foutenmarge in de uurwaterstand en de foutenmarge in een individuele 10 seconde waarneming. Een eenduidige vertaling naar een 'werkelijke' waterstand op het moment van de laseraltimetrie meting is daardoor niet *exact mogelijk, een momentane afwijking tot circa 0,1 m is zeker niet uit te sluiten*.

Laseraltimetrie metingen

- De gebruikte waarden van de laseraltimetrie meting bestaan uit een groot aantal puntwaarnemingen welke zijn omgerekend tot vakgemiddelden op de rivieras over trajecten van 100 m. De standaardafwijking in deze metingen bedraagt circa 0,032 m (zie tabel 2.3).
- Ook kunnen kleine verschillen ontstaan voor wat betreft de plaatsbepaling. Er kan als gevolg van de middeling niet exact worden achterhaald welke laseraltimetrie meetwaarde wordt vergeleken met de MSW waarnemingen.

Sobek resultaten

- De Sobek resultaten zijn berekend op discrete punten (onderlinge afstand van circa 500 m) over de as van de rivier. De resultaten per rivierkilometer worden geïnterpoleerd uit de naastgelegen rekenpunten.
- Sobek-Rijn versie 2000.3 is gekalibreerd op de MSW peilstations waarbij is gestreefd naar een nauwkeurigheid van 0,05 m op de top van hoogwaters, waarbij 90% van de overige berekende waarden niet meer dan 0,20 m mag afwijken van de meetwaarden. De statistische gegevens ten aanzien van verschillen tussen gemeten en berekende waarden per MSW peilstation voldoen voor de Waal in het algemeen ruimschoots aan de gewenste nauwkeurigheid [van der Veen, 2001]. Over de nauwkeurigheid op rekenpunten tussen de MSW peilstations bestaat thans nog geen

duidelijkheid. Voorts valt een OLA buiten het bereik waarop het model is afgeregeld.

- In een deelbereik van afvoeren mogen op grond van de gestelde criteria bij de calibratie systematische verschillen tussen gemeten en berekende waterstanden verwacht worden tot maximaal circa 0,10 - 0,15 m ter hoogte van de MSW peilstations.
- Ten aanzien van de benedenrand van de Waal moet gesteld worden dat de gemeten waterstanden van Werkendam gebruikt worden. Werkendam ligt circa 1.500 m benedenstrooms van het gemodelleerde gebied. Voor de hogere afvoeren wordt hierdoor een zekere fout geïntroduceerd.
- Ten aanzien van de bodemligging moet gesteld worden dat de bodem van 1997 in Sobek-Rijn versie 2000.3 naar alle waarschijnlijkheid niet representatief is voor de bodem in 1999 tijdens de laseraltimetrie meting. Zie hiervoor ook de vergelijking tussen Sobek-Rijn 2000.1 tot en met 2000.3 met bodemliggingen van respectievelijk 1995, 1993 en 1997 in hoofdstuk 4 (geometrietoeets).

Bij de vergelijking van waterstanden ter hoogte van MSW peilstations met de laseraltimetrie metingen worden de verschillen voor een belangrijk deel bepaald door vergelijkingen in de tijd (momentane versus 10-minuten gemiddelde waarden) en in de ruimte (oever versus as van de rivier).

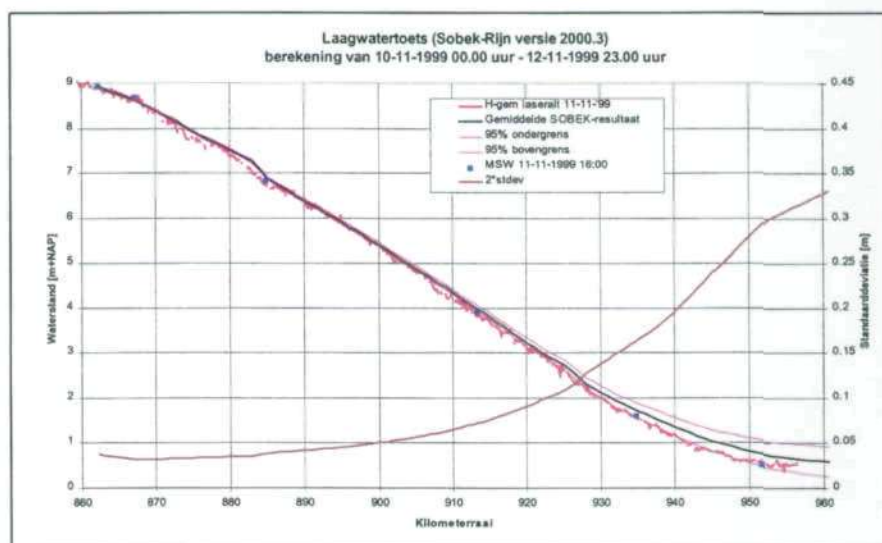
Bij de vergelijking van Sobek berekeningen met MSW peilstations worden de verschillen voor een belangrijk deel bepaald door de gestelde calibratiecriteria voor de Rijntakken schematisatie en de te verwachten verschillen in bodemligging tussen het model en tijdens de laseraltimetrie metingen.

Bij de vergelijking van Sobek berekeningen met de laseraltimetrie metingen worden de verschillen voor een belangrijk deel bepaald door verschillen in ruimte en tijd, de gestelde calibratiecriteria, de te verwachten verschillen in bodemligging tussen het model tijdens de laseraltimetrie metingen en het feit dat Sobek op locaties tussen de MSW peilstations niet is gekalibreerd.

Kortom, de vergelijking van de drie verschillende parameters is omgeven door een groot aantal onzekerheden.

Op grond van het 95% betrouwbaarheidsinterval van de Sobek berekeningen kan worden vastgesteld dat de benedenrand van het model (theoretisch) doorwerkt tot ongeveer kmr. 890. De invloed van het getij (benedenrand) is hiermee dus niet verwaarloosbaar klein (figuur 3.2), maar wordt pas substantieel benedenstrooms van kmr. 915 (Tiel).

Figuur 3.2 Invloed getij (benedenrand Sobek) op gemiddelde berekeningsresultaten (versie 2000.3).



Tenslotte zijn in bijlage 3.1 voor de periode 8 november 1999 (00.00 uur) tot 12 november (23.00 uur) de waterstanden weergegeven zoals gemeten door de MSW peilstations en berekend door Sobek (Rijn versie 2000.3).

Met uitzondering van de Pannerdensche kop wordt de waterstand door Sobek op alle MSW peilstations enigszins overschat. Ook hierin speelt wederom de bodemligging een grote rol. Daarnaast berekent Sobek een (dynamische) Waalafvoer die iets groter is dan de gemeten afvoer (zie tabel B.3.1.1).

Slotopmerking

Ondanks bovengenoemde onzekerheden en kanttekeningen voor wat betreft de vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden lijkt het vooralsnog nuttig om Sobek in zetten voor het jaarlijks vast te stellen BRV. Belangrijk hierbij is het relatief kleine verschil in nauwkeurigheid ten opzichte van de MSW peilstations ($< 0,1$ m), aanvullende informatie over het verloop van het verhang tussen de MSW peilstations en de relatief hoge snelheid waarmee het BRV kan worden vastgesteld. Over de toekomstige toepassingsmogelijkheden van Sobek ten behoeve van de vaststelling van het BRV wordt in hoofdstuk 6 uitvoerig ingegaan.

4. Geometrietoets Rijntakken-schematisatie Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2

4.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is reeds vastgesteld dat de bodemligging van het zomerbed een relatief grote invloed heeft op de door Sobek berekende waterstanden. Het is derhalve zinvol om deze invloed nader te onderzoeken met behulp van een zogenaamde geometrietoets.

De geometrietoets wordt uitgevoerd met twee verschillende Rijntakken-schematisaties, te weten Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2. Beide schematisaties worden kort beschreven in paragraaf 4.2.

4.2 Korte beschrijving Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2

De Rijntakken-schematisaties Sobek-Rijn versie 2000.1 en 2000.2 vertonen een grote gelijkenis met Sobek-Rijn 2000.3 (zie paragraaf 3.2). Ook hier is voor het winterbed de situatie conform het Digitaal Terrein Bestand (DTB-rivier) van 1995 aangehouden.

Het zomerbed in Sobek-Rijn 2000.1 bevat de zomerbed bodem van 1995. De bodemkribben bij Erlecom en de vaste laag nabij Sint Andries zijn hierin niet opgenomen. Deze schematisatie wordt overigens gehanteerd als calibratie model voor het hoogwater van januari 1995 en is dus niet afgeregeld op lagere afvoeren.

Sobek-Rijn 2000.2 bevat de zomerbed bodem van 1993 (dus zonder de bodemkribben bij Erlecom en de vaste laag nabij Sint Andries), wordt gehanteerd als calibratie model voor het hoogwater van december 1993 en is eveneens niet afgeregeld op lagere afvoeren.

Een nadere en zeer gedetailleerde beschrijving van beide schematisaties is opgenomen in van der Veen [2001].

4.3 Berekeningen en randvoorwaarden

De berekeningen met bijbehorende randvoorwaarden ten behoeve van de geometrietoets zijn identiek aan die van de laagwatertoets (hoofdstuk 3). De belangrijkste randvoorwaarden zijn:

- dynamische (tijdsafhankelijke) bovenrandvoorwaarde met waterstanden te Lobith van 8 november 1999 00.00 uur tot 12 november 1999 23.00 uur;
- dynamische (tijdsafhankelijke) benedenrandvoorwaarde met waterstanden te Werkendam (8 november 1999 00.00 uur tot 12 november 1999 23.00 uur);
- geen laterale toestroming;
- minimum spoeldebiet over de Neder-Rijn van 25 m³/s.

4.4 Resultaten

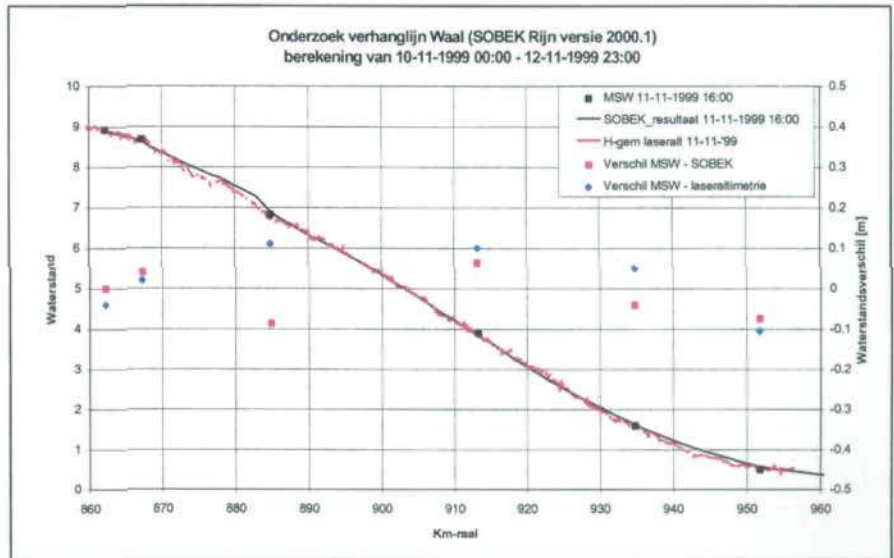
De berekeningen met Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2 zijn vergeleken met:

- gemeten waterstanden ter hoogte van MSW peilstations op de Waal;
- waterstanden conform de laseraltimetrie metingen;

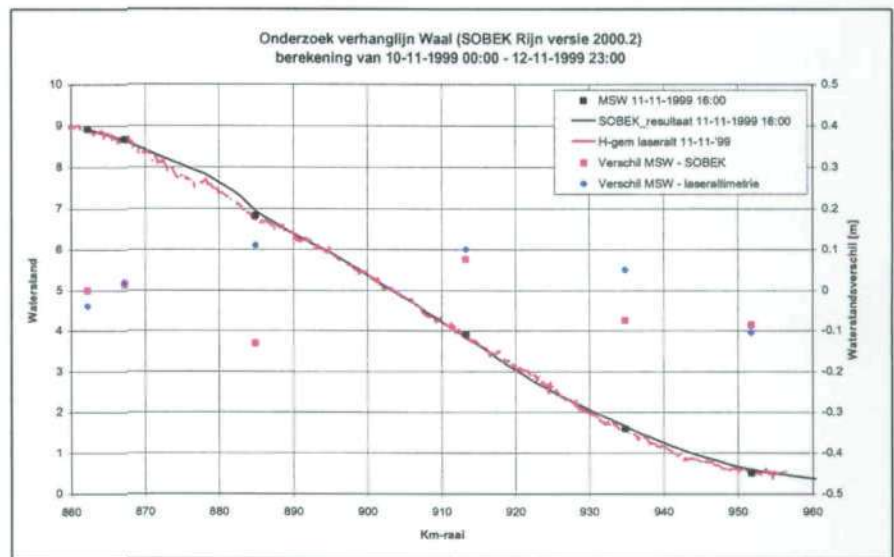
- onderlinge verschillen in berekende waterstanden als gevolg van geometrieverschillen (respectievelijk zomerbed 1995 en 1993).

In figuur 4.1 (Sobek-Rijn 2000.1) en 4.2 (Sobek-Rijn 2000.2) zijn de resultaten van de Sobek berekeningen op 11 november 1999 om 16.00 uur weergegeven. Dit komt overeen met het tijdstip waarop de laseraltimetrie meting is uitgevoerd (zie tabel 2.1).

Figuur 4.1 Resultaat Sobek berekening (versie 2000.1) op 11-11-1999 om 16.00 uur.



Figuur 4.2 Resultaat Sobek berekening (versie 2000.2) op 11-11-1999 om 16.00 uur.



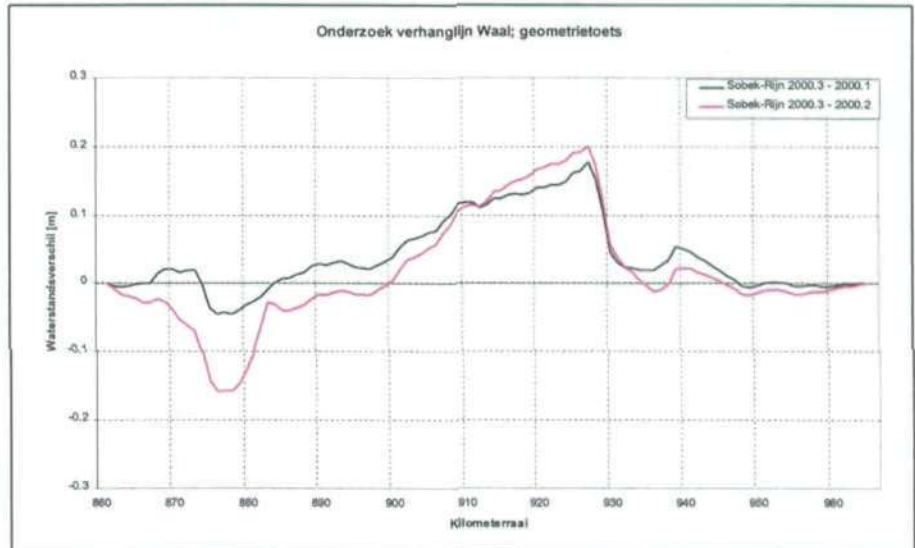
Uit figuur 4.1 en 4.2 blijkt dat de bodemdaling van het zomerbed (geometrie veranderingen) invloed heeft op de waterstandsverschillen tussen de Sobek berekeningen en de MSW peilstations. De verschillen tussen Sobek-Rijn 2000.2 (1993) en MSW waarnemingen zijn langs de gehele Waal, met uitzondering van MSW-peilstation Tiel, groter in vergelijking met Sobek-Rijn 2000.1 (1995). Dit is te verklaren als gevolg van de recentere bodemligging in Sobek-Rijn 2000.1, waardoor de bodemdaling minder invloed heeft op de berekende waterstanden.

Ten opzichte van de laseraltimetrie meting wordt voor beide Sobek berekeningen vrijwel langs de gehele Waal, met uitzondering van het traject Tiel - Sint Andries, een overschatting van de gemeten waterstanden

waargenomen. Ook hieruit blijkt de invloed van de bodemdaling (hogere berekende waterstanden door een hogere bodemligging). Op dit traject blijkt tevens dat de (gemeten) opstuwing als gevolg van de vaste laag de waterstandsdaling als gevolg van de bodemdaling overtreft. Over dit traject worden de door Sobek berekende waterstanden onderschat.

De verschillen ten opzichte van de laseraltimetrie metingen komen overeen met de verschillen tussen de Sobek-Rijn schematisaties 2000.1 en 2000.2 enerzijds en 2000.3 anderzijds. De berekende waterstanden bovenstrooms van Sint Andries zijn bij Sobek-Rijn 2000.3 hoger, wat duidt op de aanwezigheid van de vaste laag (figuur 4.3). Verder blijkt uit figuur 4.3 dat de invloed van de bodemdaling bij Sobek-Rijn 2000.2 groter is dan bij 2000.1. Dit is te verklaren, gezien de datering van de zomerbed bodem (respectievelijk 1993 en 1995).

Figuur 4.3 Waterstandsverschillen tussen Sobek berekeningen met verschillende Rijntakken schematisaties (geometrietoeets).



Slotopmerking

Uit de resultaten van de geometrietoeets kan worden afgeleid dat de invloed van de bodemligging van het zomerbed op de berekende waterstanden relatief groot is.

Verder blijkt dat lokale aanpassingen en veranderingen van het zomerbed (bijvoorbeeld bochtconstructies) eveneens van invloed zijn op de berekende waterstanden.

Indien het eendimensionale hydrodynamische model Sobek in de toekomst wordt toegepast voor de berekening van het BRV dient met bovengenoemde invloeden terdege rekening te worden gehouden.

5. OLR-toets, berekening OLR-verhanglijnen en BRV met Sobek

5.1 Inleiding

In de hoofdstukken 3 en 4 is aangetoond dat met name de geschematiseerde ligging van het zomerbed invloed heeft op de door Sobek berekende waterstanden. Deze berekeningen hebben allen betrekking op de meetperiode van november 1999.

Bij de zogenaamde OLR-toets worden twee verschillende reken exercities onderscheiden:

1. simulatie van waterstanden tijdens een OLR-situatie op basis van randvoorwaarden opgelegd door de meetperiode van de verhanglijnmetingen (november 1999);
2. reproductie van historische OLR-reductievlakken.

Met eerstgenoemde berekeningen wordt een indruk verkregen van de algemene performance van de verschillende Rijntakkenschematisaties bij een OLR-afvoer.

Met de berekening van historische OLR-reductievlakken kan worden nagegaan in hoeverre de modelresultaten afwijken van historisch vastgestelde OLR- en BR-vlakken.

Met de OLR-toets wordt over het algemeen een nadere indruk verkregen van de toepassingsmogelijkheid van Sobek voor de vaststelling van het BRV.

Voor een korte beschrijving van de verschillende Sobek-Rijn schematisaties wordt verwezen naar paragraaf 3.2 en 4.2.

5.2 Berekeningen en randvoorwaarden

Simulatie OLR-situatie op basis van meetperiode (november 1999)

Als uitgangspunt voor de berekeningen ten behoeve van een OLR-situatie is de meetperiode van de laseraltimetrie- en vaartuigmetingen aangenomen (zie tabel 2.1). De bovenrandvoorwaarde bestaat uit de gemeten waterstanden nabij Lobith van de periode van 8 november 1999 00.00 uur tot 12 november 1999 23.00 uur, vermindert met 1,435 m. De reductie van de gemeten waterstanden met 1,435 m is noodzakelijk om een dynamische OLR-situatie te simuleren, met tevens een zichtbaar effect van de benedenrand op de berekende waterstanden. Hiervoor is uitgegaan van de gemiddelde waterstand bij Lobith op 10 en 11 november 1999 (8,935 m+NAP). Om een OLR waterstand bij Lobith van 7,50 m+NAP (conform BRV 2000, zie [Douben, 2000]) als bovenrandvoorwaarde te kunnen hanteren dienen de gemeten waterstanden bij Lobith met circa 1,435 m verlaagd worden. Met deze bovenrand kunnen dynamische waterstandseffecten rondom OLR zichtbaar worden gemaakt.

De overige randvoorwaarden bestaan uit:

- dynamische (tijdsafhankelijke) benedenrandvoorwaarde met waterstanden te Werkendam van 8 november 1999 00.00 uur tot 12 november 1999 23.00 uur;

- geen laterale toestroming
- minimum spoeldebiet over de Neder-Rijn van 30 m³/s;
- periode van twee dagen (8 en 9 november) als inspeelperiode.

De berekeningen worden met alle Sobek-Rijn versies uitgevoerd.

Reproductie van historische OLR-reductievlakken

Voor de reproductie van historische OLR-reductievlakken dienen de boven en benedenrandvoorwaarden te worden aangepast en wordt stationair in plaats van dynamisch gerekend. Er worden twee verschillende OLR-reductievlakken berekend:

- een OLR voor 1995 met behulp van Sobek-Rijn 2000.1. De bovenrandvoorwaarde bestaat uit een permanente afvoer van 984 m³/s en de benedenrandvoorwaarde uit een waterstand behorend bij Laag Water (LW) doortij van 0,60 m+NAP;
- een OLR voor 1997 met behulp van Sobek-Rijn 2000.3, waarbij de bovenrandvoorwaarde uit een permanente afvoer van 984 m³/s bestaat en de benedenrandvoorwaarde uit een waterstand behorend bij LW gemiddeld getij van 0,57 m+NAP.

Met de variatie in boven en benedenrandvoorwaarden is getracht de actuele situatie in de verschillende jaren na te bootsen, waarbij rekening is gehouden met de invloed van de bodemdaling.

5.3 Resultaten

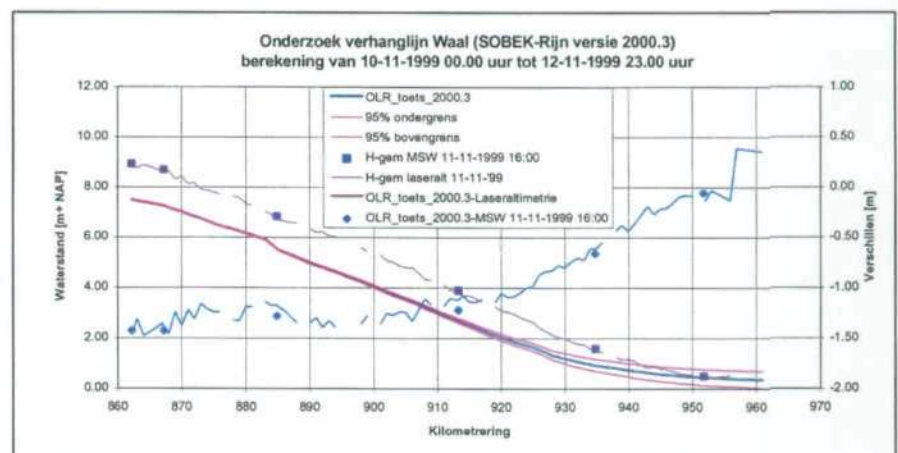
5.3.1 Simulatie OLR-situatie op basis van meetperiode (november 1999)

De berekeningen met Sobek-Rijn 2000.1, 2000.2 en 2000.3 zijn (onderling) vergeleken met :

- gemeten waterstanden ter hoogte van MSW peilstations op de Waal en waterstanden conform de laseraltimetrie metingen;
- de 95% bandbreedte van de berekende waterstanden (getij invloed);
- de geometrieveranderingen;
- de historische OLR- en BR-vlakken.

In figuur 5.1 zijn ter illustratie de berekende waterstanden voor een OLR-situatie (Sobek-Rijn 2000.3), de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsgrenzen, de gemeten waterstanden (MSW en laseraltimetrie) alsmede de verschillen tussen berekende en gemeten waterstanden weergegeven.

Figuur 5.1 Berekende (Sobek-Rijn 2000.3) en gemeten waterstanden en onderlinge verschillen ten behoeve van OLR-situatie.



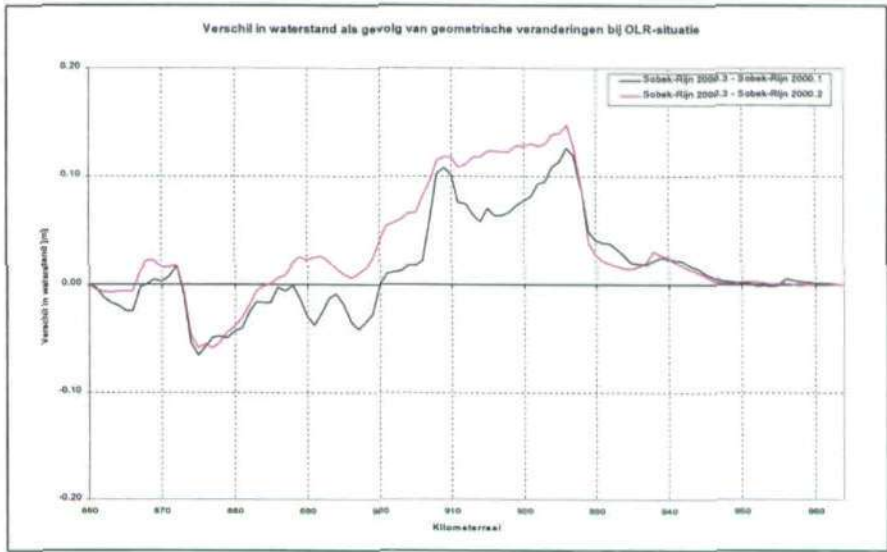
Uit figuur 5.1 blijkt dat de 'reductiewaarde' van -1,435 m ter hoogte van Lobith in benedenstroomse richting afneemt en nabij Vuren zelfs positief wordt. Dit verloop wordt in figuur 5.1 weergegeven met de lijnstukken 'OLR_toets_2000.3 - Laseraltimetrie'. De verschillen in waterstanden tussen de meetsituatie in november 1999 ($Q_{\text{Lobith}} = 1.740 \text{ m}^3/\text{s}$) en het berekende OLR-niveau nemen dus af in benedenstroomse richting en worden als gevolg van getij invloeden zelfs positief. Het verloop van de reductiewaarde wordt ook teruggevonden in het vlakke verloop van de berekende OLR-verhanglijn benedenstrooms van Sint Andries (kmr. 925).

Op grond van het 95% betrouwbaarheidsinterval kan worden vastgesteld dat de benedenrand van het model bij OLR (theoretisch) tot aan circa kmr. 880 doorwerkt. Deze invloed wordt pas substantieel benedenstrooms van kmr. 915 (Tiel). Getij invloeden hebben hiermee bij OLR omstandigheden een relatief grote invloed op de waterstanden benedenstrooms van Tiel.

Identieke figuren (zoals figuur 5.1) voor berekeningen met Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2 zijn in bijlage 5.1 opgenomen.

Verder blijkt dat verschillen in berekende waterstanden ten gevolge van de geometrische veranderingen bij OLR oplopen tot circa 0,15 m (figuur 5.2). Deze verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door de vaste laag bij Sint Andries en de bodemkribben nabij Erlecom. Daarnaast speelt natuurlijk ook de bodemdaling een rol.

Figuur 5.2 Verschillen in waterstanden (OLR-situatie) bij verschillende Rijntakken schematisaties.



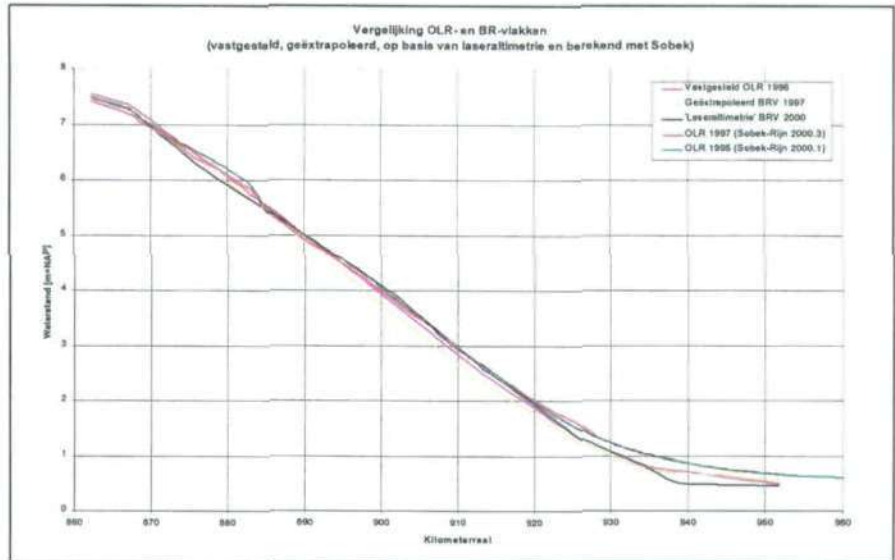
Indien figuur 5.2 (OLR-toets) wordt vergeleken met figuur 4.3 (geometrie toets) blijkt dat de verschillen in berekende waterstanden bij OLR in absolute zin afnemen, maar dat de lokale variatie in waterstanden toeneemt. Het grilligere verloop bij OLR wordt veroorzaakt doordat lokale oneffenheden in de bodemligging meer tot uiting komen in het verloop van de waterstand als gevolg van een geringere waterdiepte.

5.3.2 Reproductie van historische OLR-reductievlakken

In figuur 5.3 zijn verschillende officieel vastgestelde en berekende verhanglijnen weergegeven. Naast het vastgestelde OLR-reductievlak 1996 zijn het geëxtrapoleerde BRV 1997, het op basis van de laseraltimetrie meting

geconstrueerde BRV 2000 en de met Sobek berekende verhanglijnen voor 1995 (Sobek-Rijn 2000.1) en 1997 (Sobek-Rijn 2000.3) weergegeven.

Figuur 5.3 Vergelijking vastgestelde en berekende OLR- en BR-vlakken.

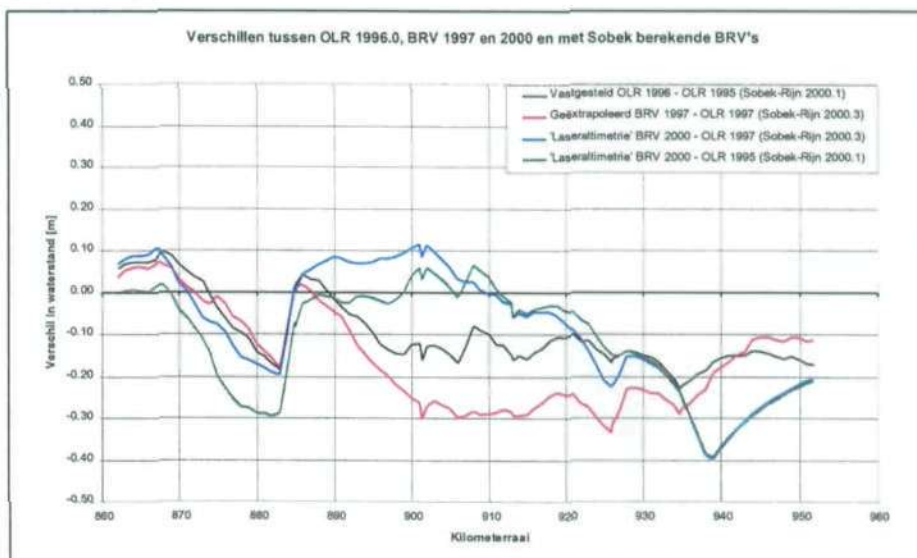


Het verloop van de verhanglijnen in figuur 5.3 is in grote lijnen overeenkomstig. Op een enkele locaties en trajecten worden duidelijke verschillen waargenomen:

- de opstuwing als gevolg van de vaste laag ter hoogte van Nijmegen (kmr. 885) wordt door beide Sobek berekeningen gereproduceerd. Bij de overige verhanglijnen (OLR 1996, BRV 1997 en BRV 2000) wordt de opstuwing niet of minder gereproduceerd waardoor een onderschatting van de waterstanden optreedt.
- het gekromde verloop van de verhanglijn tussen Nijmegen en Tiel wordt door de Sobek berekeningen en het BRV 2000 gereproduceerd. Als gevolg van het verwijderen van peilschaal Dodewaard (kmr. 905) zijn de metingen ter plaatse niet meer verdisconteerd in het OLR 1996 en BRV 1997. Als gevolg hiervan treedt in het OLR 1996 en BRV 1997 een onderschatting van de waterstanden ter plaatse op. Zie voor een nadere uitleg Taal [1999].
- de opstuwing als gevolg van de vaste laag ter hoogte van Sint Andries (kmr. 925) wordt door Sobek-Rijn 2000.3 en het BRV 2000 gereproduceerd. De vaste laag is niet in Sobek-Rijn 2000.1 geschematiseerd (zie paragraaf 4.2). Daarnaast is de vaste laag na vaststelling van het OLR 1996 aangebracht en heeft daarom geen invloed op deze verhanglijn. Dat de opstuwing niet in het BRV 1997 wordt waargenomen is het gevolg van de gehanteerde methodiek van temporele extrapolatie en ruimtelijke interpolatie (zie paragraaf 1.2).
- tenslotte blijkt dat de invloed van het getij, theoretisch tot kmr 880 (zie paragraaf 5.3.1), benedenstrooms van Sint Andries groter wordt. De met Sobek berekende verhanglijnen wijken duidelijk af van de overige.

In figuur 5.4 zijn de verschillen in waterstanden weergegeven tussen de met Sobek berekende verhanglijnen (Sobek-Rijn 2000.1, overeenkomstig met de situatie in 1995) en het vastgestelde OLR-reductievlak 1996 en het BRV 2000 (op basis van laseraltimetrie meting), alsmede Sobek-Rijn 2000.3 (1997) en het geëxtrapoleerde BRV 1997 en het BRV 2000.

Figuur 5.4 Verschillen tussen OLR- en BR-vlakken en met Sobek berekende verhanglijnen.



De bovenbeschreven verschillen worden in figuur 5.4 explicieter weergegeven, waarbij met name het volgende opvalt:

- de Sobek berekeningen geven over het algemeen een overschatting ten opzichte van de vastgestelde OLR- en BR-vlakken. Opvallend hierin zijn de vaste laag Nijmegen en het traject benedenstrooms van Sint Andries (getij).
- de kleinste verschillen (maximaal 0,1 - 0,15 m) worden waargenomen bij de vergelijking van OLR 1996 - Sobek-Rijn 2000.1 (1995) en BRV 2000 - Sobek-Rijn 2000.3 (1997). Dit is te verklaren doordat de tijdsafhankelijke geometrische verschillen tussen beide relatief klein zijn. De verschillen kunnen vrijwel volledig worden verklaard als gevolg van de bodemdaling. Daarnaast speelt bij de vergelijking tussen OLR 1996 - Sobek-Rijn 2000.1 (1995) het ontbreken van peilschaal Dodewaard een rol, waardoor de berekende waterstanden door Sobek worden overschat ten opzichte van het OLR 1996.
- de grootste verschillen worden waargenomen bij de vergelijking tussen BRV 1997 en Sobek-Rijn 2000.3 (1997). Ondanks het feit dat het tijdsafhankelijke geometrische verschil tussen beide het kleinst is, worden de grootste verschillen (tot maximaal 0,25 - 0,30 m over langere trajecten) waargenomen. Ook hierin speelt wederom het ontbreken van peilschaal Dodewaard een belangrijke rol, alsmede de wijze waarop het BRV 1997 is vastgesteld (zie paragraaf 1.2).
- tenslotte blijkt uit een onderlinge vergelijking van BRV 2000 - Sobek-Rijn 2000.1 (1995) en BRV 2000 - Sobek-Rijn 2000.3 (1997) dat de bodemdaling in het bovenstroomse traject (tot Dodewaard, kmr. 905) een relatief grote invloed heeft op de berekende waterstanden.

Slotopmerking

De berekeningen ten behoeve van de OLR-toets hebben aangetoond dat het eendimensionale hydrodynamische model Sobek kan worden ingezet voor de bepaling van het BRV, mits aan een aantal belangrijke voorwaarden wordt voldaan. De belangrijkste voorwaarde blijft het gebruik van een representatieve (recente) bodemligging van het zomerbed in de modelschematisatie.

6. Rekenprocedure Bagger Referentie Vlak

6.1 Inleiding

Uit het haalbaarheidsonderzoek naar de inzet van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek ten behoeve van de toekomstige berekening van het BRV (hoofdstuk 3 tot en met 5) kan worden afgeleid dat toepassing mogelijk is, mits aan een aantal belangrijke voorwaarden wordt voldaan.

In voorliggend hoofdstuk wordt ingegaan op de belangrijkste voorwaarden. Daarnaast wordt tevens aangegeven welke rekenprocedure kan worden gevolgd om tijdig over een geschikt en voldoende nauwkeurig BRV te kunnen beschikken.

Tenslotte is het van groot belang dat stil wordt gestaan bij de wijze waarop in de dagelijkse praktijk met het BRV (2000) wordt omgegaan.

6.2 Uitgangspunten rekenprocedure

Bij de uitgangspunten voor een rekenprocedure ten behoeve van de jaarlijkse vaststelling van het BRV kan op hoofdlijnen onderscheid worden gemaakt in de volgende drie aspecten:

- organisatie;
- verzamelen en verwerken van meetgegevens;
- voorbereidingen en uitvoering van Sobek berekeningen.

Daarnaast kan het Draaiboek Basisgegevens BASELINE [Hartman, 2000] eveneens als een belangrijk uitgangspunt voor de rekenprocedure worden beschouwd.

Organisatie

De organisatie rond de vaststelling van het BRV heeft betrekking op welke onderdelen (personen en/of afdelingen) met het BRV werken, welke onderdelen het BRV (officieel) vaststellen, welke onderdelen het BRV berekenen en welke onderdelen informatie en/of meetgegevens moeten aanleveren voor deze berekeningen.

Vooralsnog wordt er van uitgegaan dat de projectleider Baggeren (pl. DON-ANSR) het BRV vaststelt. Vaststelling zal normaliter in nauw overleg plaatsvinden met de onderdelen die het BRV gebruiken en berekenen. Voor wat betreft de gebruikers kan onderscheid worden gemaakt in de onderdelen waar (dagelijkse) beslissingen omtrent baggerwerkzaamheden worden genomen en/of begeleid (vooralsnog wordt gedacht aan de Dienstkring Boven-Rijn en Waal van DON), onderdelen waar het bestek wordt voorbereid en geschreven (DON-IXN en DON-ANSR), onderdelen waar monitoring wordt uitgevoerd of aangestuurd (DON-ANIM) en onderdelen waar (meet-)gegevens worden verwerkt (DON-ANIC en DON-ANSR). De berekening van het BRV zal hoogstwaarschijnlijk binnen het onderdeel DON-ANSR plaatsvinden. Tenslotte wordt de benodigde informatie en meetgegevens aangeleverd door DON-ANIM en -ANIC.

Bovenbeschreven organisatie kan met samenhangende taken en mandaten worden geïmplementeerd in het Draaiboek Baggeren [Bouwdienst, 2001], dat tot 2003 wordt ontwikkeld en daarna definitief in gebruik wordt genomen bij DON.

Verzamelen en verwerken van meetgegevens

Zoals bovenstaand reeds aangegeven komt de taak voor het verzamelen van meetgegevens hoogstwaarschijnlijk terecht bij DON-ANIM. De verwerking zal waarschijnlijk door DON-ANIC in samenwerking met DON-ANSR plaatsvinden. Een belangrijk aandachtspunt tijdens de verzameling en verwerking van (meet-) gegevens is de controle op consistentie en uitbijters. Daarnaast dienen de (meet-)gegevens met de gewenste nauwkeurigheid en in het juiste format te worden aangeleverd [Hartman, 2000].

Vorbereidingen en uitvoering van Sobek berekeningen

De relatie met het Draaiboek Basisgegevens BASELINE [Hartman, 2000] is bij de voorbereidingen en uitvoering van Sobek berekeningen groot. De in het draaiboek beschreven procedure kan vrijwel in z'n geheel worden gevolgd, waarbij het tijdstip waarop activiteiten plaats dienen te vinden en de bijbehorende doorlooptijden wellicht moeten worden aangepast (zie paragraaf 6.3).

6.3 Beschrijving rekenprocedure

De beschrijving van de rekenprocedure voor de jaarlijkse vaststelling van het BRV loopt vanaf de verzameling van (meet-)gegevens tot het verantwoord gebruik van het BRV. De procedure is stapsgewijs in tabel 6.1 weergegeven en is afgestemd met het Draaiboek Basisgegevens BASELINE [Hartman, 2000].

Tabel 6.1 Stapsgewijze uitwerking reken-procedure voor jaarlijkse vaststelling BRV.

Stap	Activiteit	Verantwoordelijk	Looptijd	Overleg en afstemming
1	Uitvoeren multi beam peiling (oriëntatiepeiling voorjaar)	DON-ANIM	4 weken	
2	Verwerking multi beam peiling	DON-ANIC	4 weken	met DON-ANIM
3	Opstellen wijzigingscontour	DON-ANIC	1 dag	met DON-ANIM
4	Opstellen meta-informatie	DON-ANIC	1 dag	met DON-ANIM
5	Data in BASELINE format plaatsen	DON-ANIC	1 dag	
6	Data controleren op consistentie	DON-ANIC	1 week	met DON-ANIM
7	Aanleveren gewijzigde (en eventueel overige) data aan modelleur	DON-ANIC	1 dag	met RIZA-WSR
8	Data in basisbestanden plaatsen	RIZA-WSR	1 dag	
9	Actuele zomerbedschematisatie aanmaken	RIZA-WSR	1 week	
10	Aanleveren actuele zomerbedschematisatie	RIZA-WSR	1 dag	DON-ANSR
11	Vergelijkende Sobek berekeningen	DON-ANSR	1 week	RIZA-WSR
12	Vaststellen randvoorwaarden Sobek berekeningen t.b.v. BRV	DON-ANSR	1 week	RIZA-WSR
13	Sobek berekeningen en naverwerking t.b.v. BRV	DON-ANSR	1 week	RIZA-WSR
14	Interpretatie en overleg Sobek berekeningen	DON-ANSR	1 week	DON-Dienstkring BR&W, DON-IXN en RIZA-WSR
15	Vaststelling BRV	DON-ANSR	1 dag	

Het opstellen van een wijzigingscontour (stap 3) is noodzakelijk voor de toelevering van gegevens aan BASELINE. Een wijzigingscontour bestaat uit een polygoon waarbinnen wijzigingen betrekking hebben.

De meta-informatie (stap 4) dient tegelijkertijd met het verzamelen en verwerken van gegevens te worden opgesteld. Per wijzigingscontour wordt aangegeven wie de metingen heeft uitgevoerd, wanneer en hoe ze zijn uitgevoerd, de nauwkeurigheid en verwachte update van de data en wie de data heeft gecontroleerd en goedgekeurd. De meta-informatie wordt in Geokey opgeslagen.

De verwerkte data (hoogteligging zomerbed) dient in BASELINE format te worden geplaatst (stap 5), zoals beschreven in het Protocol Basisbestanden BASELINE [van der Meulen, 1998].

De controle van data op consistentie (stap 6) heeft betrekking op vele vragen rond formats, complete informatie, uitbijters, etc. In Hartman [2000] is een compleet overzicht van dergelijke controles beschreven.

Nadat DON de gewijzigde gegevens heeft overhandigd aan RIZA-WSR (stap 7) worden deze data in BASELINE geplaatst (stap 8) en worden door een Sobek-modelleur nieuwe profielen ten behoeve van de actuele zomerbedschematisatie aangemaakt (stap 9).

Voorafgaand aan de Sobek berekeningen ten behoeve van het BRV is het van belang dat vergelijkende berekeningen worden uitgevoerd met de actuele en de 'oude' modelschematisatie (stap 11). Het resultaat van deze berekeningen geeft relatief snel inzicht in de representativiteit van de actuele modelschematisatie. Noodzakelijke aanpassingen kunnen voorafgaand aan de berekeningen ten behoeve van het BRV worden uitgevoerd.

Het vaststellen van de randvoorwaarden voor de Sobek berekeningen ten behoeve van het BRV is een belangrijke activiteit (stap 12) en dient zorgvuldig te worden onderbouwd. Voor de aannames met betrekking tot de model invoer dienen met name de volgende overwegingen te worden gemaakt:

- voor de bovenrandvoorwaarde geldt dat de OLA bij Lobith $984 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Vanwege de modelonnauwkeurigheid (zie laagwatertoets hoofdstuk 3) is het raadzaam om naast de OLA ook te rekenen met hogere en lagere afvoeren.
- voor de benedenrandvoorwaarde ligt het gezien de doelstelling van de berekeningen (vaststellen BRV) voor de hand om uit te gaan van ebsituaties die voor de scheepvaart het meest beperkend zullen zijn ten aanzien van de waterdiepte. Als uitgangspunt kan een situatie zonder wind worden gehanteerd. Bij aflandige (oosten) wind is echter een verlaging van de waterstand bij Werkendam niet uit te sluiten.
- de laterale toestroming op de Waal is onder normale omstandigheden van ondergeschikt belang. Bij OLR mag verwacht worden dat er eerder sprake zal zijn van netto onttrekking van water (landbouw) dan van lozing. Actuele informatie hier omtrent kan worden verkregen bij de betrokken waterschappen.
- voor de stuw Driel dient een aanname te worden gedaan ten aanzien van het gewenste spoeldebiet voor Neder-Rijn en Lek.

Het uitvoeren van de Sobek berekening (stap 13) neemt slechts een zeer korte tijd in beslag (enkele minuten). De naverwerking bestaat grotendeels uit het

omzetten van berekeningsresultaten naar hanteerbare presentatievormen. Het is tevens zinvol om de berekeningen vast te leggen in een document.

Over de resultaten van de Sobek berekeningen dient, voorafgaand aan de vaststelling van het BRV, te worden overlegd met de directe belanghebbenden (stap 14).

Na overleg (met bijvoorbeeld DON-ANIC) en overeenstemming wordt het berekende BRV (officieel) vastgesteld door de projectleider van het project Baggeren (DON-ANSR; stap 15). Tevens wordt er voor gezorgd dat het BRV breed binnen de bagger-organisatie van DON wordt verspreid (zowel digitaal als fysiek).

Inschatting van planning en looptijd

Het is van groot belang dat het BRV wordt vastgesteld voorafgaand aan de start van een nieuw baggerprogramma. Deze start vindt meestal tijdens het voorjaar plaats. In tabel 6.2 is een inschatting gegeven van een planning met bijbehorende looptijden.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat de inwinning van meetgegevens (stap 1) afhankelijk is van onder andere het afvoerniveau (waterstand). De looptijd van 4 weken voor stap 1 kan als gevolg van afvoerfluctuaties uitlopen. Indien de uitvoering van de multi beam peiling het kritieke pad bepaald, kan eventueel worden gekozen voor een optie waarin de bodemligging in Sobek wordt bepaald op basis van de gemeten bodemligging van het voorgaande jaar, aangevuld met de gemiddelde bodemligging van de tweewekelijkse beheerspeilingen.

Indien geen (multi beam) peilingen beschikbaar zijn en de bodemligging in Sobek niet kan worden aangepast, kan uiteindelijk nog worden overgestapt op de tijdreeksanalyse (paragraaf 2.4.3) voor de bepaling van de bodemverandering gedurende het voorgaande jaar.

Tabel 6.2 Planning en looptijden ten behoeve van vaststelling BRV.

Stap	Planning en looptijd [weken]												
	Looptijd [weken]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4												
2	4												
3	0,2												
4	0,2												
5	0,2												
6	1												
7	0,2												
8	0,2												
9	1												
10	0,2												
11	1												
12	1												
13	1												
14	1												
15	1												

Indien de communicatie en onderlinge afstemming tussen alle betrokken partijen (zowel DON als RIZA) goed verloopt, kan circa 3 maanden na de aanvang van de multi beam peiling (stap 1) een BRV definitief worden opgeleverd.

6.4 Onzekerheden en beperkingen

Uit de analyses van voorliggend rapport (hoofdstuk 2 tot en met 5) blijkt dat het BRV met een groot aantal onzekerheden is omgeven. Het is van groot belang dat de gebruikers bij de toepassing van het BRV bewust zijn van deze onzekerheden.

Daarnaast spelen onzekerheden en nauwkeurigheden een rol bij de keuze met welke methode het BRV wordt vastgesteld. In principe kan onderscheid worden gemaakt in drie verschillende methoden:

1. vaststellen BRV op basis van laseraltimetrie of vaartuigmetingen. Deze methodiek komt overeen zoals beschreven in hoofdstuk 2.
2. vaststellen BRV op basis van een tijdreeksanalyse van gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen. Hierbij worden geen extra metingen uitgevoerd, maar wordt het BRV op basis van het BRV van het voorafgaande jaar en een (trajectgemiddelde) factor welke wordt afgeleid uit de tijdreeksanalyse (zie paragraaf 2.4.3 en [Douben, 2000]) vastgesteld.
3. vaststellen BRV met behulp van Sobek berekeningen.

Vaststellen BRV op basis van laseraltimetrie of vaartuigmetingen

De volgende onzekerheden spelen bij de toepassing van deze methodiek een rol:

- meetnauwkeurigheid van MSW peilstations (onder andere als gevolg van dwarsverhang, scheeps- en windgolven);
- nauwkeurigheid afvoermeting;
- nauwkeurigheid laseraltimetrie meting;
- nauwkeurigheid verhanglijn meting met vaartuig;
- nauwkeurigheid multi beam peiling;
- nauwkeurigheid Q-h relatie.

Het BRV 2000 zoals vastgesteld en beschreven in hoofdstuk 2 en Douben [2000] is weliswaar gekoppeld aan een nauwkeurige meting (meetfout laseraltimetrie $\approx 0,01$ m), maar is uiteindelijk als gevolg van de vertaalslag van meetsituatie naar OLR-niveau relatief onnauwkeurig. De nauwkeurigheid van het BRV 2000 ter hoogte van de MSW peilstations is overeenkomstig met deze peilstations (circa $\pm 0,025$ m, oplopend tot 0,10 m als gevolg van scheeps- en windgolven). De nauwkeurigheid op tussenliggende trajecten neemt fors toe als gevolg van het gebrek aan verificatiegegevens. Uitschieters tussen 0,10 en 0,20 m mogen niet worden uitgesloten.

Vaststellen BRV op basis van tijdreeksanalyse gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen

Indien het BRV wordt vastgesteld met behulp van het BRV van het voorafgaande jaar, aangevuld met een (trajectgemiddelde) factor op basis van een tijdreeksanalyse van gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen, zal de nauwkeurigheid verder afnemen.

Deze afname wordt veroorzaakt door de nauwkeurigheid van de tijdreeksanalyse. De nauwkeurigheid is afhankelijk van de beschikbaarheid aan gegevens, met andere woorden of zich in het afgelopen jaar daadwerkelijk periodes met lagere afvoeren hebben voorgedaan.

Vaststellen BRV met behulp van Sobek berekeningen

Bij de vaststelling van het BRV met behulp van Sobek berekeningen spelen naast eerdergenoemde onzekerheden ook de modelonzekerheden een belangrijke rol.

Uit de resultaten van de laagwatertoets (hoofdstuk 3) kan worden afgeleid dat de verschillen in berekende en gemeten (laseraltimetrie en MSW peilstations) waterstanden maximaal +/- 0,1 m bedraagt. De OLR-toets (hoofdstuk 5) wijst uit dat de verschillen tussen berekende en vastgestelde OLR-reductievlakken (1996), waarbij de tijdsafhankelijke geometrische verschillen het kleinst zijn, maximaal 0,1 tot 0,15 m bedragen. De geconstateerde verschillen komen overeen met de algemene modelnauwkeurigheid, zoals beschreven in paragraaf 3.4 (0,1 - 0,15 m).

Voor wat betreft de berekening van het BRV met behulp van Sobek kan, gezien het bovenstaande, een nauwkeurigheid van circa +/- 0,1 m worden aangehouden ter hoogte van de MSW peilstations en +/- 0,15 m op tussenliggende trajecten.

Verbetering nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de bepaling van het BRV kan op relatief korte termijn verbeterd worden met behulp van:

- een laagwater calibratie van Sobek. Het huidige 'calibratie programma' richt zich met name op hogere afvoeren ten behoeve van het hoogwater voorspelmodel voor de Rijntakken. Het is aan te bevelen om na te gaan in hoeverre de hoogwater calibratie eventueel kan samenvallen met een laagwater calibratie.
- opstellen van een structurele meetcampagne (verhanglijn, bodem en afvoer) ten behoeve van de vaststelling van het BRV. Een meetcampagne zoals uitgevoerd in november 1999 zou in de toekomst structureel plaats kunnen vinden bij lagere afvoeren ($Q_{\text{Lobith}} \leq 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$). Hiermee is tevens de bovengenoemde laagwater calibratie gediend.

Slotopmerking

Uit bovenstaande beschrijving van onzekerheden en beperkingen kan worden afgeleid dat de nauwkeurigheid van het BRV bij bepaling met behulp van laseraltimetrie of vaartuigmetingen en Sobek berekeningen op hoofdlijnen overeen komt.

Naast nauwkeurigheid dient bij de keuze voor een toe te passen methode ook te worden getoetst op kosten en looptijd.

De kosten van een laseraltimetrie meting met bijbehorende analyses zullen beduidend hoger zijn dan bij de toepassing van Sobek. De looptijd zal eveneens langer zijn dan bij het gebruik van Sobek.

Tenslotte is een bijkomend voordeel van het gebruik van Sobek dat het modelinstrumentarium ook informatie geeft, weliswaar minder nauwkeurig, op trajecten tussen de MSW peilstations.

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Voor wat betreft de analyses en berekeningen ten behoeve van de vaststelling van het BRV 2000 (hoofdstuk 2), kan het volgende worden geconcludeerd:

- het waterspiegelverloop tussen de MSW peilstations wordt met behulp van verhanglijnmetingen goed weergegeven. Verhanglijnmetingen hebben een duidelijke meerwaarde ten opzichte van de rechte lijn interpolatie tussen twee MSW peilstations, zoals in het verleden heeft plaatsgevonden bij de berekening van OLR- en BR-vlakken.
- de vaststelling en berekening van een BRV voor de Waal met behulp van temporele extrapolatie van OLR-reductievlakken en ruimtelijke interpolatie tussen MSW peilstations, zoals in het verleden heeft plaatsgevonden, is met een relatief grote mate van onzekerheid omgeven.
- de invloed van de afvoerdynamiek op de verhanglijn-, bodem- en afvoermetingen van november 1999 is verwaarloosbaar klein.
- de sluitfout van de afvoermetingen heeft een effect op de waterstand van circa 0,03 m, en is tijdens de analyse buiten beschouwing gelaten.
- de vertaalslag van de meetsituatie ($Q_{\text{Boven-Rijn}} = 1.740 \text{ m}^3/\text{s}$) naar het OLR-niveau ($Q_{\text{Boven-Rijn}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$) heeft plaatsgevonden op basis van Q-h relatie 1996 'gedeeltelijk gestuwd'.
- uit de afvoermeting nabij de Pannerdensche kop kan worden afgeleid dat de afvoer over de Waal tijdens OLR, ten opzichte van Q-h relatie 1996, zal toenemen. Deze toename bedraagt circa $15 \text{ m}^3/\text{s}$. De OLA over de Waal voor het BRV 2000 bedraagt nu circa $806 \text{ m}^3/\text{s}$.
- momentane verschillen tussen vaartuigmetingen en MSW peilstations (gemiddeld 0,16 m) zijn groter dan verschillen tussen de laseraltimetrie meting en MSW peilstations (gemiddeld 0,06 m). Deze verschillen worden veroorzaakt door de squat van het meetvaartuig enerzijds en het locale dwarsverhang anderzijds.
- de verschillen zijn voor wat betreft de laseraltimetrie meting niet systematisch van aard, dit in tegenstelling tot de vaartuigmetingen. De vaartuigmetingen geven systematisch een onderschatting van de MSW peilstations (waterstanden bij vaartuigmetingen zijn lager). Een mogelijke oorzaak hiervoor is een onjuiste inschatting van de squat (inzinking) van het meetvaartuig. Er dient te worden opgemerkt dat de geconstateerde verschillen sterk indicatief zijn (momentane waarneming), waardoor niet al te veel waarde mag worden gehecht aan de absolute getallen.
- een mogelijke invloed van wind- en scheepsgolven op de gemeten verhanglijnen is geëlimineerd door middeling van gemeten waterstanden over een traject van één kilometer. Hieraan voorafgaand is eerst een 100 m gemiddelde waterstand berekend, gecombineerd met een spike-analyse (verwijdering uitbijters).
- de bodemverandering (daling en/of stijging) van het zomerbed heeft direct invloed op de ligging van het BRV en is ter hoogte van de MSW peilstations gekwantificeerd met behulp van een gewogen gemiddelde waterstandsverandering op basis van een tijdreeksanalyse over de periode 1990 tot en met 1999. Uit de analyse blijkt dat het BRV door het grillige tijdsafhankelijke verloop van waterstanden en bodemligging met grote onzekerheden is omgeven.

- de verhangtrajecten van het BRV 2000 komen overeen met de huidige MSW peilstations, aangevuld met trajectgrenzen ter hoogte van Erlecom, Dodewaard, Dreumel en Haften.
- voor wat betreft het waterstandsverhang over de verschillende trajecten is een vertaalslag van de meetsituatie naar het OLR-niveau uitgevoerd met behulp van een trajectafhankelijke verhoudingsfactor (ΔI_w). Hierin zijn zowel het verhang op basis van de waarnemingen als het verhang bij OLR volgens Q-h relatie 1996 opgenomen.
- de kilometer gemiddelde waterstanden van het BRV 2000 zijn met behulp van de waterstanden ter hoogte van de trajectgrenzen, de verhangtrajecten en de trajectafhankelijke verhoudingsfactoren berekend.
- de opvallendste verschillen en overeenkomsten tussen het BRV 2000, het OLR 1996 en het BRV 1999 kunnen als volgt worden samengevat:
 - ◊ het BRV 2000 ligt over het traject Lobith - Pannerdensch kop lager dan OLR 1996, maar hoger dan BRV 1999;
 - ◊ de lokale afname van het verhang bovenstrooms van Dodewaard, zoals in het OLR 1996, is ook in het BRV 2000 zichtbaar. Het BRV 2000 ligt op het traject Nijmegen - Dodewaard iets hoger dan OLR 1996 en BRV 1999.
 - ◊ het BRV 2000 is over het traject Tiel - Zaltbommel gestegen ten opzichte van het OLR 1996 en vrijwel gelijk aan het BRV 1999. De opstuwing van de vaste laag nabij Sint Andries speelt hierbij een belangrijke rol.
 - ◊ benedenstrooms van Zaltbommel treden in het BRV 2000 sterke verschillen op ten opzichte van de overige referentievlakken.

Uit het haalbaarheidsonderzoek naar de toepassing van het eendimensionaal hydrodynamisch model Sobek (hoofdstuk 3 tot en met 5) ten behoeve van de toekomstige berekening van het BRV, kan het volgende worden geconcludeerd:

- de verschillen in waterstanden tussen Sobek en de laseraltimetrie meting enerzijds en de MSW peilstations anderzijds blijven bij de laagwatertoets (simulatie verhanglijnmetingen november 1999) beperkt tot maximaal +/- 0,1 m.
- de geringe overschatting van Sobek ten opzichte van de laseraltimetrie meting kan worden verklaard als gevolg van verschillen in bodemligging (respectievelijk 1997 en 1999). De geschematiseerde bodem in Sobek ligt gemiddeld hoger (ten opzichte van NAP), waardoor ook de berekende waterstanden hoger komen te liggen.
- het is bij de interpretatie van verschillen tussen laseraltimetrie metingen, MSW peilstations en Sobek resultaten van belang om stil te staan bij de meetnauwkeurigheid (laseraltimetrie en MSW peilstations), de invloed van het locale dwarsverhang op gemeten waterstanden, de invloed van het getij, de plaatsbepaling van de metingen, geïnterpoleerde modelresultaten, calibratiecriteria van Sobek en de datering van de geschematiseerde zomerbed bodem.
- uit de geometrietoets (invloed van verschillende geschematiseerde zomerbed bodems op berekende waterstanden) blijkt dat de bodemdaling van het zomerbed een relatief grote invloed heeft op de verschillen tussen de berekende (Sobek) en gemeten (laseraltimetrie en MSW peilstations) waterstanden.
- de gemeten (laseraltimetrie en MSW peilstations) waterstanden worden door Sobek vrijwel altijd overschat als gevolg van een niet recente Rijntakkenschematisatie. De meest recente bodemligging van het zomerbed in Sobek dateert van 1997, terwijl de metingen in november 1999 zijn uitgevoerd. Sobek berekend als gevolg van een hogere bodemligging een dito waterstand, terwijl de bodemdaling in twee jaar tijd de werkelijk optredende waterstanden heeft verlaagd.

- als Sobek in de toekomst wordt toegepast voor de berekening van het BRV is het noodzakelijk dat de berekeningen worden uitgevoerd met een representatieve (recente) bodemligging van het zomerbed. Overschatting van de waterstanden van het BRV kan in de praktijk tot problemen leiden. De gegarandeerde waterdiepte zal als gevolg van de overschatting in werkelijkheid niet voldoen aan de norm van 2,80 m bij OLR.
- op grond van het 95 % betrouwbaarheidsinterval van de OLR-toets kan worden vastgesteld dat de benedenrand van het model bij OLR (theoretisch) tot aan circa kmr. 880 doorwerkt. Getij invloeden hebben bij OLR omstandigheden pas een relatief grote invloed op de waterstanden benedenstrooms van Tiel.
- de verschillen in berekende waterstanden ten gevolge van de geometrische veranderingen kunnen bij OLR oplopen tot circa 0,15 m.
- locale oneffenheden in de bodemligging komen bij OLR meer tot uiting in een grilliger verloop van de berekende waterstanden. Een geringere waterdiepte ligt hieraan ten grondslag.
- de relatief grote foutenmarge in een BRV dat is vastgesteld op basis van temporele extrapolatie en ruimtelijke interpolatie (bijvoorbeeld BRV 1997) is aangetoond door een vergelijkende berekening met een Sobek Rijntakken-schematisatie uit 1997. Waterstandsverschillen tot circa 0,30 m zijn hierin geen uitzondering.

Voor wat betreft een rekenprocedure ten behoeve van de jaarlijkse vaststelling van het BRV met Sobek (hoofdstuk 6) kan het volgende worden geconcludeerd:

- het haalbaarheidsonderzoek naar de inzet van Sobek heeft aangetoond dat de toepassing van een dergelijk model mogelijk is, mits aan een aantal belangrijke voorwaarden wordt voldaan.
- de modelschematisatie van Sobek dient voorafgaand aan de vaststelling van het BRV te worden aangepast met de meest recente bodemligging van het zomerbed. De rekenprocedure is hierop afgestemd en verloopt grotendeels zoals beschreven in het Draaiboek Basisgegevens BASELINE.
- om de meerwaarde van de inzet van Sobek (goedkoper en sneller in vergelijking tot verhanglijnmetingen) tot z'n recht te laten komen is een gedegen organisatie en afstemming van werkzaamheden en activiteiten noodzakelijk. De personen en/of afdelingen die in de dagelijkse praktijk met het BRV werken, die het BRV (officieel) vaststellen, die het BRV berekenen en die informatie en/of meetgegevens moeten aanleveren dienen hierbij te worden betrokken.
- een goede afstemming met betrokken actoren van buiten DON (bijvoorbeeld RIZA-WSR voor het aanmaken van een actuele modelschematisatie) is noodzakelijk voor de continuïteit van de procedure. Tijdige aanvraag, overleg en formalisatie (OGD-OND protocollen) is van cruciaal belang.
- een succesvolle jaarlijkse vaststelling van het BRV kan worden vergroot door eerdergenoemde organisatie met samenhangende taken en mandaten op te nemen in het Draaiboek Baggeren.

Tenslotte kan voor wat betreft de afweging tussen de verschillende methoden voor vaststelling van het BRV het volgende worden geconcludeerd:

- onzekerheden en nauwkeurigheden spelen een belangrijke rol bij de keuze voor een bepaalde methode. In principe kan onderscheid worden gemaakt in drie verschillende methoden:
 1. vaststellen BRV op basis van laseraltimetrie of vaartuigmetingen (hoofdstuk 2);

2. vaststellen BRV op basis van een tijdreeksanalyse van gemiddelde jaarlijkse waterstandsveranderingen. Hierbij worden geen extra metingen uitgevoerd, maar wordt het BRV op basis van het BRV van het voorafgaande jaar en een (trajectgemiddelde) factor welke wordt afgeleid uit de tijdreeksanalyse (zie paragraaf 2.4.3) vastgesteld.
 3. vaststellen BRV met behulp van Sobek berekeningen.
- uit een korte analyse van onzekerheden en beperkingen met betrekking tot de verschillende methoden kan worden afgeleid dat de nauwkeurigheid van het BRV bij bepaling met behulp van laseraltimetrie of vaartuigmetingen en Sobek berekeningen op hoofdlijnen overeen komt.
 - de kosten van een laseraltimetrie meting met bijbehorende analyses zullen beduidend hoger zijn in vergelijking met de toepassing van Sobek. De looptijd zal eveneens langer zijn dan bij het gebruik van Sobek.
 - een voordeel van het gebruik van Sobek is dat het modelinstrumentarium ook informatie geeft, weliswaar minder nauwkeurig, op trajecten tussen de MSW peilstations.

7.2 Aanbevelingen

Op basis van de analyses en resultaten van voorliggende studie kan het volgende worden aanbevolen:

- indien de keuze voor een methode ten behoeve van de bepaling van het BRV wordt gebaseerd op criteria zoals kosten, (loop-)tijd en eenduidigheid komt, op basis van voorgaand beschreven analyses, de toepassing van Sobek als eerste in aanmerking. Hierbij wordt echter aanbevolen om extra aandacht te besteden aan de relatie tussen de afvoer en hydraulische ruwheid (Q-C relatie) bij lagere afvoerniveaus, zoals als randvoorwaarde wordt opgegeven bij Sobek berekeningen.
- het opstarten en implementeren van een officieel laagwater meetprogramma wordt sterk aanbevolen. Hierdoor kunnen Q-h en Q-C relaties frequenter worden aangepast, welke ook ten goede komt aan de nauwkeurigheid van de OLR-reductievlakken en het jaarlijks vast te stellen BRV.
- in het verlengde van het laagwater meetprogramma kan, zoals dit reeds jaarlijks voor hogere afvoerniveaus plaatsvindt, een laagwatercalibratie van Sobek worden uitgevoerd.
- de vaststelling van een BRV is met vele onzekerheden omgeven. Het is daarom van groot belang een 'dienstbrede discussie' op te starten over de wijze waarop het BRV dient te worden vastgesteld.
- het verdient aanbeveling om de te hanteren procedures en methode ten behoeve van de vaststelling van het BRV op te nemen in het Draaiboek Baggeren en hiernaar in de praktijk te handelen.
- uit voorliggende analyse kan met enige voorzichtigheid worden vastgesteld dat laseraltimetrie metingen wellicht te gedetailleerd zijn voor de bepaling van een BRV. Daarnaast zijn er nog verschillende mogelijkheden voorhanden (onder andere de verkleining van de squat) om de nauwkeurigheid van de vaartuigmetingen te vergroten. Deze afweging kan worden ondersteund vanuit kostenefficiëntie en de eenvoudige mogelijkheid om met een vaartuig meerdere keren per jaar te meten.
- gezien de relatief grote onzekerheid rond het BRV is het noodzakelijk dit referentievak tijdens het gebruik gedurende een Baggerprogramma te monitoren (verifiëren). Monitoring en eventuele aanpassing op basis van beheerspeilingen (quick-scans) ligt voor de hand. Indien gelijktijdig ook het waterspiegelverhang wordt ingemeten kan gebruik worden gemaakt van de methodiek zoals in voorliggend rapport is beschreven (hoofdstuk 2).

-
- tijdens de tijdreeksanalyse van waterstanden zijn opmerkelijke verschillen tussen het hoge en lage afvoerbereik gevonden bij het MSW peilstation Nijmegen. De waterstandsdeling van circa 0,03 m/jr in het hoge afvoerbereik valt hierbij op. Een mogelijke oorzaak van het relatief grote verschil met het lage afvoerbereik kan bestaan uit een significante profielverruiming als gevolg van de aanleg van de vaste laag. Hierdoor neemt de waterstand niet af door de bodemdaling, maar door een ruimer profiel in de binnenbocht. Bij lagere afvoeren werkt de invloed van deze profielverruiming waarschijnlijk minder door in de waterstand. Het aspect van een mogelijke de invloed van profielverruiming dient onderwerp te zijn van een aanvullende analyse naar OLR waterstanden nabij Nijmegen.
 - het verdient aanbeveling om nabij de vaste laag van Sint Andries een (MSW) peilschaal te plaatsen. De vaste laag heeft een grote invloed op de plaatselijke waterstand. Deze invloed wordt als gevolg van het ontbreken van meetgegevens niet correct verdisconteerd in het BRV en de OLR-reductievlakken.

8. Geraadpleegde literatuur

Bouwdienst, 2001

Bouwdienst Rijkswaterstaat. *Draaiboek Baggeren Waal 2001*. Utrecht, mei 2001.

Douben, 2000

Douben, N. *Het Bagger Referentie Vlak 2000.0 voor de Waal; analyse meetgegevens, vaststellen verhangtrajecten en berekening referentievlak*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. RIZA-werkdocument 2000.086X. Arnhem, 26 juni 2000.

Hartman, 2000

Hartman, M.R. *Draaiboek Basisgegevens BASELINE, versie 2.0*. HKV lijn in water. Rapportnummer PR314.20. Lelystad, november 2000.

van Heerd, 2000

Heerd, R.M. van. *Laseraltimetrie voor baggerwerk in de Waal, verslag van de pilotvlucht november 1999 i.o.v. de Directie Oost-Nederland*. Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst. Delft, juni 2000.

Kinneging et al., 2000

Kinneging, N., D. Bloeme en Th. de Bruijne. *Nauwkeurighedsanalyse WaalBOS, evaluatie van beslissingsondersteunend systeem*. Meetkundige Dienst. Delft, mei 2000.

Koolwijk, 1992

Koolwijk, J. *Overeengekomen Lage Rivierstand 1991.0*. Directie Gelderland van Rijkswaterstaat. Rapportnummer ANII.1992.1. Arnhem, februari 1992.

Koolwijk, 1999

Koolwijk, J. *Vaststelling OLR*. Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. Memo. Arnhem, 2 november 1999.

Koolwijk, 2000

Koolwijk, J. *Bepaling OLR 1996 en 1999, actiepunten 00.05.05*. Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. Memo. Arnhem, 29 maart 2000.

Kruitwagen, 1997

Kruitwagen, P. *Projectplan Baggeren*. Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. Rapportnummer W-BG-97026 (versie 1.0). Arnhem, december 1997.

van der Made, 1987

Made, J.W. van der. *Analysis of some criteria for design and operation of surface water gauging networks*. Proefschrift Technische Universiteit Delft. Assen, 1987.

van der Meulen, 1998

Meulen, M.S. van der. *Protocol Basisbestanden BASELINE, versie 3.0*. CSO/ESRI. Rapportnummer 98.624. Bunnik/Rotterdam, november 1998.

Min V&W, 1996

Ministerie van Verkeer en Waterstaat. *Projectnota Waal, verdieping en verbreding van de vaarweg tussen de Pannerdensche kop en Zaltbommel (versie 2.0)*. Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. Rapportnummer W-KS-96070. Arnhem, juni 1996.

Oosterhof, 2000

Oosterhof, S. *Mondelinge mededeling inzake correctie metingen als gevolg van scheepsbewegingen*. 11 april 2000.

Smedes, 1999

Smedes, R.H. *Notitie Draaiboek baggeren*. Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. DON-Nota. Arnhem, januari 1999.

Struijk, 1994

Struijk, A.J. *Ontwikkelingen in de afvoerverdeling over de Rijntakken 1900 - 1991*. Directie Gelderland van Rijkswaterstaat. Arnhem/Rotterdam, juli 1994.

Taal, 1994

Taal, M. *Ontwikkeling scenario's autonome bodemontwikkeling Waal*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. RIZA-nota 94.062. Arnhem, november 1994.

Taal, 1999

Taal, M. *Metingen proef morfologie*. Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. Rapportnummer W-BG-99110. Arnhem, augustus 1999.

TAW, 1985

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken; deel 1 - bovenrivierengebied*. Staatsuitgeverij. Den Haag, september 1985.

TAW, 1999

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. *Leidraad Toetsen op Veiligheid*. Delft, augustus 1999.

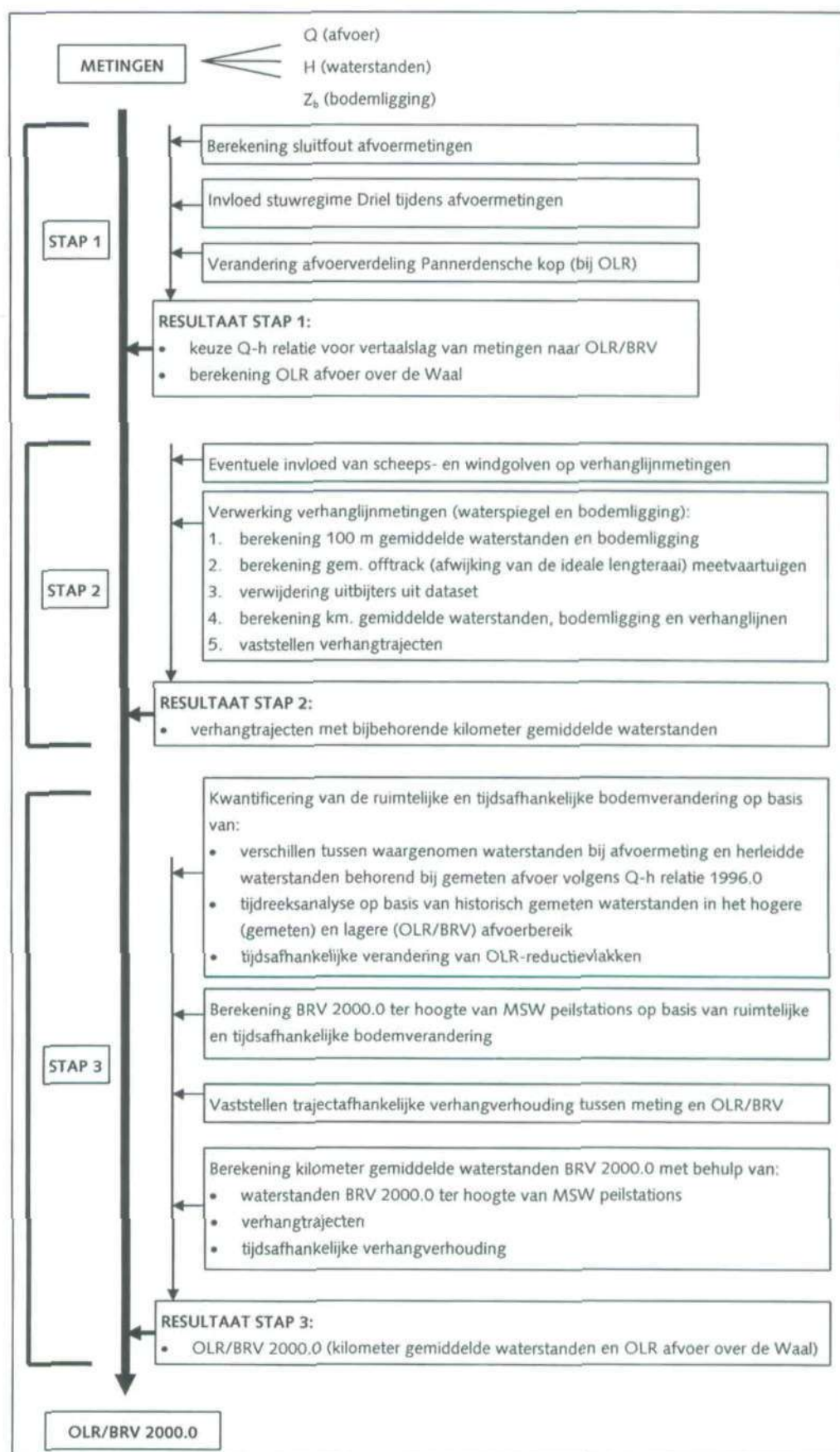
van der Veen, 2001

Veen, R. van der. *Bouw en calibratie Sobek Rijn, versie 2000.1 t/m 2000.3 (concept)*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. RIZA-rapport 2001.xx. Arnhem, mei 2001.

van Vuuren et al., 1999

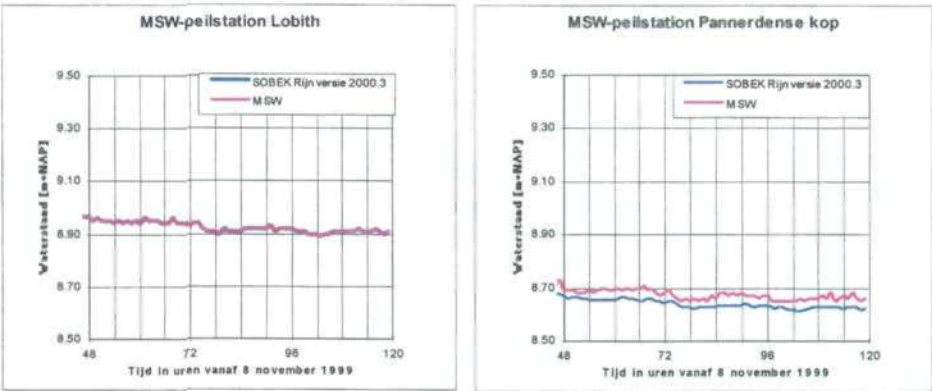
Vuuren, W. van., R. Moll en H. Vervoorn. *De Q-H relatie zijn langste tijd gehad? Op weg naar het Qf-tijdperk voor de Rijntakken*. H2O - jaargang 32, nr. 25; p. 19 - 22. 1999.

Bijlage 2.1 Schematische weergave methodiek en analyse voor berekening van BRV 2000.0

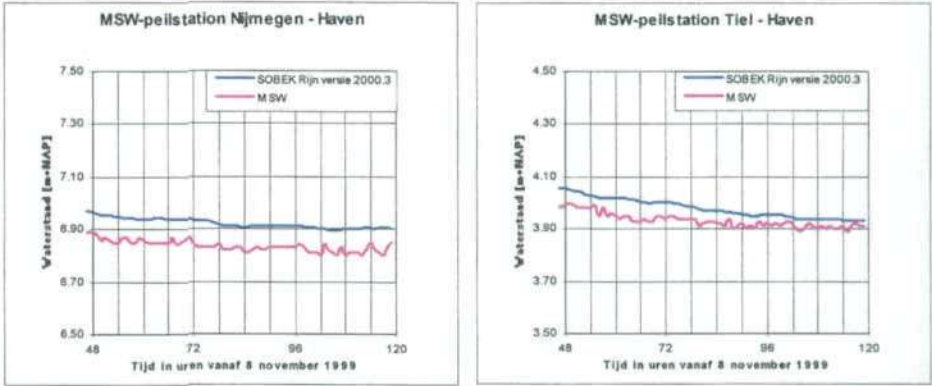


Bijlage 3.1 Waterstanden conform MSW peilstations en Sobek-Rijn 2000.3

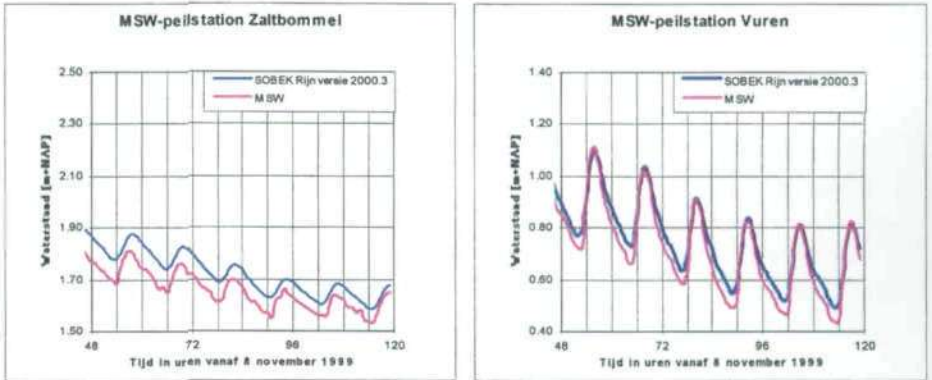
Figuur B.3.1.1 en B.3.1.2
Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden (Lobith en Pannerdensch kop).



Figuur B.3.1.3 en B.3.1.4
Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden (Nijmegen-Haven en Tiel-Haven).



Figuur B.3.1.5 en B.3.1.6
Tijdsafhankelijke gemeten (MSW) en berekende (Sobek) waterstanden (Zaltbommel en Vuren).

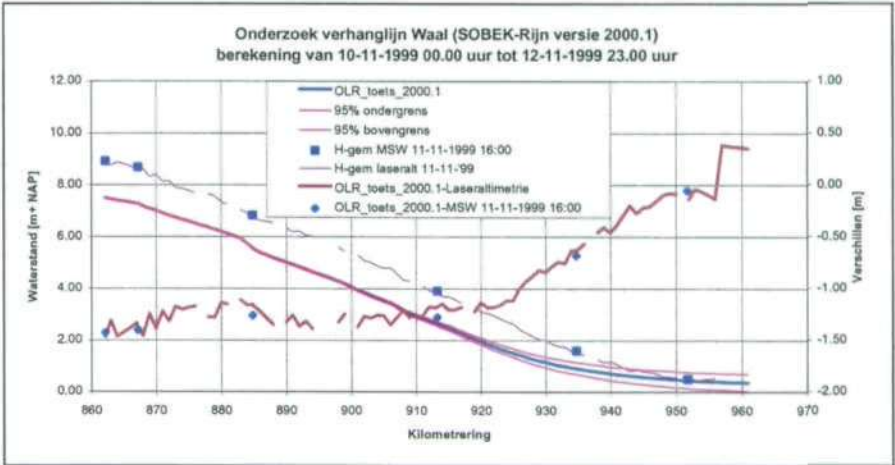


Tabel B.3.1.1
Gemeten en berekende (Sobek) afvoeren.

Datum	Kmr.	Riviertak	Meet- en rekentijdstip			Afvoer [m³/s]	
			Begin	Eind	Gem.	Gemeten	Berekend (Sobek)
10-11-'99	865.78	Boven-Rijn	13:15	15:30	14:22	1740.4	1771.2
10-11-'99	868.23	Pan.kanaal	11:10	13:00	12:05	441.8	405.8
10-11-'99	868.35	Waal	9:00	11:00	10:00	1311.1	1358.7

Bijlage 5.1 Berekende (Sobek-Rijn 2000.1 en 2000.2) en gemeten waterstanden en onderlinge verschillen ten behoeve van OLR-toets.

Figuur B.5.1.1
Berekende (Sobek-Rijn 2000.1) en
gemeten waterstanden en onderlinge
verschillen ten behoeve van OLR-toets.



Figuur B.5.1.2
Berekende (Sobek-Rijn 2000.2) en
gemeten waterstanden en onderlinge
verschillen ten behoeve van OLR-toets.

