

Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat Directie Limburg

De Maas na de Maaswerken

Aanvullende SOBEK- en WAQUA-berekeningen

maart 2002

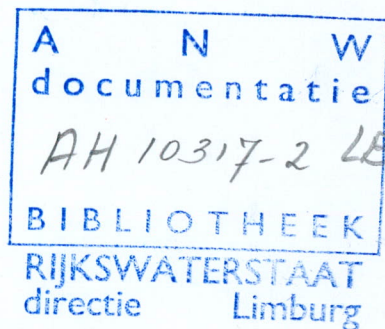
AH10317-2 LB

Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat Directie Limburg

De Maas na de Maaswerken

Aanvullende SOBEK- en WAQUA-berekeningen

drs R.C. Agtersloot
ir H.H. Rabbers



maart 2002

Inhoudsopgave

Bijlagen	2
Figurenlijst.....	2
Tabellenlijst.....	3
1. Inleiding	4
1.1 Achtergrond	4
1.2 Doelstelling	4
1.3 Uitgangspunten en randvoorwaarden.....	5
1.4 Afspraken tijdens het startoverleg.....	5
1.5 De rapportage	5
2. Werkzaamheden vooraf	7
2.1 Controleren eerder uitgevoerde berekeningen.....	7
2.2 Definiëren cross-secties in WAQUA.....	8
2.3 Conversie randvoorwaarden	10
2.3.1 De randvoorwaarden	10
2.3.2 De afvoergolven.....	10
2.3.3 Laterale afvoeren	11
2.3.4 Benedenstroomse Qh-relatie	12
2.3.5 Grondwater	12
3. De SOBEK-berekeningen.....	14
3.1 Randvoorwaarden	14
3.2 De berekeningen.....	14
3.3 De resultaten.....	15
3.3.1 Tijdseries op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)	15
3.3.2 Maximale waterstanden	17
3.3.3 Qh-relaties op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)	18
3.3.4 Afvoerverdeeling bij maximaal debiet.....	22
3.4 Conclusies.....	24
4. De WAQUA-berekeningen	25
4.1 Randvoorwaarden	25
4.2 De berekeningen.....	25
4.3 De resultaten.....	26
4.3.1 Tijdseries op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)	26
4.3.2 Maximale waterstanden	29
4.3.3 Qh-relaties op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)	30
4.3.4 Afvoerverdeeling bij maximaal debiet.....	33
4.4 Conclusies.....	35
5. Vergelijking SOBEK- en WAQUA-resultaten	37
5.1 Tijdseries op twee locaties (rkm 100 en 160).....	37
5.2 Maximale waterstanden	42
5.3 Qh-relaties op vier locaties (rkm 40, 80, 100 en 160).....	44

6. Conclusies en aanbevelingen	47
6.1 Conclusies.....	47
6.2 Aanbevelingen	48
7. Referenties	49

Bijlagen

- 1: Nieuwe cross-secties WAQUA
- 2: Berekening golf Eijsden
- 3: Grondwaterlozingen in WAQUA
- 4: Overzicht modelschematisaties
- 5: Qh-relaties SOBEK en WAQUA

Figurenlijst

Figuur 2-1 Maximale afvoeren in WAQUA met oorspronkelijke en nieuwe cross-secties (1/1250-golf +20%, situatie na Maaswerken)	9
Figuur 2-2 Percentage afvoer door zomerbed zoals berekend door SOBEK en WAQUA met een stationaire afvoer ($Q=4600\text{m}^3/\text{s}$)	9
Figuur 2-3 Bovenstroomse randvoorwaarden van alle golven bij Eijsden.....	10
Figuur 2-4 Gebruikte benedenstroomse randvoorwaarde in de berekeningen (Qh-relatie bij Keizersveer).....	12
Figuur 3-1 Tijdseries van de waterstanden op rkm 40	15
Figuur 3-2 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100	16
Figuur 3-3 Tijdseries van de waterstanden op rkm 123	16
Figuur 3-5 Effect van de ingrepen volgens SOBEK bij verschillende afvoergolven.....	18
Figuur 3-6 Qh-relatie op rkm 40.....	19
Figuur 3-7 Qh-relatie op rkm 100	20
Figuur 3-8 Qh-relatie op rkm 123	21
Figuur 3-9 Qh-relatie op rkm 160	21
Figuur 3-10 Afvoerverdeling referentiesituatie bij maximale afvoer	22
Figuur 3-11 Afvoerverdeling situatie na Maaswerken bij maximale afvoer	23
Figuur 3-12 Breedte hoofdgeul, oeversectie en winterbed referentiesituatie	23
Figuur 3-13 Breedte hoofdgeul, oeversectie en winterbed situatie na Maaswerken	24
Figuur 4-1 Effect verhoging initiële condities zoals bepaald middels SOBEK-berekeningen	26
Figuur 4-2 Tijdseries van de waterstanden op rkm 40	27
Figuur 4-3 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100	27
Figuur 4-4 Tijdseries van de waterstanden op rkm 123	28
Figuur 4-5 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160	29
Figuur 4-6 Effect van de ingrepen volgens WAQUA bij verschillende golven	30
Figuur 4-7 Qh-relatie op rkm 40.....	31
Figuur 4-8 Qh-relatie op rkm 100	31
Figuur 4-9 Qh-relatie op rkm 123	32
Figuur 4-10 Qh-relatie op rkm 160	33
Figuur 4-11 Afvoerverdeling referentiesituatie bij maximale afvoer	34
Figuur 4-12 Afvoerverdeling situatie na de Maaswerken bij maximale afvoer	34
Figuur 4-13 Breedte hoofdgeul, winterbed-links en winterbed-rechts referentiesituatie	35

Figuur 4-14 Breedte hoofdgeul, winterbed-links en winterbed-rechts situatie na Maaswerken .	35
Figuur 5-1 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100 voor de ref-250gh en -gk-berekeningen	37
Figuur 5-2 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100 voor de ivm-250gh en -gk-berekeningen	37
Figuur 5-3 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100 voor de ref-1250gh en -gk-berekeningen	38
Figuur 5-4 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100 voor de ivm-1250gh en -gk-berekeningen	38
Figuur 5-5 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160 voor de ref-250gh en -gk-berekeningen	39
Figuur 5-6 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160 voor de ivm-250gh en -gk-berekeningen	39
Figuur 5-7 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160 voor de ref-1250gh en -gk-berekeningen	40
Figuur 5-8 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160 voor de ivm-1250gh en -gk-berekeningen	40
Figuur 5-11 Effect van de maatregelen voor de 250gh en 250gk golf volgens SOBEK en WAQUA	43
Figuur 5-12 Effect van de maatregelen voor de 1250gh en 1250gk golf volgens SOBEK en WAQUA	43
Figuur 5-13 Qh-relatie op rkm 40 volgens SOBEK en WAQUA	44
Figuur 5-14 Qh-relatie op rkm 80 volgens SOBEK en WAQUA	45
Figuur 5-15 Qh-relatie op rkm 100 volgens SOBEK en WAQUA	45
Figuur 5-16 Qh-relatie op rkm 160 volgens SOBEK en WAQUA	46

Tabellenlijst

Tabel 2-1 Vergelijking SOBEK- en WAQUA-schematisaties in de referentiesituatie	7
Tabel 2-2 Vergelijking SOBEK- en WAQUA-schematisaties situatie na Maaswerken	7
Tabel 2-3 Overzicht van laterale toestromingen en onttrekkingen van rkm 2.56 t/m rkm 258	11
Tabel 3-1 Specificatie en naamgeving SOBEK-berekeningen	14
Tabel 4-1 Overzicht WAQUA-berekeningen	25
Tabel 5-1 Instroombreedtes van de retentiegebieden Lateraalkanaal-West en Lob van Gennep	42

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

Het project Integrale verkenning Maas (IVM) is een verkennende studie waarin wordt gekeken op welke manier toekomstige klimaatveranderingen, waarvan zeespiegelstijging en verhoogde piekafvoeren van de Maas een gevolg zijn, kunnen worden opgevangen. Hierbij wordt uitgegaan van een toename van de maatgevende afvoer van de Maas van 3800 m³/s naar 4600 m³/s. Om deze verhoogde afvoer te kunnen beheersen zijn maatregelen in het zomer- en winterbed van de Maas noodzakelijk. In feite komt het erop neer dat waterstandsverhogingen als gevolg van klimatologische ontwikkelingen door de te nemen maatregelen weer worden gecompenseerd.

Door Meander Advies en Onderzoek (Meander) is in opdracht van Rijkswaterstaat Directie Limburg (DLB) een 1D-schematisatie voor het BOS-ir opgeleverd waarmee het effect van maatregelen bepaald kan worden (opdrachtnummer LB-6870, rapport Agtersloot e.a., 2001c). Bij de eerste verkennende berekeningen met dit model bleek dat SOBEK (het rekenhart van het BOS-ir) het effect van de ingrepen goed weergaf, maar problemen heeft met een goede weergave van de waterstandsverhoging bij een toename van de afvoer van 3800 m³/s tot 4600 m³/s. Bij het vergelijken van de resultaten van (in principe) identieke SOBEK- en WAQUA-berekeningen met een constante afvoer bleken de resultaten van elkaar af te wijken. Een mogelijke verklaring is dat bij de SOBEK-berekeningen (1D) de omkade gebieden wel volstromen bij hogere afvoeren maar dat deze gebieden niet mee gaan stromen. Bij de WAQUA-berekeningen (2D) stromen de omkade gebieden wel mee. Uiteindelijk is het doel om binnen IVM te kijken naar de verhoging van de maximale waterstanden bij een toename van de maximale afvoer en de invloed van de maatregelen daarop bij hoogwatergolven. De beoordeling van de verschillen tussen de 1D en de 2D-berekeningen wordt mede gemaakt op basis van de resultaten bij tijdsafhankelijke afvoeren. Deze berekeningen waren nog niet uitgevoerd. Daarom is besloten binnen IVM de waterstandsverhoging ten gevolge van de afvoertoeename met WAQUA te berekenen, om het verschil tussen de SOBEK- en WAQUA-resultaten te bepalen.

Voor het uitvoeren van de benodigde SOBEK en WAQUA-berekeningen heeft DLB aan Meander gevraagd offerte uit te brengen (kenmerk DLB2001/25830 d.d. 19 november 2001). Op basis van de offerte van Meander (brief 10039.5/01.247/RA) heeft DLB aan Meander opdracht verleend (brief DLB2001/27314). Dit rapport vormt een beschrijving van de door Meander uitgevoerde werkzaamheden.

Het projectteam bestond uit drs R.C. Agtersloot (projectleider, WAQUA-berekeningen), ir H.H. Rabbers (SOBEK-berekeningen) en ir D.G. Meijer (reviewer). Het project is uitgevoerd van december 2001 tot maart 2002.

1.2 Doelstelling

Een kwantitatieve inschatting maken op basis van SOBEK- en WAQUA-berekeningen van de invloed (met name op waterstanden en afvoer(verdelingen)) van de toename van de maatgevende afvoer. De berekeningen moeten worden uitgevoerd voor zowel de situatie in 1995 na aanleg van de DGR-kaden (de referentiesituatie) als de situatie na uitvoering van het Maaswerken project (circa 2015). Ook de verdeling tussen zomer- en winterbedafvoer zoals die door SOBEK en WAQUA berekend worden moet betrokken worden bij de interpretatie van de resultaten.

1.3 Uitgangspunten en randvoorwaarden

De werkzaamheden zijn uitgevoerd onder de volgende uitgangspunten en randvoorwaarden:

- Voor de SOBEK-berekeningen voor de referentiesituatie is de SOBEK-schematisatie *refivm* gebruikt (zie RIZA, 2002). Deze schematisatie is door DLB beschikbaar gesteld;
- Voor de SOBEK-berekeningen voor de situatie na Maaswerken is de 2^e oplevering van de SOBEK-schematisatie *2001.1* gebruikt (opgenomen BOS-ir versie 1.00.02). Deze schematisatie is door DLB beschikbaar gesteld (zie Agtersloot e.a., 2001b);
- De gebruikte versie van SOBEK is het Case Management Tool versie 2.52.001 inclusief grondwater en retentiegebieden. De licentie is door WL ter beschikking gesteld;
- Voor de WAQUA-berekeningen voor de referentiesituatie is de WAQUA-schematisatie *95dgr* gebruikt (zie Agtersloot e.a., 2001a). Deze schematisatie is door DLB beschikbaar gesteld;
- Voor de WAQUA-berekeningen na Maaswerken is de WAQUA-schematisatie *vo+s2* gebruikt (zie Agtersloot e.a., 2001b). Deze schematisatie is door DLB beschikbaar gesteld;
- De WAQUA-berekeningen zijn uitgevoerd op de supercomputer Unite bij SARA in Amsterdam. De gebruikte versie van WAQUA is *parwq0002* zoals die in maart 2000 op de Unite is geïnstalleerd;
- De randvoorwaarden voor de SOBEK-berekeningen zijn door DLB ter beschikking gesteld (zie ook paragraaf 2.3);
- De randvoorwaarden voor de WAQUA-berekeningen zijn afgeleid uit de SOBEK-randvoorwaarden;
- Er zijn 20 SOBEK-berekeningen en 10 WAQUA-berekeningen en uitgevoerd (voor een volledig overzicht van de uitgevoerde berekeningen wordt verwezen naar Tabel 3-1 in paragraaf 3.2 en Tabel 4-1 in paragraaf 4.2);
- DLB is verantwoordelijk voor de juistheid van de toegeleverde gegevens.

1.4 Afspraken tijdens het startoverleg

Na opdrachtverlening is op 30 november bij DLB een startoverleg gehouden. Hieraan werd deelgenomen door S. van 't Laar, J. Reuber (beiden DLB) en R. Agtersloot (Meander). De volgende afspraken zijn tijdens dit overleg gemaakt:

- De te gebruiken waakhogte (zie Agtersloot e.a., 2001a) is 50 cm;
- De te gebruiken SOBEK-schematisatie is de 2^e oplevering van versie *2001.1* zoals opgenomen in het BOS-ir versie 1.00.02 van 6 december 2001;
- Grondwater voor WAQUA op basis van SOBEK-berekeningen conform de procedures zoals die door Van der Veen (2001) zijn beschreven;
- De prioriteit ligt bij berekeningen die de situatie na uitvoering van het Maaswerken project (na Maaswerken) beschrijven.

1.5 De rapportage

De voorliggende rapportage bestaat uit zes hoofdstukken en vier bijlage. Hoofdstuk 2 beschrijft de werkzaamheden die bij aanvang van het project zijn uitgevoerd. Hoofdstuk 3 (De SOBEK-berekeningen) en Hoofdstuk 4 (De WAQUA-berekeningen) beschrijven de uitgevoerde berekeningen en de belangrijkste resultaten. Hoofdstuk 5 vergelijkt de resultaten van de verschillende SOBEK- en WAQUA-berekeningen. In Hoofdstuk 6 worden de conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

In dit rapport wordt gerefereerd aan een aantal verschillende SOBEK- en WAQUA-modellen. De hierbij gebruikte naamgeving is als volgt:

- SOBEK-model *2000.1* beschrijft de situatie van HW1995 met de bodem opname anno 1993; SOBEK-model *2000.2* beschrijft de situatie van HW1993 met de bodem opname anno 1993; SOBEK-model *2000.32* beschrijft de situatie medio 2000 na uitvoering van het 1^e baggerbestek, na aanleg van de DGR-kaden en inclusief de bodem opname anno 1998 (zie RIZA, 2002);
- SOBEK-model *refivm* beschrijft de situatie medio 1995, met de bodem opname anno 1993, zonder uitvoering van het 1^e baggerbestek en na aanleg van de DGR-kaden; dit is een handmatig gemaakt SOBEK-model waarbij de bodemligging van de hoofdgeul (h1 t/m h5) uit het SOBEK-model *2000.2* op profiel niveau ingebracht is in het SOBEK-model *2000.32* (zie RIZA, 2002);
- SOBEK-model *2001.1* is een beschrijving van de situatie na uitvoering van de Maaswerken (circa 2015); dit model heeft als uitgangspunt het SOBEK-model *refivm* (zie Agtersloot e.a., 2001b);
- WAQUA-model *95dgr* is een beschrijving van de situatie in 1995 na aanleg van de DGR-kaden, dus nog zonder de proefprojecten van de Maaswerken (zie Meijer, 2002). Vergeleken met het WAQUA-model *1995-DGR versie3* dat bij De Maaswerken gebruikt wordt, heeft het WAQUA-model *95dgr* aangepaste laterale afvoeren en grondwatereffecten.
- WAQUA-model *vo+s2* is een beschrijving van de situatie na uitvoering van de Maaswerken inclusief het sluitstuk kaden. Het is een speciaal voor IVM gemaakte WAQUA-schematisatie die bestaat uit de maatregelen conform het Voorgenomen Ontwerp (*vo*) voor de Grensmaas en de maatregelen uit Scope 2000 Pakket I (*s2*) voor de Zandmaas.

2. Werkzaamheden vooraf

2.1 Controleren eerder uitgevoerde berekeningen

Zoals gesteld in paragraaf 1.1 bleken bij het vergelijken van de resultaten van (in principe) identieke SOBEK- en WAQUA-berekeningen de resultaten soms van elkaar af te wijken. In overleg met de opdrachtgever is daarom afgesproken dat vooraf een inventarisatie van de belangrijkste eigenschappen van de SOBEK- en WAQUA-schematisatie gemaakt wordt om na te gaan of de verschillen hieruit verklaard kunnen worden.

Namens de opdrachtgever heeft ir H.J.A. Wijbenga zich beziggehouden met het vergelijken van de beide schematisaties. Zijn bevindingen zijn neergelegd in een memo en kunnen als volgt worden samengevat:

- de modellen beschrijven dezelfde situatie;
- het grootste verschil tussen SOBEK en WAQUA wordt veroorzaakt door het wel of niet meestromen van de omkade gebieden;
- de Qh-krommen hebben verschillende gradiënten bij $Q > 3800 \text{ m}^3/\text{s}$; SOBEK heeft ten opzichte van WAQUA een hogere waterstand bij gelijke afvoer;
- de breedte van de drempels van de omkade gebieden en de retentiegebieden verschilt tussen SOBEK en WAQUA. Dit heeft invloed op de snelheid van het volstromen van de gebieden.

De referentieschematisaties kunnen als volgt worden beschreven:

Tabel 2-1 Vergelijking SOBEK- en WAQUA-schematisaties in de referentiesituatie

Onderdeel	SOBEK (refivm)	WAQUA (95dgr)
Bodem (jaar opname)	1993	1993
Overlaten	Incl. DGR	Incl. DGR
Omkade gebieden	Enkel bergend	Bergend/stromend
Retentiegebieden	-	-
Randvoorwaarden:		
- golven		gelijk aan SOBEK
- lateralen		gelijk aan SOBEK
- grondwaterinteractie		berekend met SOBEK

Tabel 2-2 Vergelijking SOBEK- en WAQUA-schematisaties situatie na Maaswerken

Onderdeel	SOBEK (2001.1)	WAQUA (vo+s2)
Bodem (jaar opname)	1993 + ingrepen	1993 + ingrepen
Overlaten	Incl. DGR	Incl. DGR
Omkade gebieden	Enkel bergend	Bergend/stromend
Retentiegebieden	-	-
Randvoorwaarden:		
- golven		gelijk aan SOBEK
- lateralen		gelijk aan SOBEK
- grondwaterinteractie		berekend met SOBEK

2.2 Definiëren cross-secties in WAQUA

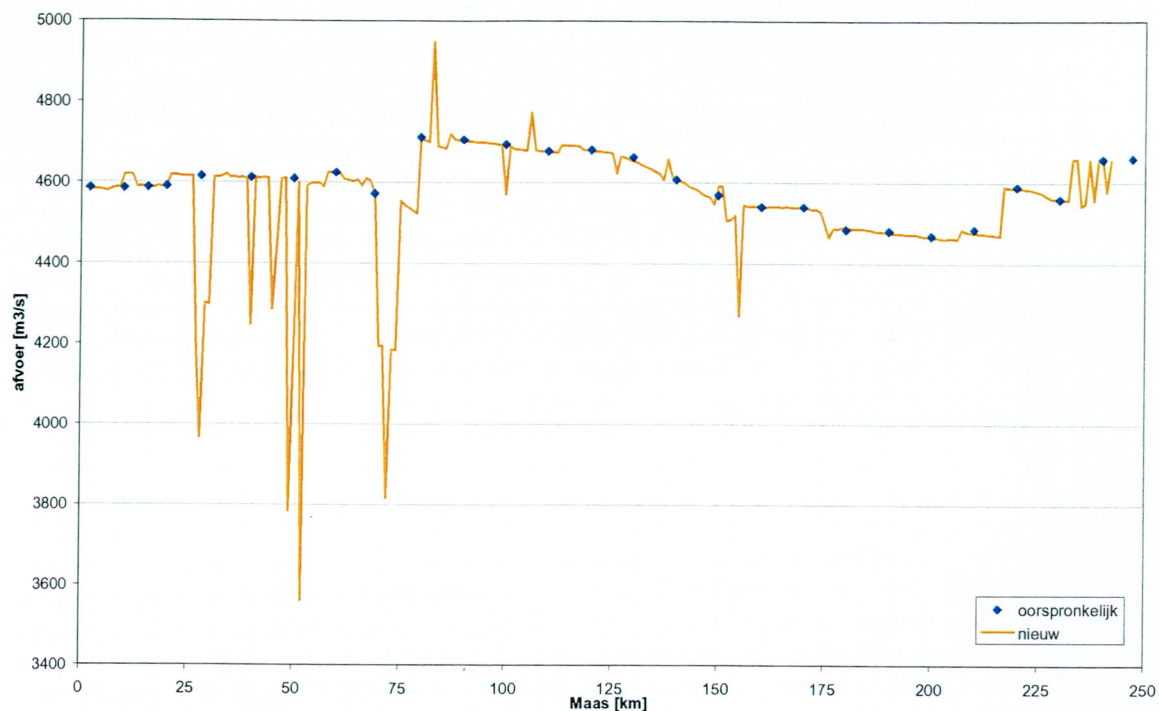
De structuur van een SOBEK-schematisatie maakt het eenvoudig om hieruit de afvoerverdeling over zomer- en winterbed te krijgen. De resolutie van de SOBEK cross-secties is ongeveer 500 m, afhankelijk van de vaklengte. Om een goede vergelijking tussen de SOBEK- en WAQUA-resultaten mogelijk te maken is het wenselijk dat deze verdeling ook uit de WAQUA-berekeningen af te leiden is. Omdat WAQUA geen onderscheid maakt tussen zomer- en winterbed (enkel in de ruwheden wordt dit onderscheid gemaakt) is hiervoor geen standaard uitvoermogelijkheid. In overleg met de opdrachtgever is daarom besloten een aantal extra cross-secties te maken die (per rivierkilometer) de afvoer bepalen over het winterbed aan de linkeroever, het zomerbed en het winterbed aan de rechteroever.

Op basis van de rivierkilometers en de SOBEK-vakken van het zomerbed en de oever is bepaald welke WAQUA-cellen deel uitmaken van het zomerbed en welke WAQUA-cellen deel uitmaken van het winterbed. In Bijlage 1 staat aangegeven waar de verschillende cross-secties zijn aangebracht en hoe de verdeling winterbed/zomerbed is gemodelleerd.

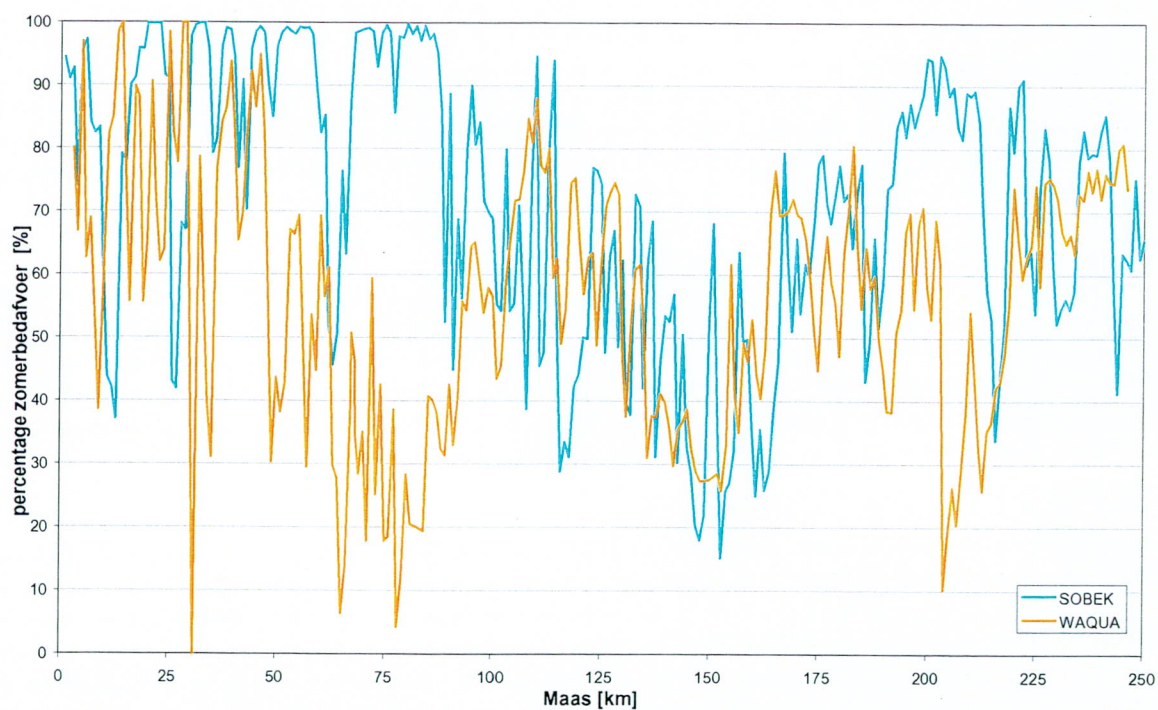
Vervolgens is een berekening uitgevoerd (1/1250-golf +20%, situatie na Maaswerken) met de cross-secties zoals ze gemaakt zijn voor dit project en de cross-secties zoals deze standaard gebruikt worden in de WAQUA-berekeningen (om de 10 kilometer). Deze laatste cross-secties lopen over de volledige breedte van het model en meten dus het totale debiet zonder onderscheid naar zomerbed/winterbed. Het resultaat is zichtbaar in Figuur 2-1. In het algemeen kan worden gesteld dat de nieuwe cross-secties een goede overeenstemming laten zien. De lokaal grote verschillen (rkm 30, rkm 40, rkm 50 en rkm 70) komen voor op plekken waar de rivier 'slingert' door het rooster (rkm 30, rkm 40) of daar waar de rivier tijdens een hoogwater een kortsluiting maakt (rkm 50, rkm 70). Op deze lokaties is het verschil tussen de verwachte (oorspronkelijke) waarde en de berekende (nieuwe) waarde een maat voor de afvoer door de kortsluiting. Tevens is de instroming van de Lob van Gennep goed te zien (rkm 155).

Tenslotte is nagegaan of de afvoerverdeling zomerbed/winterbed zoals die door de cross-secties wordt gemeten voor een vergelijkbare SOBEK- en WAQUA-berekening overeenstemt. Deze vergelijking is uitgevoerd voor een stationaire berekening (om mogelijke retentie-effecten uit te sluiten) bij een afvoer van 4600 m³/s voor de situatie na Maaswerken.

Zoals zichtbaar is in Figuur 2-2 wijken de resultaten aanzienlijk van elkaar af. Dit wordt veroorzaakt doordat het WAQUA-winterbed breder is dan het SOBEK-winterbed (zie ook Figuur 3-12, Figuur 3-13, Figuur 4-13 en Figuur 4-14). De consequentie hiervan is dat het winterbed in de WAQUA-berekeningen meer afvoer kan trekken dan in de corresponderende SOBEK-berekening.



Figuur 2-1 Maximale afvoeren in WAQUA met oorspronkelijke en nieuwe cross-secties (1/1250-golf +20%, situatie na Maaswerken)



Figuur 2-2 Percentage afvoer door zomerbed zoals berekend door SOBEK en WAQUA met een stationaire afvoer ($Q=4600\text{m}^3/\text{s}$)

2.3 Conversie randvoorwaarden

2.3.1 De randvoorwaarden

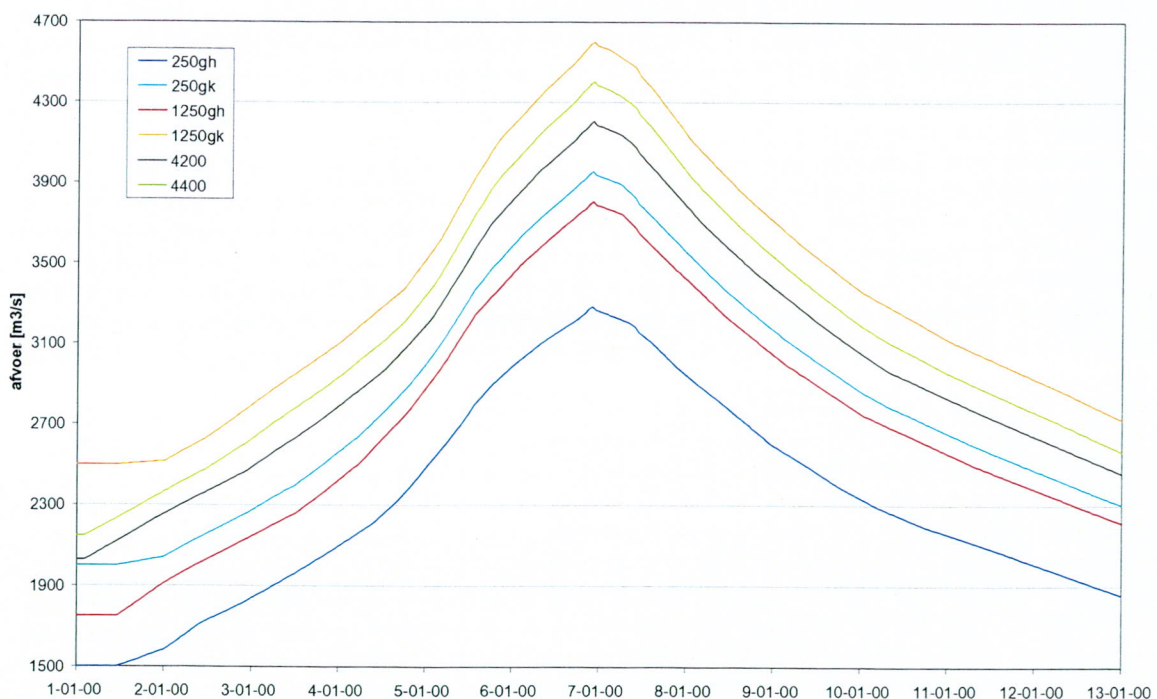
Voor de IVM-studie zijn door Rijkswaterstaat/RIZA nieuwe randvoorwaarden vastgesteld. Naast een verhoogde Qh-relatie op de benedenstroomse rand zijn ook de laterale afvoeren gewijzigd ten opzichte van de laterale afvoeren zoals die staan beschreven in het Randvoorwaardenboek 2001 (Rijkswaterstaat, 2002). Omdat de WAQUA-schematisatie uitgaat van deze randvoorwaarden moeten de randvoorwaarden worden aangepast. Naast een verandering van de grootte van de laterale afvoeren zijn enkele laterale afvoeren ook op een andere plaats terecht gekomen. Als basis voor de nieuwe randvoorwaarden dient het SOBEK-model 2001.1.

2.3.2 De afvoergolven

Conform de afspraken zijn de randvoorwaarden opgeleverd door DLB. De afvoergolven zijn berekend met de methode zoals beschreven in Bijlage 2. De hoogwatergolven worden geïdentificeerd door een statistische overschrijdingsfrequentie (bijv. 1/250 jaar) of een piekafvoer te Borgharen (bijv. $Q_{\max} = 3275 \text{ m}^3/\text{s}$).

De uit te voeren berekeningen maken gebruik van de volgende standaardgolven (Figuur 2-3):

- 1/250 ($Q_{\max} = 3275 \text{ m}^3/\text{s}$); identificatie is 250gh,
- 1/250 + 20% ($Q_{\max} = 3935 \text{ m}^3/\text{s}$); identificatie is 250gk,
- 1/1250 ($Q_{\max} = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$); identificatie is 1250gh,
- 1/1250 + 20% ($Q_{\max} = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$); identificatie is 1250gk,
- De golven met $Q_{\max} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{\max} = 4400 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn lineair geïnterpoleerd tussen golven met een lagere en hogere Q_{\max} ; identificatie is 4200 en 4400.



Figuur 2-3 Bovenstroomse randvoorwaarden van alle golven bij Eijsden

2.3.3 Laterale afvoeren

De tijdreeksen van de laterale afvoeren zijn toegeleverd door DLB. De tijdreeksen van de SOBEK-modellen *refivm* en *2001.1* zijn gebruikt voor zowel SOBEK als WAQUA. De gebruikte laterale afvoeren staan beschreven in Tabel 2-3. De tijdreeksen voor de 4200- en 4400-berekeningen zijn geïnterpoleerd uit de nabijgelegen tijdreeksen.

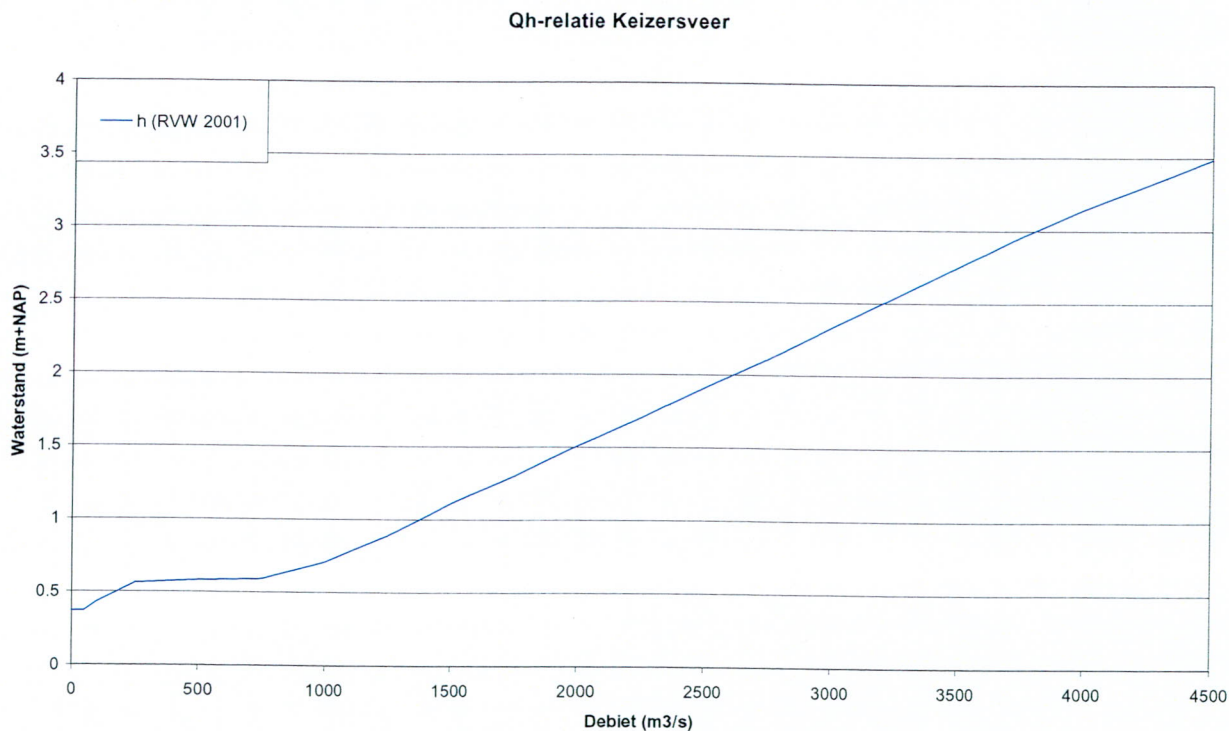
Tabel 2-3 Overzicht van laterale toestromingen en onttrekkingen van rkm 2.56 t/m rkm 258

Rivier- kilomet er	Lateraal	SOBEK naam	in relatie tot Q_{Eijsden}	constante afvoer waarde [m ³ /s]	max. afvoer variabel 1250gh/ 1250gk [m ³ /s]	cumulatief (afgerond) 1250gh/112 50gk [m ³ /s]
[rkm]						
8,8	sluis Ternaaien	Kalkmaas1		10,00		10
12,0		Kalkmaas2	variabel		26,70 / 36,21	36,7 / 46,2
14,7	Onttrekking Zuid- Willemsvaart	Grenmas1		-15,00		21,7 / 31,2
15,0	Onttrekking Juliana-kanaal	Grenmas2		-16,00		5,7 / 16,2
22,5	Geul	Grenmas3	variabel		23,84 / 32,33	28,5 / 68,5
34,6		Grenmas4	variabel		6,09 / 8,20	34,6 / 76,7
34,6		Grenmas5	variabel		27,65 / 37,37	62,2 / 114
64,8		Grenmas6	variabel		4,59 / 6,18	66,8 / 120
68,3	onttrekking Sluis Heel	Grenmas7		-8,00		58,8 / 112
69,1	onttrekking Sluis Linne	Grenmas8		-3,00		55,8 / 109
74,0		Zandmas1	variabel		7,75 / 10,4	63,6 / 120
79,9	Roer (en Hambeek)	Zandmas3	variabel		148,0 / 201,0	212 / 321
88,1		Zandmas4	variabel		10,33 / 13,93	222 / 335
88,7	Swalmen/Neerbeek	Zandmas5	variabel		19,69 / 26,54	242 / 361
114,7		Zandmas6	variabel		14,65 / 19,76	257 / 381
139,6	Afwateringskanaal	Zandmas7	variabel		15,68 / 21,15	272 / 402
153,3	Niers	Zandmas8	variabel		40,96 / 53,30	313 / 455
181,9	Gemaal Sasse	Zandmas9	variabel		3,21 / 4,44	316 / 459
206,7	Gemaal Gewande	Getymas1	variabel		3,69 / 5,04	320 / 464

209,7		Getymas2	variabel		24,60 /	345 / 498
					33,60	
219,8	Dieze	Getymas3	variabel		106,9 /	452 / 668
					170,0	
235,1	Drongelens kanaal	Getymas4	variabel		100 / 100	552 / 678
-		Andelms1		-2,50		550 / 675
-		Andelms2	variabel		3,28 /	553 / 680
					4,48	
Totaal				-33,5	586,5 /	
					713,5	
					553 / 680	

2.3.4 Benedenstroomse Qh-relatie

De gebruikte benedenstroomse randvoorwaarde is de Qh-relatie ter plaatse van Keizersveer (rkm 247) (Figuur 4-1). Deze Qh-relatie is vastgelegd in het Randvoorwaardenboek 2001 (Rijkswaterstaat, 2001). Voor IVM is het uitgangspunt dat de huidige Qh-relatie ook ná 2015 nog geldig zal zijn omdat hogere waterstanden (bijvoorbeeld ten gevolge van zeespiegelstijging) ter plaatse van rkm 226 gecompenseerd moeten zijn.



Figuur 2-4 Gebruikte benedenstroomse randvoorwaarde in de berekeningen (Qh-relatie bij Keizersveer)

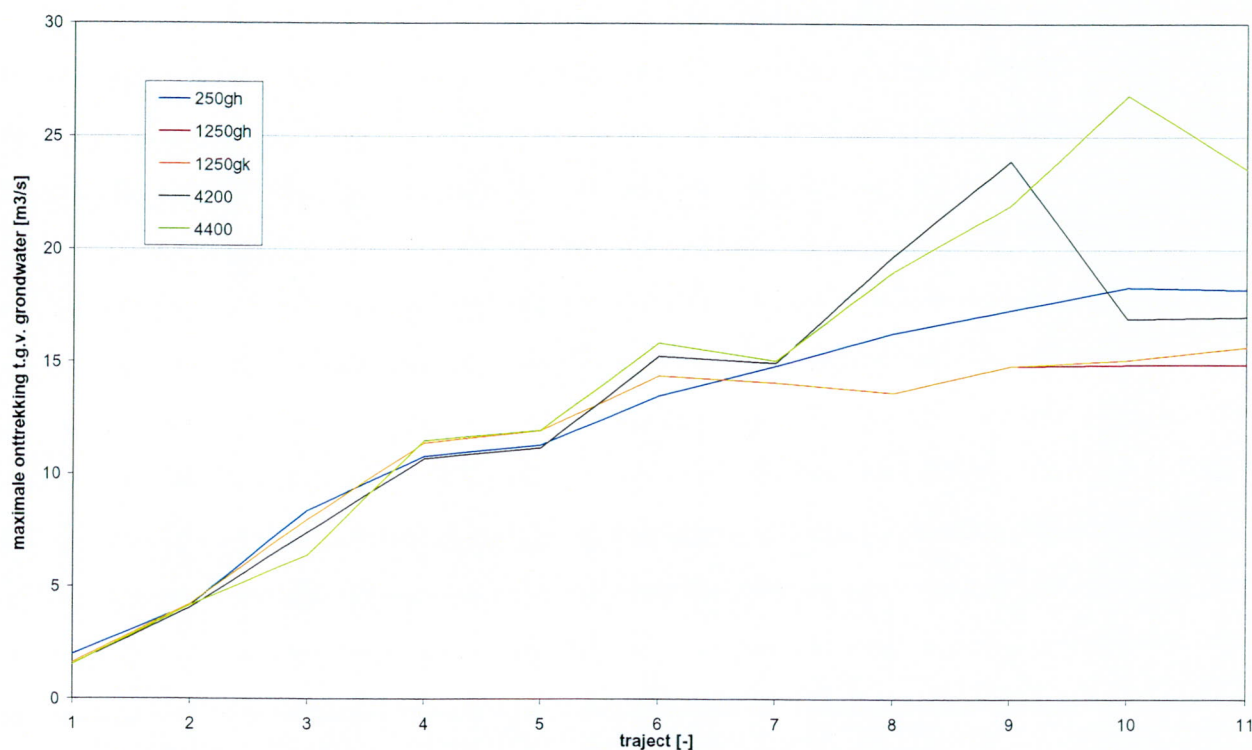
2.3.5 Grondwater

In tegenstelling tot WAQUA modelleert SOBEK wel het effect van grondwater. Om het grondwatereffect in beide sets berekeningen gelijk te krijgen, is voor elke situatie een tweetal

SOBEK-berekeningen gemaakt: één met grondwater en één zonder grondwater. In een elftal gebieden is de invloed van het grondwater op het debiet bepaald. Hiervan zijn uurlijkse tijdreeksen gemaakt welke zijn ingevoerd in WAQUA. De scheidingen tussen de gebieden liggen op de volgende SOBEK-kilometers:

rkm 8, rkm 23, rkm 37, rkm 51, rkm 64, rkm 73, rkm 90, rkm 104, rkm 120, rkm 139, rkm 158

In Figuur 2-5 staan de maximale onttrekkingen ten gevolge van grondwater op elf trajecten zoals berekend door SOBEK en ingevoerd is in WAQUA voor de situatie na Maaswerken. In Bijlage 3 staan alle tijdseries van de grondwaterlozingen in WAQUA weergegeven.



Figuur 2-5 Maximale onttrekkingen ten gevolge van grondwater op elf trajecten zoals berekend door SOBEK en ingevoerd is in WAQUA voor de situatie na Maaswerken

Op een viertal locaties worden tijdseries in deze rapportage afgebeeld (rkm 40, rkm 100, rkm 123 en rkm 160). Deze locaties zijn gekozen om de volgende redenen:

- rkm 40 ligt midden in het ingrepengebied van de Grensmaas;
- rkm 100 ligt aan het begin van het ingrepengebied van de Zandmaas;
- rkm 123 ligt ter plaatse van Broekhuizenvorst waar zich een groot omkaad gebied aan de linkeroever bevindt, op deze lokatie is het effect van het niet/wel meestromen van een omkaad gebied duidelijk zichtbaar;
- rkm 160 ligt aan het einde van het ingrepengebied van de Zandmaas en toont (met name) het effect op de doorlooptijden van de verschillende golven.

3. De SOBEK-berekeningen

3.1 Randvoorwaarden

De gebruikte randvoorwaarden staan beschreven in paragraaf 2.3.2 tot en met paragraaf 2.3.5.

3.2 De berekeningen

In onderstaande tabel staan de gemaakte berekeningen samengevat. Alle hier gepresenteerde resultaten betreffen berekeningen inclusief grondwater. De berekeningen zonder grondwater zijn enkel gebruikt om de WAQUA-berekeningen van de juiste randvoorwaarden te kunnen voorzien.

Tabel 3-1 Specificatie en naamgeving SOBEK-berekeningen

frequentie (afvoer)	1/250 (3275m ³ /s)	1/250+20% (3935m ³ /s)	1/1250 (3800m ³ /s)	1/1250+20% (4600m ³ /s)	(4200m ³ /s)	(4400m ³ /s)
Referentiesituatie (<i>refivm</i>)	S-ref 250gh	S-ref 250gk	S-ref 1250gh	S-ref 1250gk		
Na Maaswerken (2001.1)	S-ivm 250gh	S-ivm 250gk	S-ivm 1250gh	S-ivm 1250gk	S-ivm 4200	S-ivm 4400

De gebruikte SOBEK-schematisatie voor de referentiesituatie is *refivm*. De gebruikte SOBEK-schematisatie voor de situatie na Maaswerken is *2001.1* (zie paragraaf 1.5).

Het SOBEK-model bevat 31 met DGR-kades omkade gebieden met een kadehoogte gelijk aan de waterstand bij een 1/250-golf met grondwater plus 0,5 m. In SOBEK zijn deze gebieden gemodelleerd als retentiegebieden. Het SOBEK-model bevat twee echte retentiegebieden (De Lob van Gennep en Lateraalkanaal-West). Deze twee gebieden hebben een kadehoogte bepaald op basis van de maximale waterstand bij een 1/250-golf met grondwater. De kadehoogte van het Lateraalkanaal-West is gelijk aan de maximale waterstand bij een 1/250-golf met grondwater minus 30 cm; de kadehoogte van De Lob van Gennep is gelijk aan de maximale waterstand bij een 1/250-golf met grondwater.

Voordat de berekeningen uitgevoerd konden worden, is eerst de kadehoogte voor het Lateraalkanaal-West bepaald voor de schematisatie na Maaswerken (alle kades van de retentiegebieden exclusief Lob van Gennep zijn niet overstroombaar). Vervolgens is nog een berekening gemaakt met de aangepaste kadehoogte ter plaatse van Lateraalkanaal-West. Op basis van deze resultaten zijn hoogtes van de DGR-kades van de eerder genoemde 31 retentiegebieden bepaald.

Voordat de feitelijke berekeningen uitgevoerd konden worden, zijn de initiële condities voor elke situatie als volgt bepaald:

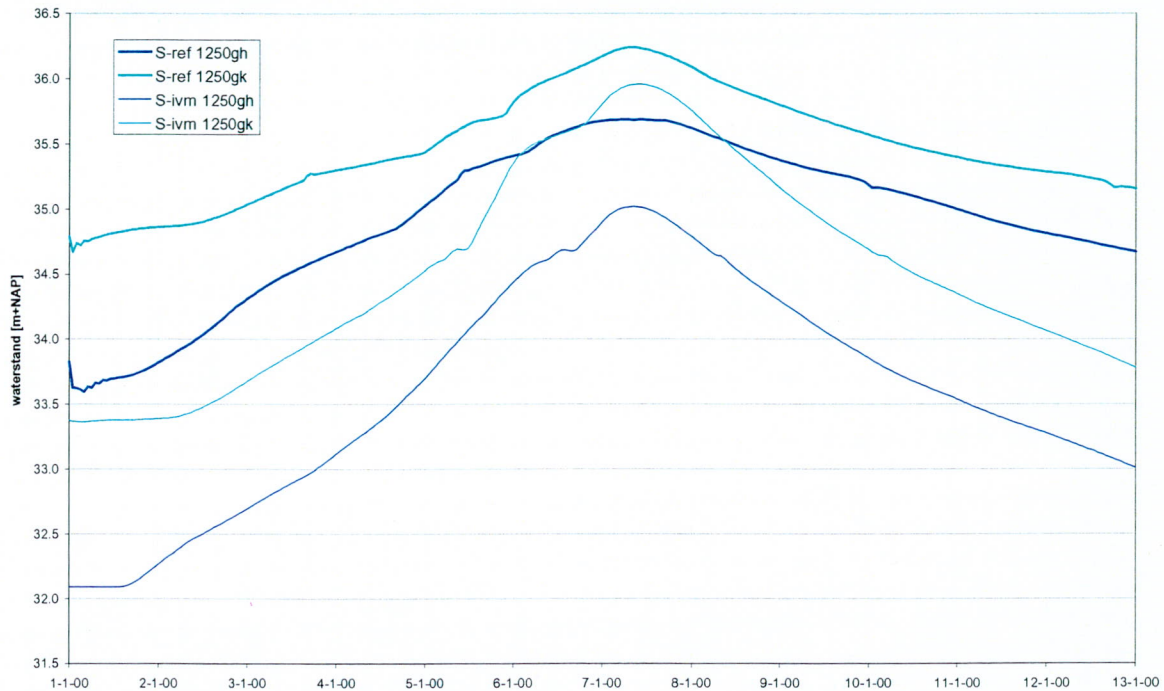
- het debiet in het gehele gebied is gelijk aan de eerste waarde van de tijdreeks van de randvoorwaarde.
- de waterstand per locatie is gelijk aan de berekende waterstand op basis van een constant debiet, met grootte gelijk aan de eerste waarde van de tijdreeks van de randvoorwaarde.

Om nog onduidelijke redenen convergeert één berekening niet. Het betreft de berekening *1250gk* zonder grondwater voor de situatie na Maaswerken. Het grondwatereffect voor deze situatie zoals dat door WAQUA gebruikt moet gaan worden is daarom bepaald uit dezelfde berekening voor de situatie na Maaswerken.

3.3 De resultaten

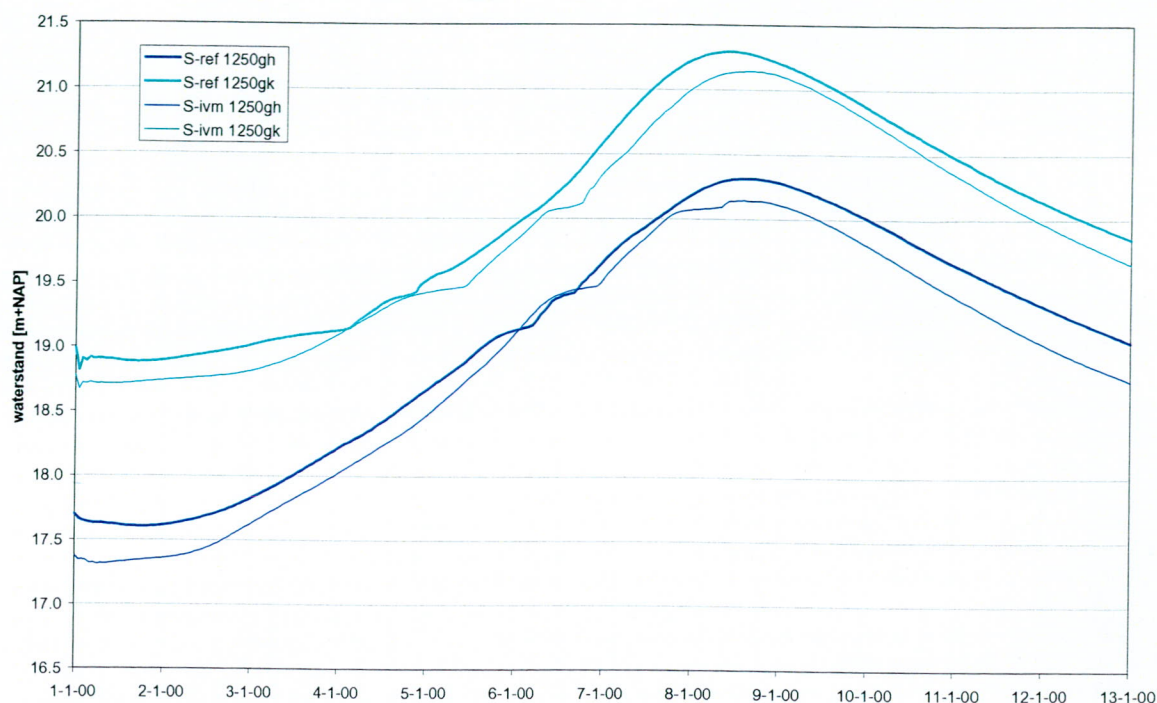
3.3.1 Tijdseries op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)

In onderstaande figuren staan de tijdseries in SOBEK voor de golven 1250gh ($Q_{\max}=3800 \text{ m}^3/\text{s}$) en 1250gk ($Q_{\max}=4600 \text{ m}^3/\text{s}$) afgebeeld op locaties rkm 40, 100, 123 en 160 voor de referentiesituatie (*S-ref*) en de situatie na Maaswerken (*S-ivm*). De dikke lijn is de referentiesituatie; de dunne lijn is de situatie na Maaswerken; de donkere lijn is de 'standaard' golf; de lichte lijn is de golf '+20%'.



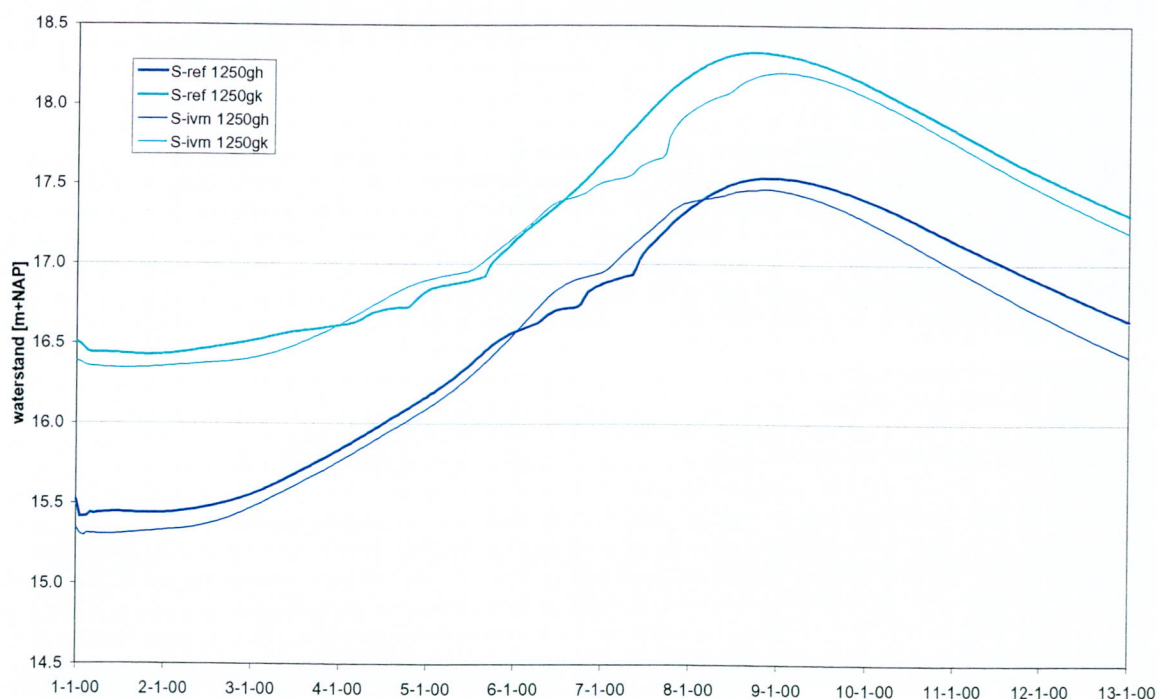
Figuur 3-1 Tijdseries van de waterstanden op rkm 40

De deuken in de tijdseries van *S-ivm*-berekeningen bij een waterhoogte van 34,7 m+NAP worden veroorzaakt door een grote plas op rkm 35 (met name vanwege een grote stroomvoerende breedte van een plas in cross-sectie 64 en ook door een grote stroomvoerende en -bergende breedte van een plas in cross-sectie 65). De afvlakking van de golf die te zien is in de tijdseries van de *S-ref*-berekeningen is onder andere het gevolg van een instabiel gedrag ter plaatse van cross-sectie 59 (rkm 31,6). In de Maas is hier is een relatief groot verhang.



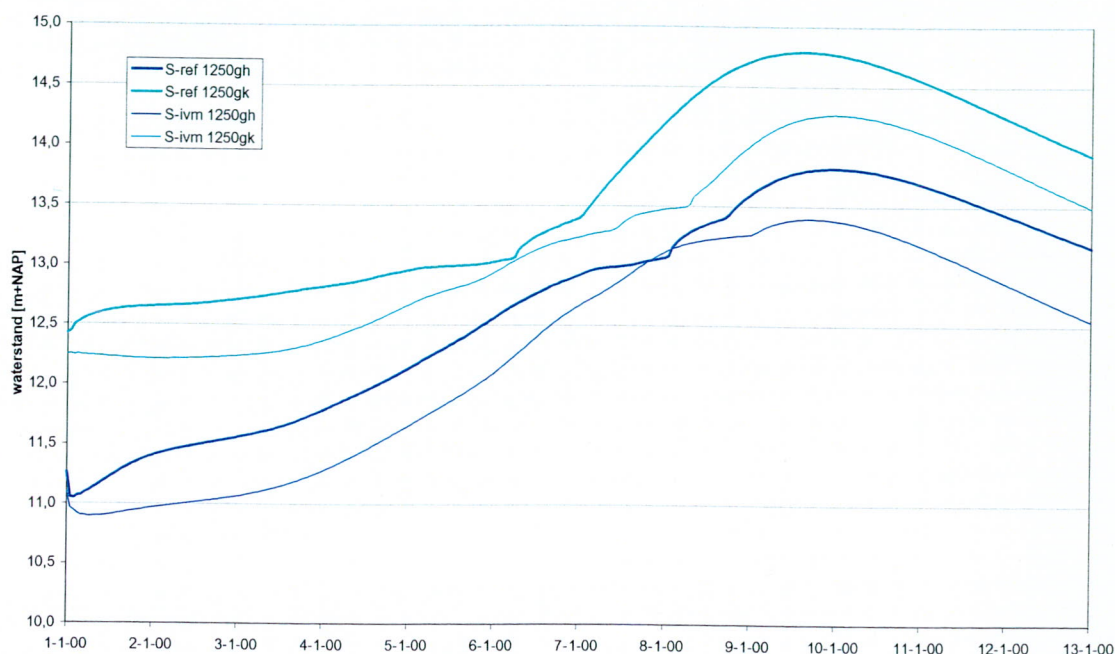
Figuur 3-2 Tijdsreeks van de waterstanden op rkm 100

De deuken in de tijdsreeks van de *S-ref*-berekeningen ter hoogte van 19,4 m+NAP worden veroorzaakt door volstromen van het omkade gebied Belfeld, dat zich direct bovenstrooms van rkm 100 bevindt. De knikken in de tijdreeksen van de *S-ivm*-berekeningen bevinden zich ter hoogte van 20,1 m+NAP. Dit effect is ook te zien in de WAQUA-resultaten.



Figuur 3-3 Tijdsreeks van de waterstanden op rkm 123

De knikken in de tijdreeksen van de *S-ref*-berekeningen worden onder andere veroorzaakt door het instromen van het omkade gebied Arcen (rkm 121, instroomhoogte 17,86 m+NAP). In de tijdseries van de *S-ivm*-berekeningen komt deze knik ook voor, maar ligt alleen iets hoger. Duidelijk is de afvlakking van de top van de hoogwatergolf te zien (boven 17,5 m+NAP) als het effect van de verhoging van de kades om de omkade gebieden te zien. Dit effect is ook te zien in de WAQUA-resultaten.



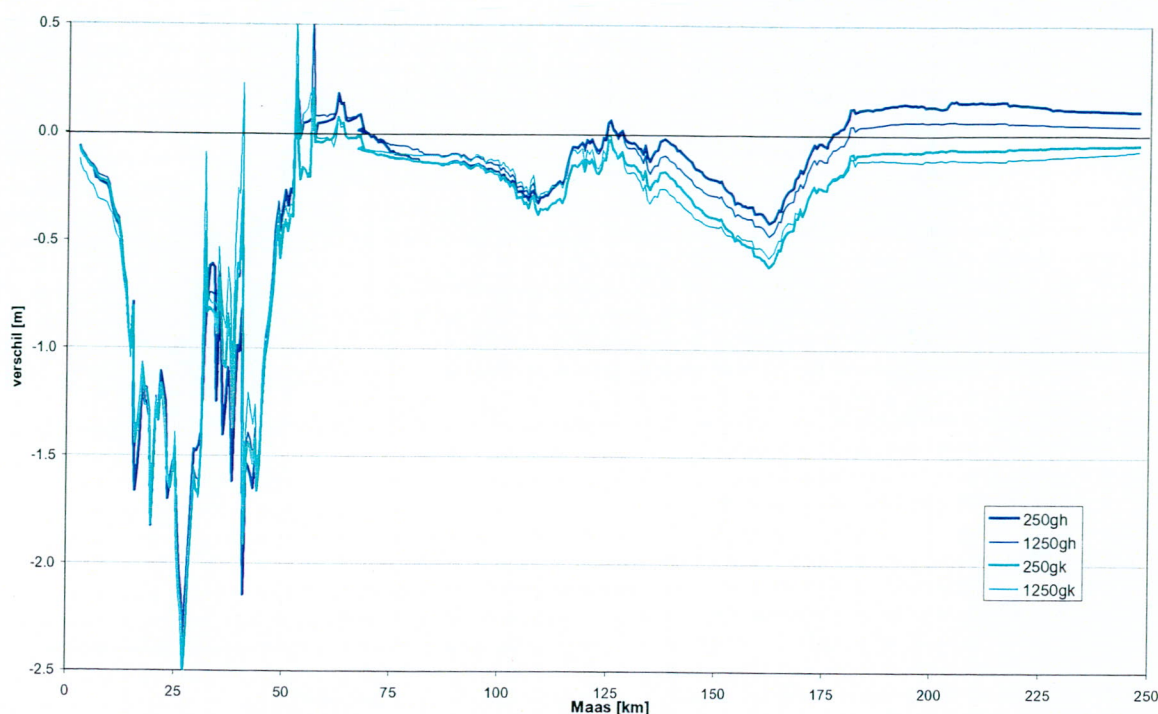
Figuur 3-4 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160

Rkm 160 ligt juist benedenstrooms van De Lob van Gennep. De knikken in de tijdseries van de *S-ref*- (13,1 m+NAP) en de *S-ivm*-berekeningen (12,9 m+NAP) zijn duidelijk te zien. Dit effect is ook te zien in de WAQUA-resultaten.

3.3.2 Maximale waterstanden

Figuur 3-5 laat het effect van de ingrepen van de Maaswerken zien ten opzichte van de referentiesituatie. De donkere lijn is de 'standaard' golf; de lichte lijn is de golf '+20%'; de dikke lijn is de 1/250-golf; de dunne lijn is de 1/1250-golf.

Bij de *S-ref-250gh*-berekening bleek dat de Lob van Gennep instroomde. In de corresponderende WAQUA-berekening blijft dit gebied echter droog. Dit wordt veroorzaakt doordat in de WAQUA-berekening de waterstanden juist onder de instroomhoogte van het gebied blijven, terwijl de waterstanden in SOBEK juist boven deze instroomhoogte uitkomen. Hierdoor neemt de afvoer (en dus de waterstanden) af ten opzichte van de WAQUA-berekening. Om toch een juiste vergelijking mogelijk te maken is een tweede SOBEK-berekening uitgevoerd waarin de Lob van Gennep niet-instroombaar is gemaakt. Van deze berekening worden de resultaten gepresenteerd. Bij de berekening met het BOS-IR moet hier op gelet worden.



Figuur 3-5 Effect van de ingrepen volgens SOBEK bij verschillende afvoergolven

Het effect van de ingrepen is duidelijk zichtbaar. In de Grensmaas dalen de waterstanden aanzienlijk; lokaal met ongeveer 2,5 m. In de Zandmaas dalen de waterstanden ook, maar beduidend minder; het maximale verschil is circa 0,6 m. Ter plaatse van Broekhuizenvorst komen de waterstanden in de situatie na Maaswerken zelfs iets boven die van de referentiesituatie. Dit wordt veroorzaakt doordat een deel van gebied na aanleg van de kaden niet meer in kan stromen. Benedenstrooms van de ingrepen (rkm) is het effect is afhankelijk van de afvoer. Bij lagere afvoeren (minder dan circa 3900 m³/s) ontstaat een verhoging van de waterstanden doordat de omkade gebieden in het niet bedijkte deel van de Maas niet instromen terwijl ze in de referentiesituatie wel instromen. Boven de circa 3900 m³/s stromen de omkade gebieden wel in en vindt een verlaging van de afvoer plaats ten opzichte van de referentiesituatie doordat de gebieden 'beter' instromen.

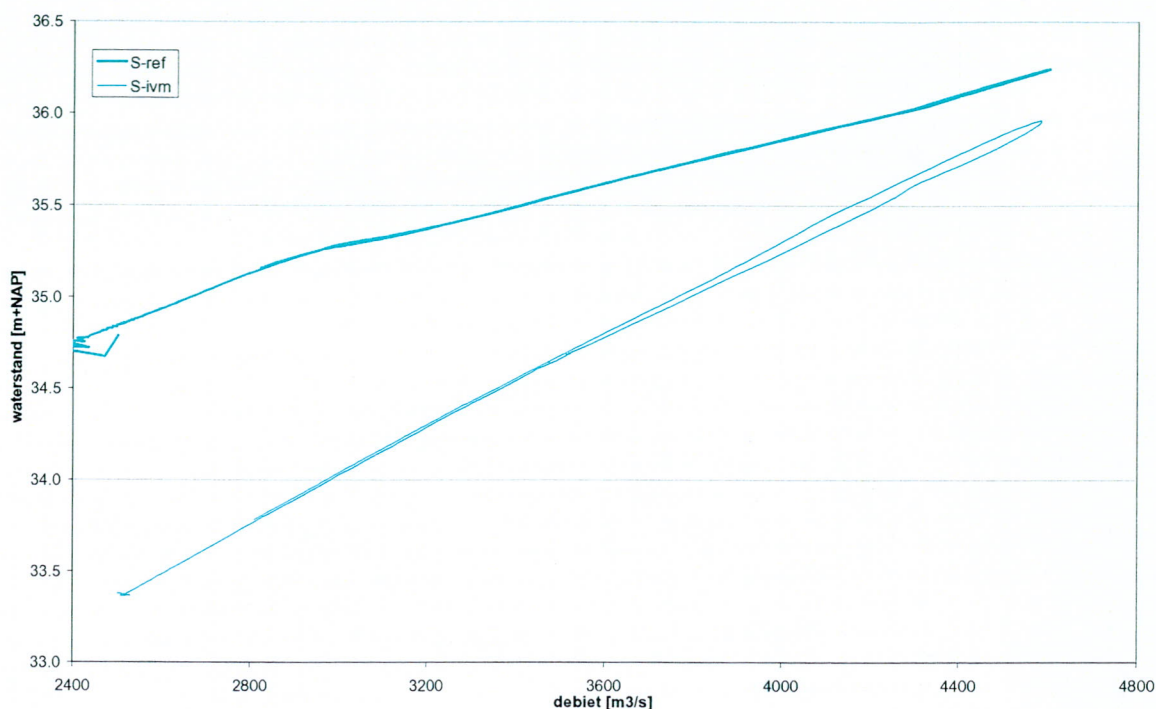
3.3.3 Qh-relaties op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)

In deze paragraaf staan de Qh-relaties op vier locaties afgebeeld. Bij bestudering de Qh-relaties op ieder uitvoerpunt van de SOBEK-berekeningen geldt het volgende:

- In de Grensmaas is in de Qh-relatie na uitvoering van De Maaserken gezakt. Bij hogere afvoeren neemt de waterstand bij de *S-ivm*-berekeningen ten opzichte van de *S-ref*-berekeningen sneller toe bij een toenemende afvoer.
- In de Zandmaas is de Qh-relatie na uitvoering van De Maaswerken gezakt. Bij hogere afvoeren neemt de waterstand bij de *S-ivm*-berekeningen ten opzichte van de *S-ref*-berekeningen over het algemeen niet sneller toe bij een toenemende afvoer.

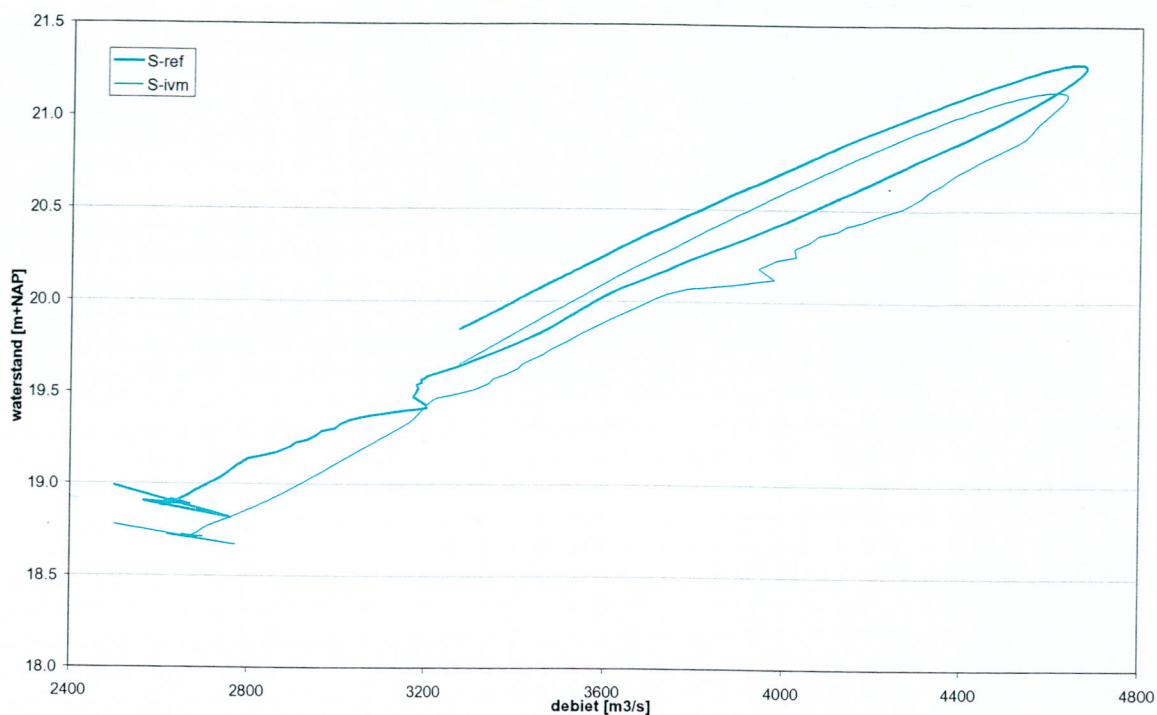
Een verklaring is dat de stroomvoerende breedte in de Grensmaas pas weer sterk toeneemt zodra de waterstand boven het oorspronkelijke weerdniveau uitkomt. In de *S-ivm*-situatie is dit bij hogere afvoeren dan in de *S-ref*-situatie. Bij de Zandmaas is de stroomvoerende breedte niet of nauwelijks aangepast.

In onderstaande figuren staan de Qh-relaties op 4 locaties (rkm 40, 100, 123 en 160) afgebeeld. De Qh-relaties zijn afgeleid van de resultaten van de *S-1250gk*-berekeningen. De dikke lijn is de referentiesituatie. De dunne lijn is de situatie na Maaswerken.



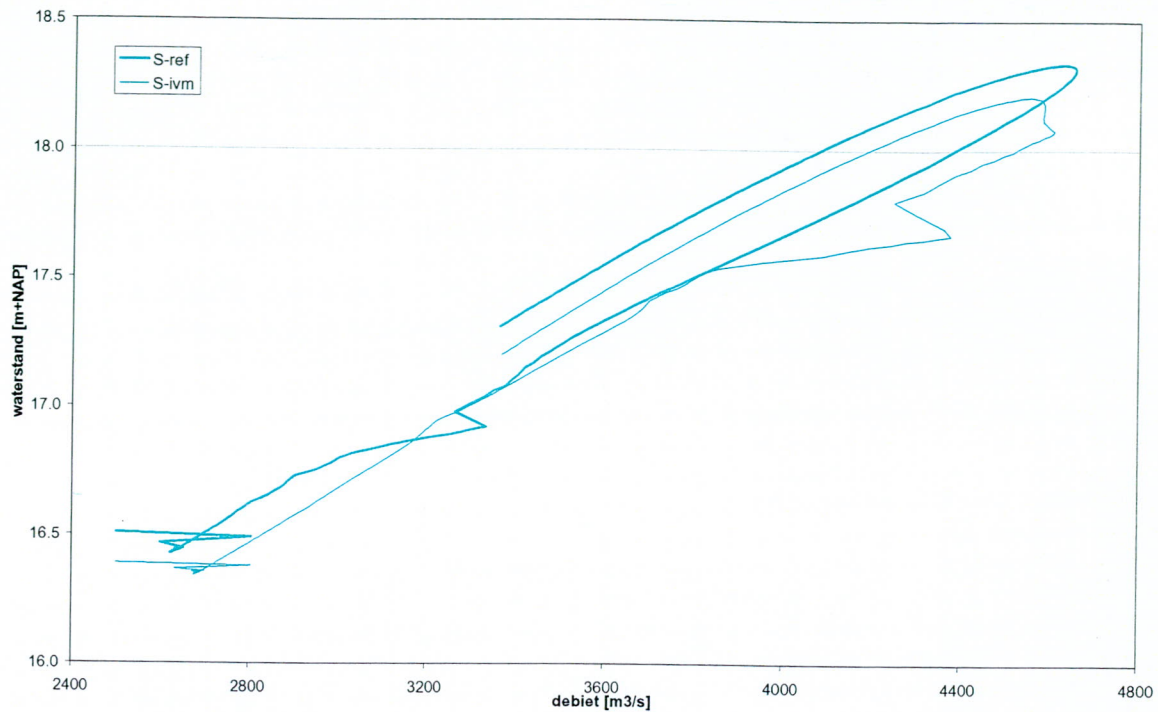
Figuur 3-6 Qh-relatie op rkm 40

De waterstanden bij gelijke afvoer zijn in de *S-ivm*-berekening lager dan in de *S-ref*-berekening. Rkm 40 ligt midden in het ingrepengebied van de Grensmaas. De maximale afvoer van de *S-ref*-berekening is hoger dan de *S-ivm*-berekening. De afvlakking van de hoogwatergolf in de tijdserie van de *S-ref*-berekening ter hoogte van 35,3 m+NAP komt terug in de Qh-relatie.



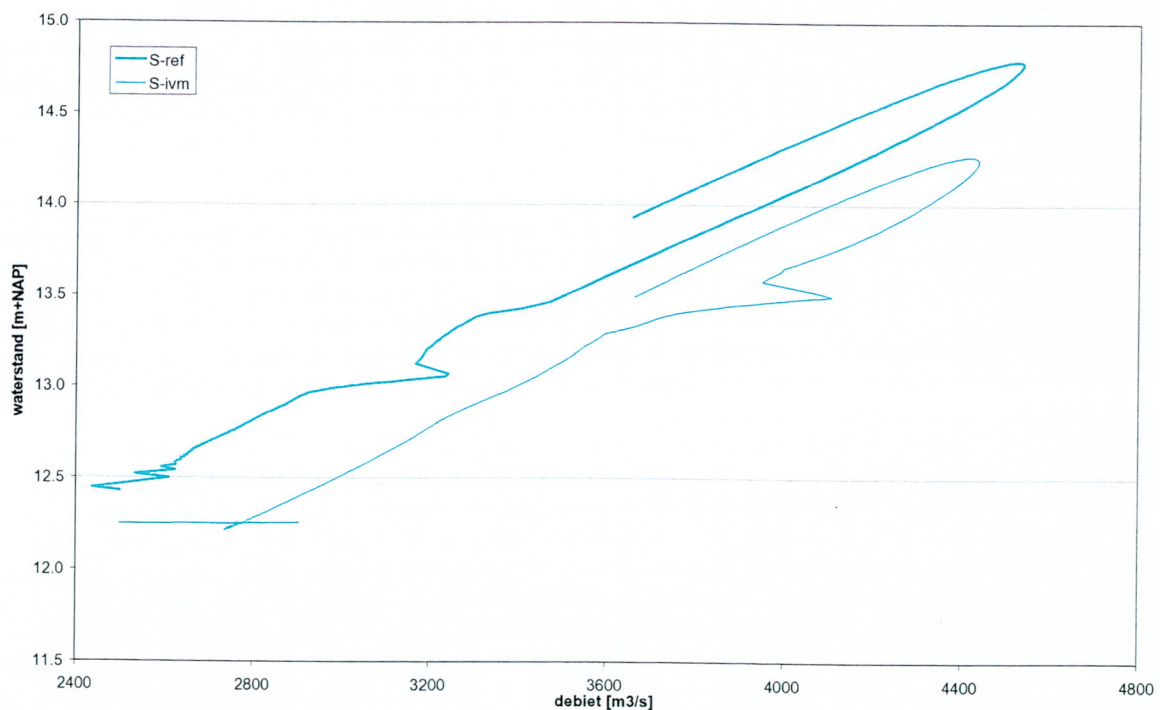
Figuur 3-7 Qh-relatie op rkm 100

Rkm 100 is juist bovenstrooms van het omkade gebied Baarlo. Op het moment dat de kades overstroomd en het omkade gebied volstroomt, daalt de stijging van de waterstand, terwijl de afvoer onveranderd toe blijft nemen. In de figuren van de Qh-relaties is dit effect duidelijk te zien. Nadat het gebied is volgestroomd, zal de waterstand weer met een 'normale' snelheid stijgen bij een toenemende afvoer. In de uitvoer van de SOBEK-berekeningen daalt de afvoer tijdelijk bij toenemende waterstand. De reden hiervoor is onduidelijk. Bij de *S-ref*-berekeningen is de kadehoogte 19,2 m+NAP; bij de *S-ivm*-berekeningen is de kadehoogte 19,9 m+NAP.



Figuur 3-8 Qh-relatie op rkm 123

Juist benedenstrooms van rkm 123 bevindt zich het omkade gebied Blitterswijk. De kadehoogte van dit gebied is bij de *S-ref*-berekeningen 16,7 m+NAP en bij de *S-ivm*-berekeningen 17,7 m+NAP. De effecten van dit het vollopen van dit gebied zijn duidelijk te zien in de figuur.



Figuur 3-9 Qh-relatie op rkm 160

Juist benedenstrooms van rkm 160 bevindt zich het omkade gebied Plasmolen. De kadehoogte van dit gebied is bij de *S-ref*-berekeningen 13,3 m+NAP en bij de *S-ivm*-berekeningen bij 12,9 m+NAP.

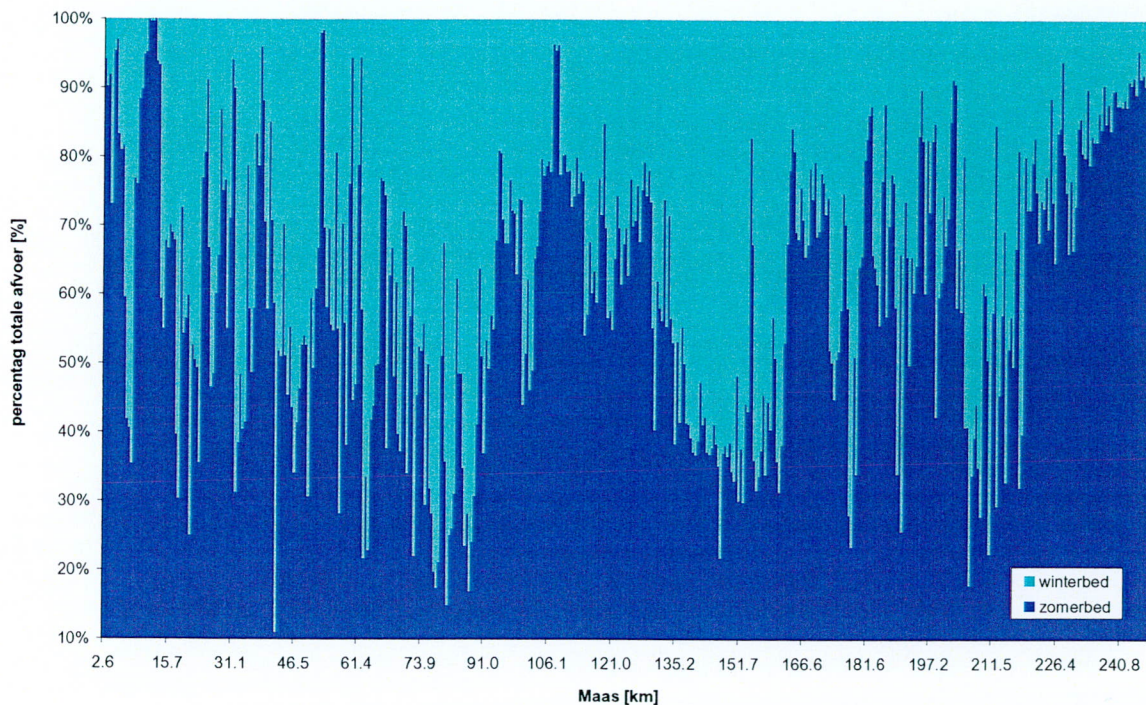
De effecten van dit het vollopen van dit gebied zijn duidelijk te zien in de figuur. In de Qh-relatie van de *S-ref*-berekening is tevens het vollopen van het bovenstrooms gelegen retentiegebied Lob van Gennep te zien.

3.3.4 Afvoerdeling bij maximaal debiet

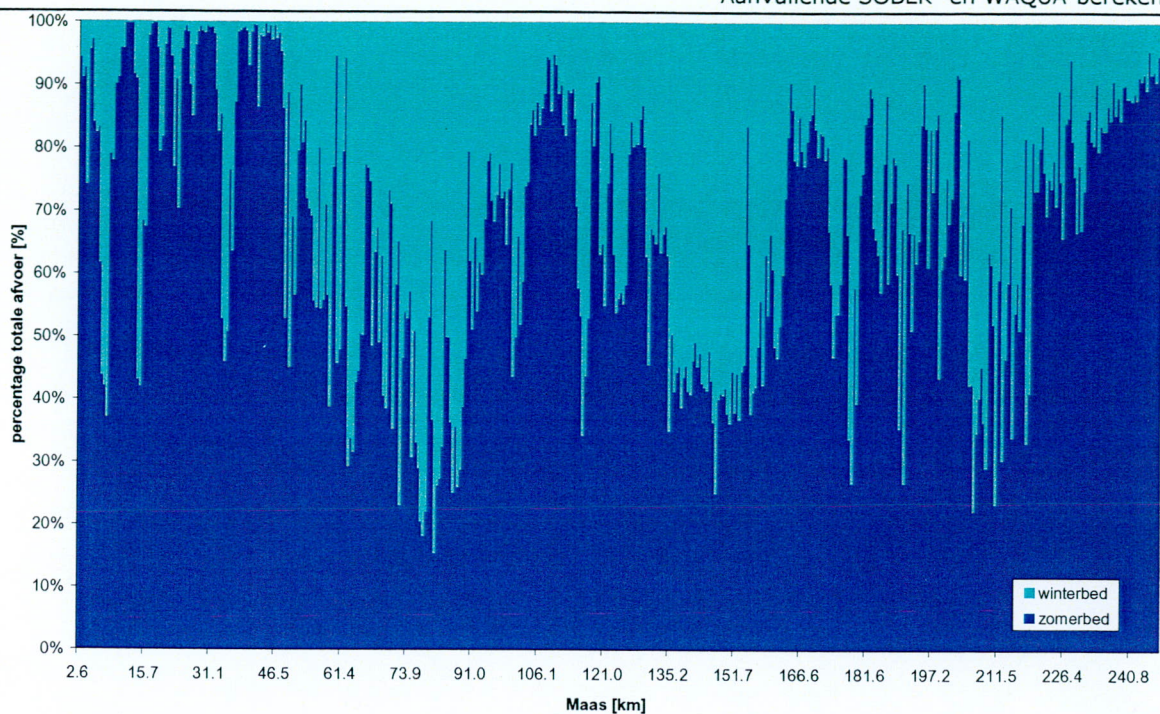
In onderstaande figuren staan de verdelingen van de afvoer over zomerbed en winterbed weergegeven als percentage van de totale afvoer voor *S-ref 1250gh*- en *S-ivm 1250 gk*-berekeningen en de breedtes van de hoofdgeulen, oeversecties en winterbedden voor deze situaties. Bij de berekening van de afvoer door het zomerbed zijn is de oeversectie bij de hoofdgeul opgeteld.

Zichtbaar is dat ten gevolge van de ingrepen een veel grotere afvoer door het zomerbed loopt. Dit wordt veroorzaakt door verbredingen van het zomerbed (zie ook Figuur 3-13), met name in de Grensmaas, en de verdiepingen (niet direct zichtbaar) in de Zandmaas.

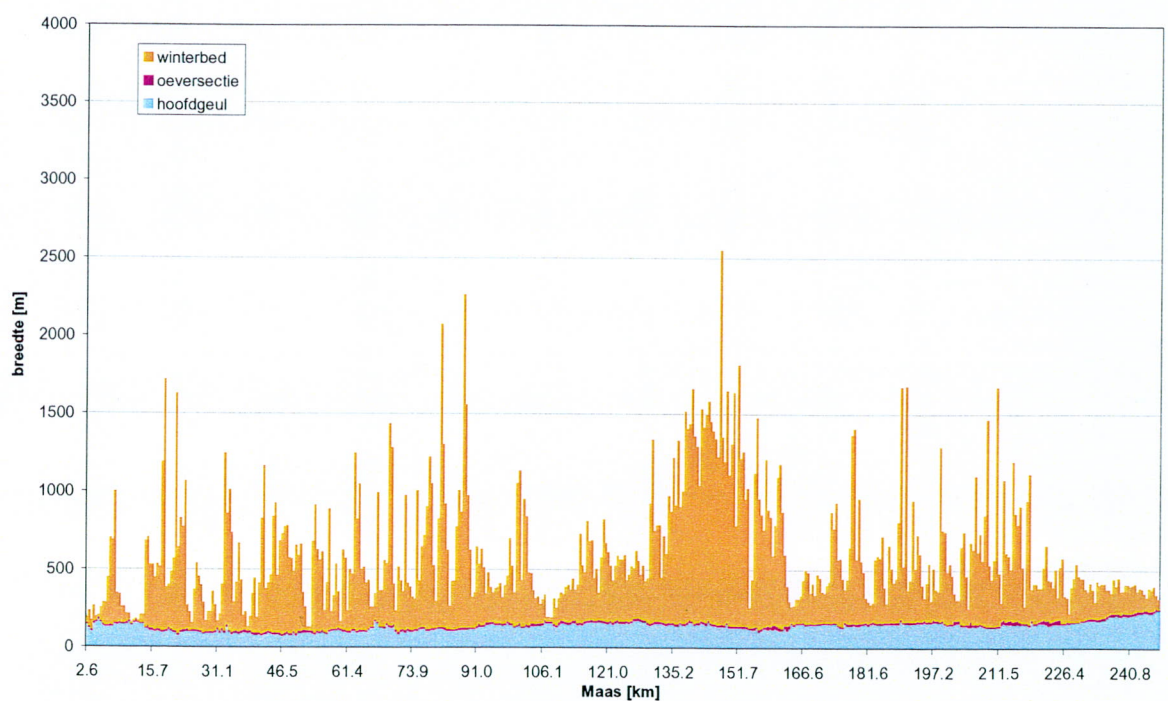
De verschillen tussen WAQUA en SOBEK worden in paragraaf 5.4 besproken.



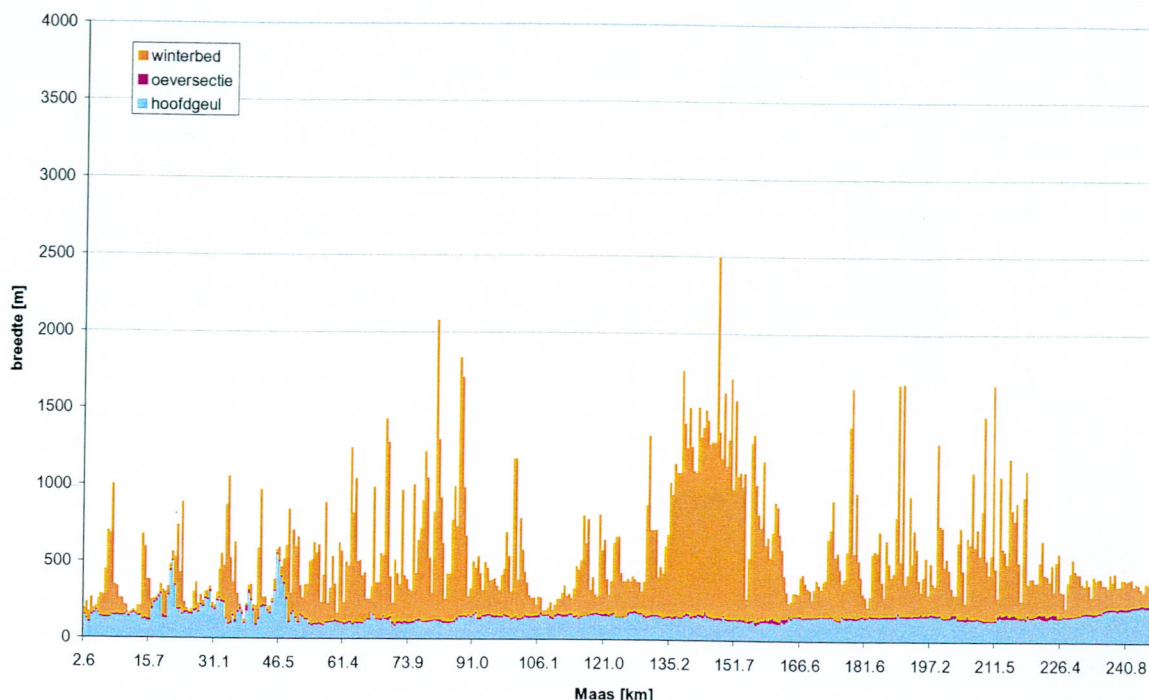
Figuur 3-10 Afvoerdeling referentiesituatie bij maximale afvoer



Figuur 3-11 Afvoerdeling situatie na Maaswerken bij maximale afvoer



Figuur 3-12 Breedte hoofdgeul, oeversectie en winterbed referentiesituatie



Figuur 3-13 Breedte hoofdgeul, oeversectie en winterbed situatie na Maaswerken

3.4 Conclusies

De ingrepen van de Maaswerken hebben duidelijk het gewenste effect op de waterstanden. Ten gevolge van het aanleggen van kaden rond bewoonde gebieden en/of eht verhogen ervan kunnen de waterstanden (lokaal) toenemen ten opzichte van de referentiesituatie. Het benedenstroomse effect van de ingrepen hangt af van de specifieke golf; lagere golven leiden tot een toename van de benedenstroomse waterstand terwijl hogere golven leiden tot een daling. Het effect van de ingrepen op de looptijd van de golf is zeer beperkt.

Ter plaatse van de retentiegebieden treedt in de Qh-relaties een daling van de afvoer bij stijgende waterstand op (zie bijvoorbeeld Figuur 3-9). De reden hiervoor is onduidelijk.

Lateraalkanaal-West zit als één retentiegebied in de SOBEK-schematisatie met (dus) ook maar één instroomopening (bij rkm 74). Dit wijkt af van de WAQUA-schematisatie waar er twee retentiegebieden zijn (Lateraalkanaal-West zuid en Lateraalkanaal-West noord) met ieder hun eigen instroomopening (rkm 68 respectievelijk rkm 84). Hoewel het lokale effect hierdoor verschillend is het totale volume dat geborgen wordt in het retentiegebied vrijwel hetzelfde. Zie verder Paragraaf 5.1 waarin dit verschil nader wordt uitgewerkt.

4. De WAQUA-berekeningen

4.1 Randvoorwaarden

De gebruikte randvoorwaarden staan beschreven in paragraaf 2.3.2 tot en met paragraaf 2.3.5.

4.2 De berekeningen

In onderstaande tabel staan de gemaakte berekeningen samengevat.

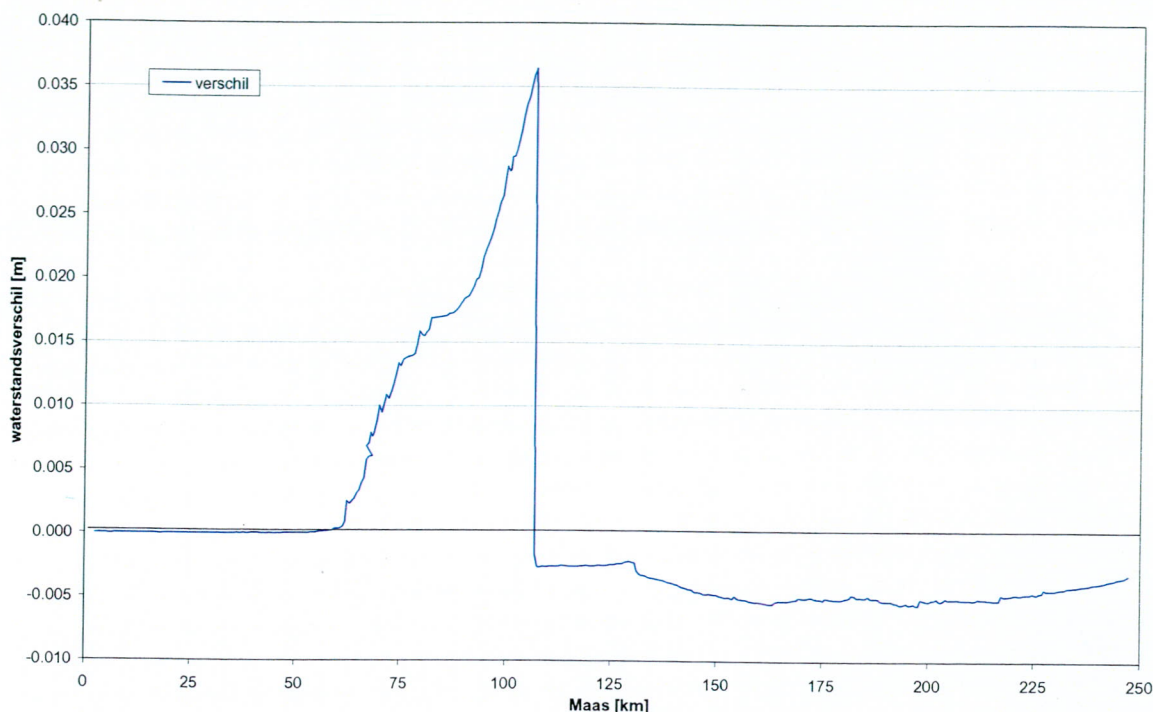
Tabel 4-1 Overzicht WAQUA-berekeningen

frequentie (afvoer)	1/250 (3275m ³ /s)	1/250+20% (3935m ³ /s)	1/1250 (3800m ³ /s)	1/1250+20% (4600m ³ /s)	(4200m ³ /s)	(4400m ³ /s)
Referentiesituatie (95dgr)	W-ref 250gh	W-ref 250gk	W-ref 1250gh	W-ref 1250gk		
Na Maaswerken (vo+s2)	W-ivm 250gh	W-ivm 250gk	W-ivm 1250gh	W-ivm 1250gk	W-ivm 4200	W-ivm 4400

De gebruikte WAQUA-schematisatie voor de referentiesituatie is 95dgr. De gebruikte WAQUA-schematisatie voor de situatie na de Maaswerken is vo+s2 (zie paragraaf 1.5).

Het WAQUA-model vo+s2 bevat twee retentiegebieden (Lateraalkanaal-West en de Lob van Gennepe) en circa 75 omkade gebieden. Deze gebieden zijn omkade met kades die een hoogte hebben van de waterstand behorend bij een 1/250-golf plus 0,5 m. Retentiegebied Lateraalkanaal-West is geoptimaliseerd voor een 1/250-golf, terwijl de Lob van Gennepe instroomt zoals de geometrie nu is (geen optimalisatie dus). Dit gebied gaat instromen zodra de waterstand bij rkm 156 circa 13,4 m+NAP is.

De SOBEK-berekeningen hebben een initiële conditie die afhankelijk is van de door te rekenen hoogwatergolf. De initiële conditie heeft onder andere invloed op de grondwaterinteractie, en daarmee de waterstanden. De initiële (waterstands)conditie is SOBEK is bepaald met een berekening met een stationaire afvoer. Omdat het voor de WAQUA-berekeningen niet praktisch is om tien verschillende initiële condities te maken (of om de WAQUA-berekeningen eerder te laten beginnen met een constante afvoer met de grootte gelijk aan de initiële conditie van de corresponderende SOBEK-berekening) is besloten om elke berekeningen met dezelfde initiële conditie te laten beginnen, namelijk 1250 m³/s bij Borgharen. Het effect van het vergroten van de initiële conditie van 1250 m³/s naar 1750 m³/s is zichtbaar in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Effect verhoging initiële condities zoals bepaald middels SOBEK-berekeningen

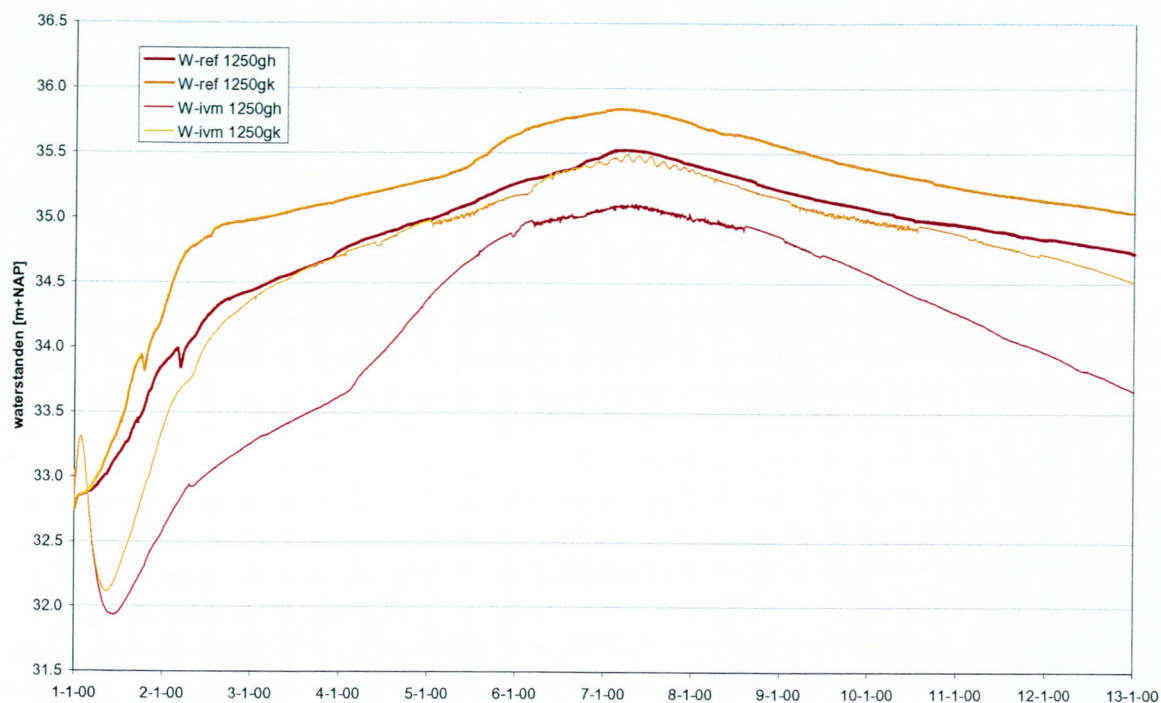
Het is opvallend dat lagere initiële condities niet automatisch leiden tot lagere maximale waterstanden. Tot kilometer 60 is het verschil nihil. Vervolgens neemt het verschil snel toe om maximaal 3,5 cm te worden iets benedenstrooms van stuw Belfeld (rkm 107). Hierna daalt het tot -0,5 cm om vervolgens vrijwel constant te blijven. De oorzaak van de grote sprong ter plaatse van kilometer 107 is onduidelijk. Ter verwachten is dat een verlaging van de initiële condities (voor de 250gh- en 1250gh-berekeningen) in orde van grootte gelijke effecten heeft op de maximale waterstanden. Gegeven de verschillen tussen de SOBEK- en WAQUA-modellen is in overleg met de opdrachtgever besloten om dit verschil te accepteren.

4.3 De resultaten

4.3.1 Tijdseries op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)

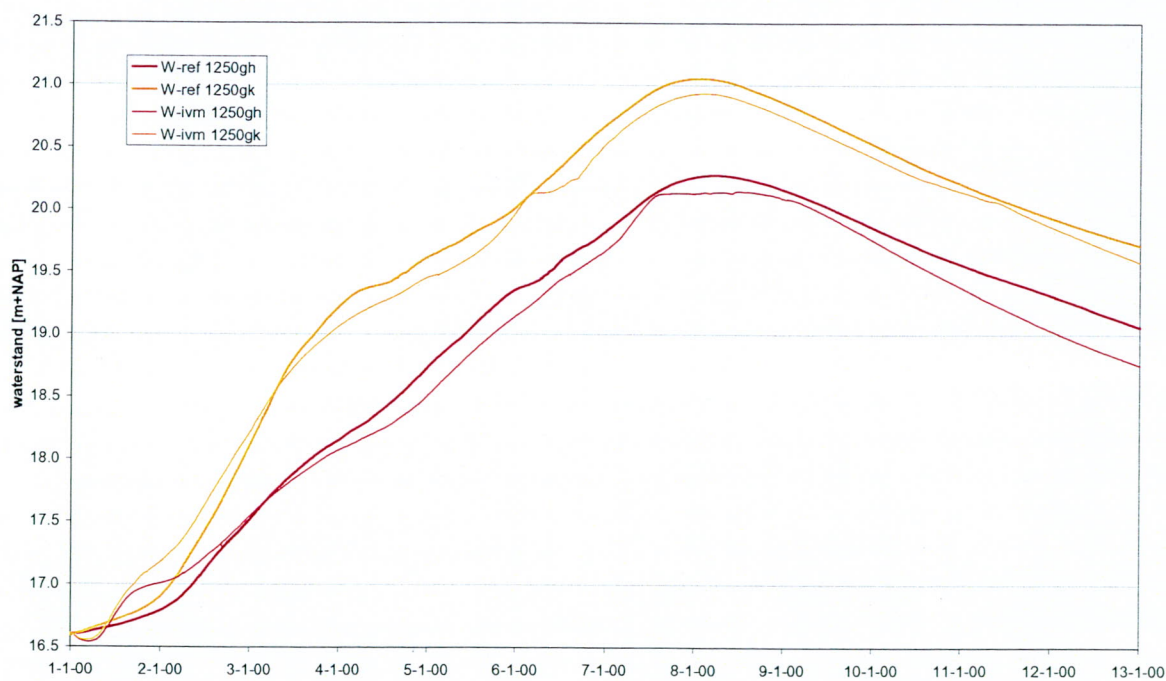
In onderstaande figuren staan de tijdseries in WAQUA voor 1250gh ($Q_{\max}=3800 \text{ m}^3/\text{s}$) en 1250gk ($Q_{\max}=4600 \text{ m}^3/\text{s}$) afgebeeld op locaties rkm 40, 100, 123 en 160 voor Maaswerken (*W-ref*) en na Maaswerken (*W-ivm*). De dikke lijn is de situatie voor Maaswerken; de dunne lijn is de situatie na Maaswerken; de donkere lijn is de 'standaard' golf; de lichte lijn is de golf '+20%'.

De 'knikken' in de tijdseries van de WAQUA-berekeningen hebben dezelfde oorzaken als in SOBEK. Verschillen in hoogtes worden veroorzaakt door verschillende kadehoogtes. De kadehoogtes voor beide modellen zijn niet gelijk, omdat ze bepaald zijn op basis van de maximale waterstanden van de *W-ivm* 250gh-berekeningen. Deze zijn voor beide modellen verschillend.



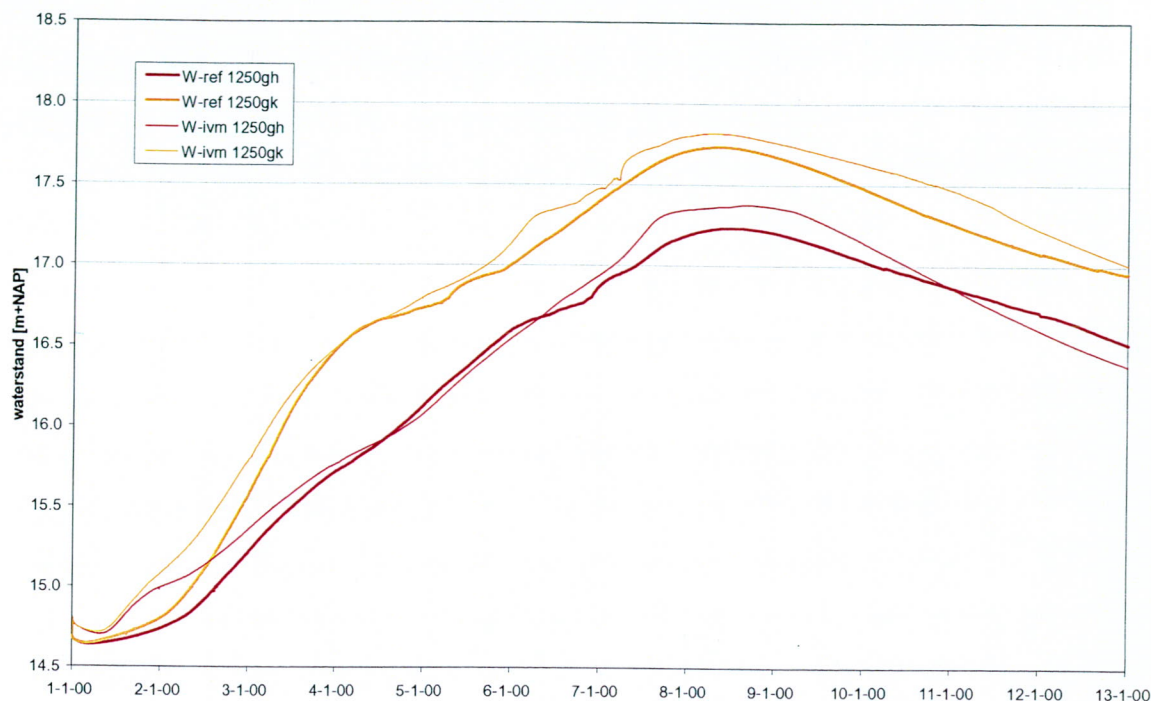
Figuur 4-2 Tijdseries van de waterstanden op rkm 40

Door de ingrepen van de Maaswerken zijn de initiële condities te hoog. Dit verschil is duidelijk te zien in de tijdseries van de *W-ivm*-berekeningen. Opvallend is dat in dit gebied de WAQUA-berekeningen een veel minder grote versteiling van de golfvorm laten zien dan de SOBEK-berekeningen (vergelijk met Figuur 3-1).



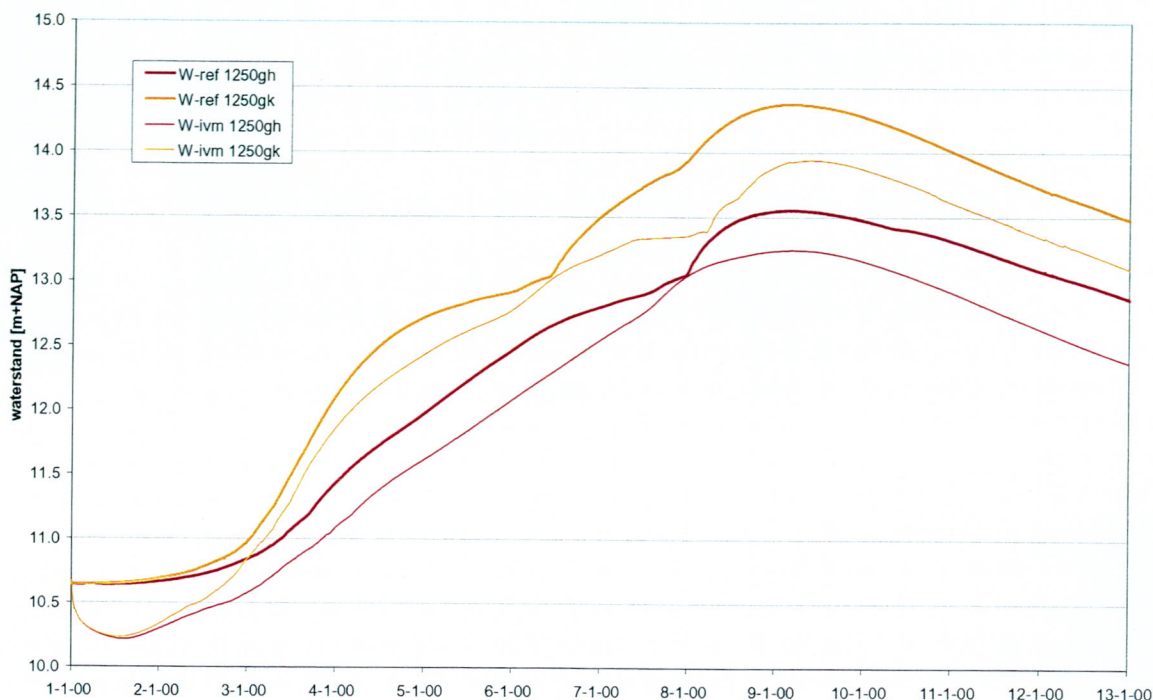
Figuur 4-3 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100

De deuken in de tijdseries van de *W-ref*-berekeningen ter hoogte van 19,4 m+NAP worden veroorzaakt door volstromen van het omkade gebied Belfeld, dat zich direct bovenstrooms van rkm 100 bevindt. De knikken in de tijdreeksen van de *W-ivm*-berekeningen bevinden zich ter hoogte van 20,1 m+NAP. Dit effect is ook te zien in de SOBEK-resultaten.



Figuur 4-4 Tijdseries van de waterstanden op rkm 123

De knikken in de tijdreeksen van de *W-ref*-berekeningen worden onder andere veroorzaakt door het instromen van het omkade gebied Arcen (rkm 121, instroomhoogte 17,86 m+NAP). In de tijdseries van de *W-ivm*-berekeningen komt deze knik ook voor, maar ligt alleen iets hoger. Duidelijk is de afvlakking van de top van de hoogwatergolf te zien (boven 16,7 m+NAP) als het effect van de verhoging van de kades om de omkade gebieden te zien. Dit effect is ook te zien in de SOBEK-resultaten.



Figuur 4-5 Tijdsreeks van de waterstanden op rkm 160

Rkm 160 ligt juist benedenstrooms van De Lob van Gennep. De knikken in de tijdsreeks van de *W-ref*- en de *W-ivm*-berekeningen zijn duidelijk te zien. Dit effect is ook te zien in de SOBEK-resultaten.

4.3.2 Maximale waterstanden

Het effect van de ingrepen is duidelijk zichtbaar. In de Grensmaas dalen de waterstanden aanzienlijk; lokaal met ongeveer 2,0 m. In de Zandmaas dalen de waterstanden ook maar beduidend minder; het maximale verschil is circa 0,5 m. Benedenstrooms van de Grensmaas (rkm 53) en ter hoogte van Broekhuizenvorst (rkm 125) komen de waterstanden boven die van de referentiesituatie. Dit wordt veroorzaakt doordat een deel van het winterbed na aanleg van de kaden niet meer mee kan stromen. Het benedenstroomse effect (voorbij rkm 175) is afhankelijk van de afvoer. Bij lagere afvoeren (minder dan circa 3900 m³/s) ontstaat een verhoging van de waterstanden doordat de omkade gebieden niet/nauwelijks instromen terwijl ze in de referentie situatie wel instromen. Boven de circa 4000 m³/s stromen de omkade gebieden wel in en vindt een verlaging van de afvoer plaats ten opzichte van de referentie situatie doordat de gebieden 'beter' instromen en ze als retentiegebieden gaan fungeren. De donkere lijn is de 'standaard' golf; de lichte lijn is de golf '+20%'; de dikke lijn is de 1/250-golf; de dunne lijn is de 1/1250-golf.

Zichtbaar is het grote effect van de ingrepen op de 250gk-berekening ten opzichte van de andere berekeningen tussen rkm 65 en rkm 125. Dit wordt veroorzaakt doordat de omkade gebieden bij deze afvoer vrijwel optimaal instromen. Bij een 1250gh-berekening ($Q_{\max} = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$) stromen de omkade gebieden juist niet in (met uitzondering van de gebieden tussen rkm 80 en 100). Bij de 250gk-berekening ($Q_{\max} = 3935 \text{ m}^3/\text{s}$) stroomt het merendeel van de omkade gebieden wel in en hierdoor ontstaat een optimaal effect (zowel verlaging ten gevolge van de maatregelen als ten gevolge van retentie).

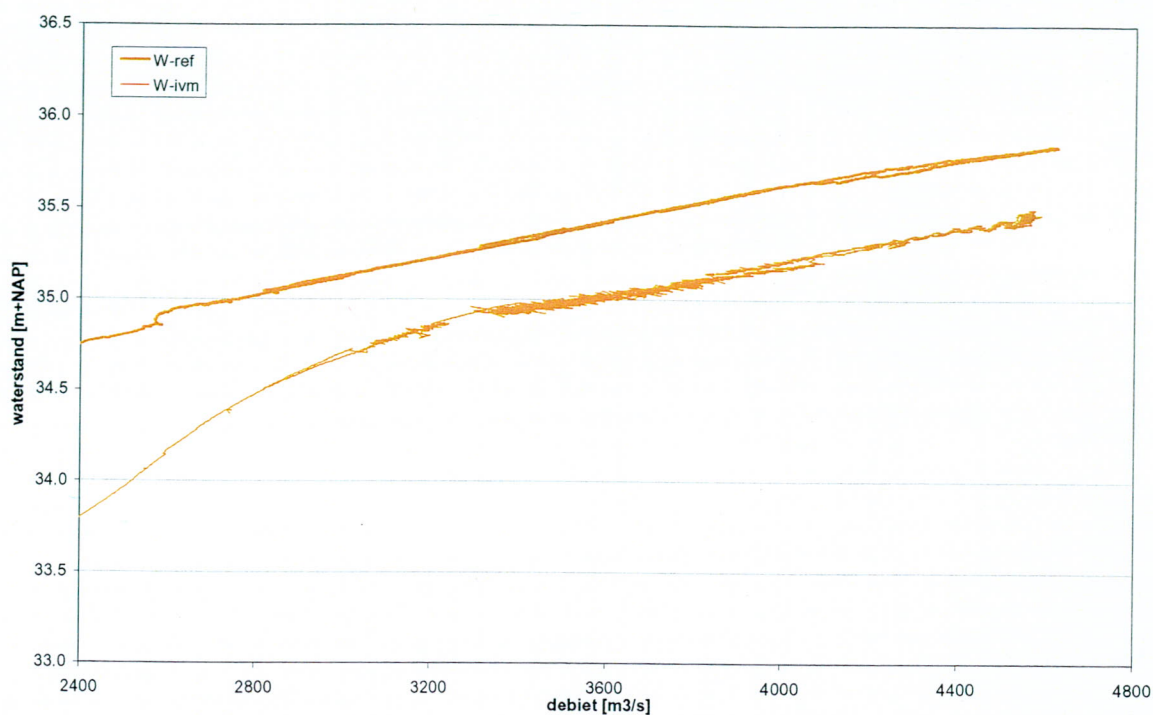


Figuur 4-6 Effect van de ingrepen volgens WAQUA bij verschillende golven

4.3.3 Qh-relaties op vier locaties (rkm 40, 100, 123 en 160)

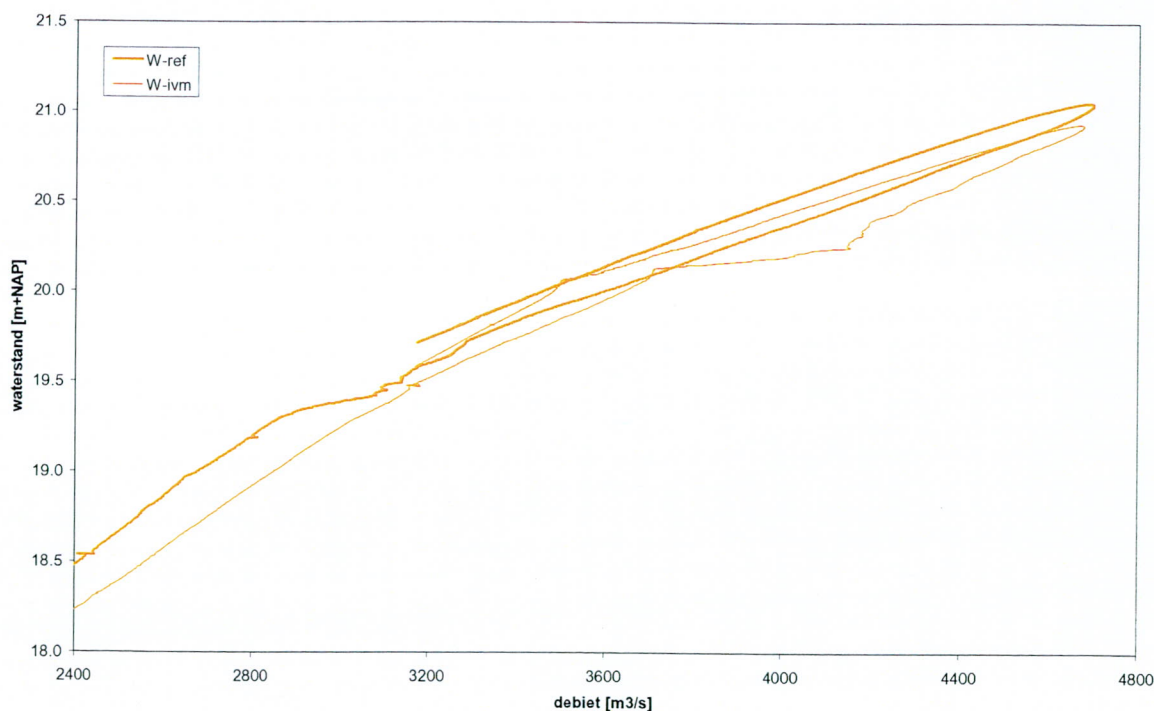
In onderstaande figuren staan de Qh-relaties op 4 locaties (rkm 40, 100, 123 en 160) afgebeeld. De Qh-relaties zijn afgeleid van de resultaten van de berekening met de 1250gk-golf. De dikke lijn is de referentiesituatie. De dunne lijn is de situatie na Maaswerken.

In de Figuur 4-5 tot en met Figuur 4-10 is het effect van de ingrepen duidelijk zichtbaar in de verlaging van de waterstanden. Ook het effect van het instromen van de retentiegebieden (zie bijvoorbeeld Figuur 4-10 bij $Q=3900 \text{ m}^3/\text{s}$) en de omkade gebieden (zie bijvoorbeeld Figuur 4-8 bij $Q=3900 \text{ m}^3/\text{s}$) kan duidelijk waargenomen worden.



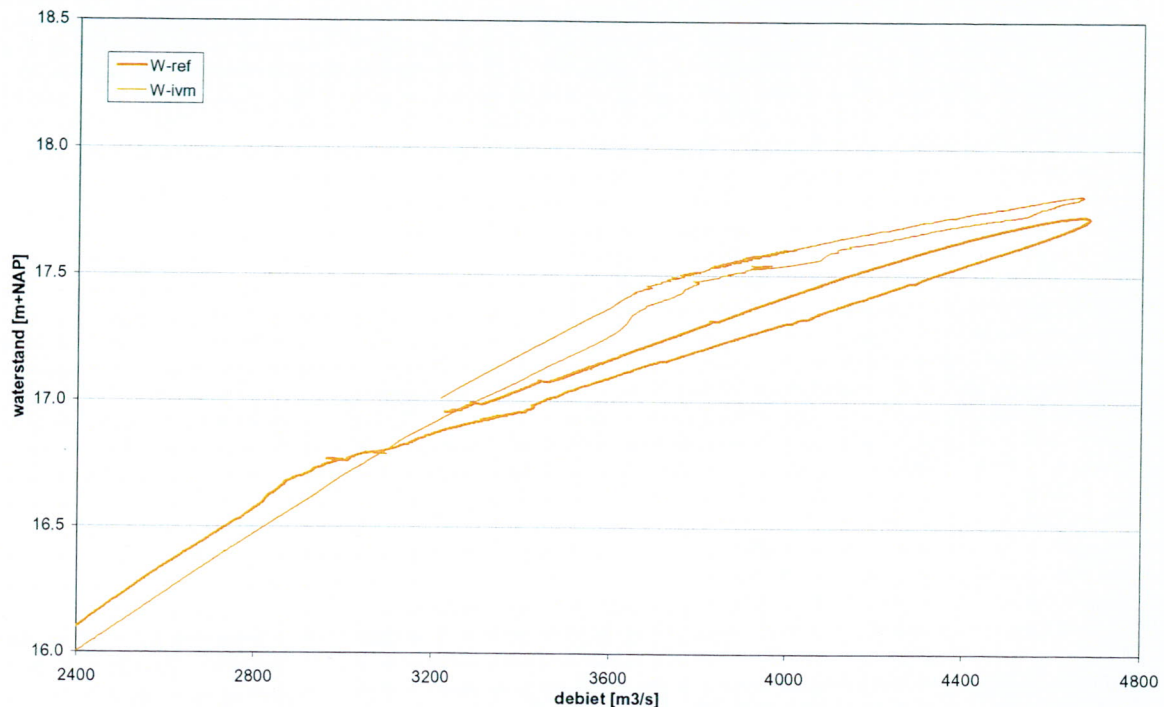
Figuur 4-7 Qh-relatie op rkm 40

De waterstanden bij gelijke afvoer zijn in de *W-ivm*-berekening lager dan in de *W-ref*-berekening. Rkm 40 ligt midden in het ingrepengebied van de Grensmaas. De maximale afvoer van de *W-ref*-berekening is hoger dan de *W-ivm*-berekening. Boven $Q=3200 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn de Qh-relaties van de berekeningen in beide situaties parallel. Duidelijk is het effect van de profielverruiming beneden $Q=3200 \text{ m}^3/\text{s}$ te zien.



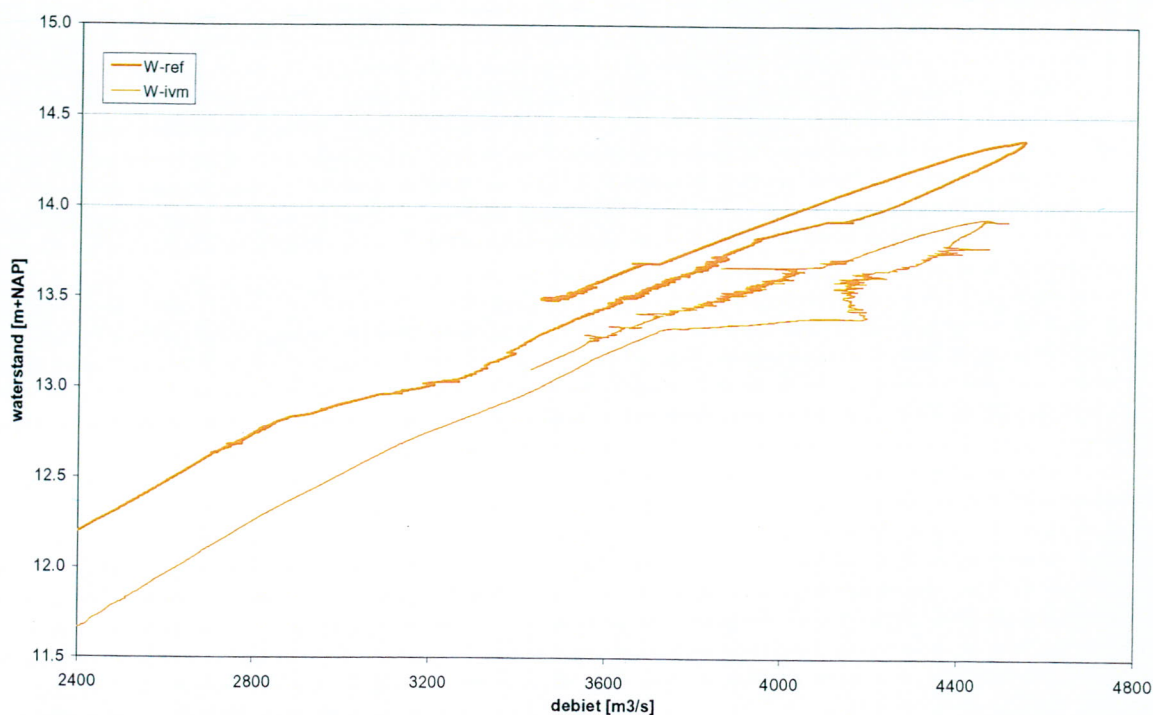
Figuur 4-8 Qh-relatie op rkm 100

Rkm 100 is juist bovenstrooms van het omkade gebied Baarlo. Op het moment dat de kades overstromen en het omkade gebied volstroomt, daalt de stijging van de waterstand, terwijl de afvoer onveranderd toe blijft nemen. In de Qh-relaties is dit effect duidelijk te zien. Nadat het gebied is volgestroomd, zal de waterstand weer met een 'normale' snelheid stijgen bij een toenemende afvoer.



Figuur 4-9 Qh-relatie op rkm 123

De 'knik' in de Qh-relatie en de maximale is bij de *W-ivm*-berekening hoger dan bij de *W-ref*-berekening. De oorzaak hiervan is dat de kades van het omkade gebied ter plaatse van Blitterswijck bij de *W-ivm*-schematisatie zijn hoger zijn, waardoor het dwarsprofiel smaller is. Hierdoor worden de waterstanden bij gelijke afvoer hoger zoals ook zichtbaar was in Figuur 4-6. Op het moment dat de omkade gebied alsnog onderloopt (bij een waterstand van circa 17,5m+NAP, overeenkomend met een afvoer van circa 3900 m³/s) vlakt de Qh-relatie in de berekening *W-ivm* sterk af.



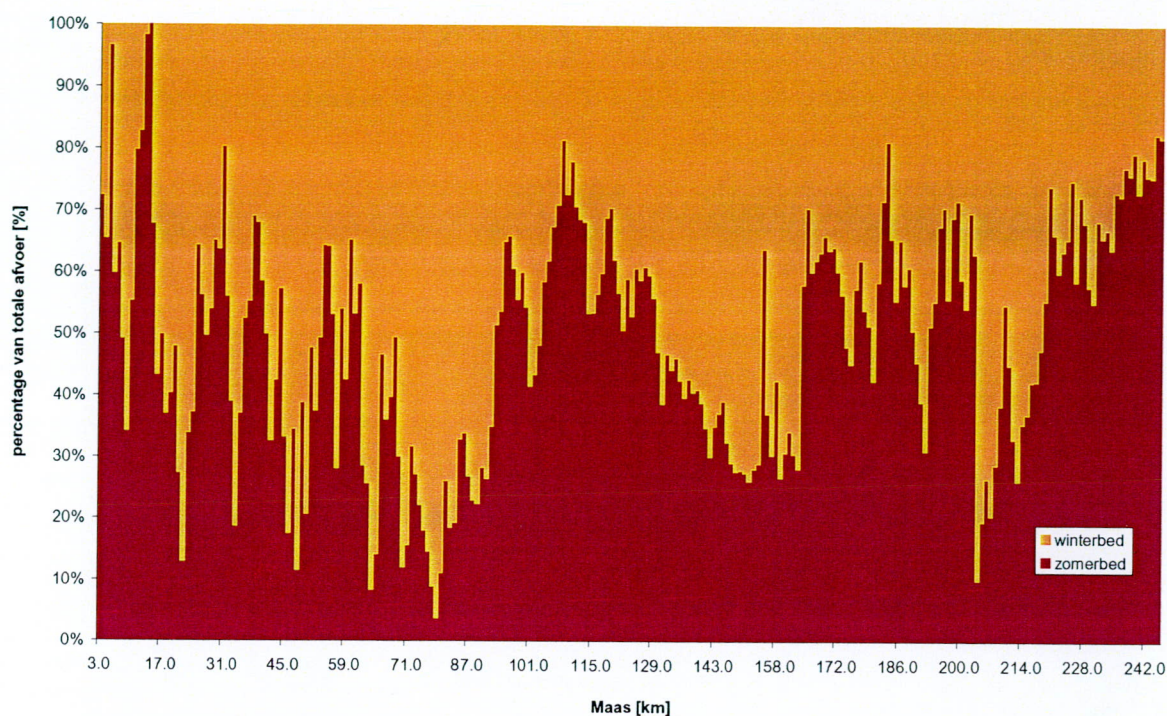
Figuur 4-10 Qh-relatie op rkm 160

Rkm 160 is juist benedenstrooms van de Lob van Gennep. Bij de resultaten van de *W-ref*-berekeningen zijn het vollopen van de omkade gebieden Plasmolen en Milsbeek en het retentiegebied Lob van Gennep te onderscheiden. Het effect van het vollopen van het retentiegebied Lob van Gennep is duidelijk te zien in de resultaten van de *W-ivm*-berekeningen (13,4 m+NAP). Het afnemen van de afvoer bij $Q=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ kan verklaard worden doordat de cross-sectie waarover het debiet berekend wordt niet over de gehele breedte van de rivier loopt (zie ook figuur uit Bijlage 1).

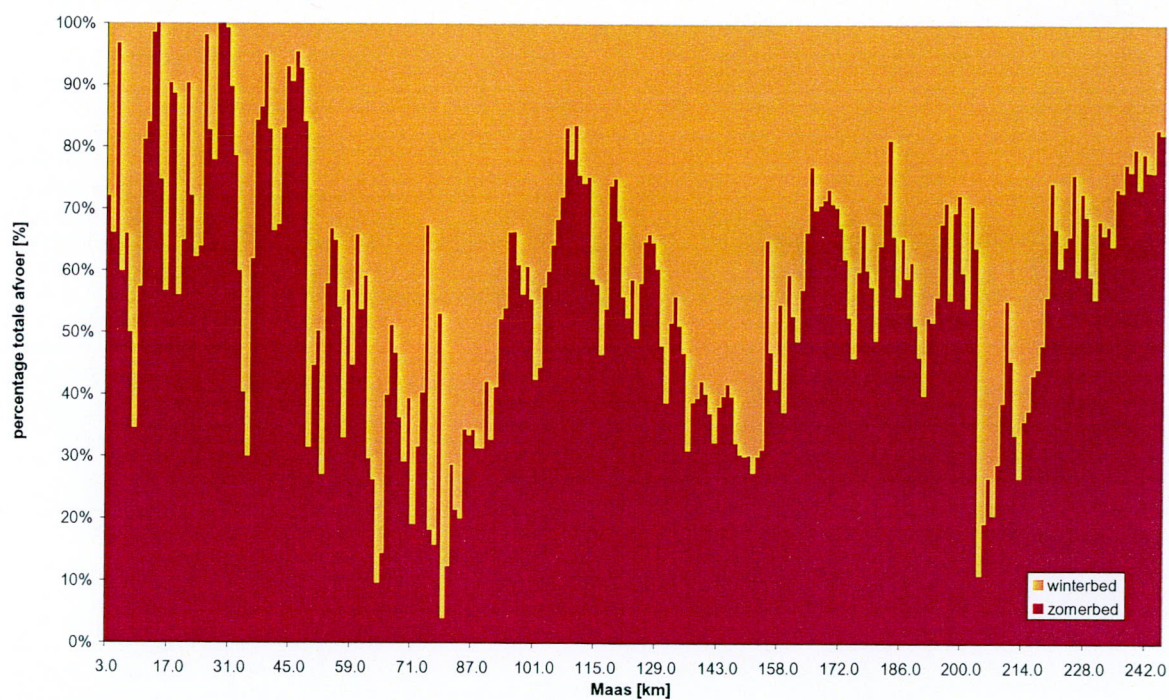
4.3.4 Afvoerverdeling bij maximaal debiet

In onderstaande figuren staan de verdelingen van de afvoer over zomerbed en winterbed weergegeven als percentage van de totale afvoer voor de referentiesituatie en de situatie na Maaswerken en de corresponderende breedtes van het zomer- en winterbed.

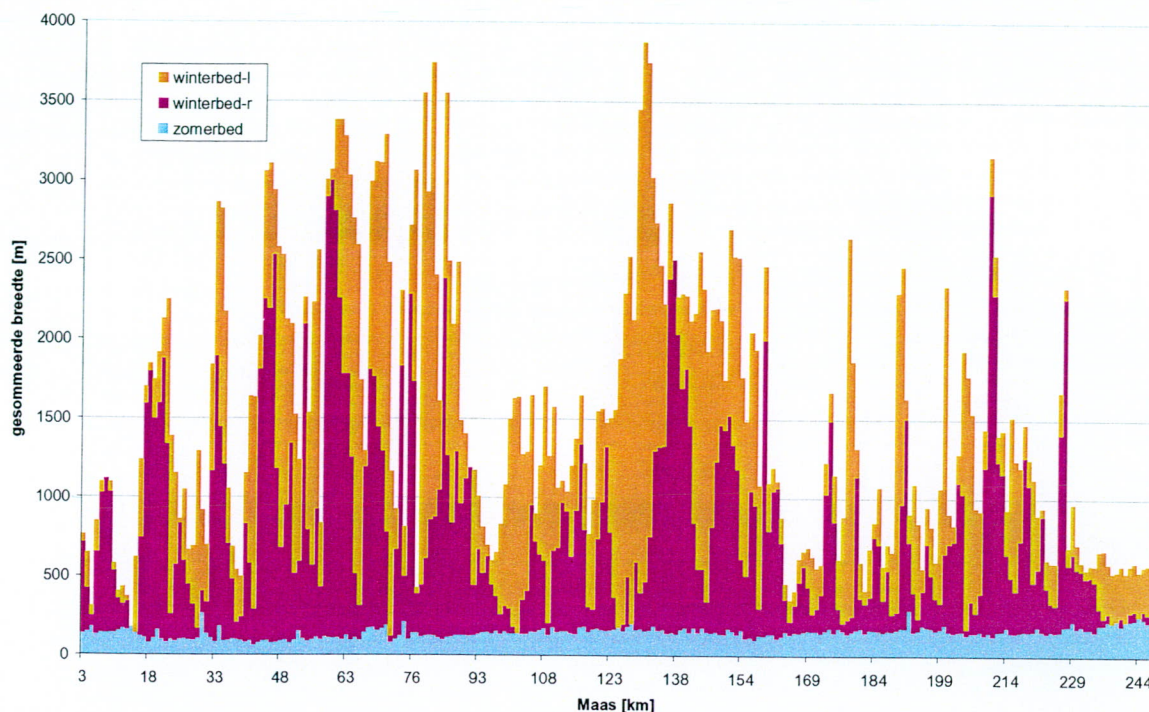
De verschillen tussen WAQUA en SOBEK worden in paragraaf 5.4 besproken.



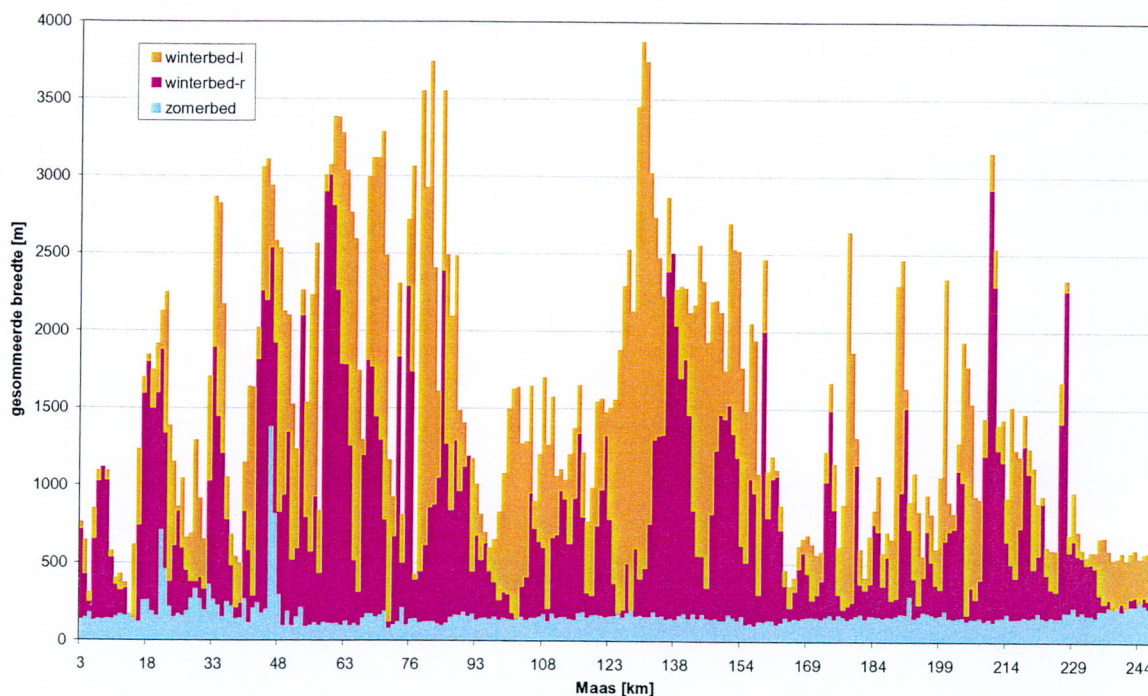
Figuur 4-11 Afvoerverdeling referentiesituatie bij maximale afvoer



Figuur 4-12 Afvoerverdeling situatie na de Maaswerken bij maximale afvoer



Figuur 4-13 Breedte hoofdgeul, winterbed-links en winterbed-rechts referentiesituatie



Figuur 4-14 Breedte hoofdgeul, winterbed-links en winterbed-rechts situatie na Maaswerken

4.4 Conclusies

De ingrepen van de Maaswerken hebben duidelijk effect op de waterstanden. Ten gevolge van het aanleggen van kaden rond bewoonde gebieden kunnen de waterstanden (lokaal) toenemen ten opzichte van de referentie situatie. Het benedenstroomse effect van de ingrepen hangt af van de specifieke golf; lagere golven leiden tot een toename van de benedenstroomse waterstand terwijl

hogere golven leiden tot een daling. Het effect van de ingrepen op de looptijd van de golf is zeer beperkt.

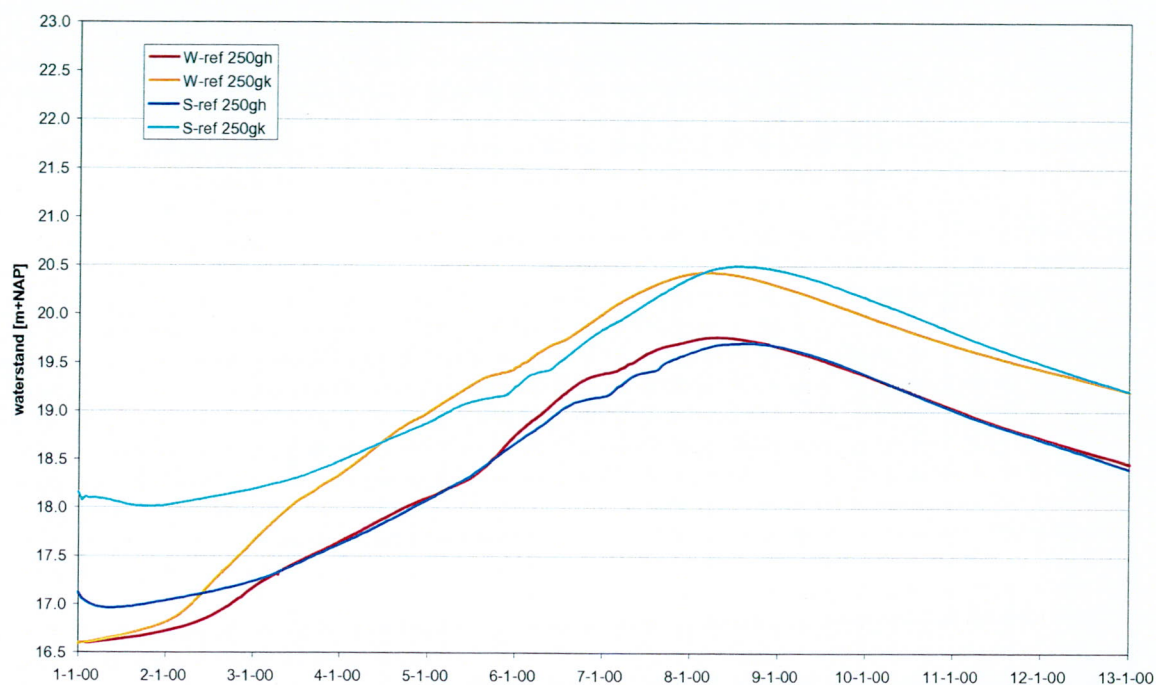
Het effect van het verhogen van de kaden (de 'sluitstuk kaden') is duidelijk zichtbaar in het later onderstromen van de omkade gebieden (zie bijvoorbeeld Figuur 4-9).

Een vergelijking met de SOBEK-resultaten vindt plaats in het volgende hoofdstuk.

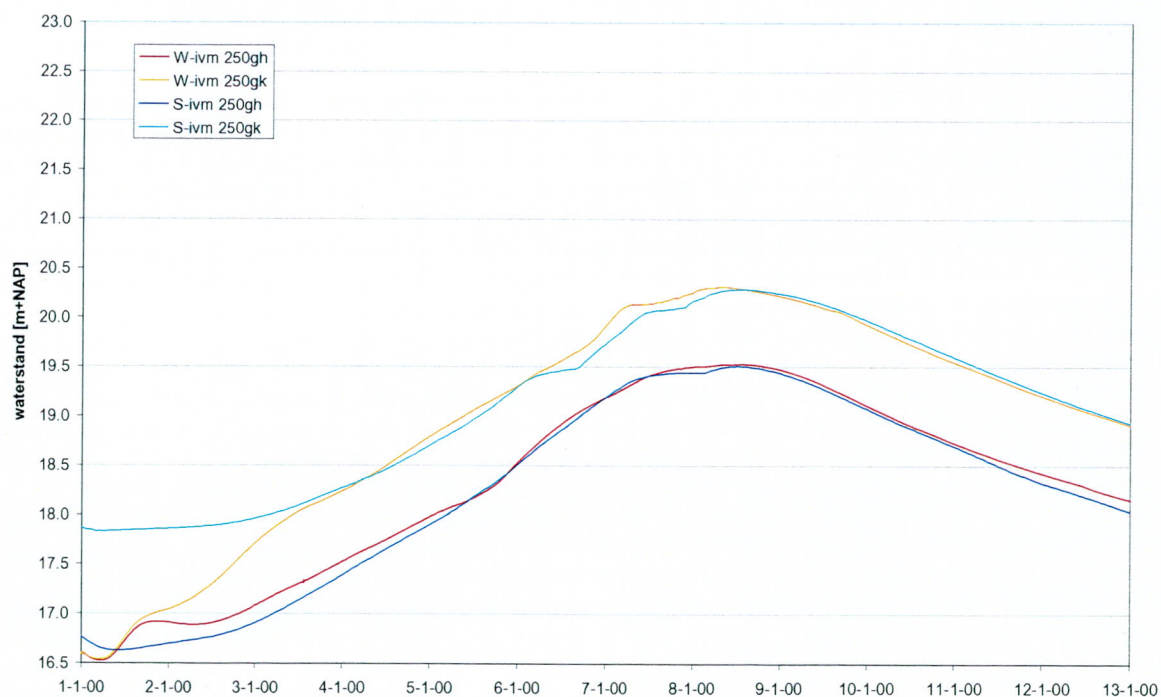
5. Vergelijking SOBEK- en WAQUA-resultaten

5.1 Tijdseries op twee locaties (rkm 100 en 160)

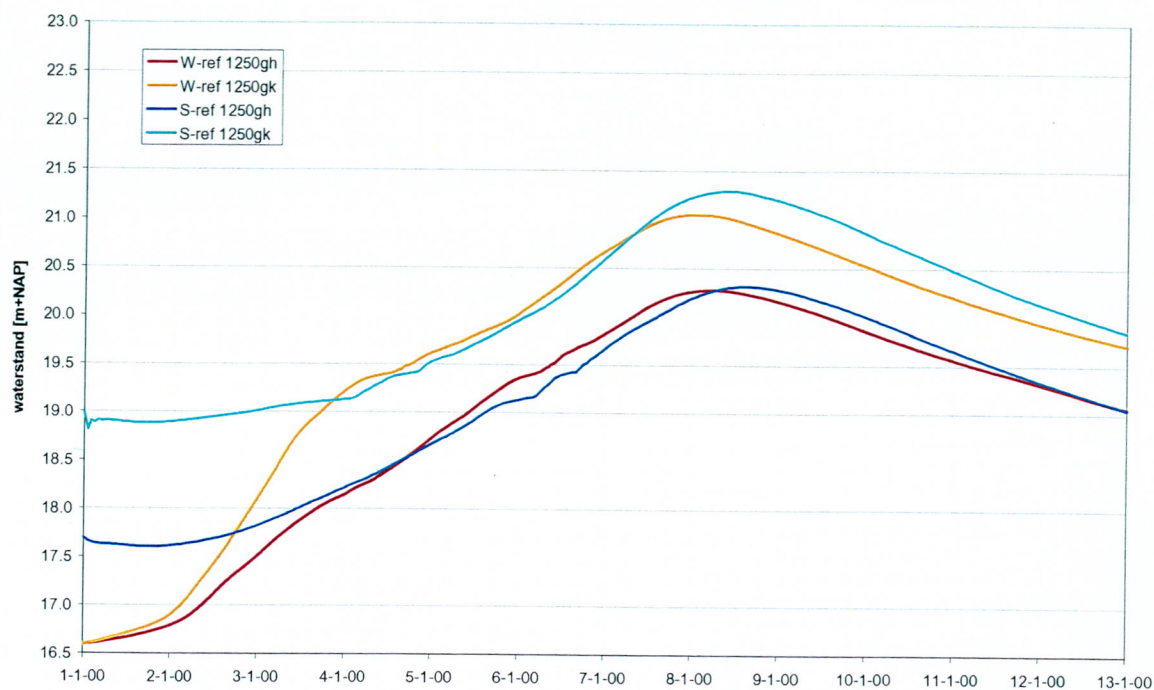
In onderstaande figuren staan de tijdseries in WAQUA en SOBEK voor 250gh, 250gk, 1250gh en 1250gk afgebeeld voor de referentiesituatie (*ref*) en de situatie na Maaswerken (*ivm*).



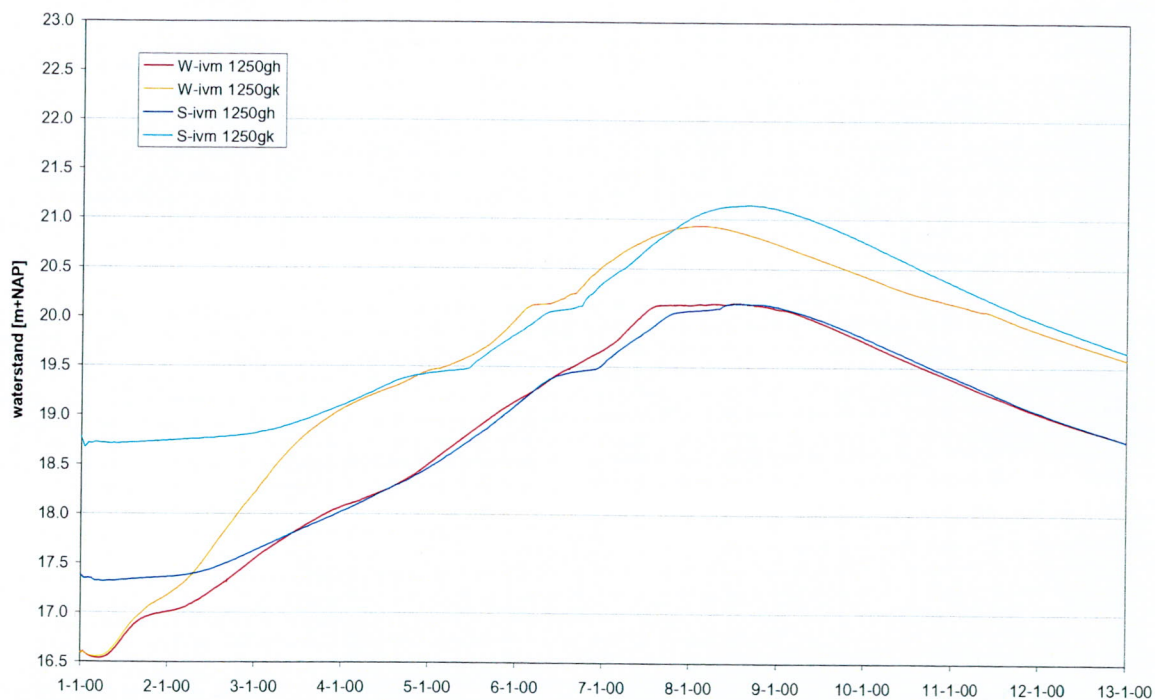
Figuur 5-1 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100 voor de ref-250gh en -gk-berekeningen



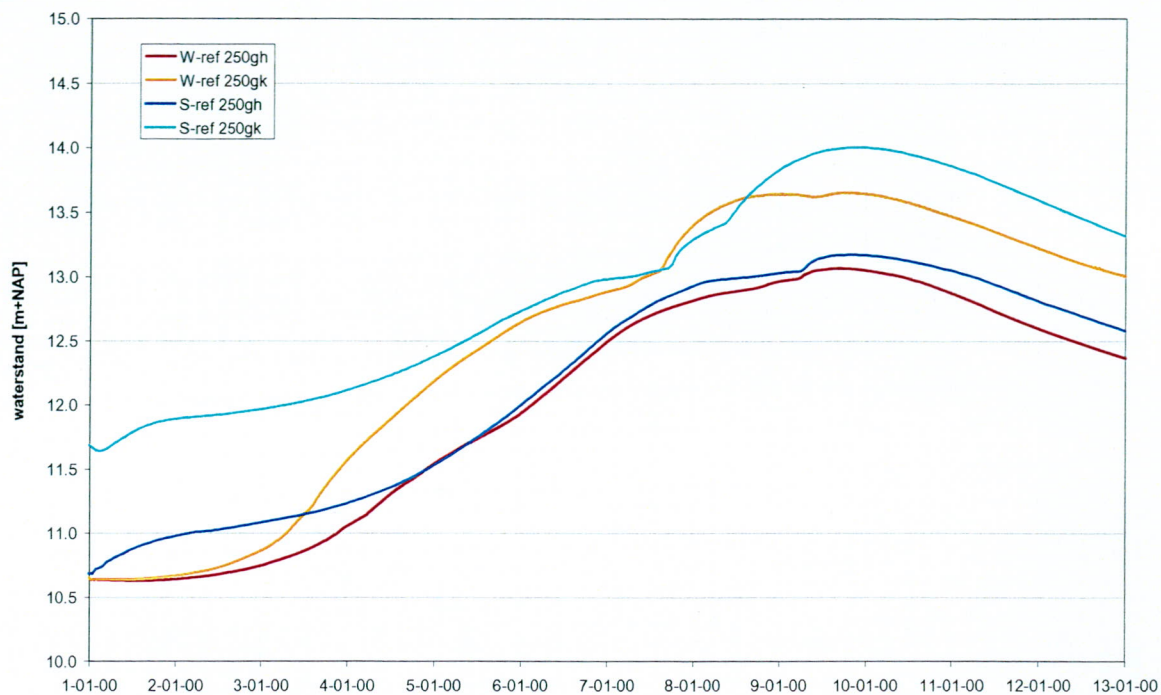
Figuur 5-2 Tijdseries van de waterstanden op rkm 100 voor de ivm-250gh en -gk-berekeningen



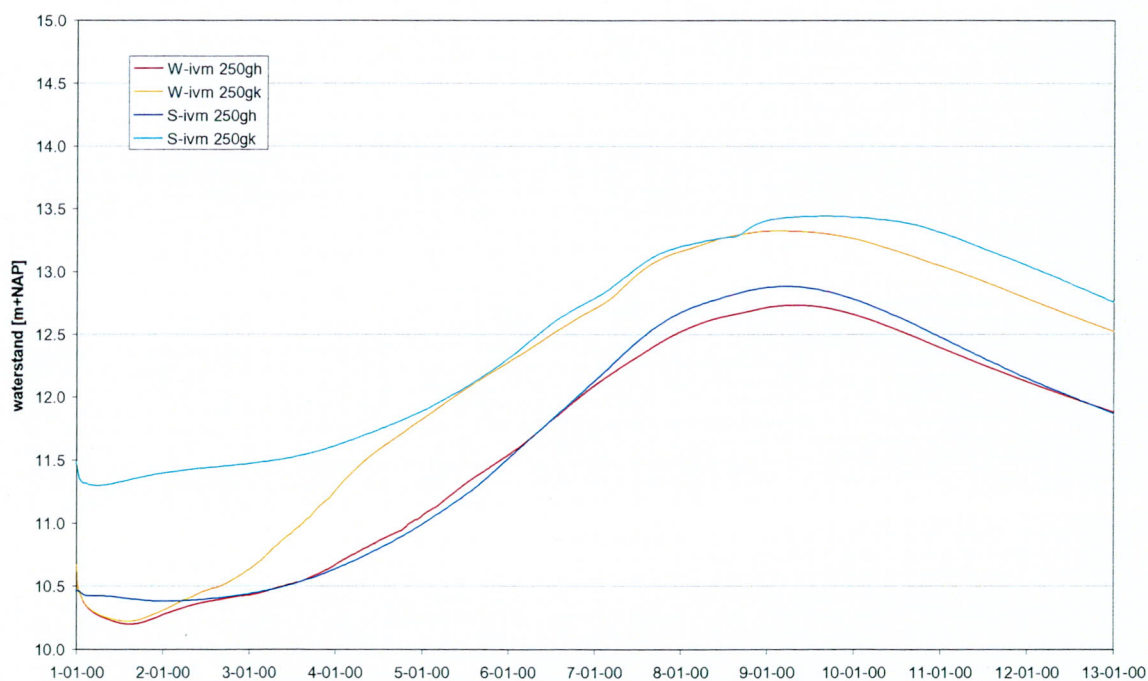
Figuur 5-3 Tijdsreeksen van de waterstanden op rkm 100 voor de ref-1250gh en -gk-berekeningen



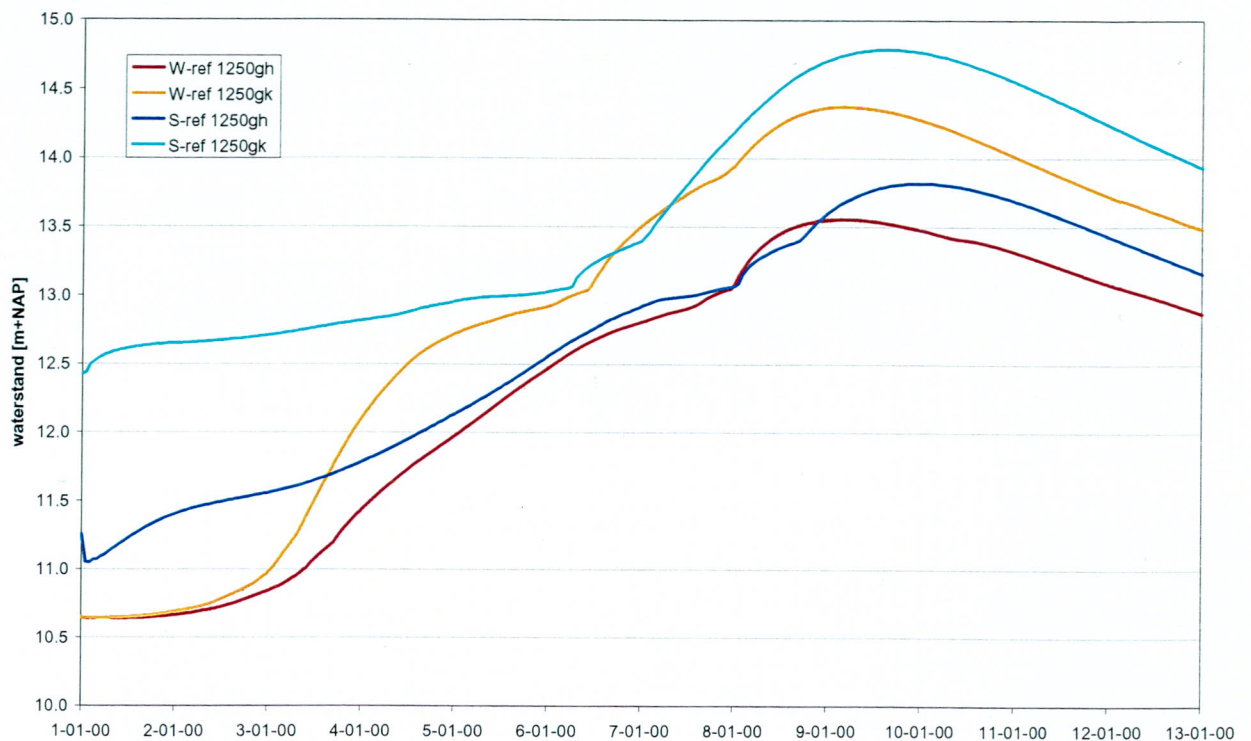
Figuur 5-4 Tijdsreeksen van de waterstanden op rkm 100 voor de ivm-1250gh en -gk-berekeningen



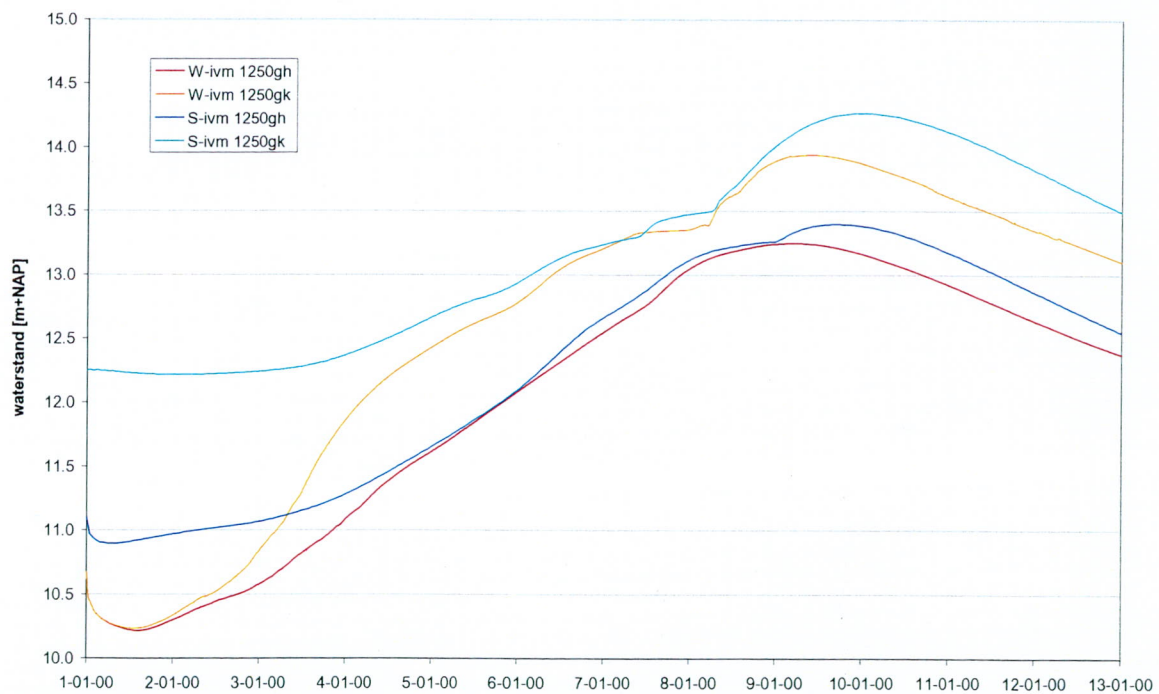
Figuur 5-5 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160 voor de ref-250gh en -gk-berekeningen



Figuur 5-6 Tijdseries van de waterstanden op rkm 160 voor de ivm-250gh en -gk-berekeningen



Figuur 5-7 Tijdsree van de waterstanden op rkm 160 voor de ref-1250gh en -gk-berekeningen



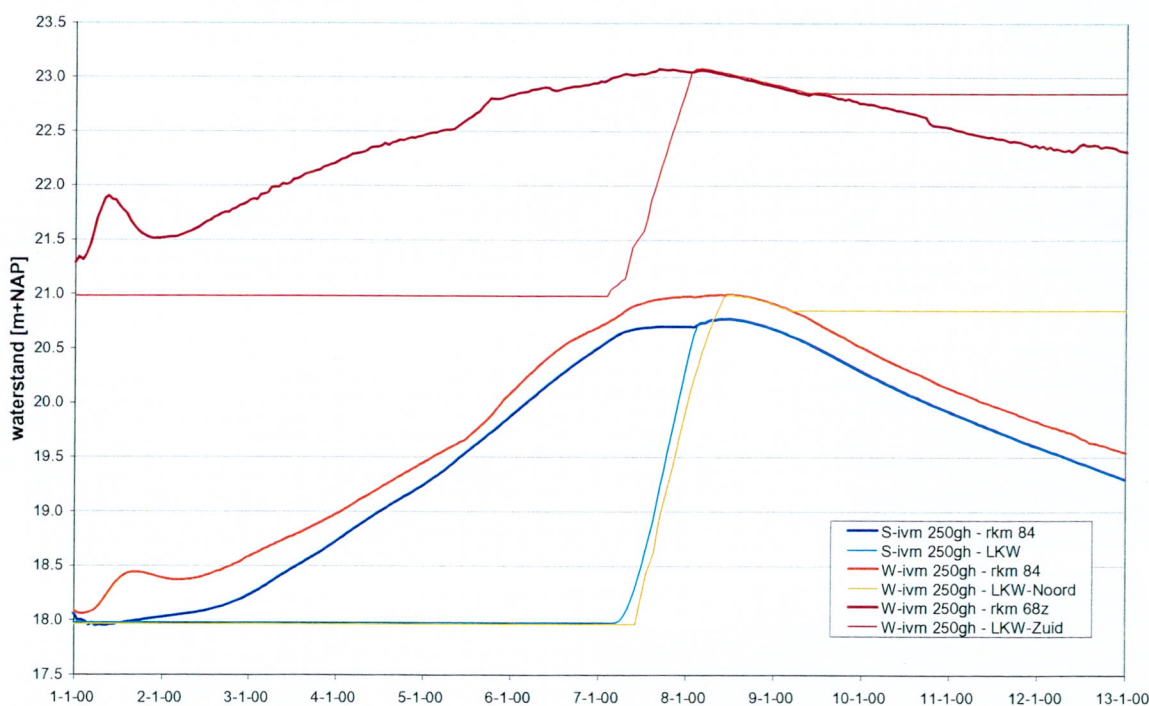
Figuur 5-8 Tijdsree van de waterstanden op rkm 160 voor de ivm-1250gh en -gk-berekeningen

De algehele conclusie is dat SOBEK in de referentie situatie consequent hogere waterstanden berekent dan WAQUA. Na uitvoering van de Maaswerken is het verschil tussen SOBEK en WAQUA (veel) minder groot en dus kan geconcludeerd worden dat het effect van de ingrepen op de waterstanden volgens SOBEK groter is dan volgens WAQUA.

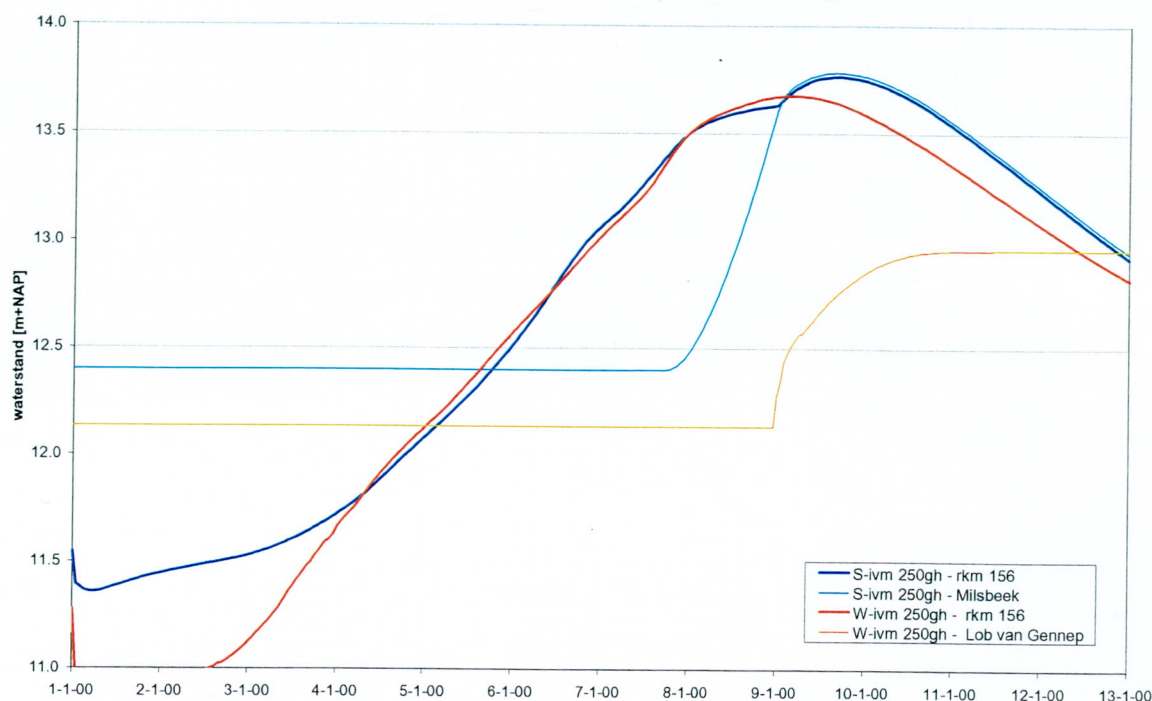
Opvallend is dat SOBEK en WAQUA voor een groot deel dezelfde tijdreeksen laten zien behalve tegen het moment het vollopen van de omkade gebieden (zie bijvoorbeeld Figuur 5-8). Hierdoor zit er een verschil in de berekende maximale waterstanden.

Het verschil in tijd van het retentiegebied Lob van Gennep dat zich juist bovenstrooms van rkm 160 bevindt is duidelijk te zien in Figuur 5-5 en Figuur 5-7. In bijvoorbeeld de *ref-250gk*-berekeningen is de vultijd bij SOBEK ongeveer 1 dag (tussen 7-jan 12:00 en 8-jan 12:00); bij WAQUA is dat 2 dagen (tussen 7-jan 12:00 en 9-jan 12:00).

In onderstaande figuren zijn de tijdseries van de waterstanden in het retentiegebied en in de rivier van de *ivm-250gh*-berekeningen ter plaatse van het Lateraalkanaal-West en De Lob van Gennep (in SOBEK Milsbeek) afgebeeld. Het retentiegebied Lateraalkanaal-West is in WAQUA geschematiseerd als één gebied met twee instroomopeningen; in SOBEK is er slechts één instroomopening. De consequentie hiervan is dat tussen rkm 68 (ter hoogte van de eerste instroomopening in WAQUA) en rkm 74 (ter hoogte van de instroomopening in SOBEK) het retentiegebied al een effect zal geven in de WAQUA-resultaten maar nog niet in de SOBEK-resultaten. Tussen rkm 74 en 84 (ter hoogte van de twee instroomopening in WAQUA) zal SOBEK een groter effect laten zien dan WAQUA omdat bij SOBEK het volledige retentiegebied gebruikt kan worden terwijl in de WAQUA-schematisatie het noordelijke deel nog niet merkbaar is. Pas vanaf rkm 84 is het effect weer gelijk.



Figuur 5-9 Tijdseries van waterstanden in de rivier en in het retentiegebied ter plaatse van het retentiegebied Lateraalkanaal-West voor de *ivm-250gh*-berekeningen



Figuur 5-10 Tijdseries van waterstanden in de rivier en in het retentiegebied ter plaatse van het retentiegebied Lob van Gennep (in SOBEK: Milsbeek) voor de ivm-250gh-berekeningen

In de figuren is te zien dat de retentiegebieden in de SOBEK-berekeningen sneller instromen. Dit valt te verklaren uit de grootte van de instroombreedtes. In onderstaande tabel staan de groottes van de instroombreedtes. Opvallend verschil is verder dat in SOBEK de retentiegebieden wel leegstromen, terwijl ze dit in WAQUA niet doen. Het totale volume dat in het Lateraalkanaal-West stroomt in SOBEK ongeveer even groot als in WAQUA.

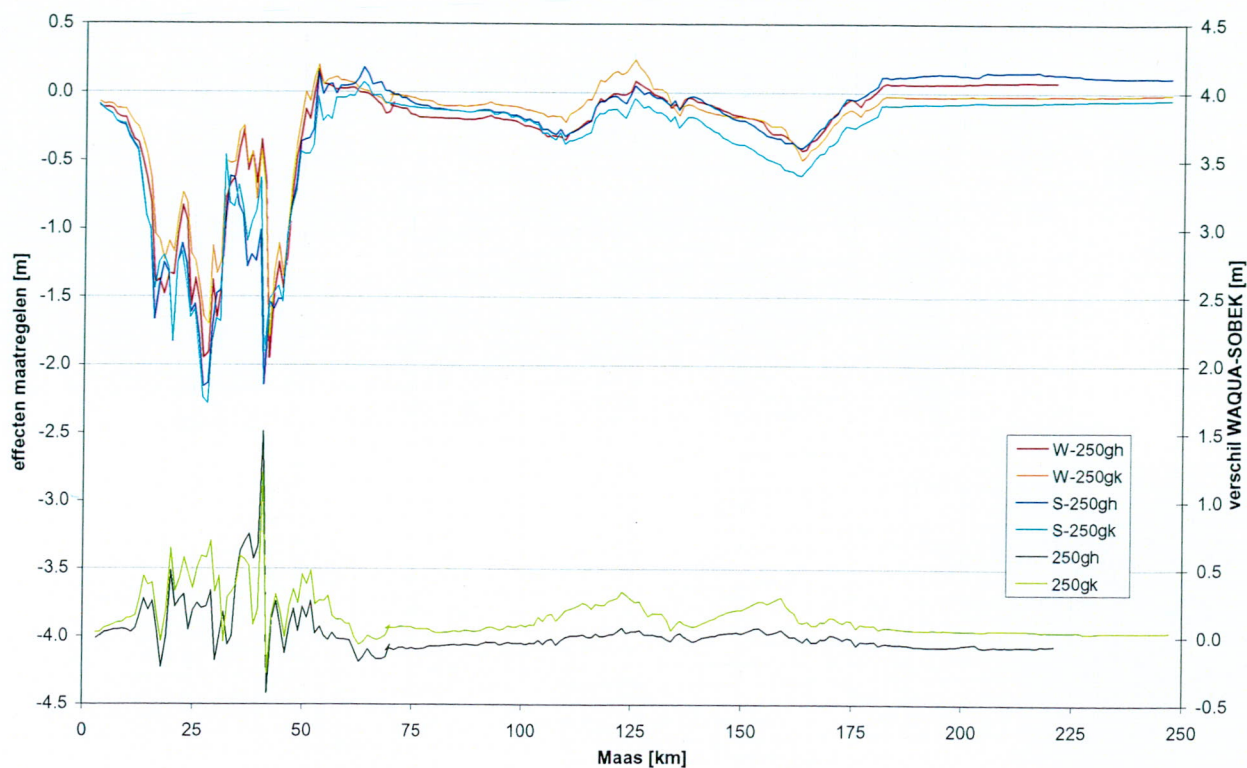
Tabel 5-1 Instroombreedtes van de retentiegebieden Lateraalkanaal-West en Lob van Gennep

	SOBEK [m]	WAQUA [m]
Lateraalkanaal-West zuid [rkm 68z]	-	350
Lateraalkanaal-West noord [rkm 84]	5400	227
Lob van Gennep	1041	600*

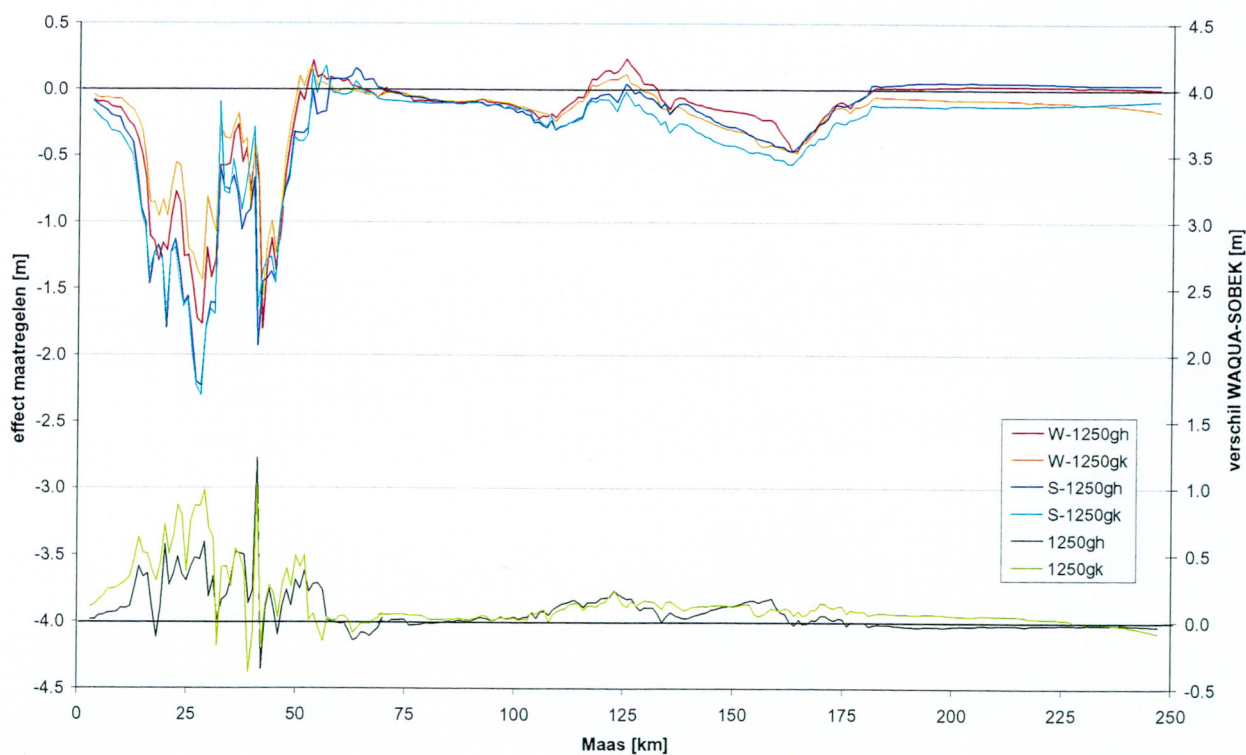
*het hoogtepunt van de instroomopening is wigvormig. Effectief is de breedte dus kleiner.

5.2 Maximale waterstanden

In onderstaande figuren staan de effecten van de ingrepen zoals berekend met SOBEK (de blauwe lijnen) en WAQUA (de rode lijnen). Het verschil tussen het effect zoals dat berekend is met SOBEK en WAQUA is zichtbaar in de groene lijnen.



Figuur 5-11 Effect van de maatregelen voor de 250gh en 250gk golf volgens SOBEK en WAQUA



Figuur 5-12 Effect van de maatregelen voor de 1250gh en 1250gk golf volgens SOBEK en WAQUA

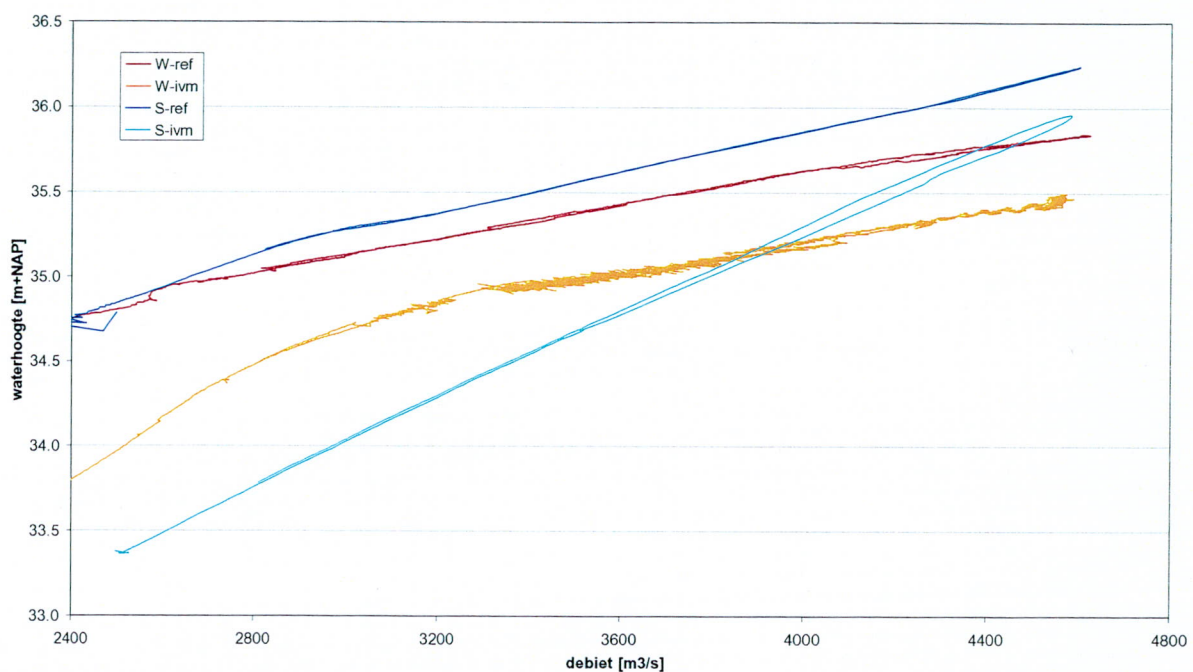
Voor alle golven geldt dat SOBEK en WAQUA het meest verschillen in de Grensmaas waar SOBEK een veel groter effect van de ingrepen voorspelt dan WAQUA. In het deel van Zandmaas waar de ingrepen hebben plaatsgevonden (tussen rkm 109 en 180) geeft SOBEK hetzelfde effect als

WAQUA voor de 250gh-golf. Voor de 250gk-golf berekent SOBEK een groter effect (maximaal 0,3 m), voor de 1250gh- en 1250gk-golven is het effect volgens SOBEK circa 0,2 m groter.

In de Zandmaas zijn de verschillen tussen SOBEK en WAQUA nihil voor de 250gh-golf; voor de 1250gh-golf zijn duidelijk twee locaties te zien waar de verschillen relatief groot zijn (ter plaatse van rkm 125 en 160); voor de hogere golven zijn worden deze verschillen afgevlakt. De verschillen ontstaan doordat omkade gebieden in SOBEK en WAQUA op een verschillend moment volstromen. De hierdoor onstaande verschillen zijn het grootst op het moment de kades net wel of net niet volstromen. Dit is het geval voor de 1250gh-golf.

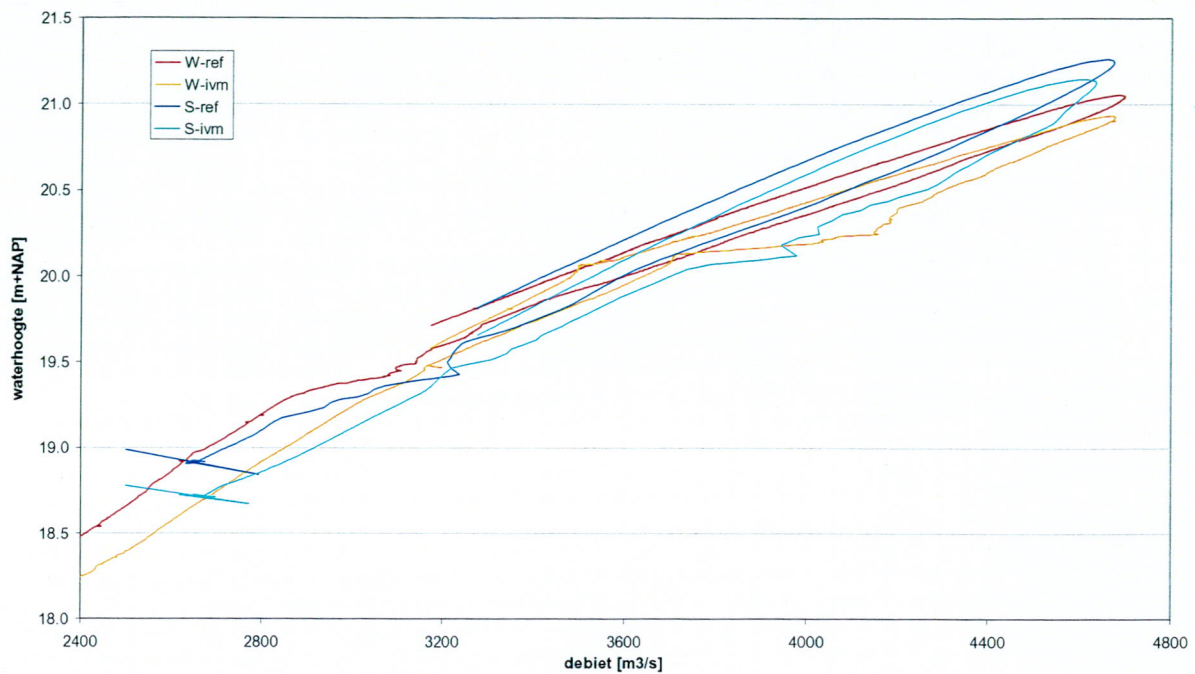
5.3 Qh-relaties op vier locaties (rkm 40, 80, 100 en 160)

Onderstaand figuren laten voor de 1250gk-golf de Qh-relaties zien van zowel SOBEK als WAQUA in de referentiesituatie en de situatie na uitvoering van de Maaswerken.



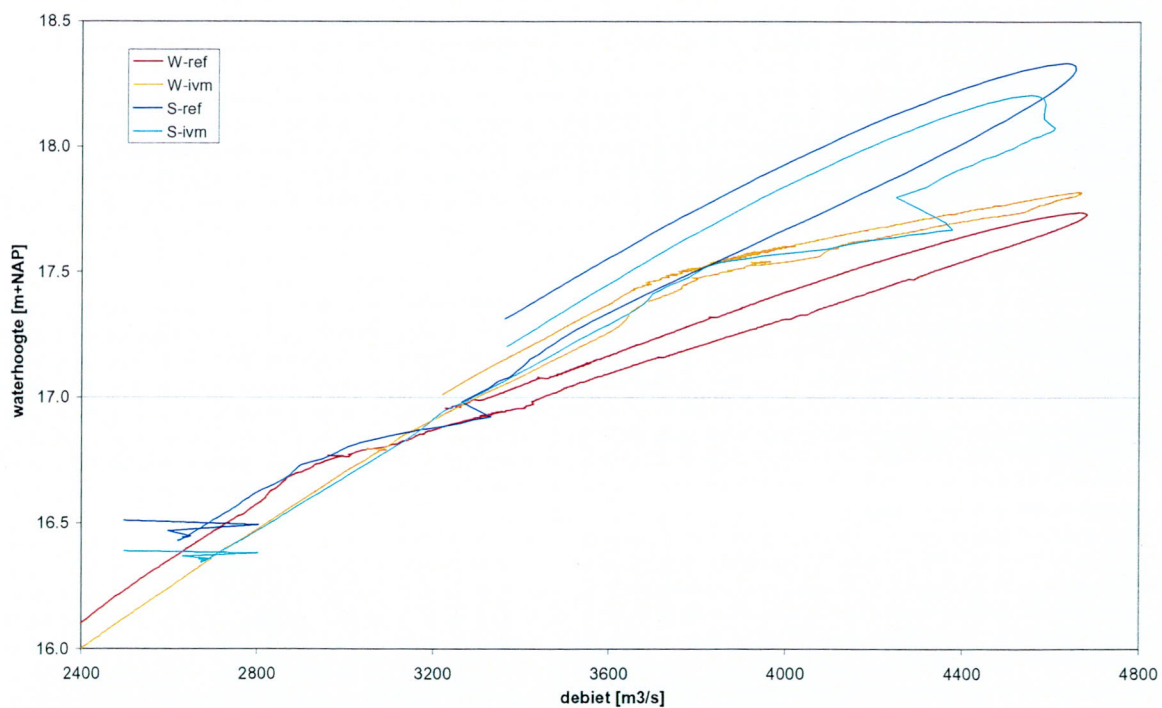
Figuur 5-13 Qh-relatie op rkm 40 volgens SOBEK en WAQUA

Er is een duidelijk verschil tussen de vormen van de Qh-relaties tussen SOBEK en WAQUA. In beide modellen is de door profielverruiming toegenomen afvoercapaciteit gedaalde waterstanden bij lager afvoeren ($Q < 3200 \text{ m}^3/\text{s}$) duidelijk te zien. Bij grotere afvoeren neemt in WAQUA de stijging van de waterstand bij toenemende afvoer af, terwijl deze in SOBEK onverminderd door blijft stijgen. Dit duidt op een breder doorstroomprofiel in WAQUA dan in SOBEK. Aangezien de ingrepen in de Grensmaas niet of nauwelijks in het winterbed plaatsvinden, de verwachte vorm van de Qh-relatie zoals die in de WAQUA-resultaten wordt weergegeven. Het is onduidelijk waarom SOBEK een andere vorm.



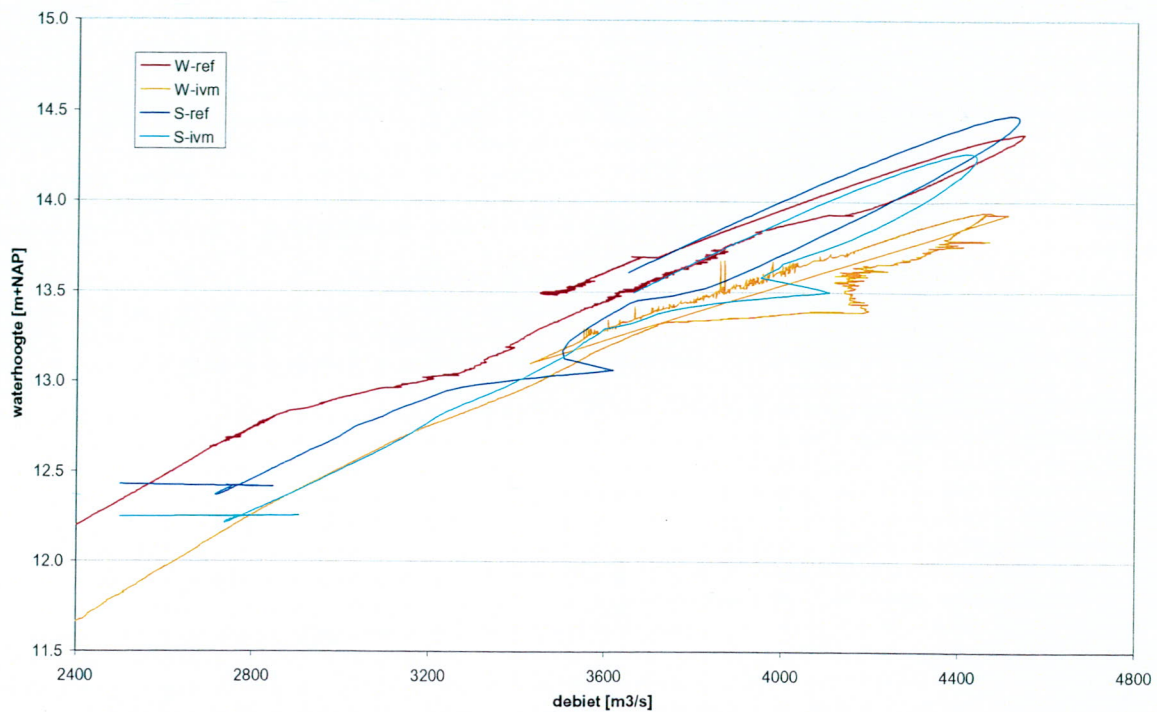
Figuur 5-14 Qh-relatie op rkm 80 volgens SOBEK en WAQUA

De Qh-relaties van SOBEK en WAQUA komen qua vorm en grootte overeen.



Figuur 5-15 Qh-relatie op rkm 100 volgens SOBEK en WAQUA

Duidelijk zichtbaar is dat de Qh-relaties volgens SOBEK steiler doorlopen dan volgens WAQUA. Dit wordt veroorzaakt doordat het WAQUA-winterbed breder is dan het SOBEK-winterbed.



Figuur 5-16 Qh-relatie op rkm 160 volgens SOBEK en WAQUA

Duidelijk zichtbaar is dat de Qh-relaties volgens SOBEK steiler doorlopen dan volgens WAQUA. Dit wordt veroorzaakt doordat het WAQUA-winterbed breder is dan het SOBEK-winterbed.

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

SOBEK voorspelt (conform de berekeningen uitgevoerd in eerder onderzoek, zie (Agtersloot, 2002a)) een groter effect van de ingrepen in de Grensmaas dan WAQUA. Dit komt doordat het stroomvoerende oppervlak in SOBEK in met name grote verbredingen (bij Borgharen en Grevenbicht) over de gehele stroomvoering plaatsheeft. In de WAQUA-schematisatie snijdt de stroming de bocht af en is slechts een deel van de verbreding stroomvoierend. Hierdoor is het effect van de verbreding in SOBEK beduidend groter dan volgens WAQUA.

Het winterbed van SOBEK is kleiner dan dat van WAQUA waardoor de Qh-krommes bij hogere afvoeren een ander gedrag vertonen. De Qh-krommes van WAQUA vlakken af (zie bijvoorbeeld Figuur 5-14) terwijl de Qh-krommes van SOBEK dezelfde richting houden.

De resultaten van de SOBEK- en WAQUA-modellen die de situatie na uitvoering van de Maaswerken beschrijven liggen in het algemeen dichter bij elkaar dan die van de modellen die de referentiesituatie beschrijven. Dit komt doordat er relatief minder afvoer door het winterbed loopt.

Het SOBEK-model kent een grens stroomvoering/stroomberging om te bepalen welk deel van het model gebruikt wordt voor stroomvoering en welk deel voor stroomberging. Deze grens is bepaald middels een stationaire WAQUA-berekening bij een afvoer van 3800 m³/s. Omdat het SOBEK-model ook wordt gebruikt voor hogere afvoeren zou het model wel eens 'te krap' kunnen zijn en dus leiden tot hogere waterstanden. In principe zou dit ook voor het WAQUA-model kunnen gelden (als bijvoorbeeld het rooster te klein is gekozen) maar omdat de SOBEK-begrenzing altijd gebaseerd is op de WAQUA-resultaten zal het effect in WAQUA nooit groter zijn dan in SOBEK.

Een verschil tussen de SOBEK- en WAQUA-schematisatie is de modellering van het retentiegebied Lateraalkanaal-West. Waar dit gebied in de WAQUA-schematisatie bestaat uit twee afzonderlijke delen is het in de SOBEK-schematisatie één groot gebied. Hierdoor zullen de effecten in het traject tussen rkm 68 en rkm 84 verschillend zijn (zie ook paragraaf 5.1).

In de SOBEK-berekening voor de golf 250gh bleek het retentiegebied Lob van Gennep al deels gevuld te worden (zie paragraaf 3.2) terwijl dit in de corresponderende WAQUA-berekening niet het geval was. Dit wordt veroorzaakt doordat de waterstanden in SOBEK iets hoger liggen dan die in WAQUA waardoor de drempelwaarde in SOBEK net overschreden wordt terwijl in WAQUA de waterstanden net onder de drempelwaarde blijven. Hierdoor zullen de SOBEK- en WAQUA-resultaten in de referentiesituatie iets verschillend kunnen zijn.

In de situatie na uitvoering van de Maaswerken hebben de omkade gebieden in SOBEK en WAQUA eenzelfde waakhoogte gekregen, namelijk 50 cm ten opzichte van de waterstand zoals die volgt uit de berekening *S-ivm-250gh* respectievelijk de waterstand uit de berekening *W-ivm-250gh*. Dit zou (ondanks een verschil in berekende waterstanden) toch moeten leiden tot eenzelfde gedrag qua berging in omkade gebieden omdat het moment van instromen wel redelijk gelijk zou moeten zijn. Voor de referentiesituatie geldt ditzelfde gedrag echter niet omdat in SOBEK en WAQUA dezelfde kadehoogte zitten maar de waterstanden wel verschillend zijn.

De omkade gebieden in SOBEK kunnen uitstromen terwijl deze gebieden in WAQUA altijd gevuld blijven tot aan de kadehoogte. Hierdoor zullen de SOBEK-resultaten na de piek van de golf een hogere waterstand en afvoer geven zolang de ingestroomde gebieden blijven uitstromen.

6.2 Aanbevelingen

Een deel van het verschil op het traject kilometer 100 – 130 wordt veroorzaakt doordat een groot deel van het winterbed tussen kilometer 123 - 129 in de WAQUA-berekening stroomvoerend wordt terwijl in het SOBEK-model dit gebied enkel als berging dient. Om tot een grotere overeenstemming tussen SOBEK en WAQUA te komen zou overwogen kunnen worden om dit gebied deels bergend en deels stromend uit te voeren, bijvoorbeeld middels een geul of zelfs een aparte tak. Een alternatief zou misschien kunnen zijn om het moment waarop de omkade gebieden gaan uitstromen anders te kiezen zodat deze uitstroming kan dienen

Het grote verschil tussen SOBEK en WAQUA op de Grensmaas wordt veroorzaakt doordat de verbredingen in SOBEK volledig stroomvoerend zijn, terwijl uit de WAQUA-berekeningen volgt dat (ten gevolge van bochtafsnijding) slechts een deel van de verbreding stroomvoerend is. Hierdoor leiden de ingrepen in het SOBEK-model tot een grotere waterstandsverlaging. Voor dit probleem zijn verschillende oplossingen denkbaar:

- slechts een deel van de verbreding toevoegen aan het zomerbed (namelijk dat deel dat volgens de WAQUA-berekening stroomvoerend is);
- het definiëren van een aparte tak om de bochtafsnijding te kunnen modelleren;
- het verkorten van de rivieras om de bochtafsnijding te modelleren;

Wat in deze situatie de beste oplossing is is niet op voorhand te zeggen.

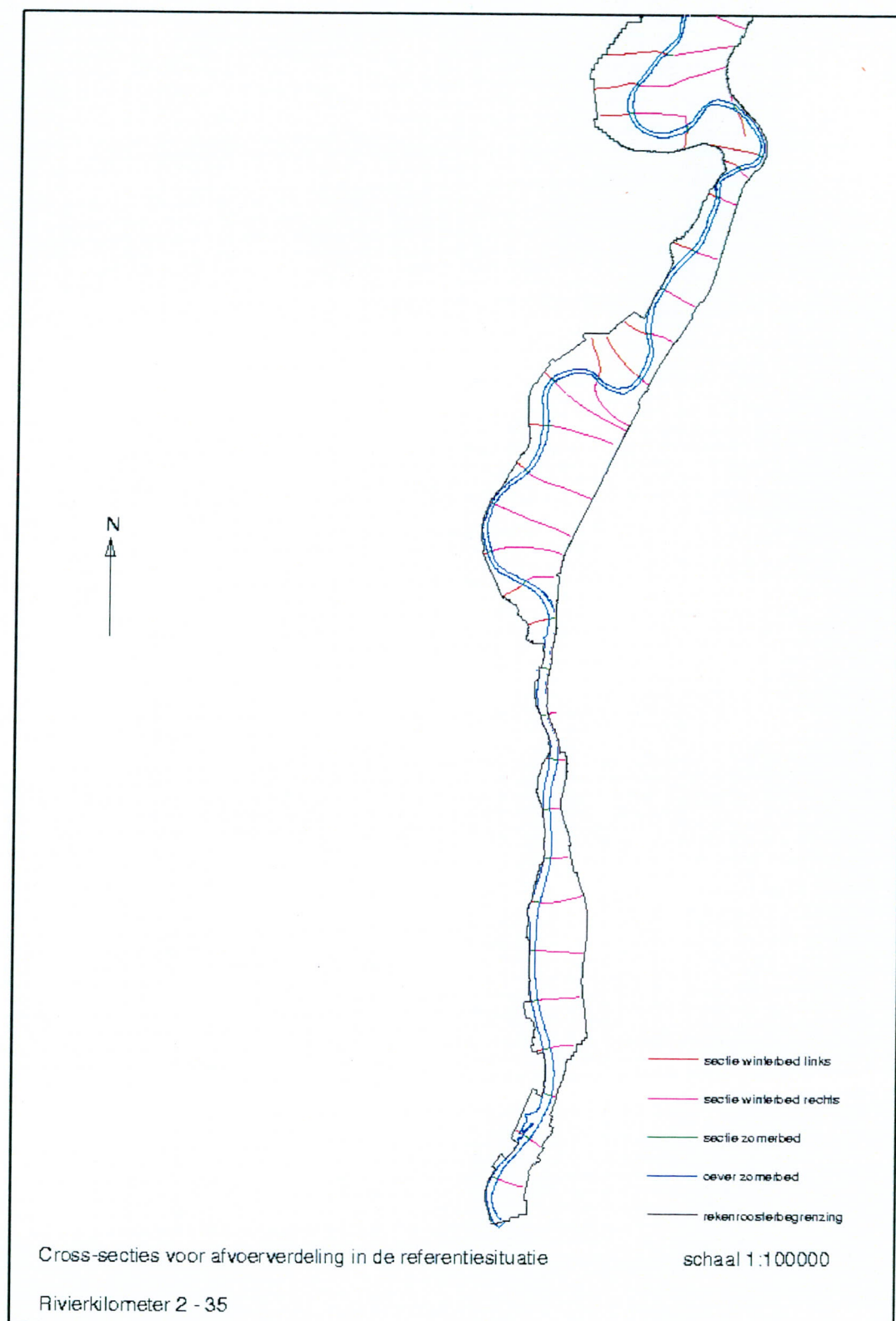
Bij hogere afvoeren in de referentiesituatie ontstaan 'kortsluitingen' over winterbed (bijvoorbeeld achterlangs Borgharen en Roosteren) die wel in het WAQUA-model tot uiting komen maar niet in het SOBEK-model. Ook hier zouden aparte takken kunnen leiden tot een grotere overeenstemming. Omdat in de situatie na Maaswerken de waterstanden zover omlaag gaan dat het winterbed hier vrijwel niet meer mee doet is dit effect na uitvoering van de Maaswerken veel minder sterk aanwezig.

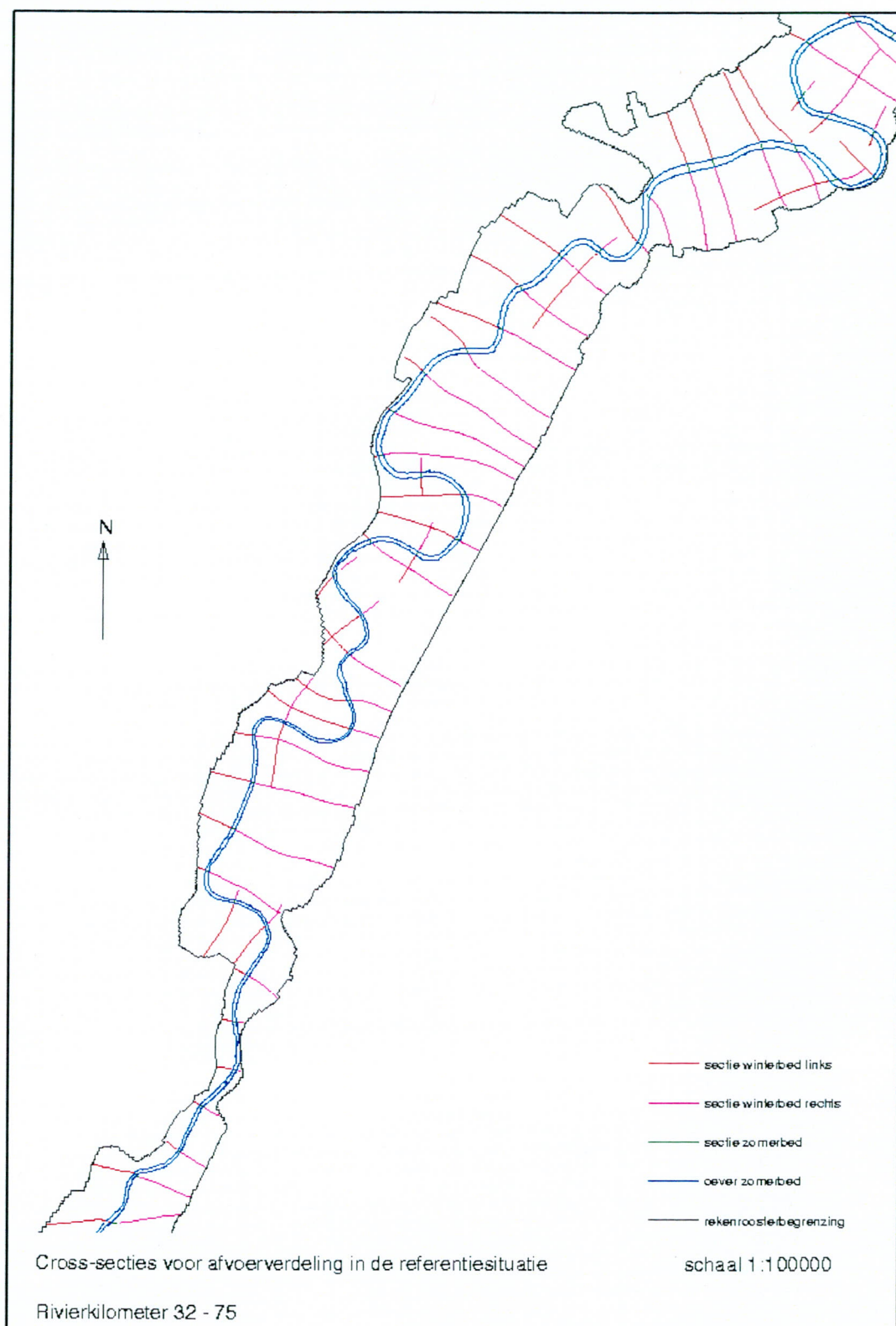
Retentiegebied Lateraalkanaal-West is verschillend gemodelleerd in SOBEK en WAQUA. Hoewel het effect van dit verschil relatief beperkt is (maximaal de helft van het totale effect van het retentiegebied, dus zo'n 5 cm) zou het overwogen kunnen worden om het Lateraalkanaal-West ook in SOBEK als twee afzonderlijke gebieden te modelleren.

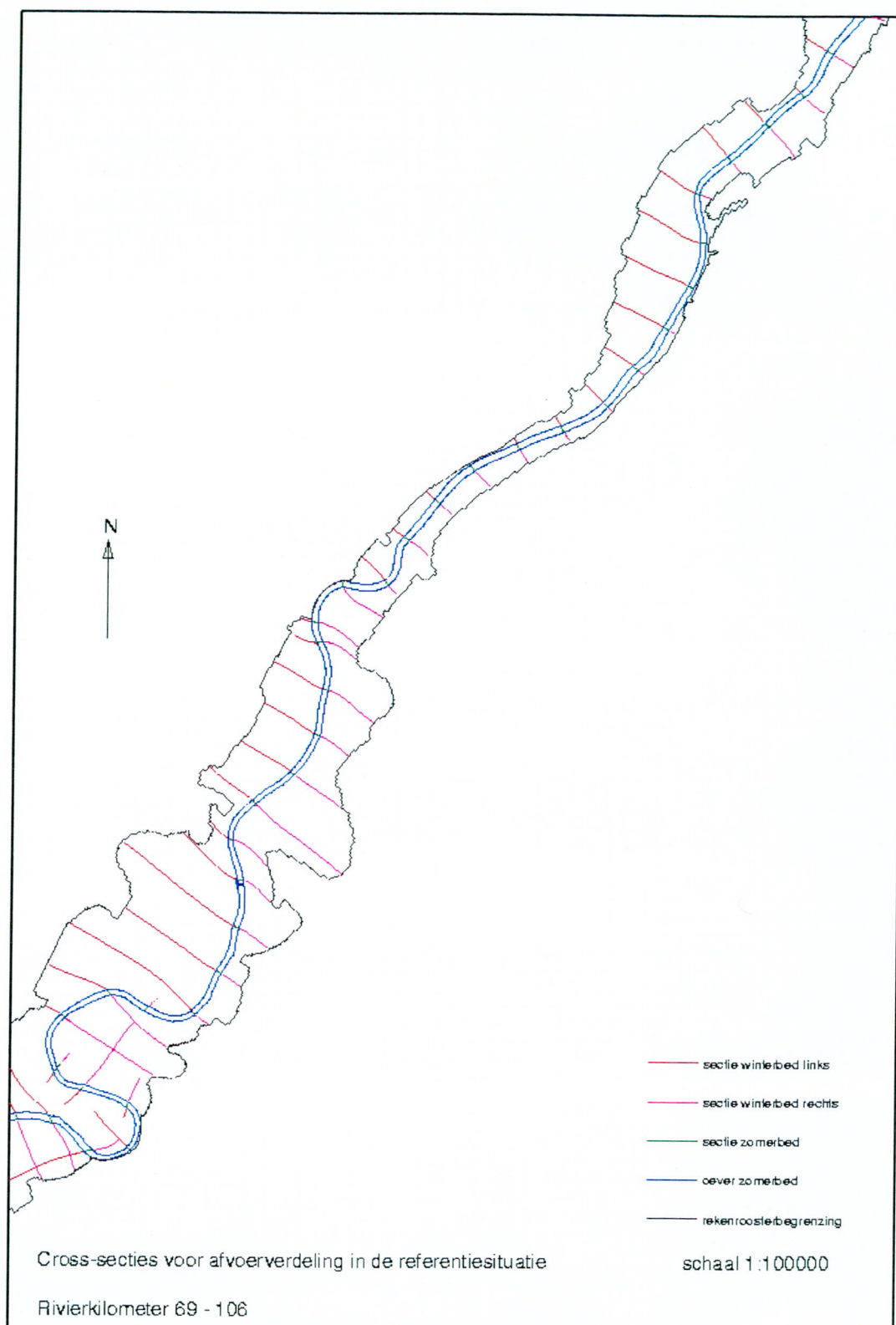
7. Referenties

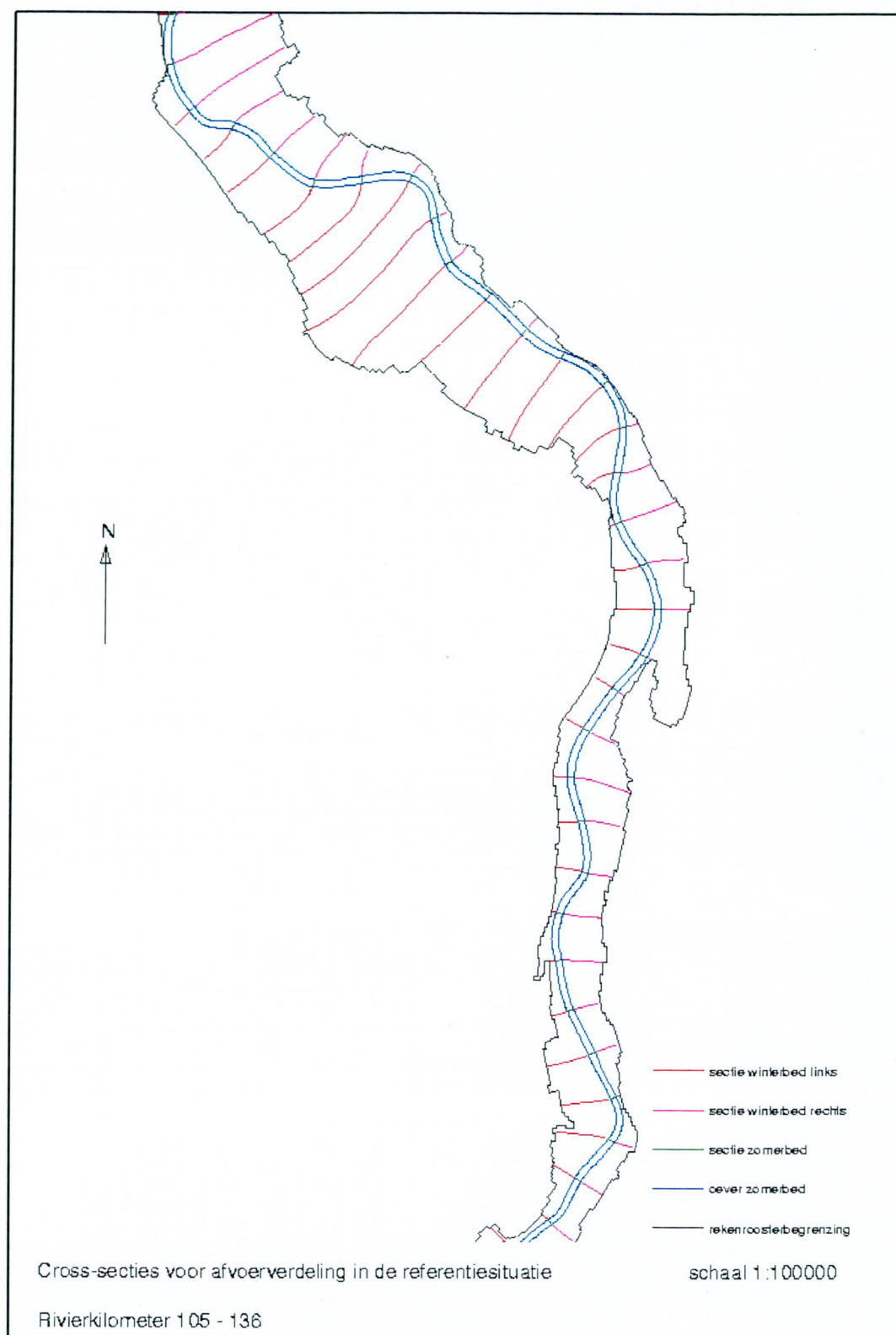
- Agtersloot, R.C., Broens, H.L., Hijdra, A.C.L. en Meijer, D.G., 2001a: Hoogwaterbescherming Zandmaas, Brondocument versie 2 mei 2001, Hydraulica en Morfologie, De Maaswerken Zandmaas/Maasroute
- Agtersloot, R.C., Bommel, M.S. van, Rabbers, H.H., Weidema, P. en Gijsbers, P. 2001b: SOBEK-model van de Maas, november 2001, opdrachtgever: Rijkswaterstaat Directie Limburg, Meander Advies en Onderzoek
- Meijer, D.G. en Levelt, O., 2001: Scope 2000 (versie 3) hydraulische effecten, Kennis en Kwaliteitsmanagement Zandmaas, De Maaswerken Zandmaas/Maasroute
- Meijer, D.G., 2002: Overzicht modelsystemen en schematisaties van de Maas, versie 8, 22 januari 2002, Kennis- en kwaliteitsmanagement Zandmaas, Zandmaas/Maasroute, De Maaswerken
- Rijkswaterstaat De Maaswerken, 2000: Voorlopig ontwerp VO, Grensmaasproject, DLB 2000/5270, Rijkswaterstaat / De Maaswerken
- Rijkswaterstaat, RIKZ, DWW, RIZA, 2001: Hydraulische randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen
- Rijkswaterstaat, RIZA, 2002: Bouw en calibratie SOBEK Maas versie 2000.1 t/m 2000.3, RIZA rapport (te verschijnen)
- Veen, R. van der, 2001: Memo ADV-01-02 "Randvoorwaarden IVM", 28 oktober 2001, Rijkswaterstaat / RIZA

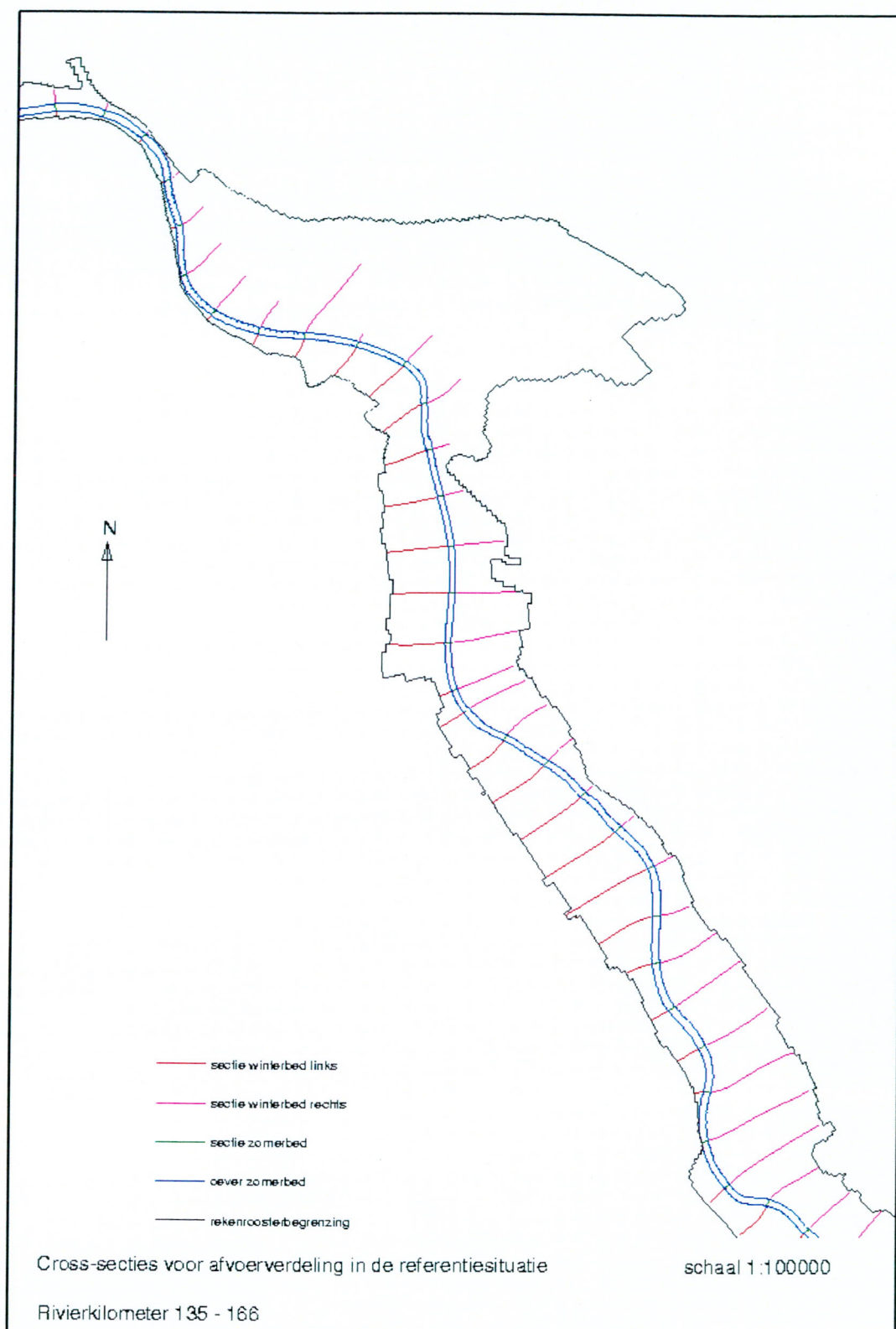
Bijlage 1 : Nieuwe cross-secties WAQUA

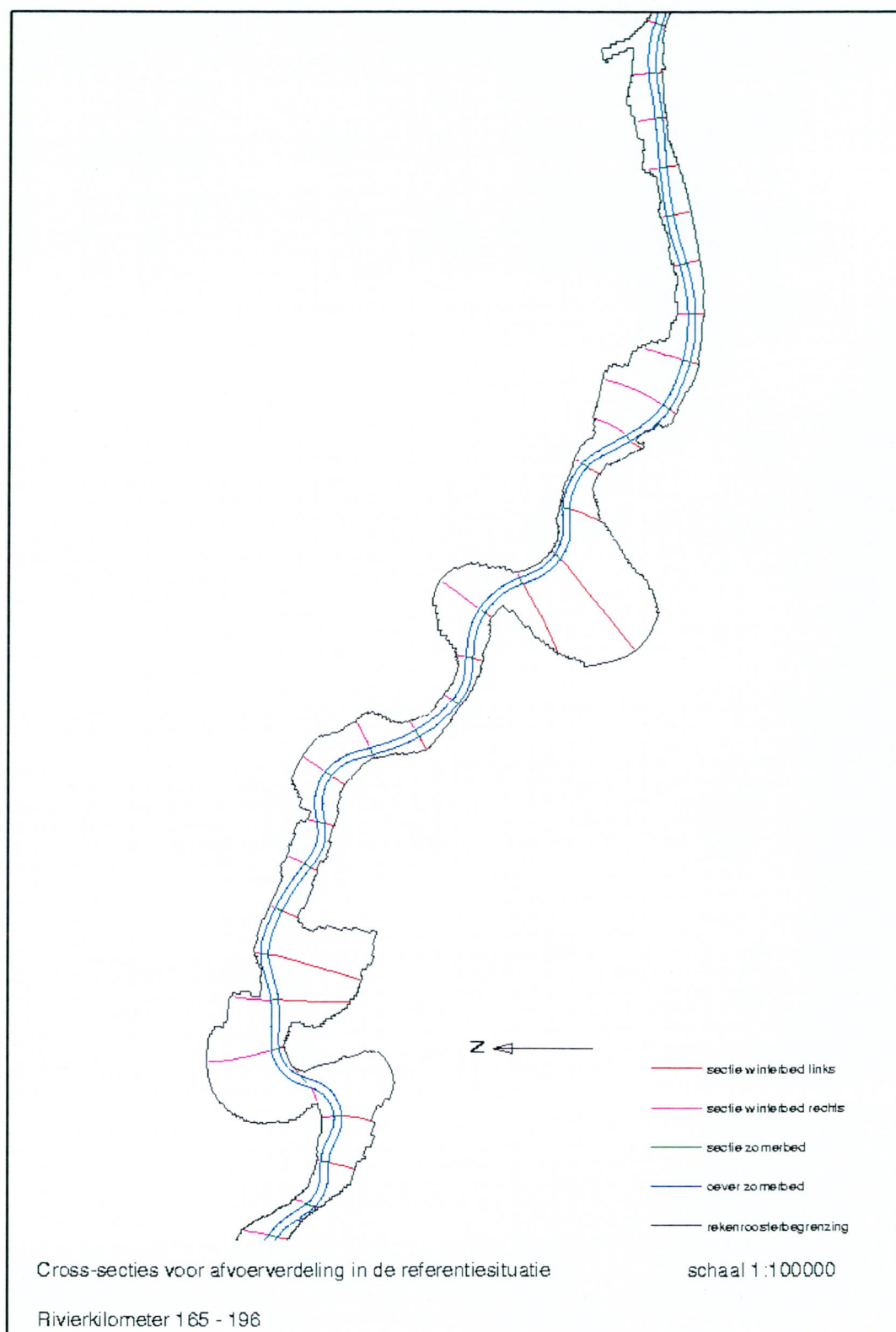


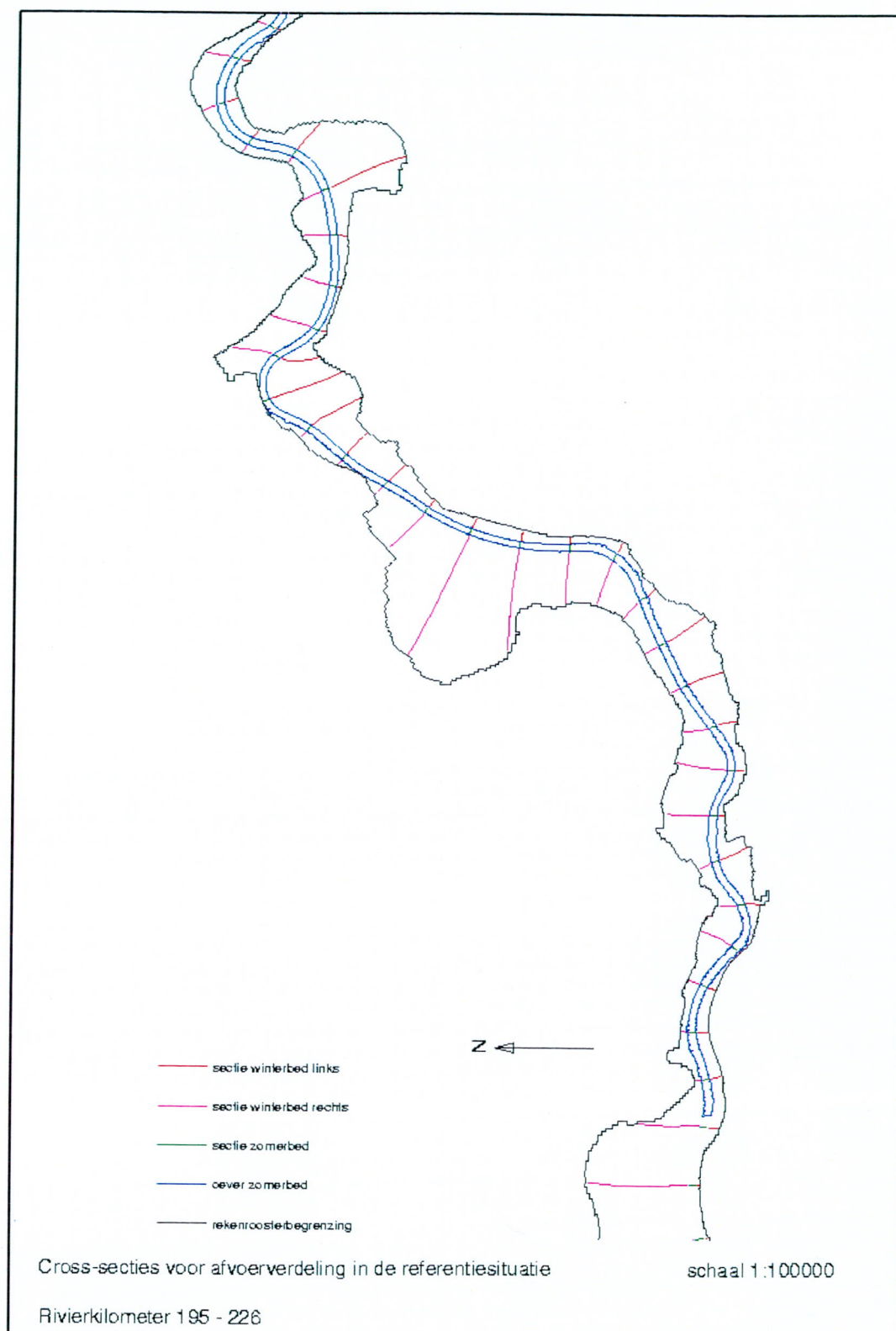


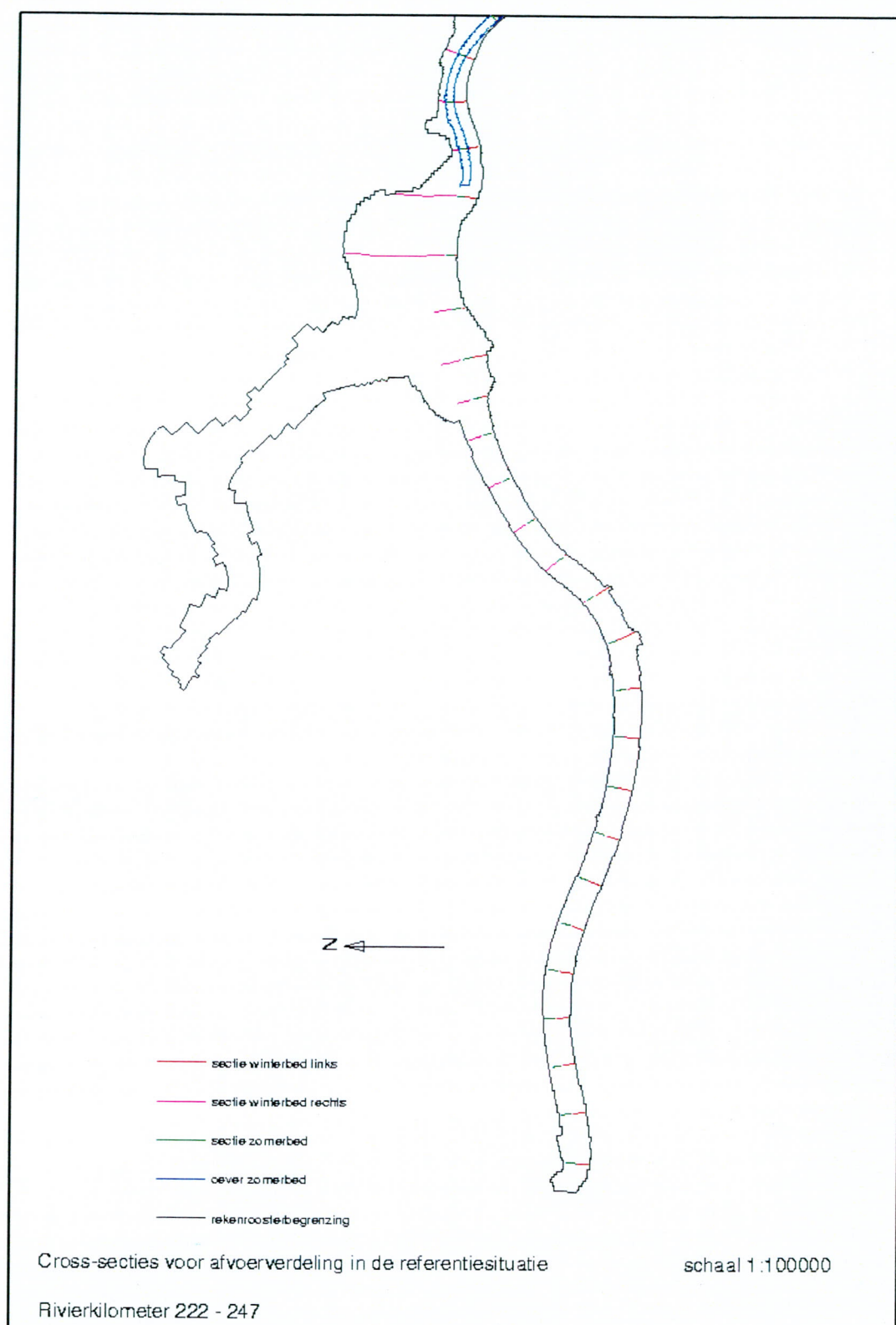












Bijlage 2 : Berekening golf Eijsden

Aan

Rijkswaterstaat directie Limburg
Postbus 6200 MA
Maastricht
t.a.v. Ir. S van 't Laar
Ir. A Wijbenga

cc

Riza
Ing. M. Scholten
Ir. D. BEijer
Ir. R. Schielen

Van

Ing. R. van der Veen

Datum

28 oktober 2001

Onderwerp

Randvoorwaarden IVM

Doorkiesnummer

026-3688546

Bijlage(n)

-

Geachte , Dames, Heren

Inleiding

Ten behoeve van de IVM-studie moeten randvoorwaarden voor het SOBEK-model aangemaakt worden. Deze randvoorwaarden moeten ter plaatse van Eijsden gedefinieerd worden. In het randvoorwaardenboek 2001 worden standaardranden gedefinieerd ter plaatse van Borgharen-dorp. In dit memo zal de translatie van deze standaardranden naar Eijsden besproken worden.

Voor de SOBEK-modellen van de 2000-serie (2000.1 t/m 2000.3) gelden ten aanzien van de laterale instromingen vernieuwde inzichten ten opzichte van de inzichten zoals gebruikt voor het randvoorwaardenboek 2001 en de vigerende WAQUA-modellen. In dit memo zullen deze nieuwe inzichten t.a.v. de laterale instromingen vastgelegd worden voor de standaardgolven [Bouw en calibratie SOBEK-Maas, versie 2000.1 t/m 2000.3 Riza rapport 2001.XX in voorbereiding].

Probleemstelling

Bij het afvoerproces tussen Eijsden en Borgharen wordt de afvoergolf bij Eijsden getransformeerd tot een afvoergolf bij Borgharen. Onderdelen van dit proces zijn :

- topvervlakking;
- vulling en lediging van berging,
- interactie met grondwater,
- laterale instroming,
- looptijd tussen Eijsden en Borgharen

De gewenste golfvorm bij Borgharen-dorp is op grond van de door HKV_{lijn in water} gebouwde applicatie voor een aantal standaardgolven bekend. De vraag is hoe de afvoergolf bij Eijsden eruit moet zien om de standaardgolf bij Borgharen te reproduceren.

Uitwerking

De standaardgolven bij Borgharen bestaan uit tijdreeksen van afvoeren met een gestandaardiseerde lengte van 288 uur. De standaardgolven bij Borgharen worden gekenmerkt door een typische spitse vorm nabij de top van de golf ($t=144$ uur). Vanwege het afvoerproces tussen Eijsden en Borgharen zal een dergelijke golfvorm niet gerealiseerd kunnen worden.

Voor de vertaling van de afvoergolf bij Eijsden uit de afvoergolf bij Borgharen-dorp wordt op basis van een aantal historische afvoergolven tussen 1993 en april 2001 uitgegaan van de volgende relatie:

$$Q_{\text{Eijsden}} = 0.991 * Q_{\text{Borgharen} + 2 \text{ uur}} - 1.23 + Q_{\text{Bunde}} + Q_{\text{Smeermaas}} - 10/16 * Q_{\text{Bunde}} \quad [1]$$

[Bouw en calibratie SOBEK-Maas, versie 2000.1 t/m 2000.3 Riza rapport 2001.XX in voorbereiding].

Voor de standaardgolven wordt thans aangehouden :

$$Q_{\text{Bunde}} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{Smeermaas}} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vergelijking [1] kan nu omgeschreven worden tot :

$$Q_{\text{Eijsden}} = 0.991 * Q_{\text{Borgharen} + 2 \text{ uur}} + 19.77 \quad [2]$$

Door het afvoerproces tussen Eijsden en Borgharen wordt ook de golfvorm beïnvloed. Teneinde deze beïnvloeding te simuleren worden voor de verschillende fases van de afvoergolf factoren geïntroduceerd. Onderscheid wordt gemaakt in stijgende afvoeren, dalende afvoeren en afvoeren nabij de top. Vergelijking 2 wordt daarmee uitgesplitst in 4 aparte vergelijkingen:

Voor $0 < T \leq 140$

$$Q_{\text{Eijsden}} = 0.991 * Q_{\text{Borgharen} + 2 \text{ uur}} + 19.77 + C_{\text{stijgend}} \quad [3.1]$$

Voor $140 < T \leq 142$

$$Q_{\text{Eijsden}} = 0.991 * Q_{\text{Borgharen} + 2 \text{ uur}} + 19.77 + C_{\text{stijgend}} + C_{\text{top}} \quad [3.2]$$

Voor $142 < T \leq 154$

$$Q_{\text{Eijsden}} = 0.991 * Q_{\text{Borgharen} + 2 \text{ uur}} + 19.77 + C_{\text{dalend}} + C_{\text{top}} \quad [3.3]$$

Voor $T > 154$

$$Q_{\text{Eijsden}} = 0.991 * Q_{\text{Borgharen} + 2 \text{ uur}} + 19.77 + C_{\text{dalend}} \quad [3.4]$$

Met deze constanten wordt getracht de afvoergolf bij Borgharen zo goed mogelijk te reproduceren. Daarbij is de aandacht vooral gericht op de periode van ca. 36 uur voor de top tot ca. 36 uur na de top. Teneinde de constanten te optimaliseren zijn SOBEK-berekeningen uitgevoerd. Voordat deze berekeningen uitgevoerd kunnen worden moet eerst een keuze gemaakt worden met welk model de berekening uitgevoerd wordt.

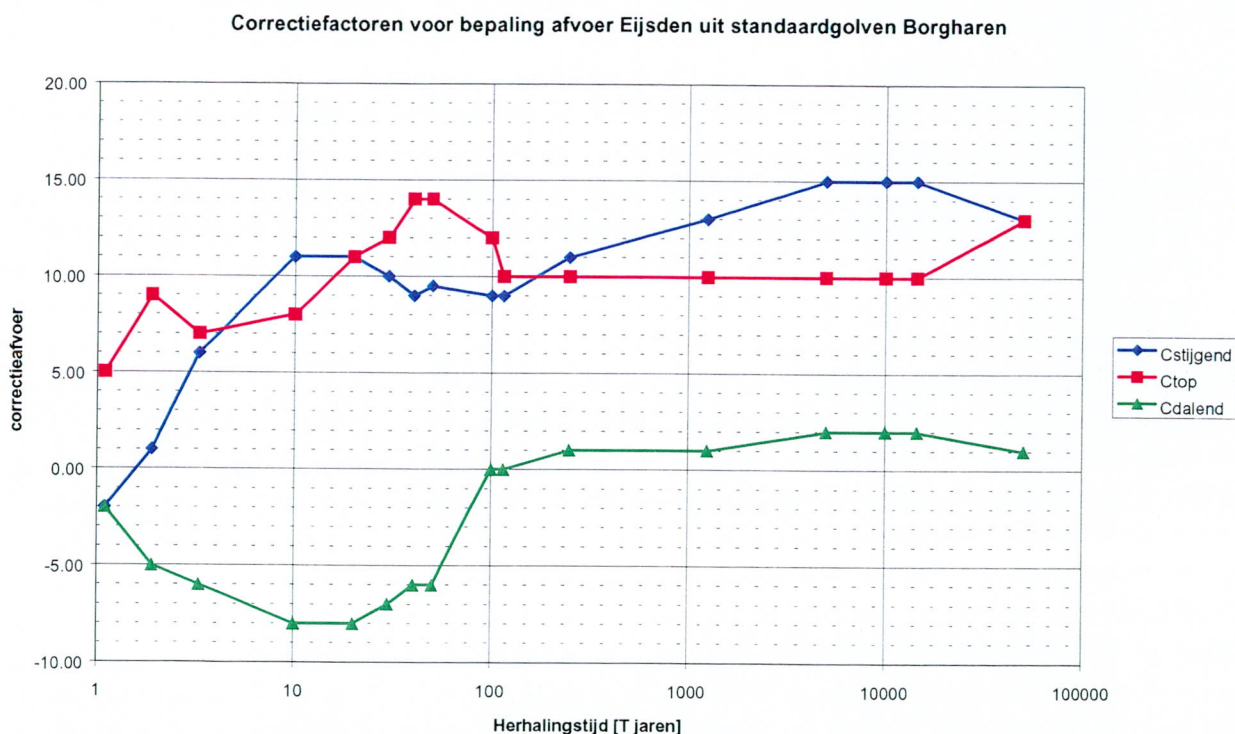
De standaardgolven bij Borgharen-dorp zijn gebaseerd op historisch opgetreden afvoergolven. Door ingrepen in de Maas wordt de transformatie van de afvoer tussen Eijsden en Borgharen beïnvloed.

De kades DGR rond Borgharen, Smeermaas en Itteren werken bij overstromen als retentiegebieden waardoor de golfvorm bij Borgharen wordt beïnvloed. Bij het niet overstromen

van deze kades is het winterbed kleiner waardoor eveneens de golfvorm wordt beïnvloed. Voor een zuivere beschouwing van op te leggen randvoorwaarden bij Eijsden moet dan ook gerekend worden met een SOBEK-model waarin de kades DGR niet opgenomen zijn. Van de beschikbare SOBEK-modellen past Sobek-Maas versie 2000.2 het beste bij dit uitgangspunt. Dit model beschrijft de geometrie van de Maas voor de grootschalige ingrepen in het kader van DGR en Maaswerken. Met de vergelijkingen 3.1 t/m 3.4 zijn afvoerranden bij Eijsden aangemaakt. Deze afvoerrand bij Eijsden is samen met:

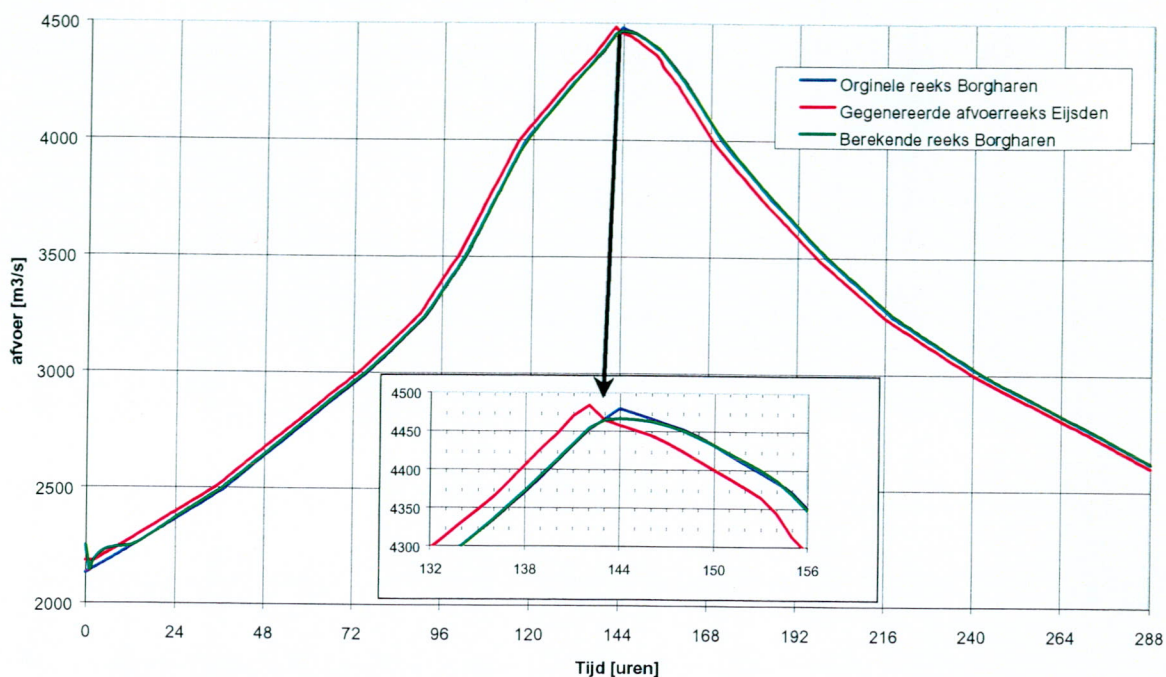
- de afvoerrand bij Borgharen,
- afvoerreeksen voor Roer en Niers
- benedenrand bij Keizersveer

aangeboden aan de hulpprogrammatuur rondom SOBEK. Met de resulterende invoerbestanden voor SOBEK zijn berekeningen uitgevoerd met met SOBEK-Maas versie 2000.2. Vervolgens is de berekende afvoer bij Borgharen vergeleken met de standaardgolven bij Borgharen. Door wijzigingen in de constanten C_{stijgend} , C_{top} en C_{dalend} is op deze wijze iteratief de afvoerreeks bij Eijsden vastgesteld die voldoet aan de voorwaarde dat de gewenste afvoerreeks bij Borgharen wordt gereproduceerd. In Figuur 1 is een overzicht gegeven van de gevonden constanten bij verschillende herhalingtijden. In Figuur 2 is een voorbeeld gegeven van de gegenereerde afvoerreeks bij Eijsden, de originele reeks bij Borgharen en de berekende reeks bij Borgharen.



Figuur 1 : Gevonden correctiefactoren

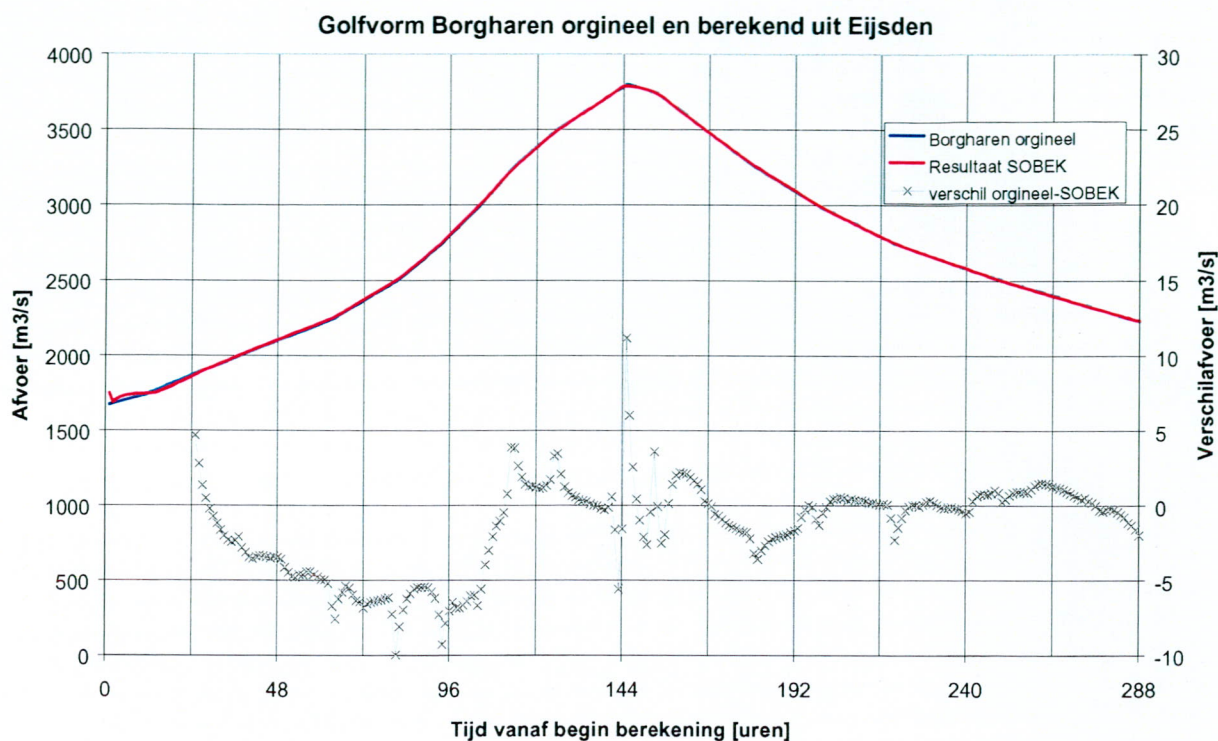
Bepaling afvoerrand Eijsden uit standaardgolf Borgharen



Figuur 2 : Voorbeeld gegenereerde afvoerreeks $T=10000$ jaar; Q Borgh. = $4480 \text{ m}^3/\text{s}$

In Figuur 3 is inzicht gegeven in de verschillen tussen de standaardgolf bij Borgharen en de met SOBEK berekende afvoergolf bij Borgharen op basis van de in memo bepaalde afvoergolf bij Eijsden. Uit de figuur kan afgeleid worden:

1. De eerste 24 uur treden grotere verschillen op door inspeelproblematiek
2. Verschillen tussen standaardgolf en met SOBEK berekende afvoergolf bij Borgharen-dorp blijven in het algemeen beperkt tot minder dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$
3. Op de top is de met SOBEK berekende afvoergolf systematisch $10\text{-}15 \text{ m}^3/\text{s}$ lager dan de standaardgolf; 1 uur vóór en 1 uur ná de top is dit verschil vrijwel teniet gedaan. Op grond van de fysica moet gesteld worden dat de standaardgolf in de uren rond de top te spits is.
4. De periode dat de met SOBEK berekende afvoergolf systematisch $5\text{-}6 \text{ m}^3/\text{s}$ hoger ligt dan de standaardgolf (dag 3 en dag 4) heeft geen invloed op de resultaten rond de top. Gezien de afvoerkrommes bij hoge afvoeren zullen de waterstandseffecten in het algemeen beperkt blijven tot minder dan 0.01 m .



Figuur 3 : Voorbeeld gegenereerde afvoerreeks $T=1250$ jaar; Q Borgh. = $3800 \text{ m}^3/\text{s}$

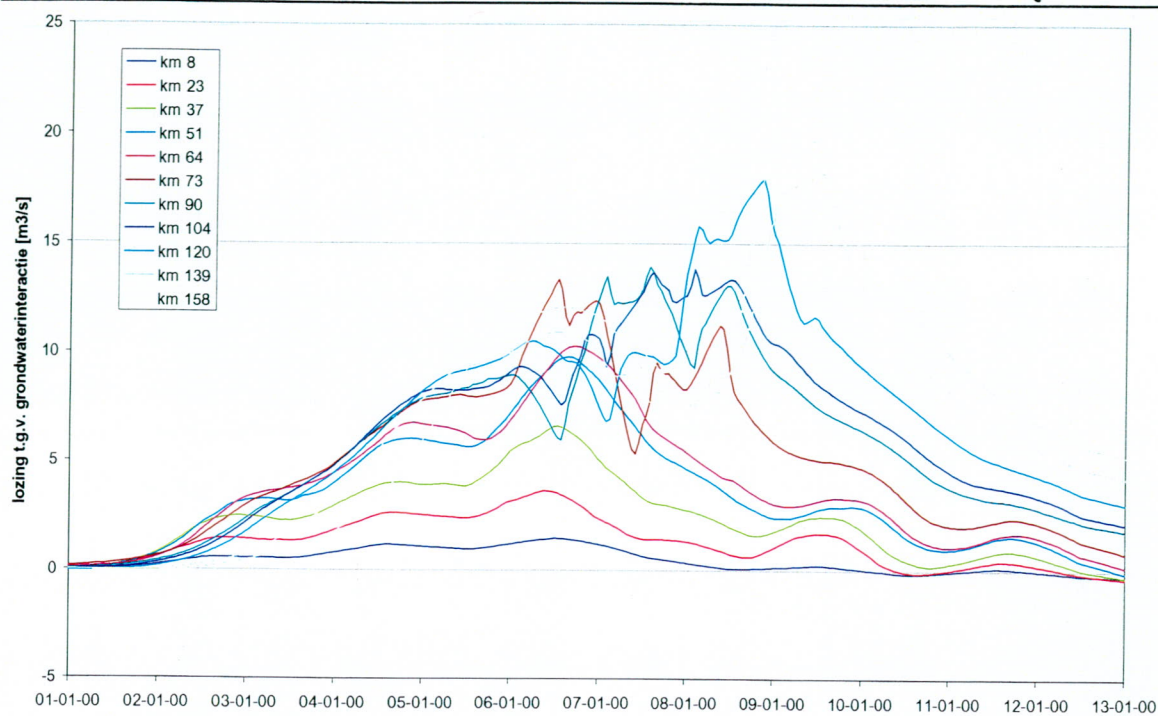
De methodiek is toegepast voor een breed scala aan afvoergolven. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de afvoergolven

Tabel 1: Overzicht beschikbare afvoergolven

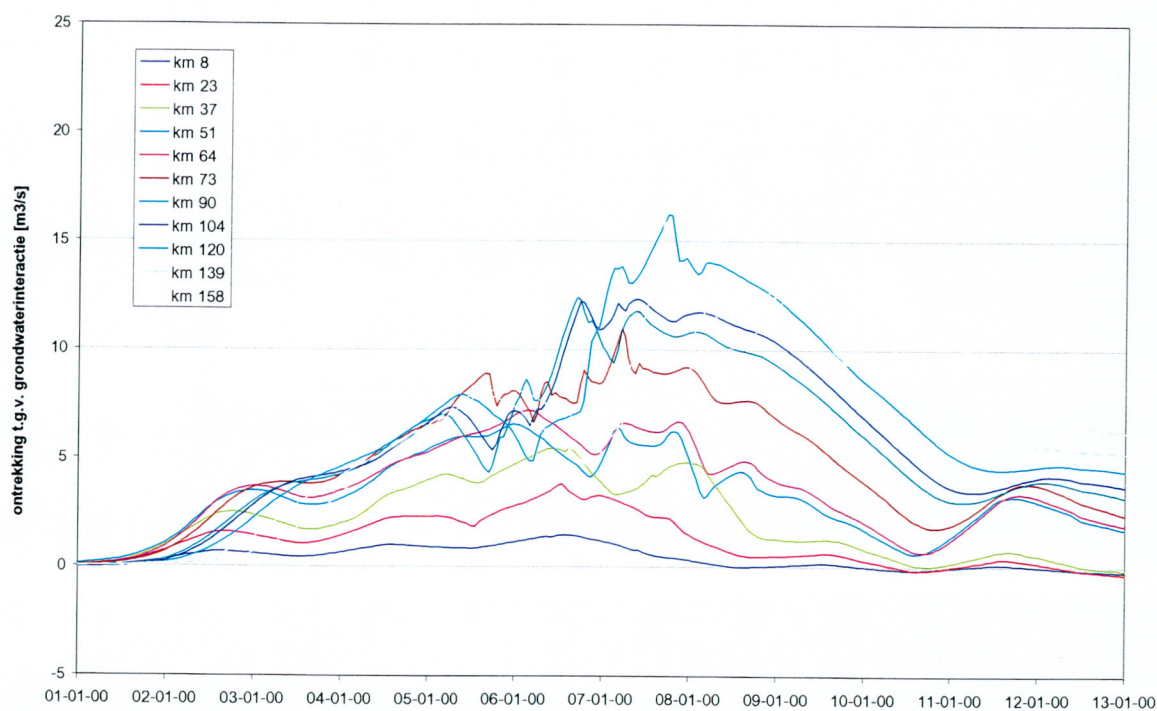
Herhalingstijd	Q Borgharen streefafvoer	Q Borgharen modelafvoer	Cstijg	Ctop	Cdal	opmerking
1.1	1300	1295	-2	5	-2	
1.9	1550	1543	1	9	-5	
3.3	1750	1742	6	7	-6	
10	2145	2138	11	8	-8	
20	2390	2386	11	11	-8	
30	2530	2527	10	12	-7	
40	2630	2627	9	14	-6	
50	2710	2707	9.5	14	-6	
100	2950	2946	9	12	0	
115	3000	2993	9	10	0	
250	3275	3267	11	10	1	IVM-huidig
1250	3800	3791	13	10	1	IVM-huidig
1954	3950	3938	14	10	1.5	IVM-klimaat
5000	4271	4258	15	10	2	
10000	4480	4466	15	10	2	
14450	4600	4585	15	10	2	IVM-klimaat
50505	5021	4992	13	13	1	

Bij de tabel moet nog opgemerkt worden dat WAQUA het afvoerproces tussen Eijsden en Borgharen anders berekent dan SOBEK. Bij de interpretatie van WAQUA-resultaten dient hiermee rekening gehouden te worden. Het verdient altijd aanbeveling om de afvoer bij Borgharen te controleren.

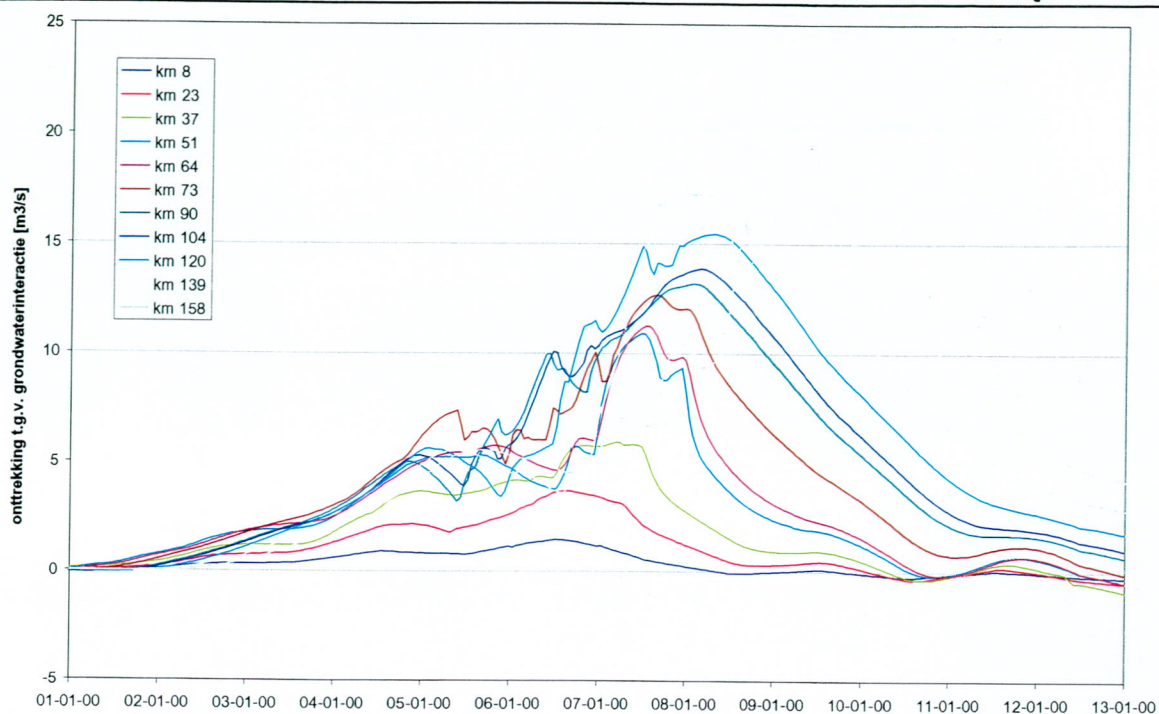
Bijlage 3 : Grondwater lozingen in WAQUA



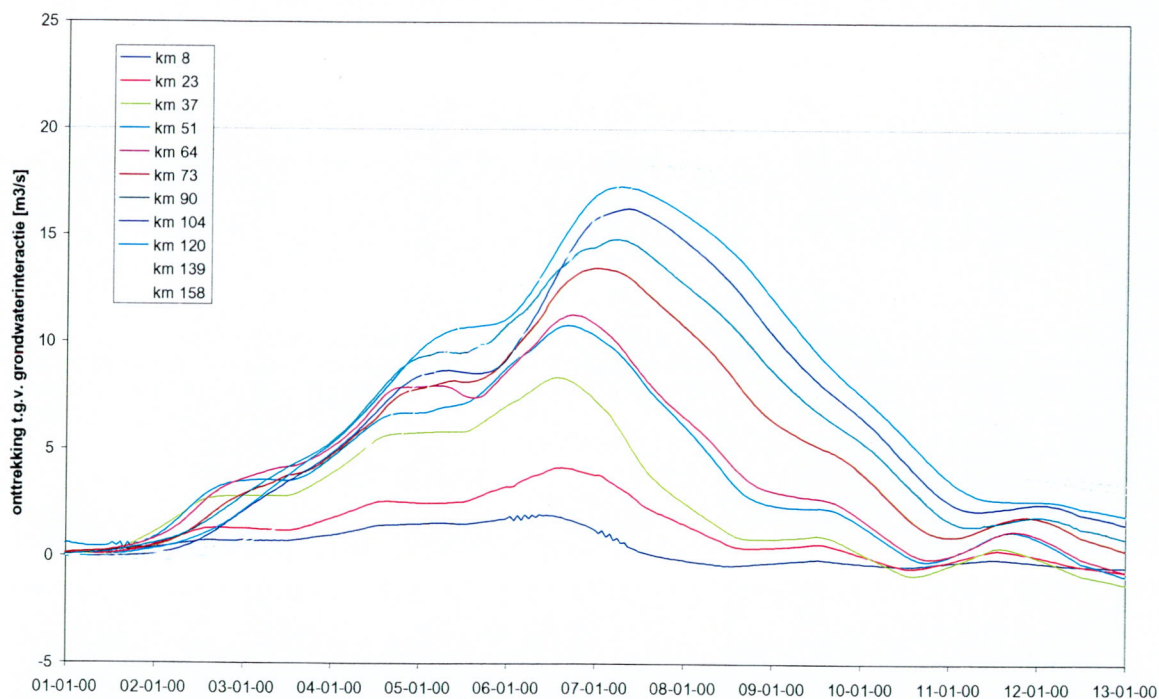
Figuur 1 Referentiesituatie 250gh-berekening



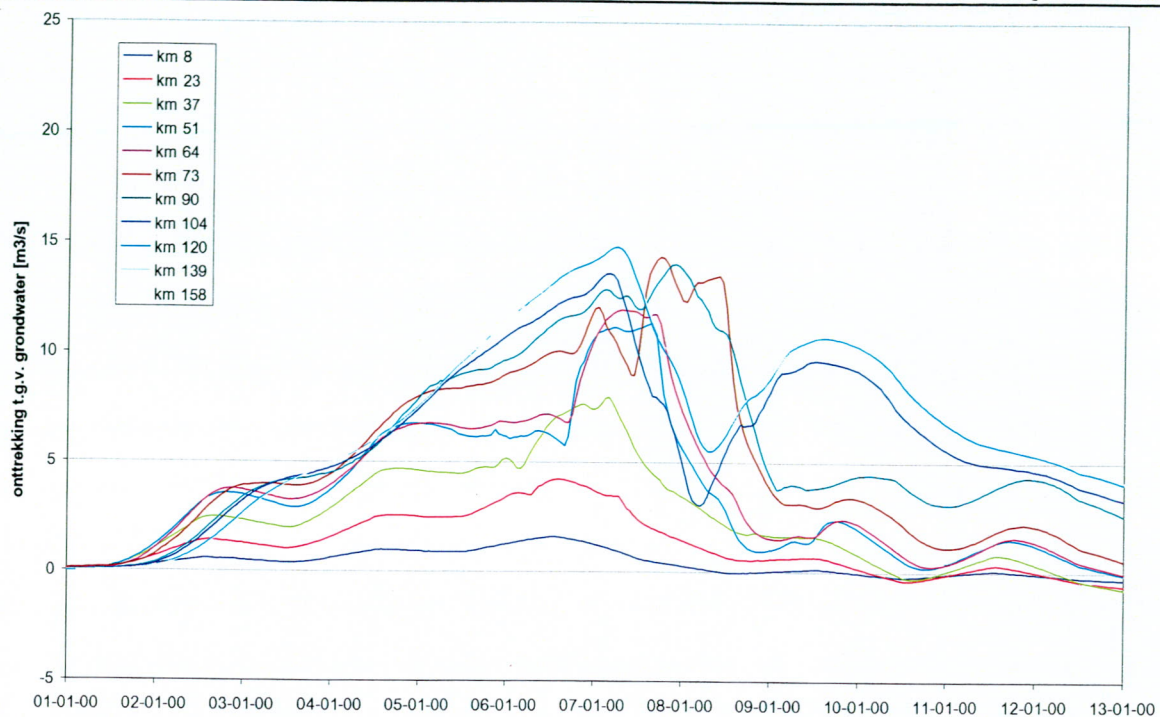
Figuur 2 Referentiesituatie 1250gh-berekening



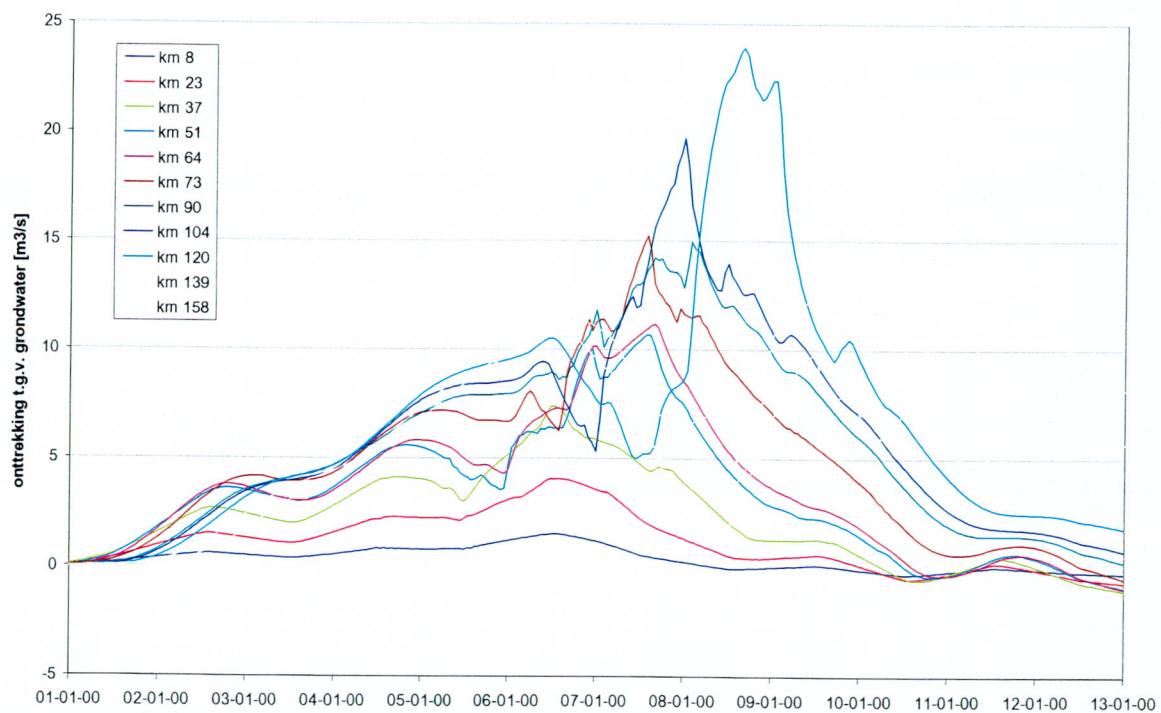
Figuur 3 Referentiesituatie 250gk-berekening



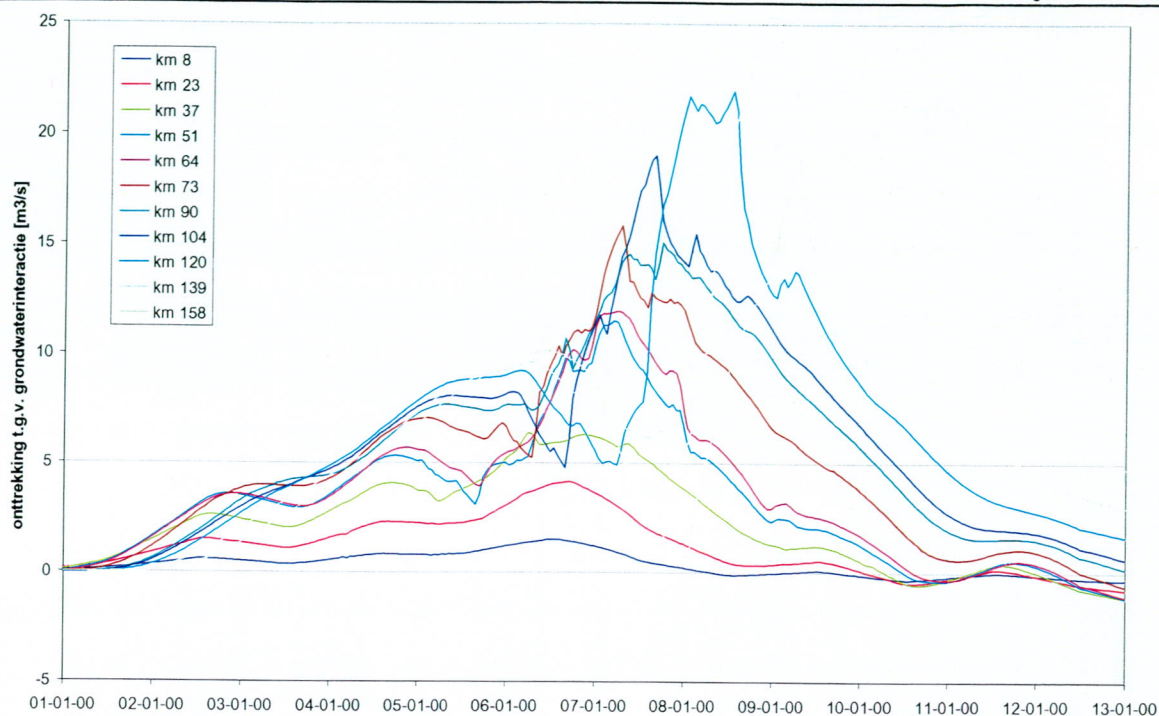
Figuur 4 Situatie na Maaswerken 250gh-berekening



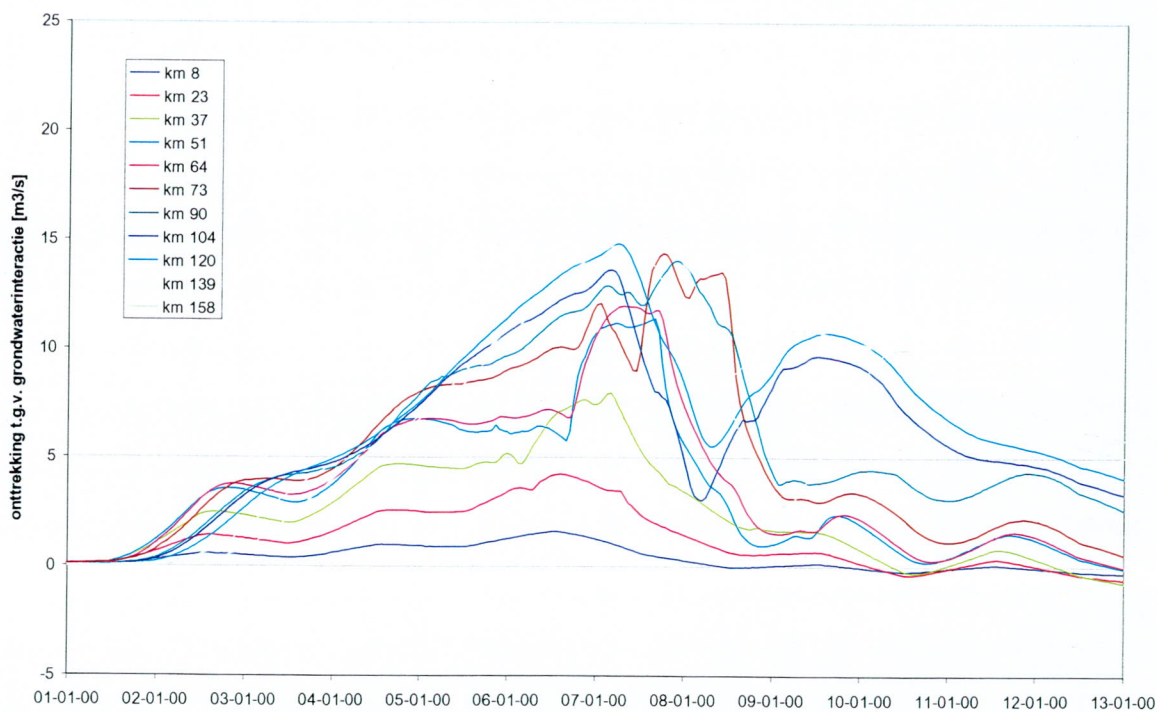
Figuur 5 Situatie na Maaswerken 1250gh-berekening



Figuur 6 Situatie na Maaswerken 4200-berekening



Figuur 7 Situatie na Maaswerken 4400-berekening



Figuur 8 Situatie na Maaswerken 1250gk-berekening

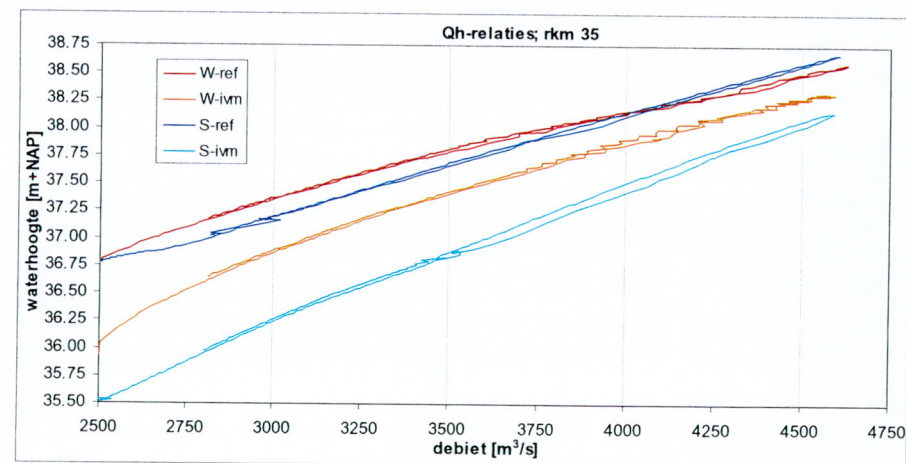
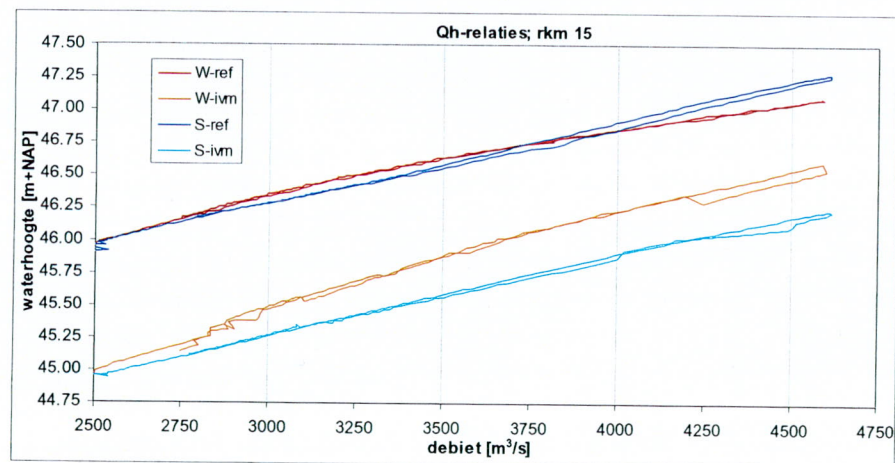
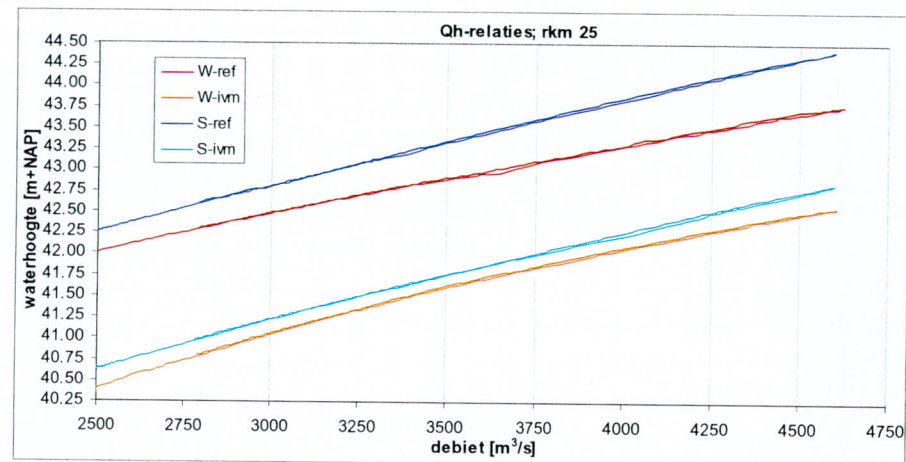
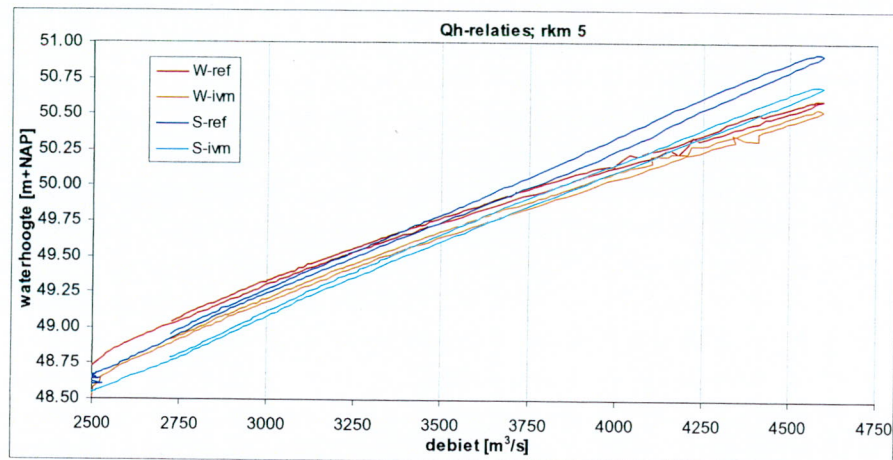
Bijlage 4 : Overzicht modelschematisaties*Tabel 1 Specificatie en naamgeving SOBEK-berekeningen*

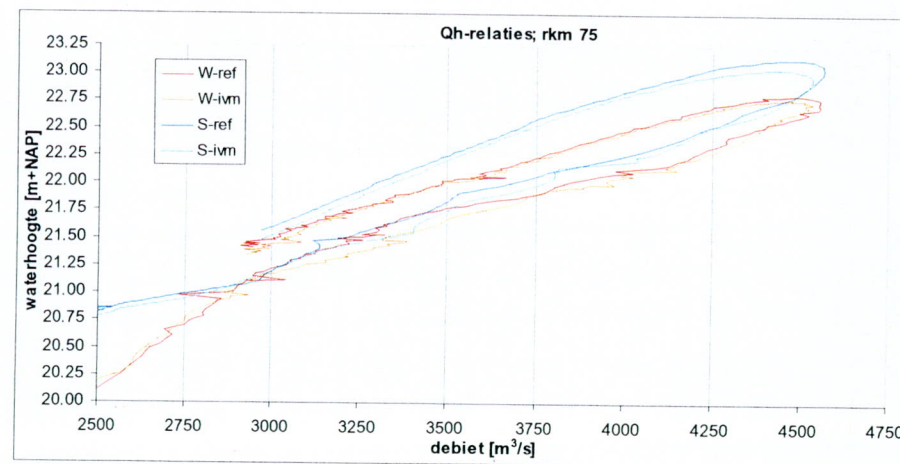
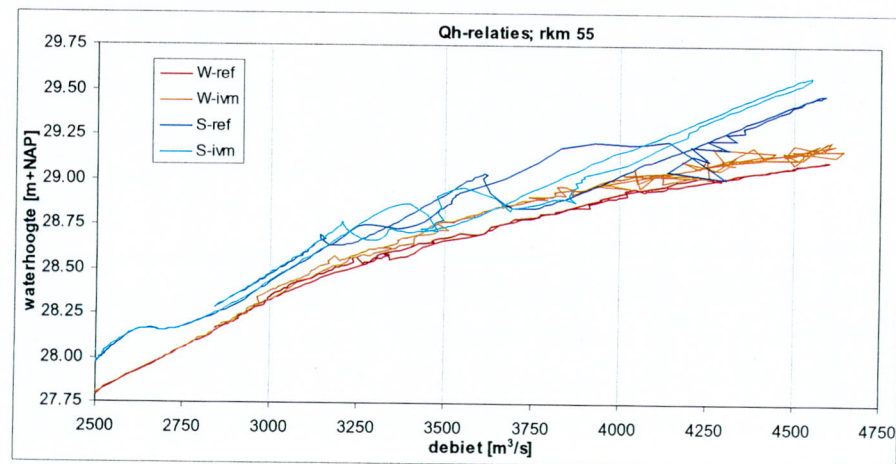
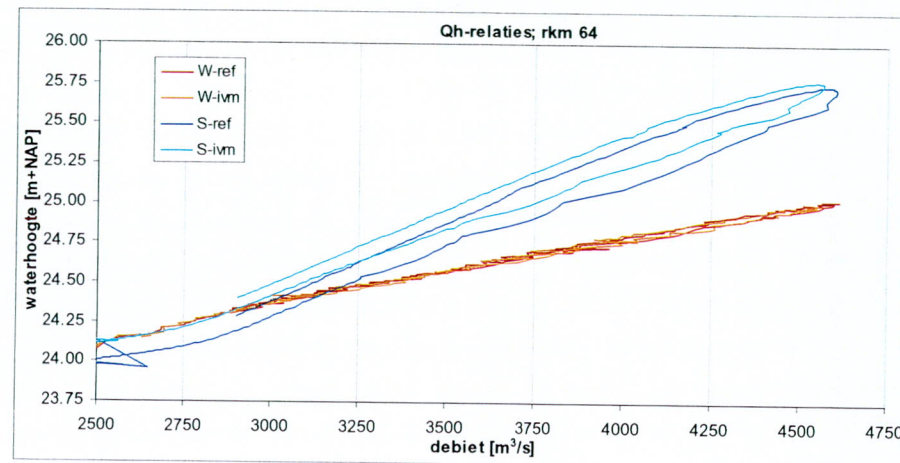
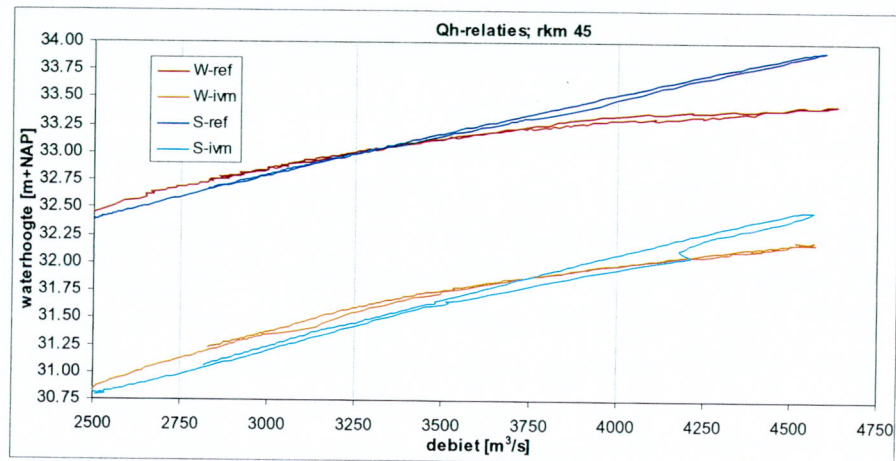
frequentie (afvoer)	1/250 (3275m ³ /s)	1/250+20% (3935m ³ /s)	1/1250 (3800m ³ /s)	1/1250+20% (4600m ³ /s)	(4200m ³ /s)	(4400m ³ /s)
Referentiesituatie (refivm)	S-ref 250gh	S-ref 250gk	S-ref 1250gh	S-ref 1250gk		
Na Maaswerken (2001.1)	S-ivm 250gh	S-ivm 250gk	S-ivm 1250gh	S-ivm 1250gk	S-ivm 4200	S-ivm 4400

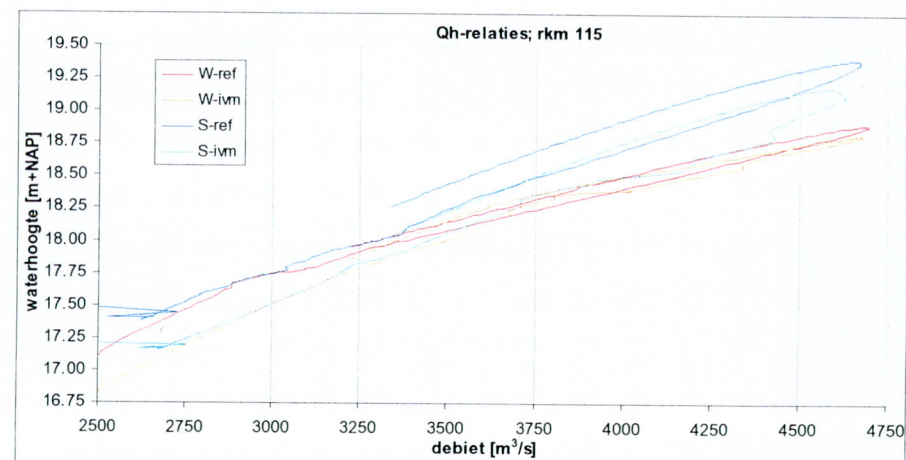
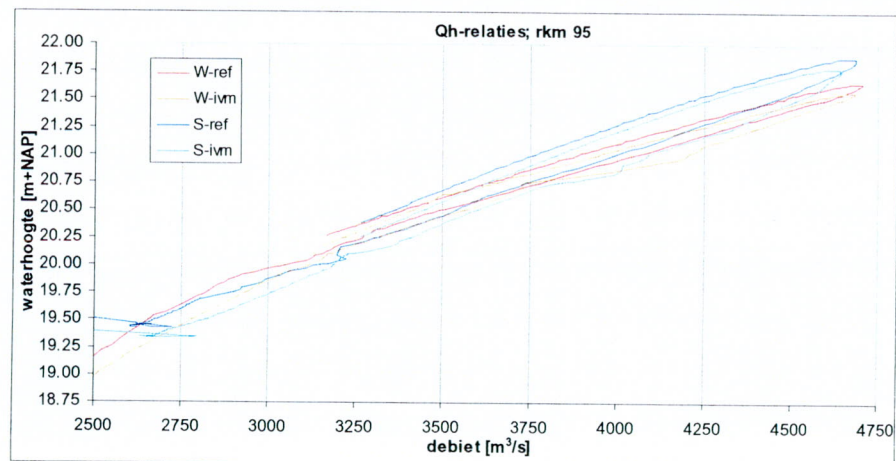
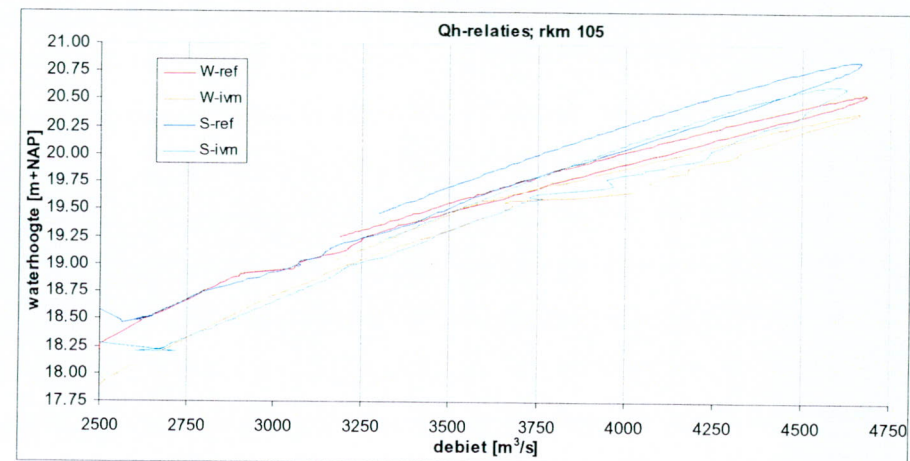
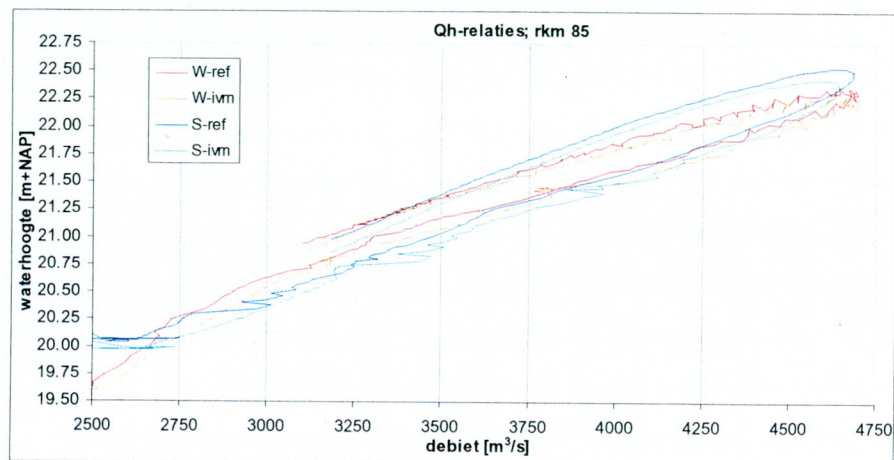
Tabel 2 Overzicht WAQUA-berekeningen

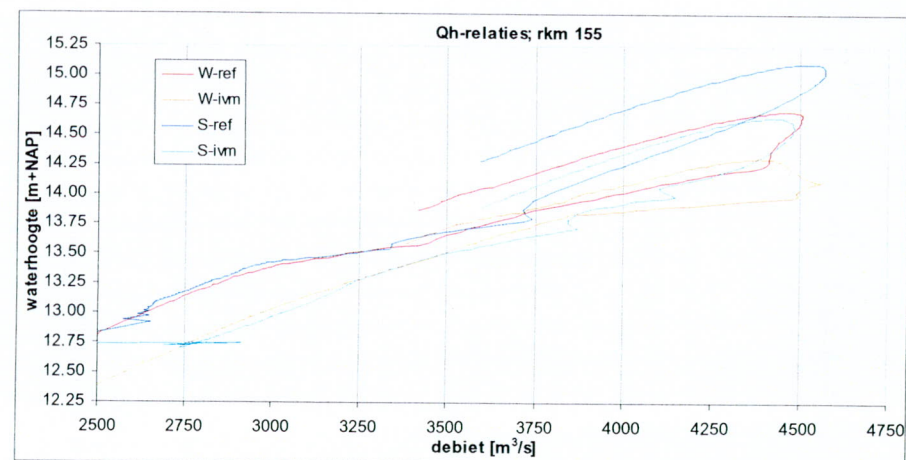
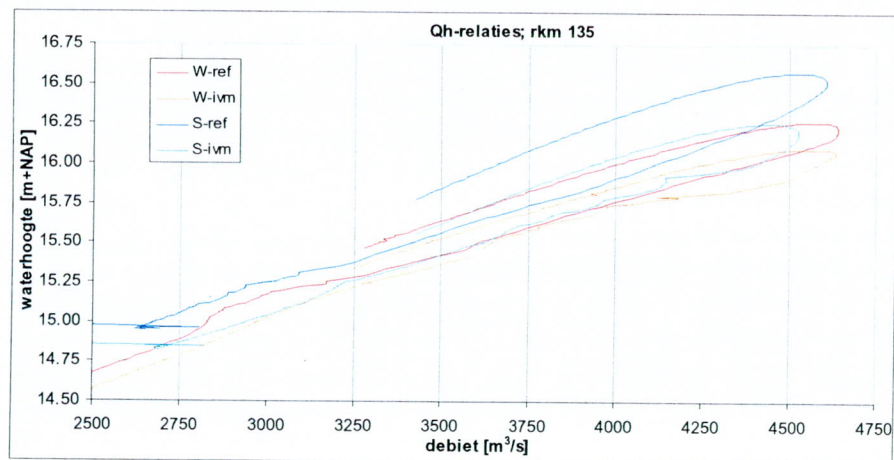
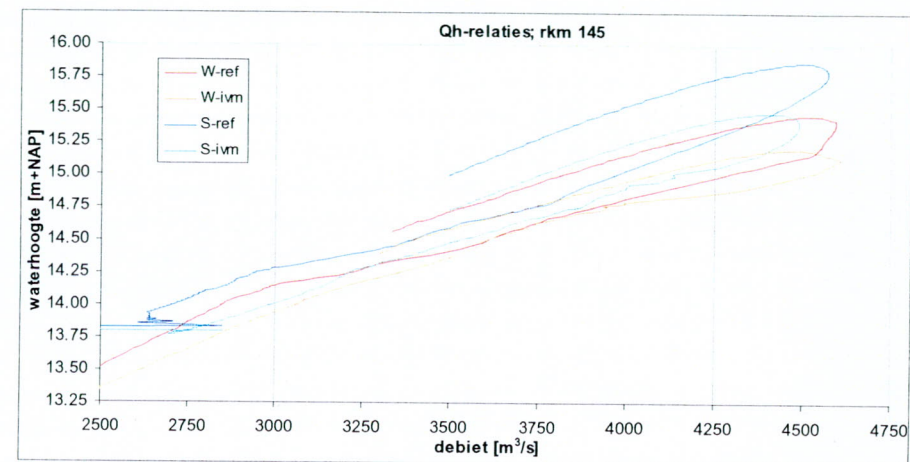
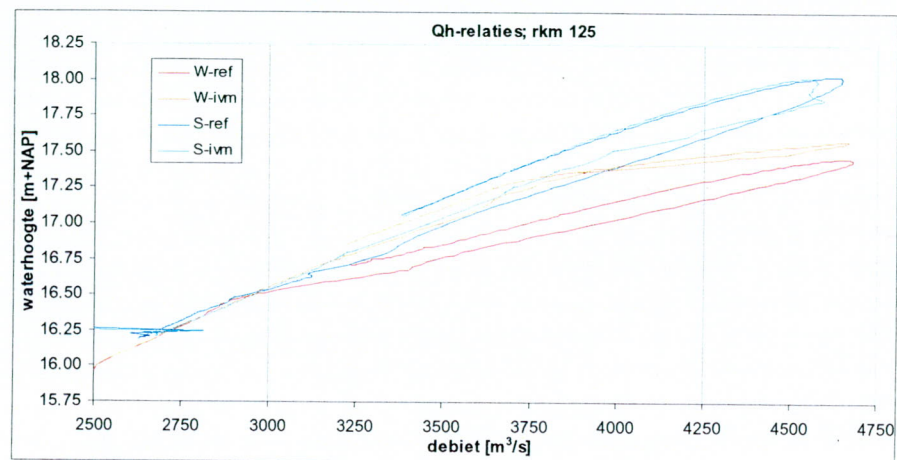
frequentie (afvoer)	1/250 (3275m ³ /s)	1/250+20% (3935m ³ /s)	1/1250 (3800m ³ /s)	1/1250+20% (4600m ³ /s)	(4200m ³ /s)	(4400m ³ /s)
Referentiesituatie (95dgr)	W-ref 250gh	W-ref 250gk	W-ref 1250gh	W-ref 1250gk		
Na Maaswerken (vo+s2)	W-ivm 250gh	W-ivm 250gk	W-ivm 1250gh	W-ivm 1250gk	W-ivm 4200	W-ivm 4400

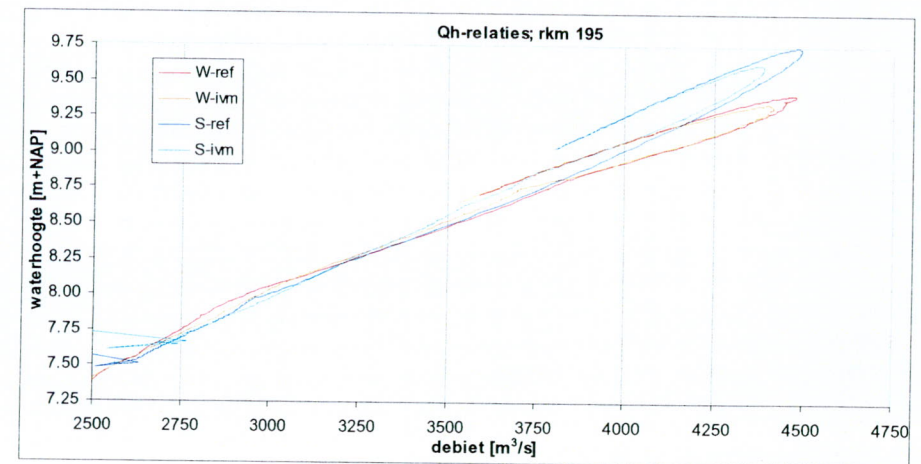
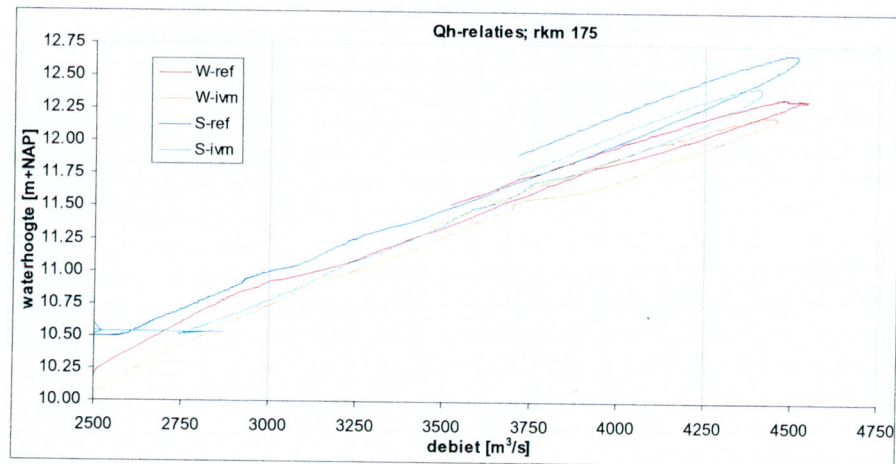
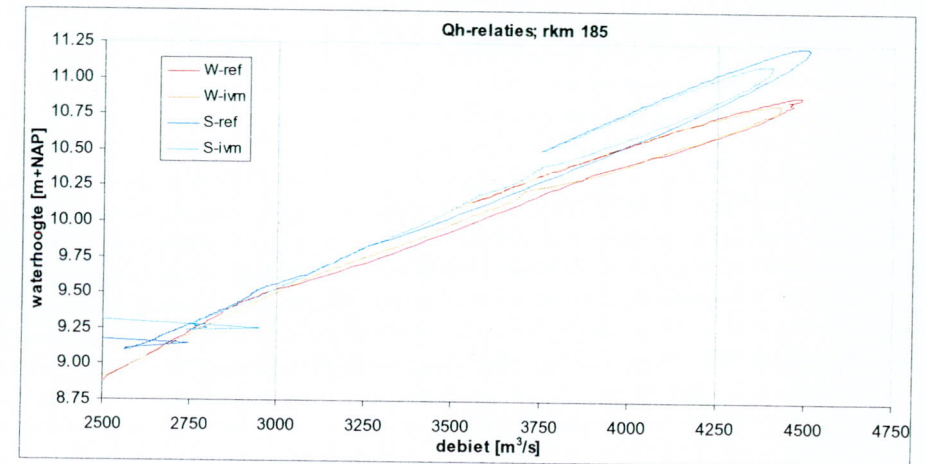
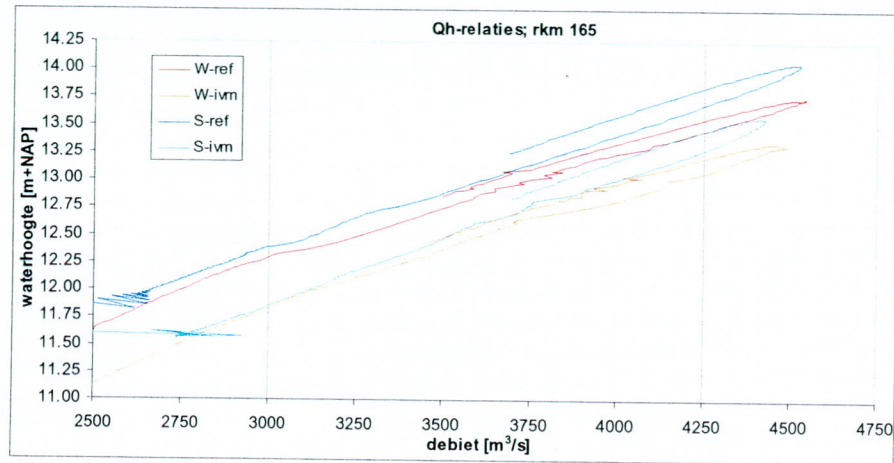
Bijlage 5 : Qh-relaties SOBEK en WAQUA

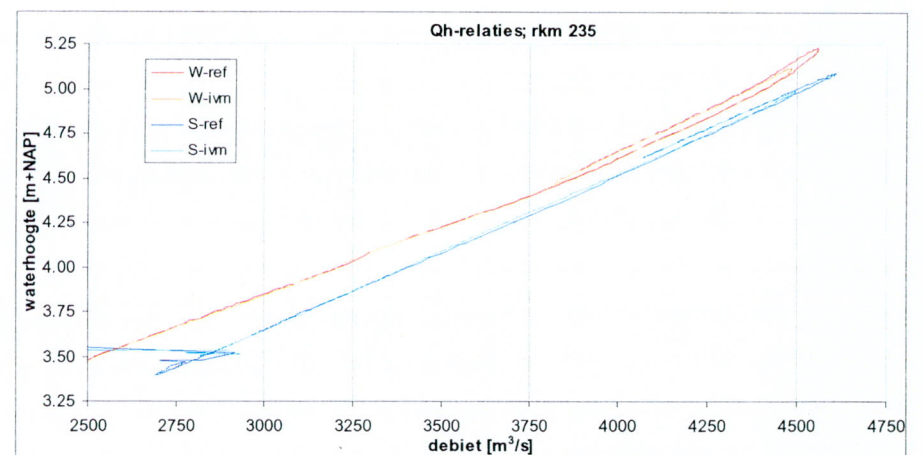
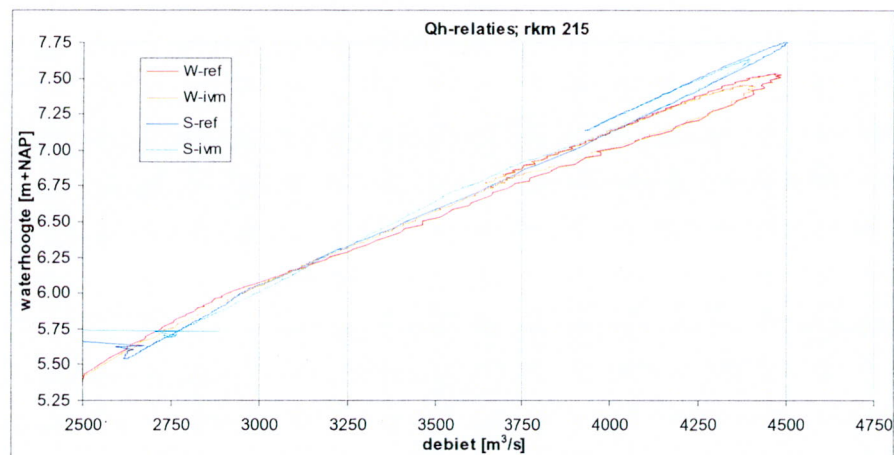
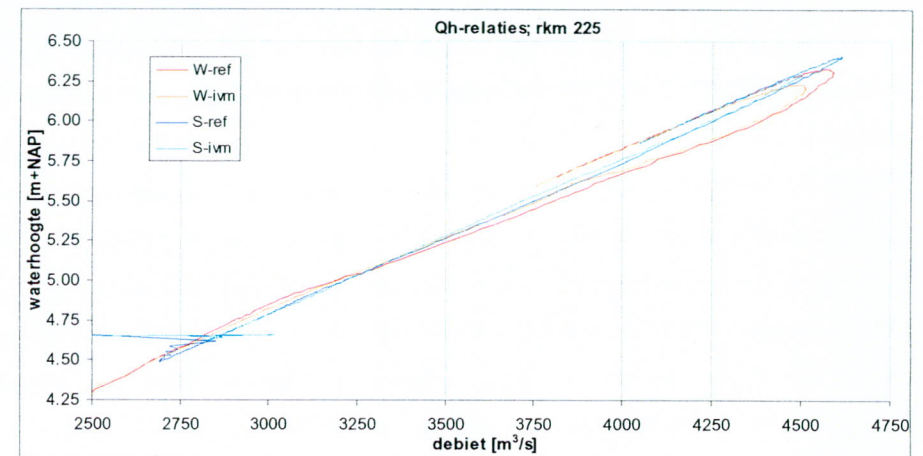
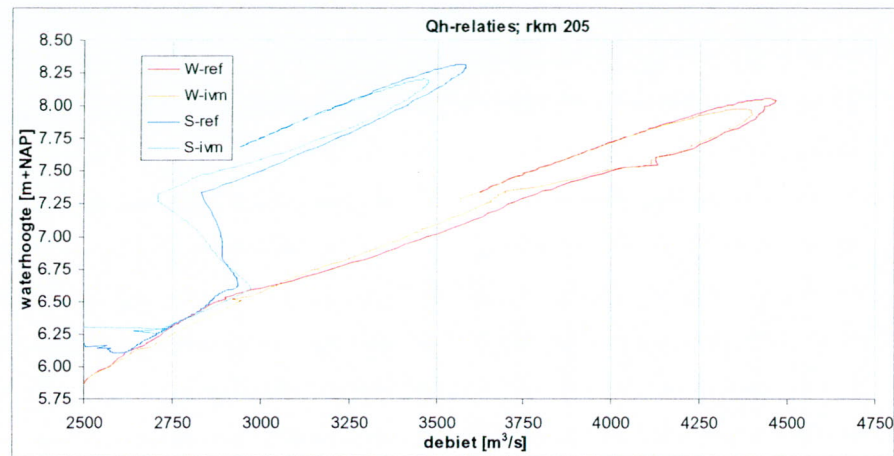


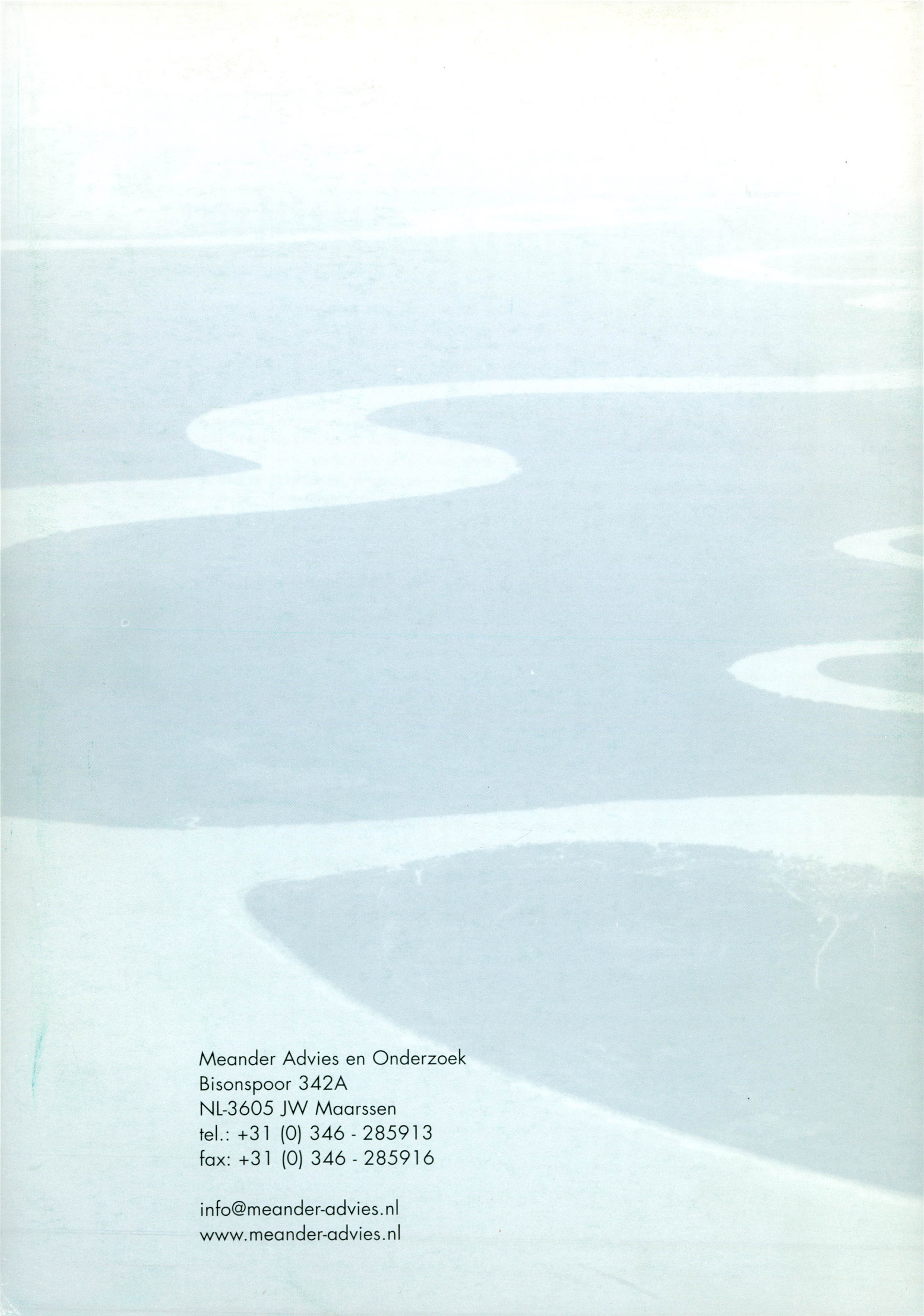












Meander Advies en Onderzoek
Bisonspoor 342A
NL-3605 JW Maarssen
tel.: +31 (0) 346 - 285913
fax: +31 (0) 346 - 285916

info@meander-advies.nl
www.meander-advies.nl