

Hydraulische knelpunten Rijntakken en Maas

Een analyse op basis van verhanglijnen



Hydraulische knelpunten Rijntakken en Maas

Een analyse op basis van verhanglijnen

Nathalie Asselman
André Hendriks

1230044-000

Titel
Hydraulische knelpunten Rijntakken en Maas

Opdrachtgever WVL	Project 1230044-000	Kenmerk 1230044-000-ZWS-0020	Pagina's 73
-----------------------------	-------------------------------	--	-----------------------

Trefwoorden
Hydraulische knelpunten, Rijntakken, Maas, verhanglijnen

Samenvatting
Momenteel wordt in het kader van BOA rivieren gewerkt aan een zogenaamde lange-termijnambitie rivierverruiming. Hiervoor wordt een Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse (MKBA) opgesteld waarbij een strategie die enkel uit dijkversterking bestaat (de referentiestrategie) wordt vergeleken met de geactualiseerde voorkeusstrategie die bestaat uit een combinatie van dijkversterking en rivierverruimende maatregelen. Eén van de criteria die wordt meegenomen in de MKBA is de bijdrage aan een robuust riviersysteem. Tijdens sessies met vertegenwoordigers van waterschappen en regionale diensten van RWS is aangegeven dat een robuust riviersysteem onder andere wordt gekenmerkt door een gelijkmatige doorstroming. Ofwel: een riviersysteem zonder hydraulische knelpunten. In deze studie is in beeld gebracht (1) waar langs de Rijntakken en de Maas bij hoogwater sprake is van een hydraulisch knelpunt, en (2) in hoeverre de bestaande hydraulische knelpunten worden opgelost door de rivierverruimende maatregelen die in de VKS van het Deltaprogramma rivieren zijn voorgesteld.

Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
03	Okt. 2016	Nathalie Asselman	NA	Frans Klijn	b/a MO	Annemargreet de Leeuw	AL

Status
definitief

Inhoud

Samenvatting	i
1 Inleiding	1
1.1 Kader	1
1.2 Dit rapport	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Het principe van de verhanglijn	3
2.1 Wat is een verhanglijn?	3
2.2 Verhanglijnen en hydraulische knelpunten - theorie	3
2.3 Verhanglijnen en hydraulische knelpunten - praktijk	4
2.4 Verwijderen van hydraulische knelpunten	5
3 Methode	7
4 Bevindingen BovenRijn en Waal	9
4.1 Globaal beeld Bovenrijn en Waal	9
4.2 Resultaten in detail	10
4.2.1 BovenRijn – Waal, traject Lobith-Millingen (km 860-870)	11
4.2.2 Waal traject Millingen Dodewaard (km 865-900)	12
4.2.3 Waal traject Dodewaard – Opijnen (km 895-930)	12
4.2.4 Waal traject Opijnen – Hardinxveld (km 925-960)	13
4.3 Samenvattend overzicht	14
5 Bevindingen Pannerdensch Kanaal en IJssel	17
5.1 Globaal beeld Pannerdensch Kanaal en IJssel	17
5.2 Resultaten in detail	19
5.2.1 Lobith – Pannerden (km 860-870)	19
5.2.2 Pannerden - Olburgen (km 865-900)	20
5.2.3 Olburgen – Zutphen (km 900-930)	21
5.2.4 Zutphen - Wapenveld(km 930-960)	22
5.2.5 Wapenveld - Kampen(km 960-991)	23
5.3 Samenvattend overzicht	23
6 Bevindingen Nederrijn-Lek	27
6.1 Globaal beeld Nederrijn en Lek	27
6.2 Resultaten in detail	28
6.2.1 Pannerden – Wageningen (km 870-900)	28
6.2.2 Wageningen – Ravenswaaij (km 900-930)	29
6.2.3 Ravenswaaij – Tienhoven (km 930-960)	30
6.2.4 Tienhoven - Krimpen (km 960-985)	31
6.3 Samenvattend overzicht	32
7 Bevindingen Limburgse Maas	35
7.1 Globaal beeld Limburgse Maas	35
7.2 Resultaten in detail	37
7.2.1 Eijsden – Stokkem (km 2,5 - 40)	38

7.2.2	Meers – Linne (km 30 - 70)	39
7.2.3	Linne – Belfeld (km 70 - 100)	40
7.2.4	Belfeld – Grubbenvorst (km 100 - 115)	41
7.2.5	Venlo – Boxmeer (km 110 - 150)	42
7.3	Samenvattend overzicht	43
8	Bevindingen Brabantse Maas	47
8.1	Globaal beeld Brabantse Maas	47
8.2	Resultaten in detail	48
8.2.1	Boxmeer – Grave (km 150 - 176)	48
8.2.2	Grave – Lith (km 176 - 200)	49
8.2.3	Lith – Raamsdonksveer (km 200 - 245)	50
8.3	Samenvattend overzicht	51
9	Conclusies	53
10	Referenties	55
 Bijlage(n)		
A	Hydraulische knelpuntenanalyse 2015 Waal	A-1
B	Hydraulische knelpuntenanalyse (2015) Venlo	B-1
C	Legenda samenvattende tabellen	C-1

Samenvatting

Kader

Momenteel wordt in het kader van BOA rivieren gewerkt aan een zogenaamde lange-termijnambitie rivierverruiming. Hiervoor wordt een Maatschappelijke Kosten-BatenAnalyse (MKBA) opgesteld waarbij een strategie die enkel uit dijkversterking bestaat (de referentiestrategie) wordt vergeleken met de geactualiseerde voorkeusstrategie die bestaat uit een combinatie van dijkversterking en rivierverruimende maatregelen. Eén van de criteria die wordt meegenomen in de MKBA is de bijdrage aan een robuust riviersysteem. Tijdens sessies met vertegenwoordigers van waterschappen en regionale diensten van RWS is aangegeven dat een robuust riviersysteem onder andere wordt gekenmerkt door een gelijkmatige doorstroming. Ofwel: een riviersysteem zonder hydraulische knelpunten.

Een manier om hydraulische knelpunten in beeld te krijgen is met behulp van verhanglijnen. Wanneer een verhanglijn afvakt en plots weer steiler wordt, dan duidt dit veelal op een knelpunt.

Dit rapport

Doel van dit rapport is om aan te geven:

- 1 waar langs de Rijntakken en de Maas bij hoogwater sprake is van een hydraulisch knelpunt, en
- 2 in hoeverre de bestaande hydraulische knelpunten worden opgelost door de rivierverruimende maatregelen die in de VKS zijn voorgesteld.

Dit rapport beoogt vooral bij te dragen aan de studie naar de bijdrage van rivierverruiming aan een robuust riviersysteem. In die context is het voornaamste doel te bepalen waar de doorstroming in de rivier gelijkmatiger/verbeterd kan worden. Rivierverruiming ter plaatse van knelpunten draagt daar aan bij. In welke mate volgt uit het oplossend vermogen van de beschouwde VKS maatregelen.

Het rapport kan echter ook gebruikt worden bij de actualisatie van de VKS. Middels de knelpuntanalyse is in beeld gebracht waar effectieve maatregelen genomen kunnen worden, waardoor ook benedenstrooms gelegen maatregelen effectiever kunnen worden.

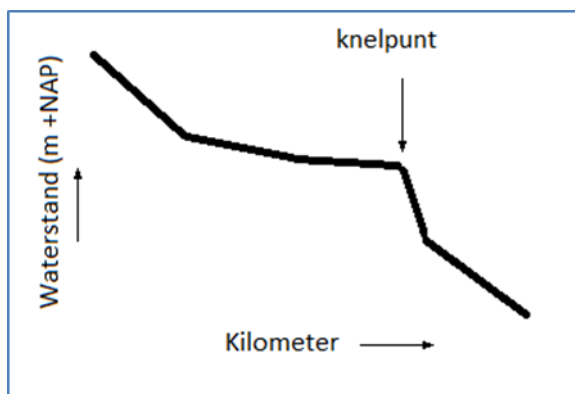
Methode

De in dit rapport gepresenteerde hydraulische knelpunten zijn geïdentificeerd op basis van sprongen in de verhanglijn op de rivier. De volgende stappen zijn doorlopen:

- Waterstanden op de as van de rivier zijn berekend voor verschillende afvoeren op de Rijn (te Lobith) en op de Maas (te Eijsden). De berekeningen zijn uitgevoerd met het Deltamodel.
- De waterstanden zijn uitgezet tegen de rivierkilometers. Omdat op de Maas en de IJssel rivierkilometers ontbreken en de afstand tussen twee rivierkilometers ook elders niet altijd exact gelijk is aan 1 km, zijn de rivierkilometers voor dit doel gecorrigeerd. Bij het

bespreken van de knelpunten zijn ook steeds de ongecorrigeerde rivierkilometers genoemd (aangeduid met kmr, naar de kilometerraai op de oever).

- De waterstanden zijn uitgezet in grafieken om zo (op het oog) hydraulische knelpunten te kunnen identificeren. Bij een knelpunt neemt het verhang sterk af, om vervolgens juist weer toe te nemen. Dit resulteert in ‘bobbels’ in de geplote waterstandslijnen (zie onderstaande figuur).



Figuur 1 Fictieve verhanglijn op een riviertraject met een hydraulisch knelpunt

- Er zijn ook grafieken gemaakt van de gemiddelde waterstand over een traject van 5 km lengte. Door beide waterstandslijnen in 1 grafiek te plotten, vallen hydraulische knelpunten meer op.
- De omvang van een knelpunt is berekend als het verschil tussen de berekende waterstand en de gemiddeld berekende waterstand op een traject van ongeveer 5 kilometer.

Deze analyse is uitgevoerd voor de huidige situatie en de situatie na realisatie van de voorkeursstrategie van DPR (VKS) uit 2014. Bij de analyse is vooral gekeken naar knelpunten bij hoge afvoeren.

Bij de analyse van de resultaten wordt onderscheid gemaakt tussen grootschalige knelpunten die merkbaar zijn over een afstand van 10 tot 20 kilometer en kleinschalige knelpunten waarvan het effect vaak beperkt is tot een afstand van ongeveer 5 kilometer of minder.

Grootschalige knelpunten

Op de **Waal** bevindt zich een grootschalig knelpunt benedenstrooms van de voormalige overlaat bij Sint Andries. Mogelijk bevindt de Waal zich benedenstrooms van dit punt in een ‘te klein jasje’ omdat er geen water van de Waal meer richting de Maas stroomt. Vroeger was dit wel het geval. Of dit echt de (enige) verklaring is, is zonder nader onderzoek niet te zeggen.

Wanneer dit knelpunt inderdaad het gevolg is van het afsluiten van de Heerewaardense overlaat, dan hangt dit knelpunt samen met een systeemingreep. Dit is waarschijnlijk niet, of alleen met zeer grootschalige, rivierverruimende maatregelen op te lossen.

Grootschalige knelpunten op het **Pannerdensch Kanaal** hangen vooral samen met de splitsingspunten. Benedenstrooms van de Pannerdensche Kop neemt het verhang bij hogere afvoeren sterk toe. Aangenomen mag worden dat bij een vrij afstromende rivier (zonder regelwerken en kades) een groter deel van de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en de

IJssel zou gaan. Na realisatie van de rivierverruimende maatregelen uit de VKS komt ook de IJsselkop nadrukkelijker als 'knelpunt' naar voren. Beide knelpunten zijn voor een groot deel bewust door de mens gemaakt om de beleidsmatige afvoerverdeling te kunnen handhaven. Wanneer de regelwerken bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop geheel zouden worden open gezet zou de omvang van deze knelpunten afnemen of verdwijnen, maar zou een groter deel van de afvoer via het Pannerdensch Kanaal en de IJssel naar het noorden stromen. De vraag is of dat wenselijk is.

Bij afvoeren tot en met 13.000 m³/s te Lobith bevindt zich een grootschalig knelpunt op de **IJssel** rond km 950 (ongecorrigeerd km 960). Dit nauwe traject, bevindt zich bij Veessen. Bij hogere afvoeren 'verdwijnt' dit knelpunt, door de inzet van de bypass bij Veessen-Wapenveld. De bypass bij Veessen-Wapenveld is dus een effectieve maatregel waar het gaat om het verwijderen van knelpunten bij zeer hoge afvoeren.

Bij zeer hoge afvoeren is nog wel een grootschalig knelpunt te zien op de IJssel bij km 970 (ongecorrigeerd kmr 980). Dit is ter hoogte van Zwolle.

Langs de **Nederrijn-Lek** bevindt zich een grootschalig knelpunt bij Lexmond. Dit knelpunt wordt veroorzaakt door de smaller wordende uiterwaarden benedenstrooms van Lexmond. Dit zorgt voor opstuwning (en een geringer verhang) in een traject bovenstrooms van Lexmond (tussen Maurik en Lexmond).

Wanneer van enige afstand naar de verhanglijnen van de **Limburgse Maas** in z'n geheel wordt gekeken, dan valt op dat bij hoge afvoeren sprake is van een zeer sterke afname van het verhang tussen km 70 en 90. Stroomafwaarts hiervan neemt het verhang weer toe. Dit grootschalige 'knelpunt' is van geologische origine en wordt veroorzaakt door de Peelhorst die het water in de Roerdalslenk opstuwt. Bovenstrooms van km 90 bevindt de Maas zich in een breed dal (Maasplassengebied). Daarna wordt het dal veel smaller. Ook dit grootschalige knelpunt is niet eenvoudig met rivierverruiming op te lossen.

Wanneer naar de verhanglijn van de **Brabantse Maas** in zijn geheel wordt gekeken, dan valt op dat bij hoge afvoeren sprake is van een afname van het verhang tussen km 130 en 150 (ongecorrigeerd 132 – 154) en tussen km 195 en 210 (ongecorrigeerd bij km 199 – 214). Het eerste traject zou kunnen duiden op een grootschalig knelpunt bij Gennep. Daar begint de bedijking en stroomde vroeger een deel van de afvoer van de Maas via de Beerse overlaat. Het tweede traject met een geringer verhang duidt op een knelpunt bovenstrooms van Den Bosch en hangt mogelijk samen met de dijkkring Alem en de dam daar naar toe. Maar ook de aanwezigheid van schaar dijken in meanderbochten kan een rol spelen.

Kleinschalige knelpunten

BovenRijn, Waal en BovenMerwede

Een overzicht van de kleinschalige knelpunten zoals geïdentificeerd langs de BovenRijn, Waal en BovenMerwede is te zien in Tabel 1. De grote knelpunten hebben een oranje/rode kleur gekregen. Kleine knelpunten zijn groen gekleurd (de klasse-indeling is te vinden in Bijlage C van het rapport). Ook het effect van de VKS is bepaald. Een donkergroene of blauwe kleur duidt op een groot positief effect. Een rode of oranje kleur duidt op een negatief effect. In dat laatste geval komt het knelpunt na uitvoering van de VKS dus duidelijker naar voren.

De knelpunten die het meest in het oog springen bevinden zich bij Woudrichem en Oosterhout. Ook Tolkamer en Sleeuwijk komen nadrukkelijk naar voren. Uit eerdere analyses kwam Nijmegen/Lent (km 883) als een van de grootste knelpunten naar voren. Dit knelpunt is door de by pass (PKB-RvR) nagenoeg opgelost (in het overzicht heeft het knelpunt een groene kleur). Ook Zaltbommel is in eerdere analyses als knelpunt genoemd. In de omgeving van Zaltbommel zijn in het kader van Ruimte voor de Rivier reeds rivierverruimende maatregelen uitgevoerd. De omgeving van Zaltbommel komt in de huidige analyse nog wel als knelpunt naar voren, maar minder pregnant.

Tabel 1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de BovenRijn, Waal en BovenMerwede. Kilometers betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers (de kilometerraaien langs de oever) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect	maatregel met pos effect
		Ref	VKS		VKS	in VKS
949 (951)	Brakel Benedenwaarden	10	12	lokale vernauwing (benedenstrooms RvdR maatregel Munnikenland)	-2	
887 (888)	Oosterhout	10	7	Schaardijk + hogere terreinen Staartjeswaard	3	dijkverl. Oosterhout; Moespoetsche waard
862 (862)	Tolkamer	8	8	versmalling uiterwaarden, schaarlijk	0	-
953 (955)	Sleeuwijk	8	4	vernauwing	4	maatr.pakket 1 (mn nevengeul Sleeuwijk?)
916 (917)	Tiel Passewaaij	7	8	steenfabriek en smalle uiterwaard + hoge kades linkeroever	-1	
932 (933)	Waardenburg (Rijswaard)	7	4	lokale vernauwing (o.a. A2 en spoorbrug Zaltbommel)	3	Rijswaard?, Cropsche Waard?
957 (959)	Sleeuwijk/Gorinchem	7	0	vernauwing in combinatie met landhoofd brug	7	maatr.pakket 1 (mn nevengeul Sleeuwijk?)
926 (927)	Heesselt/Hurwenen	5	5	schaardijk linkeroever, hoog terrein in smalle uiterwaard rechteroever	0	
878 (878)	Bemmel	5	2	hoogwatervrij terrein Bemmelsche Gendsche en Ooijrijksche polder	3	dijkverlegging Ooij
939 (940)	Haaften/Nieuwaal	4	6	lokale vernauwing door schaarlijken	-2	
870 (870)	Millingerwaard	4	5	hoge kades (regeling van afvoerverdeling?)	-1	
875 (875)	Gendtsche Polder	4	5	hoogwatervrij terrein in binnenbocht met hoge kade als toegangsweg	-1	
907 (908)	IJzendoorn	4	4	hoge dwarskade naar hoogwatervrij terrein	0	Grote Willempolder
900 (901)	Dodewaard	4	3	schaardijk + steenfabriek Afferdensche en Deestsche waard	1	
921 (922)	Varik	4	0	vernauwing bocht bij ingaan bocht	4	hoogwatergeul Varik-Heesselt
880 (881)	Ooijpolder	3	6	scherpe bocht, dijk in binnenbocht vlakbij rivier	-3	
935 (936)	Zaltbommel/Haaften	3	6	lokale vernauwing (stadsfront + schaarlijk)	-3	
913 (914)	Wamel	3	4	vernauwing bovenstrooms aantakking Amsterdam-Rijnkanaal	-1	
883 (884)	Lent	3	3	scherpe bocht	0	
944 (945)	Herwijnen	3	2	lokale vernauwing (dijk dichtbij rivier)	1	
904 (905)	Drutensche Waard	2	3	hoogwatervrij terrein steenfabriek + smalle uiterwaard rechteroever	-1	
866 (866)	Millingen a/d Rijn	0.5	1	links geen uiterwaard, rechts hoogwatervrije terreinen + hoge kades	-0.5	
946 (948)	Brakel	0	2	lokale vernauwing die alleen na uitvoering van VKS zichtbaar is	-2	

Hoewel de rivierverruimende maatregelen uit de VKS overall zorgen voor een verlaging van de waterstand, lossen zij niet alle knelpunten op. De VKS heeft een gunstig effect op de relatief grote knelpunten bij Oosterhout (km 887) en Sleeuwijk (km 953). Het knelpunt bij Sleeuwijk/Gorinchem (km 957) wordt zelfs helemaal opgelost. De VKS heeft ook een sterk positief effect op de wat kleinere knelpunten bij Bemmel (km 878) en Varik (km 921). De VKS zorgt er op een aantal plekken voor dat de knelpunten opvallender worden. Dit doet zich voor bij km 935 en 939 (Zaltbommel/Haaften/Nieuwaal).

Pannerdensch Kanaal en IJssel

Een overzicht van de kleinschalige knelpunten zoals geïdentificeerd langs het Pannerdensch kanaal en de IJssel is te zien in Tabel 2.

Het meest pregnante knelpunt wordt gevormd door het regelwerk bij de Pannerdensch Kop (km 886). Om de beleidsmatige afvoerverdeling te kunnen handhaven wordt dit regelwerk bewust niet helemaal open gezet. Dit resulteert in een 'knelpunt'. Datzelfde gebeurt ook bij de Hondsbroeksche Pleij (km 879). Naast de bewust gecreëerde 'knelpunten' bij de splitsingspunten die handhaving van de afvoerverdeling als doel hebben, is sprake van een knelpunt bij Kampereiland en van een aantal grote knelpunten rond de steden Zutphen, Deventer, Zwolle, Doesburg, Dieren en Kampen. Veel van deze steden en Kampereiland kwamen ook in eerdere analyses als knelpunt naar voren.

Op de bovenloop van de IJssel zorgt een aantal rivierverruimende maatregelen uit de VKS voor aanzienlijke waterstandsdeling. Dit lost een aantal knelpunten op, maar zorgt er ook voor dat een klein aantal knelpunten verplaatst en/of pregnanter in beeld komt (Westervoort km 882). De VKS heeft verder veel effect op de knelpunten bij Doesburg (km 898, kmr 903), Zutphen (km 915-918, kmr 925-928) en Kampereiland (km 990, kmr 1000). De voorgestelde maatregelen zijn echter niet afdoende om de knelpunten helemaal op te lossen. De knelpunten bij Giesbeek (km 892, kmr 896) en Westervoort (km 882) komen nadrukkelijker in beeld. De waterstandsdeling voor en na deze knelpunten is groter dan bij het knelpunt zelf, waardoor het duidelijker naar voren komt.

Tabel 2 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Kilometers betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers (kmr) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
868 (868)*	Pannerden	10	10	Regelwerk ver dicht. Mogelijk spelen hoge kades op rechteroever rol	-3	regelwerk verder dicht om afvoerdeling te handhaven
990 (1000)	Kampereiland	13	9	Relatief smal	4	Reevediep fase 2
934 (944)	Deventer	11	11	Vernauwing	0	
915-918 (925-928)	Zutphen	11	7	Vernauwing, vooral bij bruggen. Mogelijk deels artefact van kortsluiting Cortenoever.	4	dv Cortenoeverse brug, Tichelbeekse waard SNIP3
969 (979)	Zwolle	10	12	Smalle rivier + landhoofden van bruggen	-2	
898 (903)	Doesburg	10	2	Brug. Nagenoeg opgelost door VKS	8	uiterwaardvergraving Havikerwaard en Noordingsbouwning natuur
901 (906)	Olburgen/Dieren	9	8	Vernauwing	1	
982 (993)	Kampen	9	6	Vernauwing bovenstrooms van Kampen	3	2e fase bypass Kampen
879 (879)*	Hondsbroeksche Pleij	8	11	Regelwerk ver of zelfs geheel dicht	-3	regelwerk verder dicht om afvoerdeling te handhaven
884 (884)	Velperwaarden	7	6	Kades rond Koppenwaard	1	IJsselpoort (mn ij_kopwmax_a1)
973-976 (983-986)	Zalk	4	4	Onduidelijke oorzaak, mogelijk artefact	0	
892 (896)	Giesbeek	3	11	Vernauwing. Prominenter in beeld na verbeterde doorstroming Koppenwaard-Rhederlaag en waterstandsdeling Havikerwaard	-8	beter zichtbaar door Y13_Y15_2?
940-946 (950-956)	Olst	3	4	Relatief smal	-1	
980 (990)	Koppelerwaard	3	4	Onduidelijke oorzaak, mogelijk artefact	-1	
954 (964)	Veessen	3	3	Fortmond, mogelijk deels artefact door by pass Veessen-Wapenveld (bochtasfijnding)	0	
958 (968)	Herxen	2	2	Schaardijk rechteroever	0	
881 (881)	Westervoort	2	0	Obstakels direct benedenstrooms van spoorbrug Arnhem-Westervoc	2	IJsselpoort (mn ij_wooortg_a1)
985 (995)	Kampen	1	0	Vernauwing brug Kampen – IJsselmuiden	1	
907 (916)	Brummen	0.5	2	Niet duidelijk. Mogelijk hoger gelegen terreinen en/of kades Bronckh	-1.5	
882 (882)	Westervoort	0	5	Terp Putman. Niet zichtbaar in referentie, wel na uitvoering VKS (verplaatsing van knelpunt bij km 881)	-5	

* bewust gecreëerde 'knelpunten' om de afvoerdeling te kunnen handhaven.

Ook omvang van de 'stremming' bij de regelwerken op de Pannerdensch Kop en de IJsselpoort neemt na uitvoering van de VKS toe. Dit komt doordat de regelwerken verder dicht moeten worden gezet om de huidige afvoerdeling te handhaven.

Bij het gedetailleerdere ontwerp van de maatregelen zou men na kunnen gaan of deze 'nieuwe' of zich verplaatsende knelpunten ook opgelost kunnen worden. Het effect van de maatregelen zoals opgenomen in de VKS zou dan over een langer traject merkbaar zijn. Dit geldt ook voor de splitsingspunten. Wanneer de afvoerdeling op een andere manier kan worden 'recht getrokken' (bijvoorbeeld door proportionele rivierverruiming op de bovenloop van de Nederrijn), dan kan het regelwerk verder open worden gezet, waardoor het waterstandsverlagende effect van klimaatpark IJsselpoort ook op het Pannerdensch Kanaal kan doorwerken.

Nederrijn en Lek

Een overzicht van de kleinschaligere knelpunten langs de Nederrijn-Lek is gegeven in Tabel 3.

Het grootste knelpunt op de Nederrijn/Lek doet zich voor bij Arnhem, gevolgd door de knelpunten bij de Blauwe Kamer en Culemborg. In de studie van WL Delft hydraulics en RIZA (1999) werd Arnhem ook als belangrijkste knelpunt genoemd. In het kader van de PKB is hier wel een maatregel getroffen, maar het knelpunt is hiermee niet geheel opgelost.

In de VKS zijn geen rivierverruimende maatregelen voorzien op de Nederrijn-Lek. Er is dus geen verandering te verwachten in de waargenomen knelpunten. De beperkte afname van het knelpunt bij Arnhem hangt waarschijnlijk samen met een geringe waterstandsaling bij de IJssel Kop door Klimaatpark IJsselpoort op de bovenloop van de IJssel.

Tabel 3 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Nederrijn-Lek. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
881 (881)	Arnhem	11	10	Vernauwing Arnhem Bakenhof	1	IJsselpoort?
906 (907)	Blauwe Kamer	8	8	Schaardijk Kesteren en fortificatie De Spees	0	
936 (939)	Culemborg	8	8	Rechter oever: weg naar veerboot, linker oever: hoogwatervrij terrein	0	
971 (974)	Ammerstol	6	6	Vernauwing	0	
887 (888)	Oosterbeek	4	4	Spoorbrug	0	
926 (928)	Wijk bij Duurstede	4	4	Kades bij verbinding met Amsterdam-Rijnkanaal.	0	
931 (933)	Beusichem	4	4	Kade met weg dwars op rivier	0	
947 (950)	Vreeswijk	4	4	Stadsfront steekt uit richting rivier. Evt. i.c.m. landhoofden A2	0	
914 (915)	Elst	3	3	Waarschijnlijk kades met veerwegen	0	
919 (920)	Eiland van Maurik	3	3	Rechteroever sluisencomplex + toegangsweg, linkeroever hoog terrein + toegangsweg	0	
954 (957)	Lexmond	3	3	Bocht, extra scherp door schaaldijk linkeroever	0	
959 (962)	Ameide	3	3	Smal traject Ameide-Tienhoven	0	
941 (943)	Everdingen	2	2	Fort Everdingen	0	
964 (967)	Waal	2	2	Niet duidelijk	0	
977 (980)	Streefkerk	2	2	Vernauwing door schaaldijken	0	
981 (984)	Lekkerkerk	2	2	Rechts schaaldijk, links hoogwatervrij terrein	0	
893 (894)	Heteren	1	1	Hoogwatervrije terreinen + hoge kades mogelijk. i.c.m. brug A50	0	
896 (897)	Renkum	1	1	Stuwwal en hoogwatervrije terreinen	0	
899 (900)	Wageningen	1	1	Veerweg Lexkesveer	0	
944 (946)	Hagestein	1	1	stuwcomplex	0	
968 (971)	Schoonhoven	1	1	Vernauwing	0	

Limburgse Maas

Een overzicht van de kleinschaliger knelpunten is geven in Tabel 4 en Tabel 5. Tabel 4 toont de resultaten voor de Limburgse Maas bovenstrooms van rivierkilometer 70. De knelpunten op dit traject zijn in een aparte tabel vermeld omdat de afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde verhang hier groter zijn. Dit duidt niet op een groter knelpunt, maar hangt samen met het feit dat het verhang op dit traject ongeveer vier keer groter is dan op het meer benedenstrooms gelegen traject. Dat wil zeggen dat een knelpunt met een 'omvang' met waarde 10 op het bovenstroomse traject duidt op een relatief klein knelpunt (groen gekleurd) terwijl het verder benedenstrooms duidt op een knelpunt dat nadrukkelijke aanwezig is (oranje/bruin gekleurd).

Het grootste knelpunt in het bovenstroomse traject van de Limburgse Maas bevindt zich bij Elsloo. Bovenstrooms van Elsloo bevinden zich ook twee grote knelpunten bij Maastricht en Herbricht. Alle drie de knelpunten kwamen ook in analyses uitgevoerd in het kader van IVM naar voren als grote knelpunten.

De VKS lost het grootste knelpunt bij Elsloo voor een groot deel op. Het knelpunt bij Herbricht komt door de maatregelen uit de VKS juist prominenter in beeld. Dit laatste geldt ook voor het knelpunt bij Maaseik (km 53) en bij Borgharen (km 15). Bij Maaseik (km 53) zorgt de VKS boven- en benedenstrooms van de brug voor forse waterstandsaling. Bij de brug zelf zet deze waterstandsaling niet door. Het levert een nog duidelijkere knik op in de verhanglijnen. Het knelpunt bij Borgharen is in de huidige situatie niet zichtbaar, maar komt na realisatie van

de VKS naar voren doordat de waterstand benedenstrooms veel sterker zakt dan bovenstrooms. Dit komt doordat in de VKS een deel van de afvoer via het Julianakanaal wordt afgevoerd. Mogelijk is dit dus meer een artefact (de afvoer benedenstrooms is wat kleiner) dan een echt knelpunt.

Benedenstrooms van kilometer 70 zijn geen zeer grote knelpunten waarneembaar. Een aantal matig grote knelpunten bevindt zich bij Arcen, Belfeld, Lomm, Well en Neer. Gezien het zeer flauwe verhang bij Roermond zou ook Roermond nog tot de matig grote knelpunten kunnen worden gerekend. Geen van deze knelpunten zijn in eerdere analyses opgenomen in het lijstje met de 'meest extreme' knelpunten op dit traject. In dat lijstje staat wel het hele traject bij Venlo als knelpunt genoemd. In deze studie is in de huidige situatie niet of nauwelijks sprake van een knelpunt bij Venlo. Na realisatie van de maatregelen uit de VKS lijkt de zuidelijke brug wel wat nadrukkelijker in beeld te komen. De VKS heeft een sterk positief effect op de knelpunten bij Elsloo (kmr 27-30), Roermond (kmr 79) en Heel (kmr 73).

Tabel 4 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Limburgse Maas, bovenstrooms van kilometer 70. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde rivierkilometers (kmr) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
27-30 (27-30)	Elsloo	40	20	Bocht en relatief smal tussen Meers en Geneut	20	Kotem weerdverlaging FHL2-I-AO
9-12 (9-12)	Maastricht	32	29	Smalle corridor bij Maastricht	3	
23 (23)	Herbricht	30	38	Vernauwing na scherpe bocht?	-8	
59 (59)	Laak	27	24	Relatief smal, mogelijk ook invloed veerweg?	3	
50 (50)	Roosteren	23	13	bovenstrooms Roosteren. Niet duidelijk	10	
42 (42)	Grevenbicht	22	29	Versmalling	-7	
53 (53)	Maaseik	21	52	Nauwe doorgang i.v.m. brug N296	-31	
35-38 (35-38)	Maasband-Berg	21	19	Versmalling van het winterbed	2	
67 (67Z)	Wessem	17	2	Smalle doorgang (mede door brug A2)	15	
57 (57)	Ohé	16	0	vernauwing en aantal hoge kades rond jachthaven	16	
47 (47)	Elen	6	10	Kades op rechter oever?	-4	
61 (61)	Stevensweert	3	11	Plaats dicht op rivier, aan Belgische zijde hoge kade.	-8	
15 (15)	Aftakking Julianakanaal, stuw Borgharen	0	20	Stuw Borgharen. Niet zichtbaar in huidige situatie, wel na realisatie VKS.	-20	knelpunt wordt zichtbaar doordat waterstands daling door afvoer via Julianakanaal (ma_g4_a1) benedenstrooms van dit punt veel groter is
69 (68N)	Linne	0	7	stuw	-7	

Tabel 5 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Limburgse Maas, benedenstrooms van kilometer 70. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde rivierkilometers (kmr) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
119 (121)	Arcen	9	9	versmalling	0	
100 (102)	Belfeld	9	7	Waarschijnlijk invloed van de stuw	2	
115 (117)	Lomm	8	7	versmalling	1	
129 (131)	Well	8	6	versmalling door brug en het plaatsje	2	
90 (90)	Neer	8	5	versmalling	3	
83 (84)	Roermond	7	3	bovenstrooms spoorbrug Roermond	4	
74 (73)	Heel	7	1	Niet duidelijk mogelijk vindt opstuwing plaats tussen sluisencor	6	
105 (107)	Venlo	6	5	spoorbrug + weg bij Venlo	1	
135 (137)	Maashees	4	6	lokale versmalling	-2	
124 (126)	Ooijen	4	5	lokaal versmalling	-1	
80 (79)	Roermond	4	2	belemmerde doorstroming door weglichaam N280 bij Roermond	2	
147(151)	Boxmeer	2	4	brug (A77)	-2	
93 (93)	Beesel	2	1	Niet duidelijk	1	
104 (106)	Venlo	0	8	zuidelijke brug bij Venlo (N275)	-8	
109 (111)	Venlo	0	4	noordelijke brug bij Venlo	-4	
96 (96)	Reuver	0	3	Niet duidelijk	-3	
76 (75)	Beegden	0	2	Niet duidelijk	-2	

Brabantse Maas

Een overzicht van de kleinschaligere knelpunten is geven in Tabel 6.. De duidelijkste knelpunten bevinden zich bij Gennep en Ravenstein en hangen beiden samen met een vernauwing. De VKS lost het eerst genoemde knelpunt grotendeels op. De VKS heeft ook een positief effect op de knelpunten bij Cuijk en Milsbeek. Wat opvalt is dat er relatief veel knelpunten zijn waar de VKS geen effect op heeft. Daar staat tegenover dat, in tegenstelling tot veel andere riviertakken, de VKS hier vrijwel niet leidt tot een 'toename' van een bestaand knelpunt of het zichtbaar worden van een nieuw knelpunt.

Tabel 6 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Brabantse Maas. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
150 (154)	Gennep	14	4	Vernauwing (weg dicht bij rivier), mogelijk i.c.m. landhoofden brug	10	groene rivier Oeffelt?
177 (181)	Ravenstein	12	12	Vernauwing en brug (A50)	0	
159 (163)	Cuijk	8	4	vernauwing	4	weerdverlaging?
170 (174)	Grave	7	8	Stuw mogelijk i.c.m. brug (N324)	-1	
181 (185)	Batenburg	7	7	vernauwing	0	
188-190 (192-194)	Megen – Maasbommel	7	7	Smalle rivier met een 'hoekig' verloop (voor stroming door uiterwaarden)	0	
193 (197)	Greffeling (Alphen)	7	7	Niet duidelijk. Mogelijk kleine afname breedte.	0	
204 (208)	Sint Andries	5	4	Vernauwing	1	
210-215 (214-219)	Den Bosch	4	4	Mogelijk veroorzaakt door drietal bruggen	0	
155 (159)	Milsbeek	4	2	Mogelijk enige opstuwing door veerstoept	2	
222 (226)	Well	3	3	vernauwing	0	
165 (169)	Heumen	2	2	Geleidelijke versmalling voorbij brug	0	

Conclusies

De knelpuntanalyse heeft meerdere knelpunten in beeld gebracht. De oorzaak van deze knelpunten is niet altijd met honderd procent zekerheid vast te stellen.

Sommige knelpunten lijken van geologische oorsprong. Dit geldt onder meer voor het grootschalige knelpunt op de Limburgse Maas nabij Roermond. Dergelijke knelpunten zijn niet eenvoudig met rivierverruiming op te lossen.

Andere knelpunten lijken samen te hangen met systeemingrepen door de mens. Een voorbeeld hiervan is het grootschalige knelpunt op de Waal benedenstrooms van de Heerewaardense overlaat. Omdat hier vroeger een deel van het water uit de Waal naar de Maas stroomde is het benedenstroomse deel van de Waal mogelijk niet 'berekend' op de huidige hogere afvoeren. Ook de 'knelpunten' bij de Pannerdensche Kop en de IJssel Kop zijn grotendeels door de mens veroorzaakt. In dit geval met als doel handhaving van de beleidsmatige afvoerverdeling. Ook voor deze knelpunten geldt dat ze niet eenvoudig met rivierverruiming op te lossen zijn. In het geval van de splitsingspunten zou dit betekenen dat grootschalige rivierverruiming nodig is op de Waal en op de Nederrijn. Op deze manier kunnen de regelwerken bij de splitsingspunten verder worden open gezet.

Overige oorzaken voor (veelal kleinere) knelpunten zijn onder andere smalle uiterwaarden of schaaldijken, hoge kades in uiterwaarden, steenfabrieken (vooral langs de Waal), bruggen, veerstoepen en stadsfronten die tot aan de rivier liggen (met name langs de IJssel). Sommige van deze knelpunten worden opgelost door de rivierverruimende maatregelen uit de VKS. Of en in welke mate dit het geval is, is te zien in voorgaande tabellen. Veel knelpunten zijn niet of gedeeltelijk opgelost, bijvoorbeeld omdat dit een zeer dure ingreep is (aanpassing bruggenhoofden), of omdat het een zeer grote ingreep vergt die op maatschappelijke weerstand stuit (bijvoorbeeld by passes om de stedelijke knelpunten langs de IJssel op te lossen).

1 Inleiding

1.1 Kader

Het Deltaprogramma Rivieren (DPR) heeft in 2014 een voorkeursstrategie (VKS) geformuleerd voor de Rijnakken en de Maas. De VKS beoogt vermindering van het overstromingsrisico in het rivierengebied en bestaat uit een combinatie van dijkversterking en rivierverruimende maatregelen. Omdat de kosten voor zo'n combinatiestrategie hoger zijn dan de kosten voor een strategie die alleen uit dijkversterking bestaat, is discussie ontstaan over de wenselijkheid en de bekostiging van rivierverruimende maatregelen.

Momenteel wordt in het kader van BOA rivieren gewerkt aan een zogenaamde lange-termijnambitie rivierverruiming. Hiervoor wordt een Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse (MKBA) opgesteld waarbij een strategie die enkel uit dijkversterking bestaat (de referentiestrategie) wordt vergeleken met de VKS. Eén van de criteria die wordt meegenomen in de MKBA is de bijdrage aan een robuust riviersysteem. Tijdens sessies met vertegenwoordigers van waterschappen en regionale diensten van RWS is aangegeven dat een robuust riviersysteem onder andere wordt gekenmerkt door een gelijkmatige doorstroming. Ofwel: een riviersysteem zonder hydraulische knelpunten.

Een manier om hydraulische knelpunten in beeld te krijgen is met behulp van verhanglijnen. Wanneer een verhanglijn afvlakt en plots weer steiler wordt, dan duidt dit veelal op een knelpunt.

1.2 Dit rapport

Doel van dit rapport is om aan te geven:

- 3 waar langs de Rijnakken en de Maas bij hoogwater sprake is van een hydraulisch knelpunt, en
- 4 in hoeverre de bestaande hydraulische knelpunten worden opgelost door de rivierverruimende maatregelen die in de VKS zijn voorgesteld.

De analyses hebben dus betrekking op de huidige situatie en op de situatie na uitvoering van de rivierverruimende maatregelen uit de VKS zoals opgesteld in 2014.

Dit rapport beoogt vooral bij te dragen aan de studie naar de bijdrage van rivierverruiming aan een robuust riviersysteem. In die context is het voornaamste doel te bepalen waar de doorstroming in de rivier gelijkmatiger/verbeterd kan worden. Rivierverruiming ter plaatse van knelpunten draagt daar aan bij. In welke mate volgt uit het oplossend vermogen van de beschouwde VKS maatregelen. De analyse richt zich op de knelpunten die zich voordoen tijdens hoogwater.

Het rapport kan echter ook gebruikt worden bij de actualisatie van de VKS. Middels de knelpuntanalyse is in beeld gebracht waar effectieve maatregelen genomen kunnen worden, waardoor ook benedenstrooms gelegen maatregelen effectiever kunnen worden.

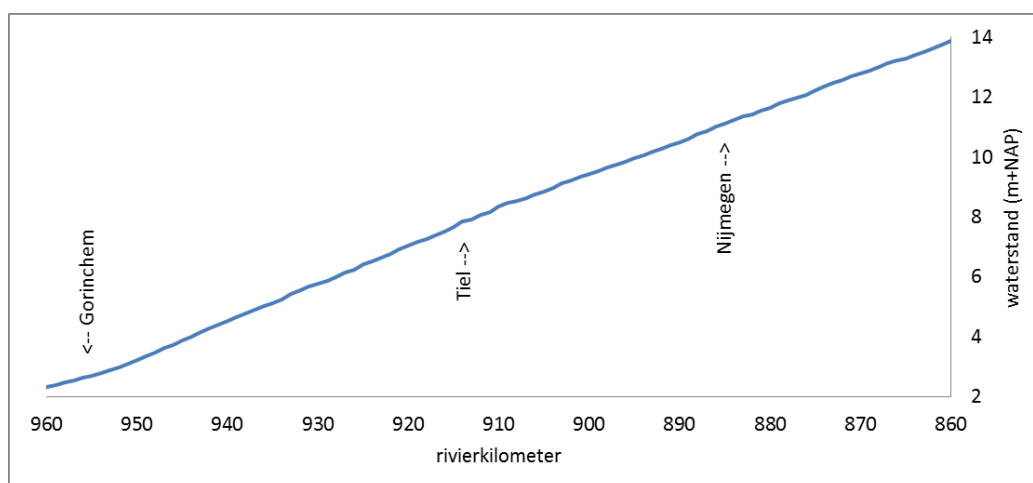
1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het principe van de verhanglijn uitgelegd. Voor een aantal voorbeelden wordt geïllustreerd hoe een hydraulisch knelpunt zichtbaar is in de verhanglijn. In hoofdstuk 3 gaan we in op de hier gebruikte methode. De resultaten worden per riviertak getoond en nader toegelicht in hoofdstuk 4 t/m 8. Bijlagen A en B bevatten resultaten van analyses die eerder zijn uitgevoerd in 2015. Dit betreft analyses voor de Waal en de Maas bij Venlo. Resultaten voor deze rivier(traject)en zijn ook in het hoofdrapport opgenomen, maar dan op een iets andere wijze weergegeven, zodat de weergave van verhanglijnen en knelpunten voor alle riviertakken uniform is.

2 Het principe van de verhanglijn

2.1 Wat is een verhanglijn?

De methode om hydraulische knelpunten te identificeren maakt gebruik van zogenaamde verhanglijnen. Een verhanglijn is het verloop van de waterspiegel of waterstand in de lengterichting van de rivier. Een voorbeeld van een verhanglijn is te zien in Figuur 2.1. Figuur 2.1 toont het verloop van de waterstand vanaf de Duits-Nederlandse grens (rechts in de figuur) tot voorbij Gorinchem. Te zien is dat de waterstand lager wordt van ongeveer NAP +14 m bij de grens tot ruim NAP +2,5 m bij Gorinchem. Dit verschil over de hele lengte noemt men het verval. Ook is te zien dat het verhang (de afname van de waterstand per rivierkilometer) weinig varieert. Alleen in het meest benedenstroomse deel neemt het verhang iets af (de waterstandslijn gaat iets vlakker verlopen).

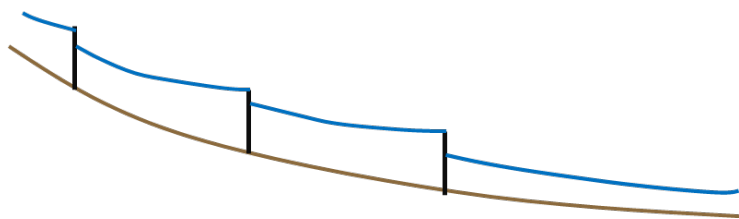


Figuur 2.1 Berekende verhanglijn van de Waal bij een afvoer van $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith

In verband met de oost-west oriëntatie is het meest bovenstroomse punt in deze figuur rechts geplott. Omdat niet alle riviertakken in Nederland een oost-west oriëntatie hebben is bij de overige figuren in dit rapport gekozen voor een standaard opmaak, waarbij het bovenstroomse punt altijd links ligt.

2.2 Verhanglijnen en hydraulische knelpunten - theorie

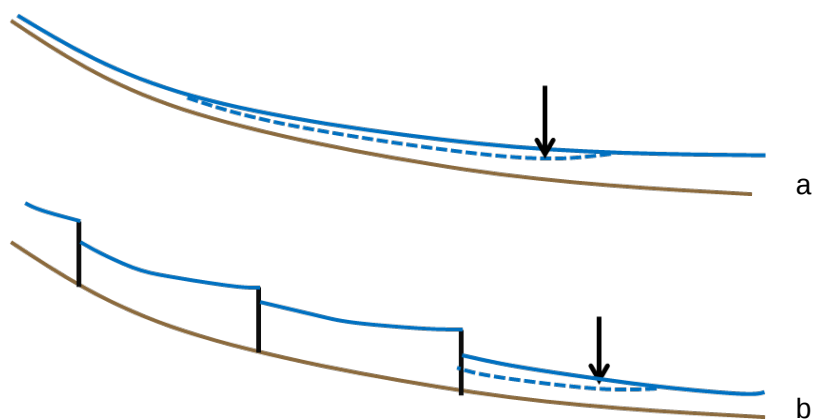
Figuur 2.2 toont de schematische weergave van een verhanglijn in een gestuwde rivier. Een stuw zou men kunnen zien als 'het ultieme knelpunt': doelbewust probeert men het water hier tegen te houden, bijvoorbeeld om bij lage afvoeren een zekere vaardiepte te garanderen. Zoals Figuur 2.2 aangeeft resulteren de stuwen in sprongen in de verhanglijn. In een ongestuwde rivier zou de verhanglijn veel gelijkmatiger verlopen (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.2 Schematische weergave van een verhanglijn in een gestuwde rivier

De vraag is vervolgens waarom een hydraulisch knelpunt verwijderd zou moeten worden. Ten eerste geldt dat een knelpunt leidt tot hogere waterstanden bovenstrooms van het knelpunt. Verwijdering van het knelpunt leidt er toe dat de waterstanden bovenstrooms omlaag gaan.

Ten tweede is het zo dat verwijdering van een knelpunt er voor zorgt dat het effect van benedenstrooms genomen rivierverruimende maatregelen verder bovenstrooms merkbaar zijn. Dit is uitgelegd in Figuur 2.3. De bovenstroomse stuwkromme kent een geleidelijk verloop, zonder abrupte sprongen, dus zonder knelpunten. De rivierverruimende maatregel heeft daardoor niet alleen effect op de locatie waar de maatregel wordt uitgevoerd (bij de pijl), maar ook bovenstrooms. In Figuur 2.3a is de waterstandsddaling aangegeven met de blauwe stippellijn. Figuur 2.3.b toont het effect van een vergelijkbare rivierverruimende maatregel, maar dan op een gestuwde rivier. Door de aanwezigheid van een knelpunt (de stuw) wordt de stuwkromme (waterstandsddaling) abrupt afgebroken. De maatregel heeft dus wel effect op de locatie waar hij wordt uitgevoerd, maar nauwelijks bovenstrooms. Om het effect van rivierverruimende maatregelen elders optimaal te kunnen benutten is het dus eveneens nodig om de hydraulische knelpunten op te lossen. In dit geval betekent dit dat de stuwen verwijderd/getrokken zouden moeten worden.



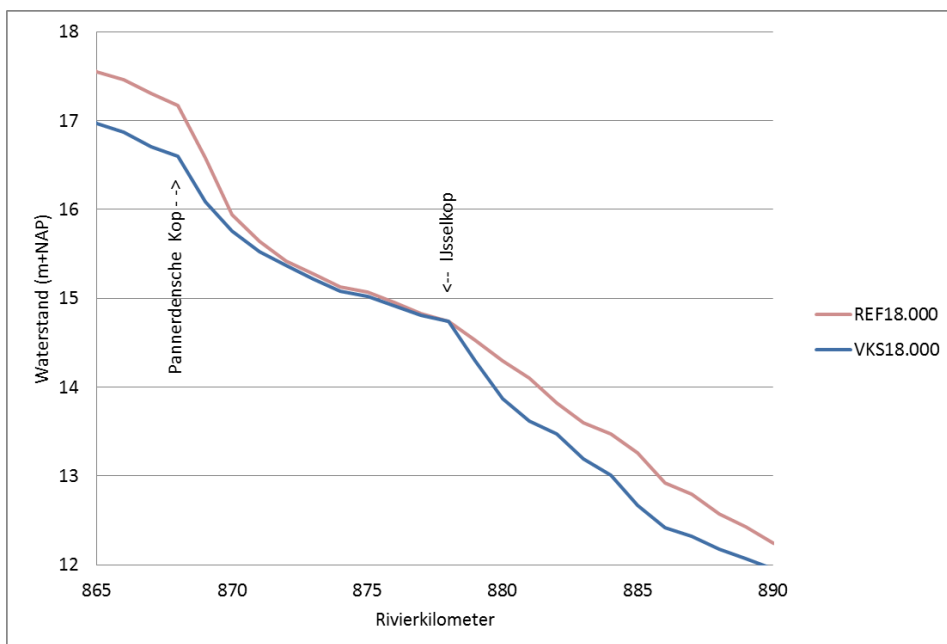
Figuur 2.3 Effect van rivierverruiming op de waterstanden in een rivier (a) zonder en (b) met hydraulische knelpunten

2.3 Verhanglijnen en hydraulische knelpunten - praktijk

Figuur 2.2 en Figuur 2.3 tonen hoe een hydraulisch knelpunt zichtbaar is in de verhanglijn van een rivier. De vraag is of dit ook in de Nederlandse rivieren waar te nemen is. Het antwoord is ja. Een van de grootste 'knelpunten' langs de Rijnakken wordt gebruikt om dit te illustreren.

Figuur 2.4 toont twee verhanglijnen voor het Pannerdensch Kanaal en de bovenloop van de IJssel, berekend bij een afvoer te Lobith van 18.000 m³/s in de huidige situatie (REF, roze

lijn) en voor de situatie na uitvoering van de rivierverruimende maatregelen uit de voorkeursstrategie (VKS, blauwe lijn) van het Deltaprogramma Rivieren. In de referentiesituatie (roze lijn) is een duidelijke knik aanwezig bij de Pannerdensche Kop (overgang van de Bovenrijn naar het Pannerdensch kanaal). Bij de IJsselkop is niet of nauwelijks een knik waarneembaar. Na uitvoering van de VKS verandert het beeld. Bij de Pannerdensche Kop wordt de waterstand lager, maar blijft het knelpunt gehandhaafd. Bij de IJsselkop verschijnt nu ook een zeer duidelijke knik. Rivierverruimende maatregelen op de bovenloop van de IJssel (Klimaatpark IJsselpoort) zorgen voor een waterstandsval op de bovenloop van de IJssel. Deze zet zich echter niet stroomopwaarts voort op het Pannerdensch Kanaal. Hier is duidelijk sprake van een 'hydraulisch knelpunt' dat de stuwkromme sterk beïnvloedt. Zonder dit 'knelpunt' zou het effect van Klimaatpark IJsselpoort veel verder bovenstrooms merkbaar zijn. In dit geval hangt het 'knelpunt' echter samen met het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij. In de huidige situatie staat dit regelwerk gedeeltelijk open om er voor te zorgen dat de afvoerverdeling onder maatgevende omstandigheden voldoet aan de in het beleid vastgelegde afvoerverdeling. Er is daardoor in de referentiesituatie bij een afvoer van 18.000 m³/s te Lobith vrijwel geen sprake van een knelpunt. Na uitvoering van de VKS moet het regelwerk echter worden dichtgezet om te voorkomen dat er te veel water naar de IJssel stroomt. Het dichtzetten van het regelwerk betekent dat er bewust een knelpunt wordt gecreëerd: de afvoer naar de IJssel wordt afgeknepen. Dat is duidelijk terug te zien in de verhanglijnen.



Figuur 2.4 Verhanglijnen voor het Pannerdensch Kanaal en de bovenloop van de IJssel berekend bij een afvoer te Lobith van 18.000 m³/s in de huidige situatie (REF) en voor de situatie na uitvoering van de rivierverruimende maatregelen uit de voorkeursstrategie (VKS) van het Deltaprogramma Rivieren.

2.4 Verwijderen van hydraulische knelpunten

In het kader van de PKB ruimte voor de rivier is sinds 1995 hard gewerkt aan het verwijderen van hydraulische knelpunten. Bekende voorbeelden zijn Lent, Lexkesveer, Bakenhof, spoorbrug Oosterbeek.

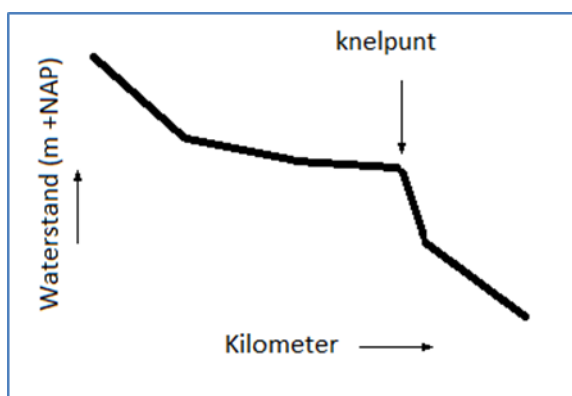
Riza en WL|Delft Hydraulics (1999) geven een overzicht van de knelpunten langs de Rijntakken en mogelijke oplossingen om deze knelpunten op te lossen. Bij een analyse waarbij een groot aantal rivierverruimende maatregelen werd ingezet (Alternatief maximaal plus), kwam een aantal van deze knelpunten nog duidelijker naar voren. Langs de Waal vormden Nijmegen en Zaltbommel de grootste knelpunten die nog pregnanter zouden worden. Arnhem vormde het grootste knelpunt langs de Nederrijn. Langs de IJssel bestonden verschillende knelpunten, die zonder specifieke rivierverruimende maatregelen (gericht op verwijdering van dit knelpunt), in omvang toe zouden nemen. Deze knelpunten bevonden zich onder andere bij Zutphen, Deventer en Kampen.

Het knelpunt bij Nijmegen/Lent is (grotendeels) opgelost met een dijkverlegging en een geul. Ook bij Kampen is een bypass aangelegd om het knelpunt te verkleinen. In het rapport van RIZA en WL (1999) zijn bypasses voorgesteld bij de stedelijke knelpunten langs de IJssel. Deze zijn bij de PKB wel opgenomen in een ruimtelijke reservering, maar niet gerealiseerd.

3 Methode

De in dit rapport gepresenteerde hydraulische knelpunten zijn geïdentificeerd op basis van sprongen in de verhanglijn op de rivier. De volgende stappen zijn doorlopen:

- Waterstanden op de as van de rivier zijn berekend voor verschillende afvoeren op de Rijn (te Lobith) en op de Maas (te Eijsden). Deze berekeningen zijn uitgevoerd met het Deltamodel in opdracht van het Deltaprogramma Rivieren. De resultaten voor de referentiesituatie zijn beschikbaar in het bestand "DPR_rijn_2100W_as_WS_S10.mdb" (voor de Rijn) en "DPR_maas_2100W_as_WS_S1.mdb" (voor de Maas). Voor de Maas is gerekend met hoge, niet overstromende Maaskades. Aangenomen is dat de Vlaamse ingrepen die deel uitmaken van de "referentie plus" zoals gedefinieerd in het Deltaprogramma zijn uitgevoerd.
- De waterstanden zijn uitgezet tegen de rivierkilometers. De rivierkilometers zijn voor dit doel gecorrigeerd. Op de Maas en de IJssel ontbreken namelijk enkele rivierkilometers, maar ook op andere plekken is de afstand tussen twee kilometerpunten vaak niet exact gelijk aan 1 kilometer. Om te voorkomen dat variaties in de verhanglijn het gevolg zijn van 'te korte' of 'te lange' rivierkilometers is de werkelijke afstand tussen twee punten bepaald. De waterstanden zijn dus uitgezet ten opzichte van de gecorrigeerde rivierkilometers (aangeduid met km).
- De waterstanden zijn uitgezet in grafieken om zo (op het oog) hydraulische knelpunten te kunnen identificeren. Bij een knelpunt neemt het verhang sterk af, om vervolgens juist weer toe te nemen. Dit resulteert in 'bobbels' in de geplote waterstandslijnen (zie Figuur 3.1 en de figuren in hoofdstuk 2).



Figuur 3.1 Fictieve verhanglijn van een riviertraject met een hydraulisch knelpunt

- Er zijn ook grafieken gemaakt van de gemiddelde waterstand over een traject van 5 km lengte. Door beide waterstandslijnen in 1 grafiek te plotten, vallen hydraulische knelpunten meer op.
- Om het opsporen van de knelpunten makkelijker te maken, is deze methode vervolgens verder uitgewerkt: het verschil tussen de berekende waterstand op elk punt is vergeleken met de gemiddeld berekende waterstand op een traject van ongeveer 5 kilometer rond het punt (2 rekenpunten bovenstrooms tot en met 2 punten benedenstrooms). De mate waarin de waterstand in het punt hoger is dan de over 5 km gemiddelde waterstand is een goede maat voor de ernst van het knelpunt.

Om na te gaan of, en in welke mate, de voorkeursstrategie (VKS) de hydraulische knelpunten oplost, is een vergelijkbare analyse uitgevoerd voor de situatie na uitvoering van de VKS. Hiervoor is eveneens gebruik gemaakt van berekeningen uitgevoerd met het deltamodel. Het bestand "DPR_rijn_2100W_as_WS_S15.mdb" is gebruikt voor de Rijn. Voor de Maas is het bestand "DPR_maas_2050W_as_WS_S14.mdb" gebruikt voor de situatie na uitvoering van de VKS. Het bestand "DPR_maas_2050W_as_WS_S12.mdb" bevat resultaten voor de situatie "referentie plus". Het effect van de VKS op de Maas is dus exclusief de rivierverruimende maatregelen die deel uitmaken van de referentie plus. De doorlopen stappen zijn gelijk aan die hierboven beschreven voor de huidige situatie.

Bij alle bepalingen is gebruik gemaakt van gecorrigeerde rivierkilometers, waarin de daadwerkelijke afstanden op de rivier-as tussen de rekenpunten zijn gebruikt. Gemeten is vanaf rivierkilometer 854 (BovenRijn) respectievelijk 3 (Maas). Als voorbeeld staan in de volgende tabel de rivierkilometers voor de Maas van km 66 tot km 70.

Rivierkilometer (kmr)	Gecorrigeerd (km)
66	66,054
67 zuid	67,062
68 zuid	68,125
67 noord	68,676
68 noord	69,675
69	70,376

Bij het bespreken van de knelpunten zijn ook steeds de ongecorrigeerde rivierkilometers genoemd (aangeduid met kmr, naar de kilometterraai op de oever). Op deze manier is de locatie makkelijker terug te vinden op kaarten, die immers de ongecorrigeerde rivierkilometers geven.

Per riviertak is een figuur gemaakt met de verhanglijnen zoals berekend voor verschillende afvoeren. Deze figuren worden gebruikt om na te gaan of er op een groter schaalniveau sprake is van knelpunten (effect merkbaar over tientallen kilometers in plaats van over één of enkele kilometers). Ook worden de figuren gebruikt om na te gaan of zich bij lage afvoeren knelpunten voordoen die bij hogere afvoeren verdwijnen, of omgekeerd (knelpunten die bij lage afvoeren zichtbaar zijn, maar bij hoge afvoeren niet).

Er zijn ook figuren gemaakt waarbij wordt ingezoomd op een riviertraject met een lengte van ongeveer 30 km. In deze figuren is te zien welke knelpunten zich voordoen op een lager schaalniveau (één tot enkele kilometers). Ook is te zien of de VKS deze knelpunten oplost of juist vergroot. Immers, net als bij een fileprobleem kan het zo zijn dat het oplossen van een knelpunt op één locatie leidt tot een verplaatsing van het probleem naar elders.

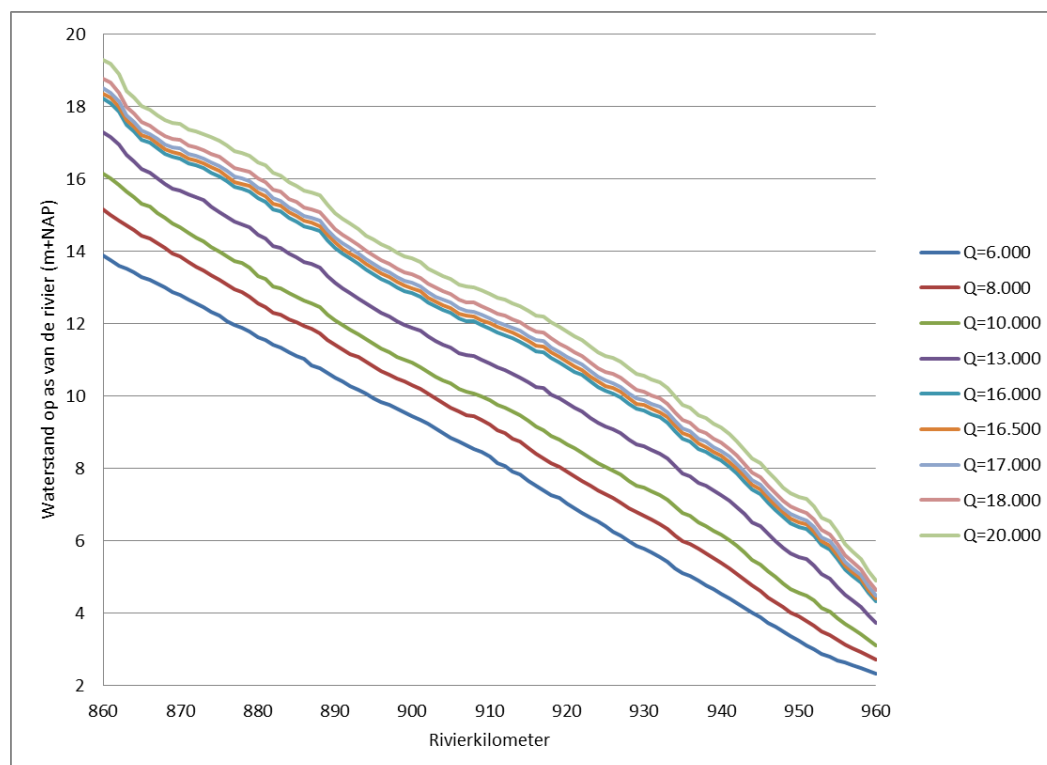
4 Bevindingen BovenRijn en Waal

4.1 Globaal beeld Bovenrijn en Waal

Figuur 4.3 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier de Waal bij verschillende afvoeren te Lobith (huidige situatie). Een aantal dingen valt op:

- Bij middelhoge afvoeren ($6.000 \text{ m}^3/\text{s}$) resulteren de geplote waterstanden in een redelijk rechte lijn. Er is onder die omstandigheden dus geen sprake van belangrijke hydraulische knelpunten.
- Bij hogere afvoeren (10.000 of $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$) wordt de lijn 'bobbeler', wat duidt op hydraulische knelpunten.
- Bij zeer hoge afvoeren ($16.000 - 20.000 \text{ m}^3/\text{s}$) is een aantal duidelijke knelpunten te zien. Bovenstrooms van deze punten neemt het verhang af en loopt de waterstandslijn dus iets meer horizontaal. Dit treedt onder meer op bij rivierkilometer 888 (Oosterhout), 901 (Dodewaard), 927 (Heesselt) en 952 (Woudrichem).

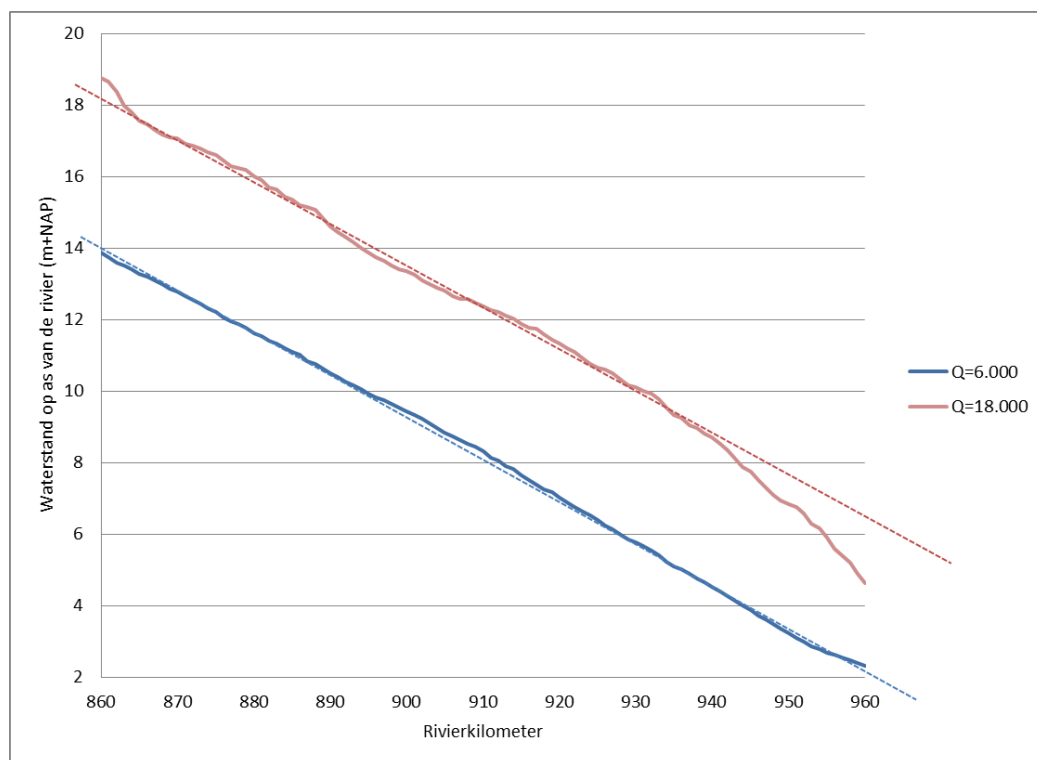
Op basis van Figuur 4.1 wordt geconcludeerd dat de meeste hydraulische knelpunten een effect hebben over een beperkte afstand (een kilometer of 5) en pregnanter worden bij hogere afvoeren.



Figuur 4.1 Berekende waterstand op de Waal op de as van de rivier voor verschillende afvoeren te Lobith

Er is echter nog iets anders dat opvalt in Figuur 4.1. De verhanglijn die berekend is voor een afvoer van $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith is een rechte lijn. Alleen over de laatste 7 km ongeveer heeft de verhanglijn een wat flauwer verloop. De verhanglijn is concaaf zoals dat te verwachten is bij een rivier in een delta. Bij hogere afvoeren verandert het verloop van het verhang en wordt

de lijn meer convex. Om dit te illustreren zijn de verhanglijnen zoals berekend bij een afvoer van 6.000 en bij 18.000 m³/s te Lobith apart geplot (Figuur 4.2). Op het oog is een rechte lijn gefit. Zoals eerder opgemerkt komt de verhanglijn bij 6.000 m³/s te Lobith sterk overeen met de gefitte rechte lijn. Dat wil zeggen dat ook op een hoger schaalniveau geen duidelijke knelpunten aanwezig zijn. De verhanglijn bij 18.000 m³/s schommelt tot rivierkilometer 930-935 rond de getrokken rechte lijn. Daarna neemt het verhang sterk toe. Op een hoger schaalniveau lijkt sprake te zijn van een knelpunt dat zich voordoet vanaf ongeveer km 930. Dit punt bevindt zich nabij Opijnen. Dit zou er op kunnen duiden dat de Waal in dit traject te smal is. Dit kan samenhangen met het feit dat vroeger een deel van de afvoer van de Waal via de overlaat bij Heerewaarden naar de Maas stroomde. Dit zorgde langs de Maas voor veel overlast, maar had wel tot gevolg dat de afvoer op de Waal benedenstrooms van dit punt kleiner was. Het nu 'te kleine jasje' paste toen waarschijnlijk wel. Of dit de (enige) verklaring is, is zonder extra onderzoek niet met 100% zekerheid te zeggen.



Figuur 4.2 Verhanglijnen berekend voor de Waal bij afvoeren van 6000 en 18000 m³/s te Lobith

4.2 Resultaten in detail

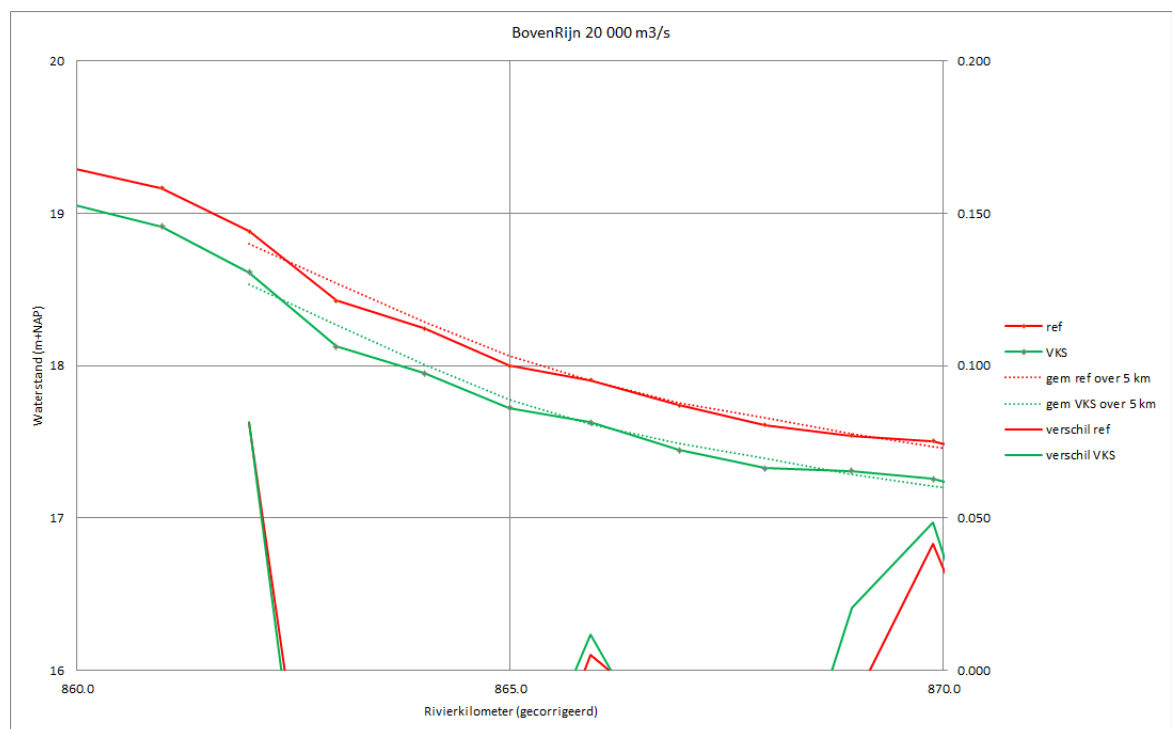
Voor alle overige figuren in dit hoofdstuk geldt:

- de berekende waterstand in de referentiesituatie is weergegeven met een groene *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de berekende waterstand na uitvoering van de VKS is weergegeven met een rode *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de gemiddelde waterstanden over 5 kilometer worden weergegeven met *stippellijnen* in dezelfde kleuren
- het verschil tussen de berekende lokale waterstand en de gemiddelde waterstand wordt ten opzichte van de rechter y-as weergegeven door *doorgetrokken* lijnen zonder markering (dit zijn veelal de 'piekerige lijnen aan de onderkant van de grafiek).

4.2.1 BovenRijn – Waal, traject Lobith-Millingen (km 860-870)

Figuur 4.3 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier, alsmede de gemiddelde waterstand over 5 kilometer. Locaties met grote verschillen tussen beide duiden op knelpunten. Deze zijn ook te herkennen aan de pieken aan de onderkant van de grafiek.

Het eerste knelpunt dat opvalt, bevindt zich bij Tolkamer (km 862). In hoeverre dit knelpunt mede veroorzaakt wordt door de modelrand is niet goed te zeggen. De belangrijkste oorzaak is waarschijnlijk de schaarlijk bij Tolkamer die zorgt voor een vernauwing van de rivier. Oplossen van dit knelpunt zou tot lagere waterstanden leiden in Duitsland. Dit zou effect hebben op de overstromingen in Duitsland en daarmee op het aftoppen van de afvoer bij de Nederlandse grens.



Figuur 4.3 Berekende waterstand op de BovenRijn en Waal, traject Lobith-Millingen

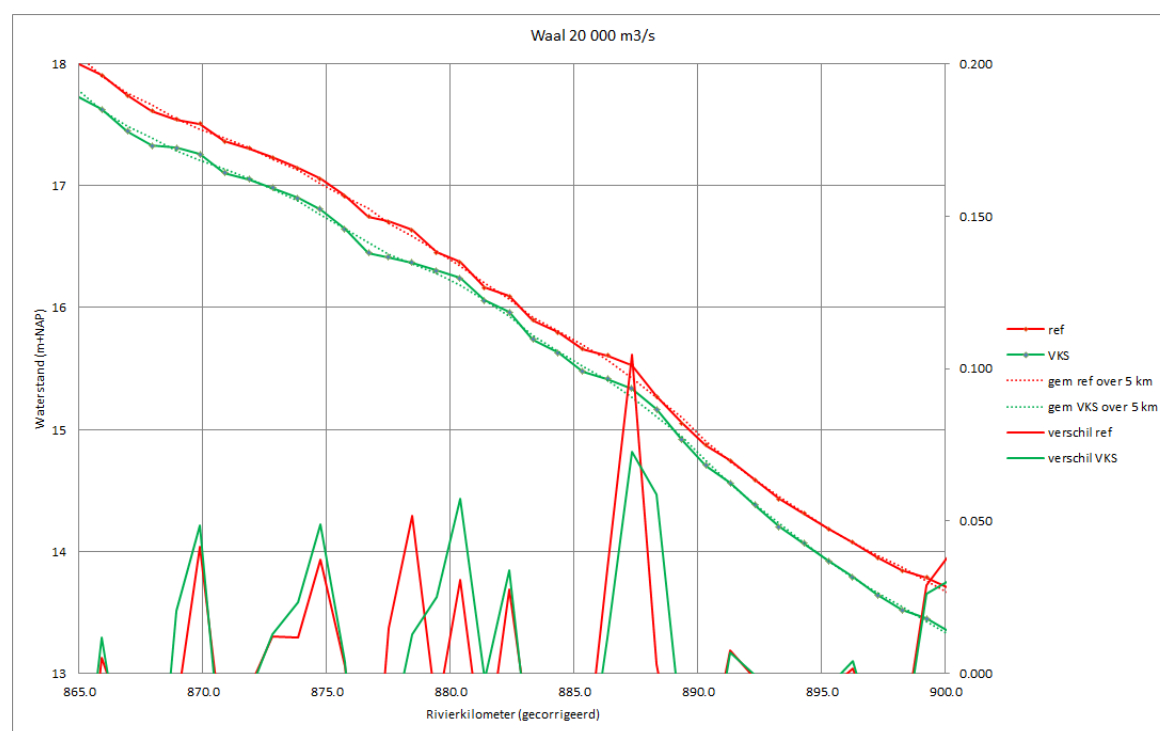
Bij km 866 bevindt zich een beperkt knelpunt dat samen kan hangen met de hoogwatervrije terreinen en relatief hoge kades bij de Lobberdensche waard, tegenover Millingen a/d Rijn.

Het derde knelpunt bevindt zich ter hoogte van de Millingerwaard. Mogelijk spelen de relatief hoge kades rond de Millingerwaard een rol, als onderdeel van de vele werken die de afvoerverdeling over Waal en Pannerdensch Kanaal regelen. Het vastgelegde splitsingspunt (Pannerdense overlaat) is de meest waarschijnlijke verklaring voor deze knik in de verhanglijn. Na uitvoering van de VKS lijkt dit knelpunt zich nog iets nadrukkelijker te manifesteren. De maatregel "Millingerwaard & Erlecomse Waard (wl_06-2) leidt tot 11 cm waterstandsval, maar dit effect doet zich vooral voor rond km 868. Bij km 870 is het effect zeer gering.

4.2.2 Waal traject Millingen Dodewaard (km 865-900)

Op dit traject bevinden zich meerdere knelpunten achter elkaar. Bij km 875 bevindt zich een knelpunt dat waarschijnlijk samenhangt met de steenfabriek in de Gendtsche Polder en de relatief hoge kade waarop de toegangsweg zich bevindt. Vervolgens doen zich 3 knelpunten vlak achter elkaar voor bij km 878, km 880 en km 883. Deze knelpunten hangen samen met de hoogwatervrije terreinen (steenfabriek) bij Bemmels, de dijk bij Ooij die in de binnenbocht vlak bij de rivier ligt en de bocht bij Lent.

De Schaardijk bij Oosterhout en de hoger gelegen terreinen in de Staartjeswaard aan de zuidzijde van de rivier zijn de oorzaak van het knelpunt bij km 887/888.



Figuur 4.4 Berekende waterstand op de Waal, traject Millingen-Dodewaard (865-900)

De VKS zorgt voor een sterke afname van het knelpunt bij km 878. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de voorgestelde dijkverlegging Ooij. Direct benedenstrooms neemt het knelpunt Lent echter in belangrijkheid toe.

4.2.3 Waal traject Dodewaard – Opijnen (km 895-930)

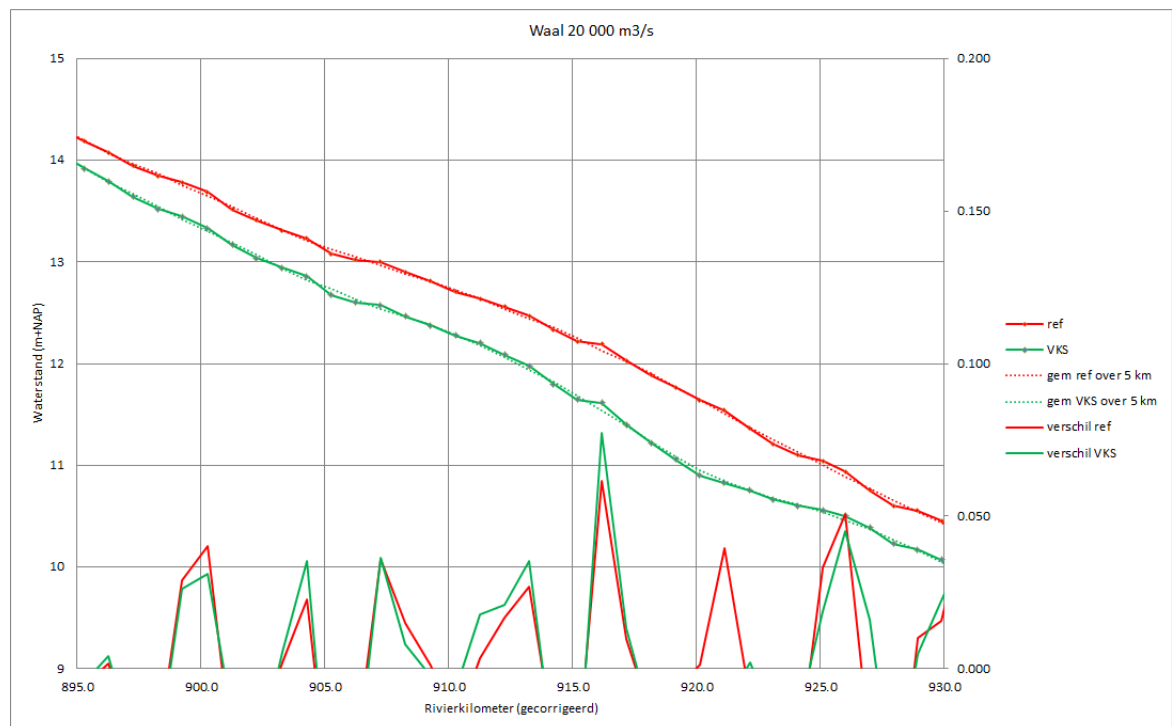
Het grootste knelpunt op dit traject bevindt zich bij km 916/917 en hangt waarschijnlijk samen met de schaardijk en een steenfabriek bij Tiel-Passewaaij op de rechteroever en de smalle uiterwaarden met relatief hoge zomerkades in de Dreumelsche waard op de linkeroever.

Bovenstrooms van dit knelpunt bevindt zich een aantal kleinere knelpunten. Bij km 900 is het effect merkbaar van de schaardijk bij Dodewaard op de rechteroever en de hoogwatervrije terreinen (steenfabriek) in de Afferdensche en Deestsche Waarden op de linkeroever.

Bij km 904/905 zorgt de combinatie van de smalle uiterwaard bij Ochten op de rechteroever met de hoogwatervrije terreinen in de Drutensche Waarden op de linkeroever waarschijnlijk voor opstuwning.

Het knelpunt bij km 907/908 is waarschijnlijk het gevolg van een dwarskade naar een hoogwatervrij terrein bij IJzendoorn.

De aantakking van het Amsterdam-Rijnkanaal zorgt voor het knelpunt bij km 913.



Figuur 4.5 Berekende waterstand op de Waal, traject Dodewaard-Opijnen (895-930)

Verder benedenstrooms bevinden zich ook nog twee knelpunten:

- bij km 921 (922) is sprake van een vernauwing bij het ingaan van de bocht bij Varik;
- bij km 926 (927) ontbreken uiterwaarden op de linkeroever (schaardijk bij Hurwenen) terwijl zich in de smalle uiterwaard op de rechteroever bij Heesselt een relatief hoog terrein bevindt.

Van alle knelpunten op dit traject lost de VKS alleen het knelpunt bij Varik volledig op.

4.2.4 Waal traject Opijnen – Hardinxveld (km 925-960)

Bij km 932/933 bevindt zich een duidelijk knelpunt. Dit wordt veroorzaakt door de vernauwing als gevolg van de aanbruggen van de snelweg (A2) en de spoorbrug bij Zaltbommel. De VKS zorgt hier voor een aanzienlijke afname van het knelpunt.

Bij km 935 en 939 bevinden zich twee vernauwingen waarvan het effect is terug te zien in de verhanglijn. De vernauwingen worden gevormd door de kades bij Zaltbommel, mogelijk in combinatie met de schaardijken bij Haaften (km 935-937, rechteroever) en Nieuwaal (km 939-940, linkeroever).



Figuur 4.6 Berekende waterstand op de Waal, traject Opijnen-Hardinxveld (925-960)

Bij km 944 is sprake van een vernauwing doordat de dijk bij Herwijnen dicht bij de rivier ligt. De maatregel “dijkverlegging Brakel/ Geul Ruiterwaard” (wl_43-45-1) zorgt voor een afname van dit knelpunt, maar zorgt voor een verhoging van de waterstand bij km 946. Na uitvoering van de VKS is het knelpunt bij Brakel (vernauwing bij km 947) nadrukkelijker zichtbaar. In de huidige situatie levert deze vernauwing geen duidelijk knelpunt op.

Het grootste knelpunt bevindt zich bij km 950. Dit hangt samen met de versmalling net benedenstrooms van de ruimte-voor-de-riviermaatregel dijkverlegging en uiterwaard-vergraving Munnikenland.

Het knelpunt bij km 953 (kmr 955; vernauwing bij Sleeuwijk) is in de huidige situatie relatief groot. De VKS lost dit echter voor een groot deel op.

Hetzelfde geldt voor het knelpunt bij km 957. Dit knelpunt wordt gevormd door de brug bij Gorinchem. De maatregel “nevengeul Sleeuwijk (MW9_4_MW9_5_DPR)”, die bestaat uit het graven van een nevengeul en het doorlaatbaar maken van het landhoofd aan de zuidzijde van de brug, heeft hier duidelijk een positief effect.

4.3 Samenvattend overzicht

Wanneer van wat grotere afstand naar de verhanglijnen van de Waal in hun geheel wordt gekeken, dan valt op dat zich bij lagere afvoeren (circa 6.000 m³/s te Lobith) geen hydraulische knelpunten voordoen. Bij hogere afvoeren springt een aantal knelpunten in het oog met een effect over maximaal een kilometer of 5 (deze zijn vermeld in Tabel 4.1). Maar dan is ook sprake van een grootschalig ‘knelpunt’. Dit knelpunt bevindt zich benedenstrooms van de voormalige overlaat bij Sint Andries. Mogelijk bevindt de Waal zich

benedenstrooms van dit punt in een 'te klein jasje' omdat er geen water van de Waal meer richting de Maas stroomt. Vroeger was dit wel het geval en was de jas mogelijk wel groot genoeg voor het af te voeren volume. Of dit echt de (enige) verklaring is, is zonder nader onderzoek niet te zeggen.

Een overzicht van de kleinschaliger knelpunten zoals geïdentificeerd langs de BovenRijn, Waal en BovenMerwede is te zien in Tabel 4.1. De omvang is gebaseerd op de mate waarin het verhang afwijkt van het gemiddelde verhang over een langer traject. De omvang is bepaald voor de referentie situatie en de situatie na uitvoering van de VKS. De grote knelpunten hebben een oranje/rode kleur gekregen. Kleine knelpunten zijn groen gekleurd. Ook het effect van de VKS is bepaald. Een donkergroene of blauwe kleur duidt op een groot positief effect. Een rode of oranje kleur duidt op een negatief effect. In dat laatste geval komt het knelpunt na uitvoering van de VKS dus duidelijker naar voren. De exacte klasseindeling is te vinden in Bijlage C.

Tabel 4.1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de BovenRijn, Waal en BovenMerwede. Kilometers betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers (de kilometterraaien langs de oever) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt			effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS	Verklaring		
949 (951)	Brakel Benedenwaarden	10	12	lokale vernauwing (benedenstrooms RvdR maatregel Munnikenland)	-2	
887 (888)	Oosterhout	10	7	Schaardijk + hogere terreinen Staartjeswaard	3	dijkverl. Oosterhout; Moespotse waard
862 (862)	Tolkamer	8	8	versmalling uiterwaarden, schaaldijk	0	
953 (955)	Sleeuwijk	8	4	vernuwing	4	maatr.pakket 1 (mn nevengeul Sleeuwijk?)
916 (917)	Tiel Passewaaij	7	8	steenfabriek en smalle uiterwaard + hoge kades linkeroever	-1	
932 (933)	Waardenburg (Rijswaard)	7	4	lokale vernauwing (o.a. A2 en spoorbrug Zaltbommel)	3	Rijswaard?, Crobsche Waard?
957 (959)	Sleeuwijk/Gorinchem	7	0	vernuwing in combinatie met landhoofd brug	7	maatr.pakket 1 (mn nevengeul Sleeuwijk?)
926 (927)	Heesselt/Hurwenen	5	5	schaardijk linkeroever, hoog terrein in smalle uiterwaard rechteroever	0	
878 (878)	Bemmel	5	2	hoogwatervrij terrein Bemmelsche Gendsche en Ooijrijksche polder	3	dijkverlegging Ooij
939 (940)	Haften/Nieuwaal	4	6	lokale vernauwing door schaaldijken	-2	
870 (870)	Millingerwaard	4	5	hoge kades (regeling van afvoerdeling?)	-1	
875 (875)	Gendsche Polder	4	5	hoogwatervrij terrein in binnenbocht met hoge kade als toegangsweg	-1	
907 (908)	Ijzendoorn	4	4	hoge dwarskade naar hoogwatervrij terrein	0	Grote Willemspolder
900 (901)	Dodewaard	4	3	schaardijk + steenfabriek Afferdensche en Deestsche waard	1	
921 (922)	Varik	4	0	vernuwing bocht bij ingaan bocht	4	hoogwatergeul Varik-Heesselt
880 (881)	Ooijpolder	3	6	scherpe bocht, dijk in binnenbocht vlakbij rivier	-3	
935 (936)	Zaltbommel/Haften	3	6	lokale vernauwing (stadsfront + schaaldijk)	-1	
913 (914)	Wamel	3	4	vernuwing bovenstrooms aantakking Amsterdam-Rijnkanaal	-1	
883 (884)	Lent	3	3	scherpe bocht	0	
944 (945)	Herwijnen	3	2	lokale vernauwing (dijk dichtbij rivier)	1	
904 (905)	Drutensche Waard	2	3	hoogwatervrij terrein steenfabriek + smalle uiterwaard rechteroever	-1	
866 (866)	Millingen a/d Rijn	0.5	1	links geen uiterwaard, rechts hoogwatervrije terreinen + hoge kades	-0.5	
946 (948)	Brakel	0	2	lokale vernauwing die alleen na uitvoering van VKS zichtbaar is	-2	

Huidige knelpunten

De knelpunten die het meest in het oog springen bevinden zich benedenstrooms van Brakel en bij Oosterhout. Ook Tolkamer en Sleeuwijk komen nadrukkelijk naar voren.

In 1997 is door HKV een analyse uitgevoerd naar hydraulische knelpunten op de Nederlandse Rijntakken. De analyse vond plaats op basis van een visuele analyse waarbij de breedte van een knelpunt (B_k) werd vergeleken met de totale breedte van de rivier (B_t). Om de omvang van het knelpunt te berekenen werd de verhouding B_k/B_t vermenigvuldigd met de lengte van het knelpunt (l). De grootste knelpunten op de BovenRijn en de Waal waren toen Tolkamer (km 862) en Nijmegen/Lent (km 883). Tolkamer komt ook nu nog als belangrijk knelpunt naar voren. Het knelpunt bij Nijmegen/Lent is door de by pass (Ruimte voor de Rivier) nagenoeg opgelost.

Bij de analyse die in het kader van Ruimte voor de Rivier is uitgevoerd (WL Delft hydraulics en Riza, 1999) wordt naast Tolkamer en Nijmegen ook Zaltbommel als knelpunt genoemd. In de omgeving van Zaltbommel zijn in het kader van Ruimte voor de Rivier reeds rivier-

verruimende maatregelen uitgevoerd. De omgeving van Zaltbommel komt in de huidige analyse nog wel als knelpunt naar voren, maar minder pregnant.

Knelpunten na realisatie VKS

Hoewel de rivierverruimende maatregelen uit de VKS overal zorgen voor een verlaging van de waterstand, lossen zij niet alle knelpunten op. De VKS heeft een gunstig effect op de relatief grote knelpunten bij Oosterhout (km 887) en Sleeuwijk (km 953). Het knelpunt bij Sleeuwijk/Gorinchem (km 957) wordt zelfs helemaal opgelost. De VKS heeft ook een sterk positief effect op de wat kleinere knelpunten bij Bommel (km 878) en Varik (km 921). De VKS zorgt er op een aantal plekken voor dat de knelpunten opvallender worden. Dit doet zich voor bij km 935 en 939 (Zaltbommel/Haften/Nieuwaal).

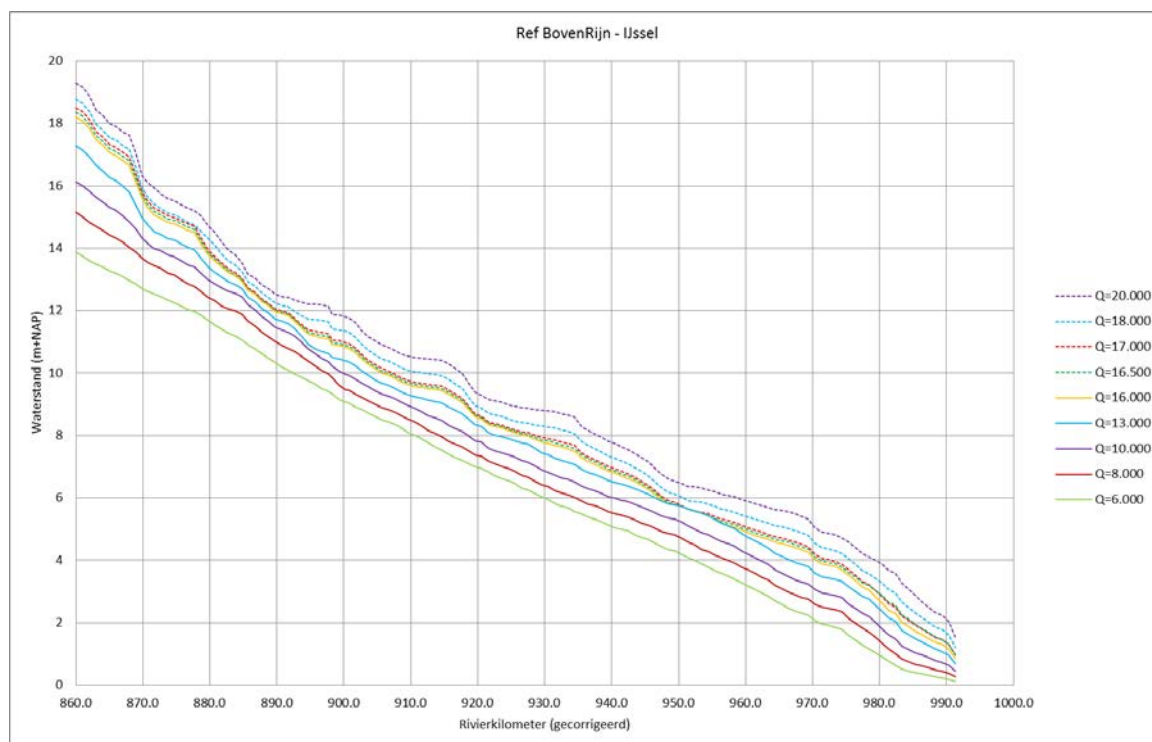
5 Bevindingen Pannerdensch Kanaal en IJssel

5.1 Globaal beeld Pannerdensch Kanaal en IJssel

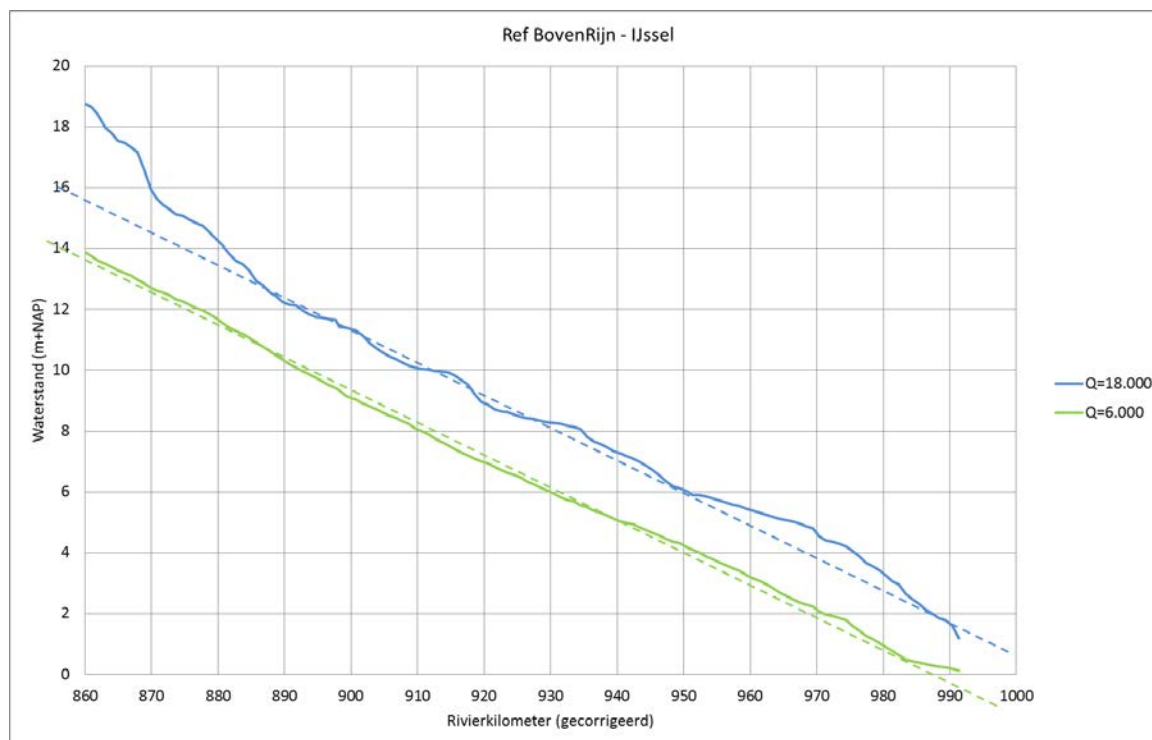
Figuur 5.1 toont de waterstanden berekend voor het Pannerdensch Kanaal en de IJssel voor verschillende afvoeren te Lobith. Voor twee afvoeren zijn de resultaten in meer detail weergegeven in Figuur 5.2.

Het volgende valt op:

- Bij middelhoge afvoeren ($6.000 \text{ m}^3/\text{s}$) resulteren de uitgezette waterstanden in een redelijk rechte lijn. Ook zijn er geen grote 'bobbels' waarneembaar in deze verhanglijn, wat er op duidt dat ook er ook over kortere trajecten geen sprake is van hydraulische knelpunten.
- Op het Pannerdensch Kanaal en de bovenloop van de IJssel is het verhang bij hogere afvoeren relatief groot. Dit valt af te leiden uit de steile waterstandslijn tussen rivierkilometer 860 en 885 (Lobith – Velp). De sterkste toename van het verhang doet zich voor na km 868, dus voorbij de Pannerdensch Kop. Aangenomen mag worden dat bij een vrij afstromende rivier (zonder regelwerken) een groter deel van de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal zou gaan. Ook voorbij de IJsselpop is het verhang relatief groot. Waarschijnlijk zou deze extra afvoer dus vooral via de IJssel naar het noorden willen stromen. Het steile verval is vooral goed te zien in Figuur 5.2.
- Op de middenloop van de IJssel is het verhang bij hoge afvoeren (t/m $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith) kleiner dan bij zeer hoge afvoeren. Bovenstrooms van km 960 is het verhang bij een afvoer van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith veel kleiner dan benedenstrooms van dit punt. Blijkbaar is hier sprake van een grootschalig knelpunt, dat bij hogere afvoeren echter is opgelost door de aanleg van bypass Veessen-Wapenveld. Er is bij die hogere afvoeren geen knik meer te zien in de verhanglijnen bij km 950 (ongecorrigeerd kmr 960) en de waterstand bij een afvoer van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is gelijk aan die bij $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De oorzaak van het 'verdwijnen' van dit grootschalige knelpunt bij hogere afvoeren is te vinden in het inzetprotocol van de bypass bij Veessen-Wapenveld. Bij afvoeren boven de $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith stroomt een deel van het water via deze bypass, maar tot afvoeren met een overschrijdingskans van 1: 100 is het inlaatwerk gesloten. De rivier krijgt alleen bij de daar bovenuit gaande afvoeren dus meer ruimte, waardoor het grootschalige knelpunt bij zeer hoge afvoeren verdwijnt.
- Bij de zeer hoge afvoeren is nog wel een grootschalige knik in de verhanglijn te zien bij km 970 (ongecorrigeerd kmr 980). Dit is ter hoogte van Zwolle- Hattem.



Figuur 5.1 Berekende waterstand op de IJssel op de as van de rivier voor verschillende afvoeren te Lobith



Figuur 5.2 Verschillen in gemiddeld verhang op de IJssel

Bij hogere afvoeren is ook een groot aantal knelpunten waarneembaar met een effect over kortere afstand. Dit is onder meer bij km 898 (kmr 903, brug Doesburg), 915 (kmr 925, brug en versmalling bij de Hoven te Zutphen), 934 (kmr 944, Deventer) en 969 (kmr 979 Zwolle-Hatter). Deze knelpunten worden hieronder nader toegelicht.

5.2 Resultaten in detail

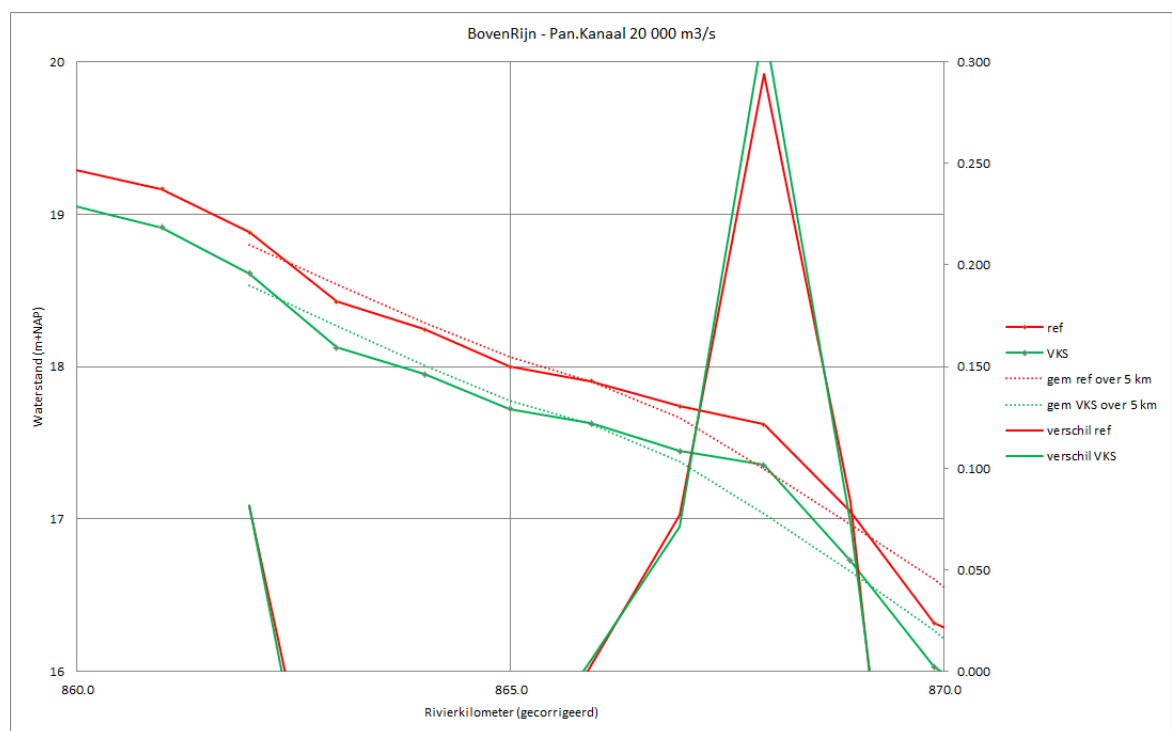
Voor alle figuren in dit hoofdstuk geldt:

- de berekende waterstand in de referentiesituatie is weergegeven met een groene *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de berekende waterstand na uitvoering van de VKS is weergegeven met een rode *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de gemiddelde waterstand over 5 kilometer wordt voor beide weergegeven met *stippellijnen* in dezelfde kleuren
- het verschil tussen de berekende lokale waterstand en de gemiddelde waterstand wordt ten opzichte van de rechter y-as weergegeven door *doorgetrokken* lijnen zonder markering (dit zijn veelal de 'piekerige lijnen aan de onderkant van de grafiek).

5.2.1 Lobith – Pannerden (km 860-870)

Figuur 5.3 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier op het traject Lobith-Pannerden. Het knelpunt bij km 862 is al besproken in hoofdstuk 4.

Het knelpunt bij km 868 is het meest opvallende knelpunt op de Rijntakken. Het wordt gevormd door het regelwerk bij de Pannerdensche Kop (dat bewust niet geheel open wordt gezet). Mogelijk spelen de hoge kades op de rechteroever bij de Pannerdensche Kop bij de middelhoge en hoge afvoeren ook nog een rol. Omdat het regelwerk ook bij inzet van de rivierverruimende maatregelen uit de VKS (ver) dicht blijft staan blijft dit effect van het afknijpen duidelijk zichtbaar.



Figuur 5.3 Berekende waterstand op de BovenRijn en Pannerdensch kanaal, traject Lobith-Pannerden

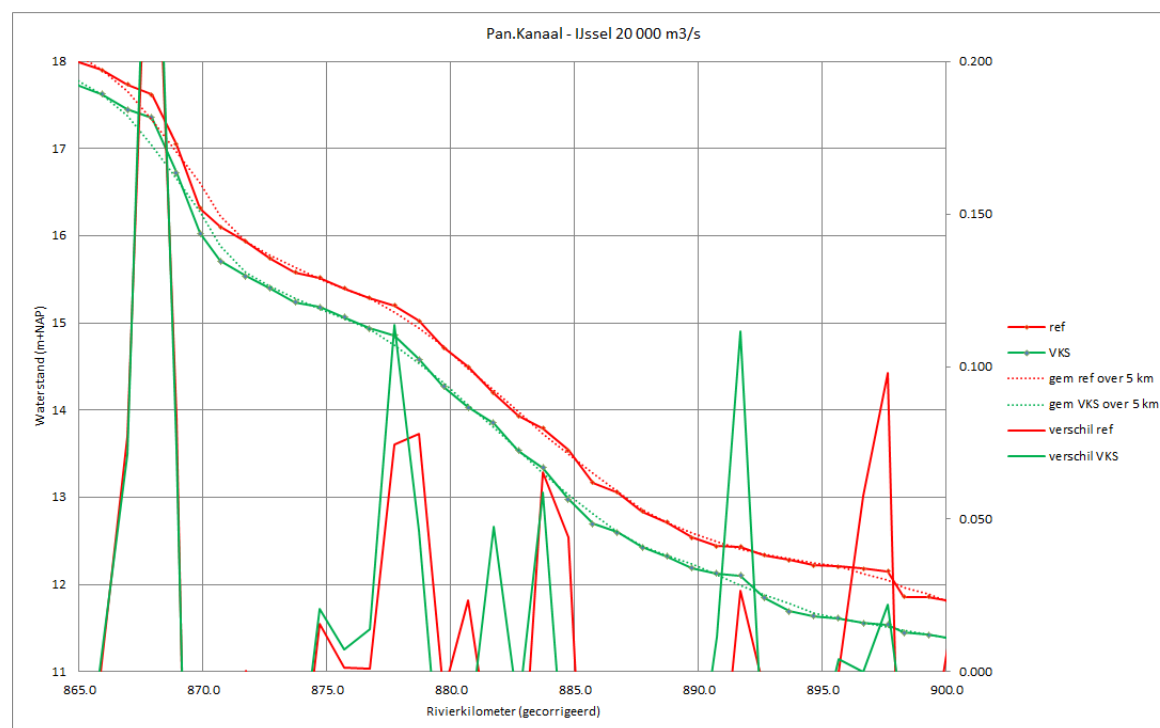
5.2.2 Pannerden - Olburgen (km 865-900)

Het tweede grote knelpunt op het Pannerdensch Kanaal bevindt zich bij km 879. Dit knelpunt wordt gevormd door het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij. Na uitvoering van de VKS staat dit regelwerk nog verder dicht (geheel dicht), waardoor het knelpunt in belangrijkheid toeneemt.

In de huidige situatie is een klein knelpunt zichtbaar bij km 881 (direct benedenstrooms van de spoorbrug Arnhem-Westervoort). De maatregel Koppenwaard/Rhederlaag (ij_wvoortg_a1) zorgt ervoor dat dit knelpunt wordt verplaatst naar km 882. Terp Putman vormt, in combinatie met de smalle uiterwaarden op de linkeroever en de aanbrug van de snelweg A12, na uitvoering van de VKS dus een duidelijkere belemmering van de doorstroming.

Het knelpunt bij km 884/885 wordt waarschijnlijk gevormd door de hoge kades rond de Koppenwaard een aantal kades in de Velperwaarden. De maatregel "IJsselnoord (IJsselpoort)" (ij_ijnoord_a2) lost dit knelpunt deels op.

In de referentiesituatie bevindt zich een knelpunt van beperkte omvang bij km 892 (kmr 896). Dit knelpunt wordt gevormd door de vernauwing bij Giesbeek en de hoge kades rond de Havikerwaard. Na uitvoering van de VKS is dit knelpunt veel prominenter in beeld. Dat komt waarschijnlijk doordat de maatregel "Koppenwaard/ Rhederlaag, maximaal scenario (IJsselpoort)" (ij_kopwmax_a1) de doorstroming bovenstrooms van dit punt dermate vergroot dat de beperkte doorstroming bij km 892 (896) relatief meer invloed heeft. Daar komt bij dat de maatregel "uiterwaardenvergraving Havikerwaard (897-900) en Noordingsbouw natuur (PKB)" (Y13-Y15-2) benedenstrooms voor veel waterstands daling zorgt. Het knelpunt bij km 892 (kmr 896) voorkomt waarschijnlijk dat dit effect zich sterk stroomopwaarts door kan zetten. Dit resulteert in een opvallende knik in de verhanglijn.



Figuur 5.4 Berekende waterstand op het Pannerdensch kanaal en de IJssel, traject Pannerden - Olburgen

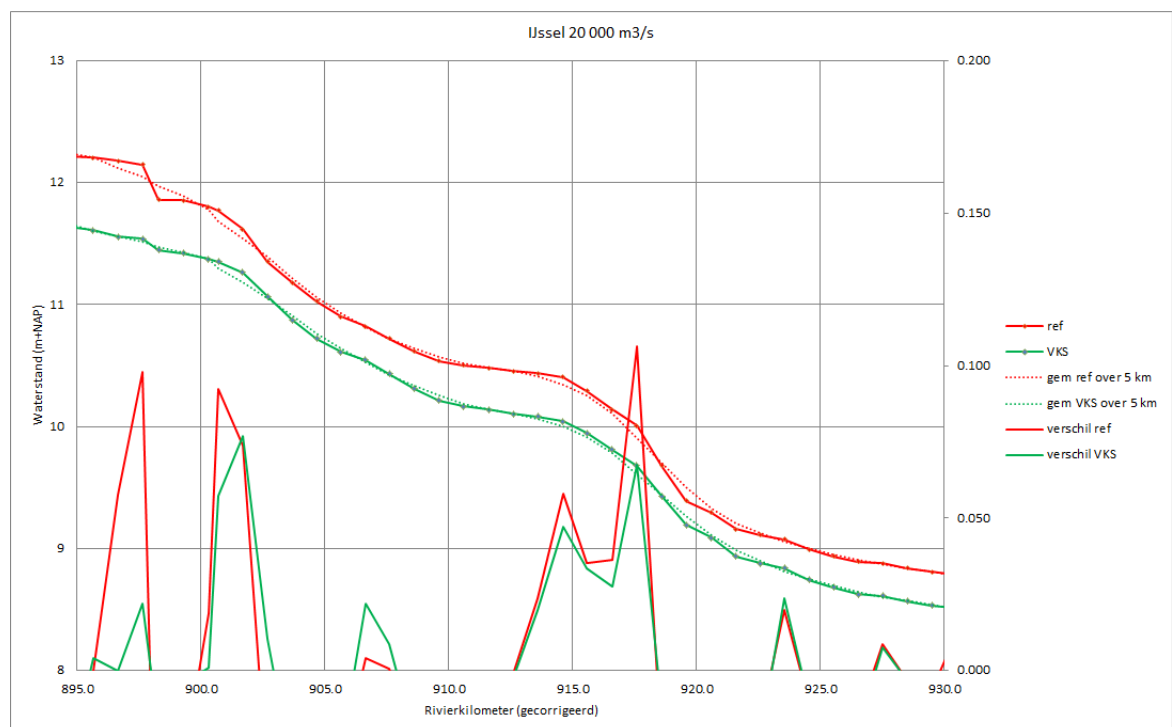
Bij km 898 (ongecorrigeerd km 903) bevindt zich de brug bij Doesburg. Na realisatie van de VKS is dit knelpunt nagenoeg verdwenen. De maatregel “uiterwaardenvergraving Havikerwaard (897-900) en Noordingsbouwing natuur (PKB)” (Y13-Y15-2) heeft hier waarschijnlijk een sterk positief effect.

5.2.3 Olburgen – Zutphen (km 900-930)

Het knelpunt bij km 901 (ongecorrigeerd ongeveer km 905/906) komt door de vernauwing bij Olburgen/Dieren.

Een klein knelpuntje bevindt zich bij km 907 (ongecorrigeerd km 916). De oorzaak van dit knelpunt is niet geheel duidelijk. Mogelijk hangt het samen met hoger gelegen terreinen in de Brummensche Waarden of met de kade/veerweg die van Bronkhorst naar de rivier loopt.

Een groot knelpunt bevindt zich bij km 915-918 (ongecorrigeerd km 925-928). Dit betreft het nauwe deel bij Zutphen. De pieken hangen waarschijnlijk samen met de bruggen. Het begin van het knelpunt (bij de kruising van de N314) kan nog voor een klein deel een artefact zijn van de kortsluiting die door de dijkverlegging Cortenoever mogelijk is geworden; daardoor kan de kilometrering bij hoogwater aanpassing behoeven. De maatregelen uit de VKS hebben een positief effect op de waterstand, maar lossen het knelpunt niet op.



Figuur 5.5 Berekende waterstand op de IJssel, traject Olburgen – Zutphen

De oorzaak voor de schijnbare kleine knelpuntjes bij km 924 (kmr 933) en km 928 (kmr 937) is niet bekend. Er kan sprake zijn van een artefact, doordat de rivier bij hoogwater bochten afsnijdt, waardoor de kilometrering niet constant blijft (en in elkaar zou moeten schuiven). De VKS heeft er geen effect op.

5.2.4 Zutphen - Wapenveld(km 930-960)

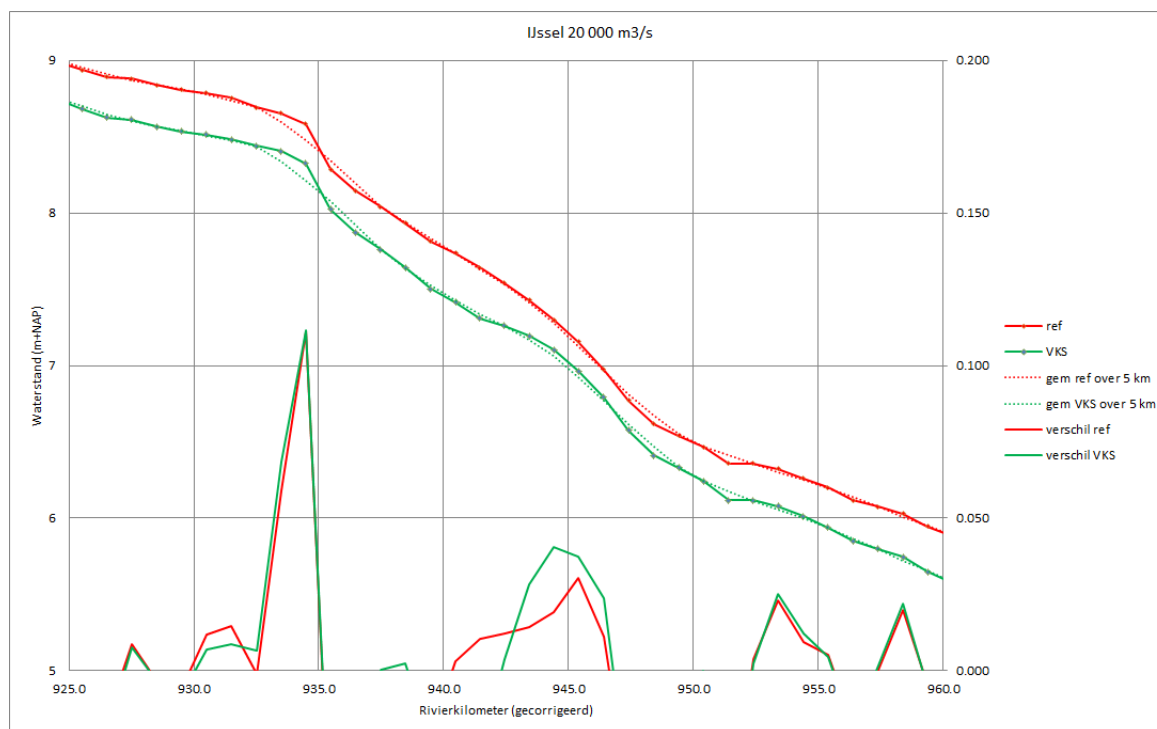
De vernauwing in het winterbed bij Deventer is duidelijk zichtbaar als knelpunt bij km 934 (ongecorrigeerd kmr 944).

Het volgende grote knelpunt bevindt zich bij km 940-946 (ongecorrigeerd kmr 950-956). Dit betreft het deel met relatief smalle uiterwaarden bovenstrooms van Olst. De VKS zorgt boven- en benedenstrooms van Olst voor meer waterstandsdeling dan bij Olst zelf. Hierdoor komt het knelpunt nog iets prominenter in beeld.

Bij km 954 (kmr 964) bij Veessen en bij km 958 (kmr 968) bevinden zich nog twee kleinere knelpunten. Bij Veessen bevindt zich aan de rechterzijde van de rivier een relatief hooggelegen buitendijks gebied (Fortmond), maar hier doet zich mogelijk ook een artefact voor, doordat de rivier bij hoogwater de bocht afsnijdt. Dat betekent dat de kilometrerings opnieuw zou moeten worden gecorrigeerd, danwel dat het in de verhanglijn verschijnende knelpunt geen echt hydraulisch knelpunt is.

Bij km 958 (kmr 968, Herxen) komt de bandijk op de rechteroever plotseling een stuk dichter bij de rivier te liggen; dit is een schaadijk. De VKS heeft nauwelijks invloed op deze knelpunten.

Op basis van de hier gebruikte modelberekeningen is niet na te gaan hoe dit traject er uit zag voordat de PKB werd uitgevoerd, maar verwacht wordt dat het knelpunt veel groter was. De maatregel Veessen-Wapenveld heeft de doorstroming op dit traject bij afvoeren boven de 1: 100 per jaar afvoer sterk verbeterd. In Figuur 5.1 is te zien dat het grootschalige knelpunt tussen Veessen en Wapenveld bij lagere afvoeren nog steeds aanwezig is. Dat is logisch, want de *bypass* Veessen-Wapenveld stroomt dan niet mee.



Figuur 5.6 Berekende waterstand op de IJssel, traject Zutphen-Wapenveld

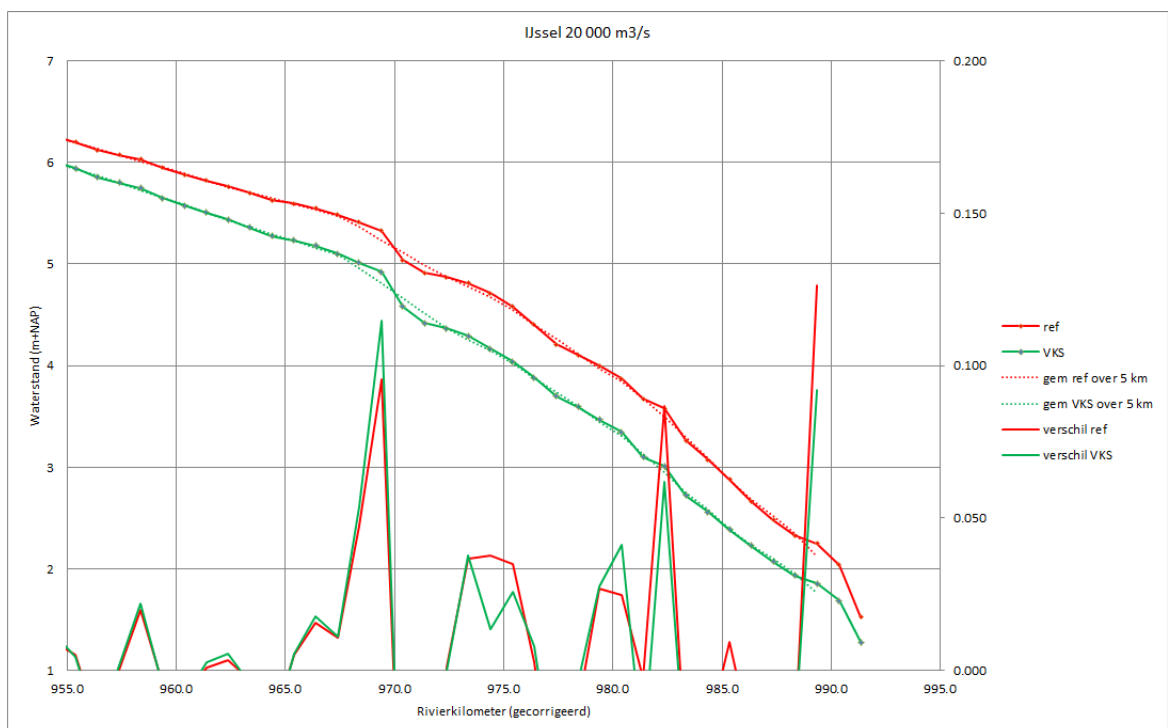
5.2.5 Wapenveld - Kampen(km 960-991)

Op dit traject bevindt zich een duidelijk knelpunt bij km 969 (kmr 979). Dit is bij Zwolle. De rivier is hier smal en op de iets bredere delen bevinden zich landhoofden van bruggen.

Het volgende knelpunt bevindt zich bij Zalk (km 973-976, ongecorrigeerd kmr 983-986), gevolgd door een knelpunt bij km 980 (kmr 990) bij de Koppelerwaard. Beide situaties betreffen uiterwaarden in scherpe meanderbochten (getijdemeanders), die artefacten zouden kunnen zijn door kortsluiting via de uiterwaarden. Om dit, net als bij de eerder genoemde vergelijkbare situaties, werkelijk te kunnen vaststellen zou de *thalweg* bij hoogwater moeten worden bepaald en de kilometrering daaraan aangepast alvorens de waterstanden uit te zetten.

Km 982 (kmr 993) en 985 (kmr 995) bevinden zich net bovenstrooms van, respectievelijk in Kampen. Deze knelpunten nemen af (km 985 verdwijnt zelfs) na uitvoering van de VKS.

Het knelpunt bij km 990 (kmr 1000) kan veroorzaakt worden doordat de rivier relatief smal is, maar ook door een artefact van de modelrand. Opgemerkt wordt dat relevante hoogwaterstanden in dit traject ook niet zozeer bepaald worden door de afvoer, maar meer door de waterstanden op het IJsselmeer (meerpeil en windopzet).



Figuur 5.7 Berekende waterstand op de IJssel, traject Wapenveld-Kampen

5.3 Samenvattend overzicht

Wanneer van grotere afstand naar de verhanglijnen van de IJssel in z'n geheel wordt gekeken, dan valt op dat zich bij middelhoge afvoeren (circa 6.000 m³/s te Lobith) geen hydraulische knelpunten voordoen. Bij hogere afvoeren springt een aantal knelpunten in het oog met een effect over maximaal een kilometer of 5 (deze zijn vermeld in Tabel 5.1), maar dat ook sprake is van een aantal grootschaliger knelpunten:

- Benedenstrooms van de Pannerdensche Kop neemt het verhang bij hogere afvoeren sterk toe. Aangenomen mag worden dat bij een vrij afstromende rivier (zonder regelwerken) een groter deel van de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en de IJssel zou gaan.
- Bij hoge afvoeren (t/m 13.000 m³/s te Lobith) bevindt zich een grootschalig knelpunt rond km 950 (ongecorrigeerd km 960). Dit punt, of beter nauw traject, bevindt zich bij Veessen en wordt in de referentiesituatie gevormd door het inlaatwerk van de bypass. Bij hogere afvoeren 'verdwijnt' dit knelpunt dan ook, door de inzet van de bypass bij Veessen-Wapenveld.
- Bij de hogere afvoeren is nog wel een grootschalig knelpunt te zien bij km 970 (ongecorrigeerd kmr 980). Dit is ter hoogte van Zwolle. Voorbij Zwolle neemt het gemiddelde verhang sterk toe.

Een overzicht van de kleinschalige knelpunten zoals geïdentificeerd langs het Pannerdensch kanaal en de IJssel is te zien in Tabel 5.1. De meest opvallende knelpunten staan bovenaan en hebben een oranje/rode kleur. De legenda behorend bij de klasse-indeling is te zien in Bijlage C.

Tabel 5.1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Kilometers betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers (kmr) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
868 (868)*	Pannerden	13	13	Regelwerk ver dicht. Mogelijk spelen hoge kades op rechteroever rol	-3	regelwerk verder dicht om afvoerverdeling te handhaven
990 (1000)	Kampereiland	13	9	Relatief smal	-4	Reevediep fase 2
934 (944)	Deventer	11	11	Vernauwing	0	
915-918 (925-928)	Zutphen	11	7	Vernauwing, vooral bij bruggen. Mogelijk deels artefact van kortsluiting Cortenoever.	4	dv Cortenoeverse brug, Tichelbeekse waard SNIP3
969 (979)	Zwolle	10	12	Smalle rivier + landhoofden van bruggen	-2	
898 (903)	Doesburg	10	2	Brug. Nagenoeg opgelost door VKS	8	uiterwaardvergraving Havikerwaard en Noordingsbouw natuur
901 (906)	Olburgen/Dieren	9	8	Vernauwing	1	
982 (993)	Kampen	9	6	Vernauwing bovenstrooms van Kampen	3	2e fase bypass Kampen
879 (879)*	Hondsbroeksche Pleij	8	11	Regelwerk ver of zelfs geheel dicht	-3	regelwerk verder dicht om afvoerverdeling te handhaven
884 (884)	Velperwaarden	7	6	Kades rond Koppenwaard	1	IJsselpoort (mn ij kopwmax a1)
973-976 (983-986)	Zalk	4	4	Onduidelijke oorzaak, mogelijk artefact	0	
892 (896)	Giesbeek	3	11	Vernauwing. Prominenter in beeld na verbeterde doorstroming Koppenwaard-Rhederlaag en waterstands daling Havikerwaard	-8	beter zichtbaar door Y13_Y15_2?
940-946 (950-956)	Olst	3	4	Relatief smal	-1	
980 (990)	Koppelerwaard	3	4	Onduidelijke oorzaak, mogelijk artefact	-1	
954 (964)	Veessen	3	3	Fortmond, mogelijk deels artefact door by pass Veessen-Wapenveld (bochtafsnijding)	0	
958 (968)	Herxen	2	2	Schaardijk rechteroever	0	
881 (881)	Westervoort	2	0	Obstakels direct benedenstrooms van spoorbrug Arnhem-Westervoor	2	IJsselpoort (mn ij wvoortg a1)
985 (995)	Kampen	1	0	Vernauwing brug Kampen – IJsselmuiden	1	
907 (916)	Brummen	0.5	2	Niet duidelijk. Mogelijk hoger gelegen terreinen en/of kades Bronckh	-1.5	
882 (882)	Westervoort	0	5	Terp Putman. Niet zichtbaar in referentie, wel na uitvoering VKS (verplaatsing van knelpunt bij km 881)	-5	

* bewust gecreëerde 'knelpunten' om de afvoerverdeling te kunnen handhaven.

Het meest pregnante knelpunt wordt gevormd door het regelwerk bij de Pannerdensche Kop (km 886). Om de beleidsmatige afvoerverdeling te kunnen handhaven wordt dit regelwerk bewust niet helemaal open gezet. Dit resulteert in een 'knelpunt'. Datzelfde gebeurt ook bij de Hondsbroeksche Pleij (km 879). De opstuwing op deze locaties is echter bewust veroorzaakt om de afvoerverdeling te kunnen regelen. Om die reden zijn deze locaties gemarkeerd met een * en grijs in de tabel weergegeven.

Naast de bewust gecreëerde 'knelpunten' bij de splitsingspunten is sprake van een knelpunt bij Kampereiland en van een aantal grote knelpunten rond de steden Zutphen, Deventer, Zwolle, Doesburg, Dieren en Kampen. Zutphen, Deventer en Kampen kwamen ook al naar

voren bij de knelpuntenanalyse van HKV (1997). In de knelpuntenanalyse van Deltares en RIZA (1999) werd daarnaast ook Kampereiland nog apart genoemd.

Op de bovenloop van de IJssel zorgt een aantal maatregelen voor aanzienlijke waterstandsdeling. Dit lost een aantal knelpunten op, maar zorgt er ook voor dat een klein aantal knelpunten pregnanter in beeld komt. De VKS heeft veel effect op de knelpunten bij Doesburg (km 898, kmr 903), Zutphen (km 915-918, kmr 925-928) en Kampereiland (km 990, kmr 1000). De voorgestelde maatregelen zijn echter niet afdoende om de knelpunten helemaal op te lossen.

De knelpunten bij Giesbeek (km 892, kmr 896) en Westervoort (km 882) komen nadrukkelijker in beeld. De waterstandsdeling voor en na deze knelpunten is groter dan bij het knelpunt zelf, waardoor het duidelijker naar voren komt.

Ook omvang van de 'stremming' bij de regelwerken op de Pannerdensche Kop en de IJsselkop neemt na uitvoering van de VKS toe. Dit komt doordat de regelwerken verder dicht moeten worden gezet om de huidige afvoerverdeling te handhaven.

Bij het gedetailleerdere ontwerp van de maatregelen zou men na kunnen gaan of deze 'nieuwe' of zich verplaatsende knelpunten ook opgelost kunnen worden. Het effect van de maatregelen zoals opgenomen in de VKS zou dan over een langer traject merkbaar zijn. Dit geldt ook voor de splitsingspunten. Wanneer de afvoerverdeling op een andere manier kan worden 'rechtgetrokken' (bijvoorbeeld door proportionele rivierverruiming op de bovenloop van de Nederrijn), dan kan het regelwerk verder open worden gezet, waardoor het waterstandverlagende effect van klimaatpark IJsselpoort ook op het Pannerdensch Kanaal kan doorwerken.

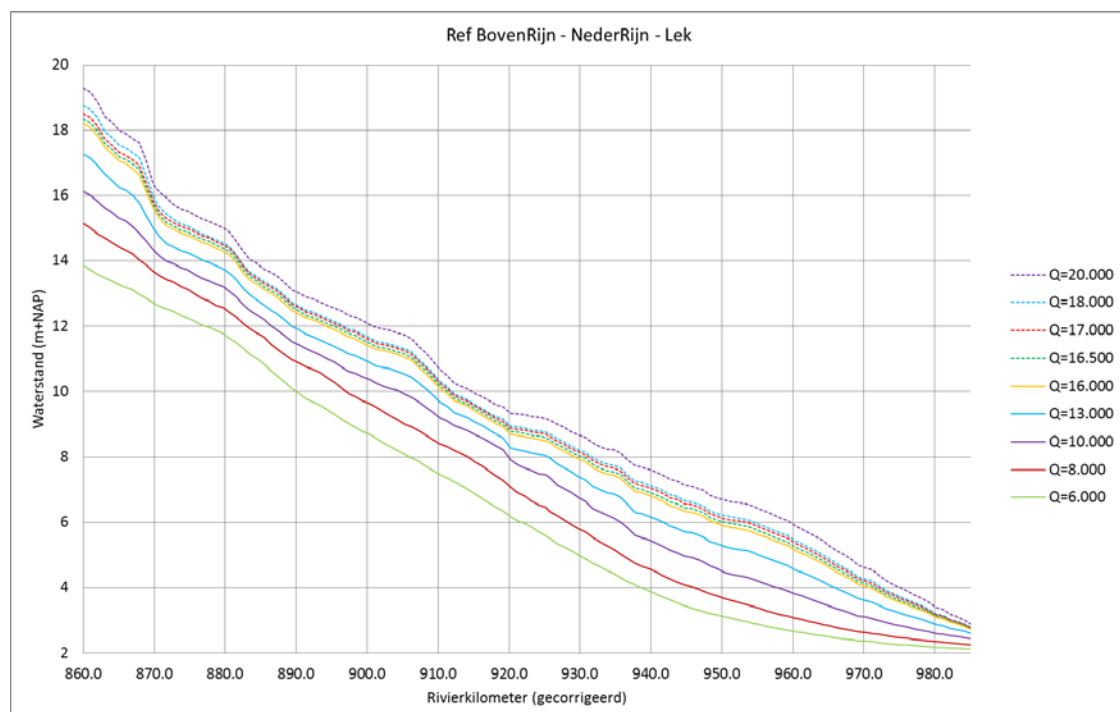
6 Bevindingen Nederrijn-Lek

6.1 Globaal beeld Nederrijn en Lek

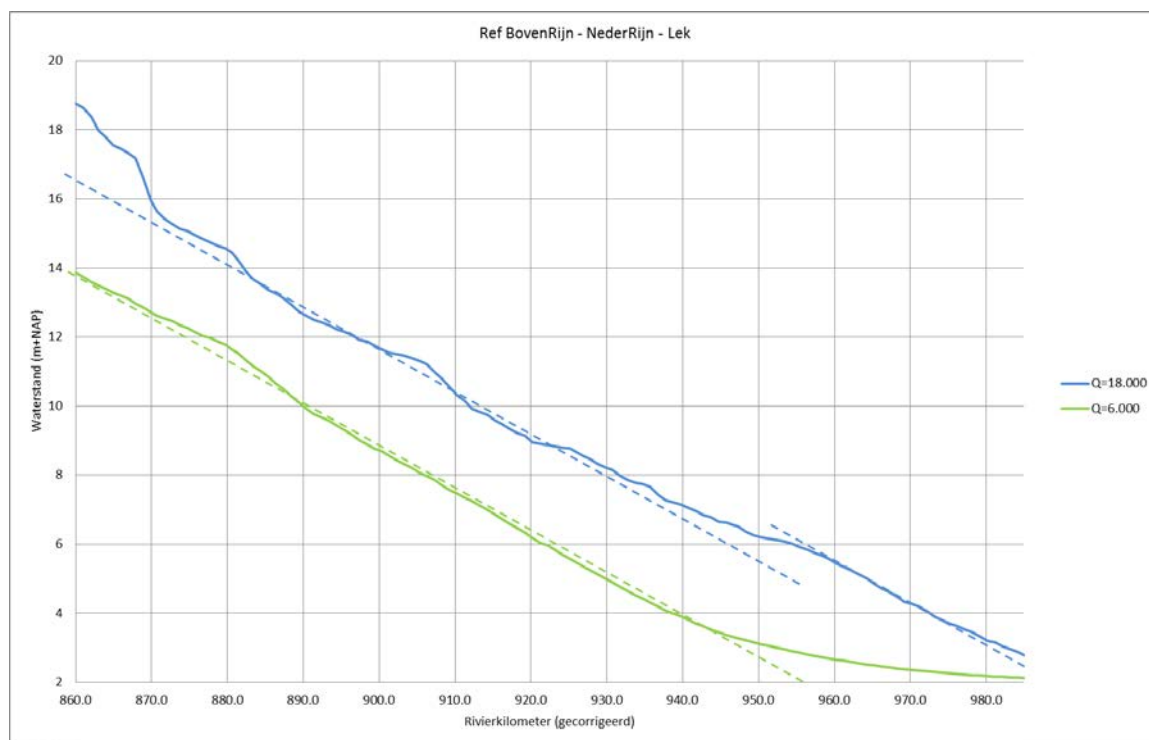
Figuur 6.1 toont de berekende waterstanden op de Nederrijn-Lek voor verschillende afvoeren te Lobith. Figuur 6.2 toont dezelfde informatie, maar dan voor 2 afvoeren. Ook zijn in deze figuur (op het oog) lijnen getrokken om het gemiddeld verhang aan te geven.

Bij middelhoge afvoeren (6.000 m³/s te Lobith) is het verval op de BovenRijn, het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn-Lek relatief constant. Pas rond km 940 (tussen Culemborg en Vianen) neemt het verhang sterk af. Daar wordt de Lek een getijderivier.

Wanneer een lijn met hetzelfde verhang wordt getrokken door de waterstanden die zijn berekend voor een afvoer van 18.000 m³/s te Lobith, dan blijkt deze redelijk overeen te komen met het gemiddelde verhang op de Nederrijn-Lek tussen Arnhem (km 882) en de stuw bij Maurik (km 920). Bovenstrooms hiervan (BovenRijn en Pannerdensch Kanaal) wordt de rivier gekenmerkt door een steiler verhang. Benedenstrooms hiervan neemt het verhang tijdelijk iets af (km 920 tot km 955 ongeveer, ofwel tussen Maurik en Lexmond). Daarna neemt het verhang weer iets toe. De tijdelijke afname van het verhang kan duiden op een knelpunt dat op een grotere schaal merkbaar is. Mogelijk hangt dit samen met de vernauwing van de Lek stroomafwaarts van Lexmond (waar de uiterwaarden beduidend smaller worden).



Figuur 6.1 Berekende waterstand op de Nederrijn-Lek op de as van de rivier voor verschillende afvoeren te Lobith



Figuur 6.2 Verschillen in gemiddeld verhang op de Nederrijn-Lek

Bij hogere afvoeren is ook een aantal knelpunten waarneembaar met een effect over kortere afstand. Deze knelpunten worden hieronder nader toegelicht.

6.2 Resultaten in detail

Voor alle figuren in dit hoofdstuk geldt:

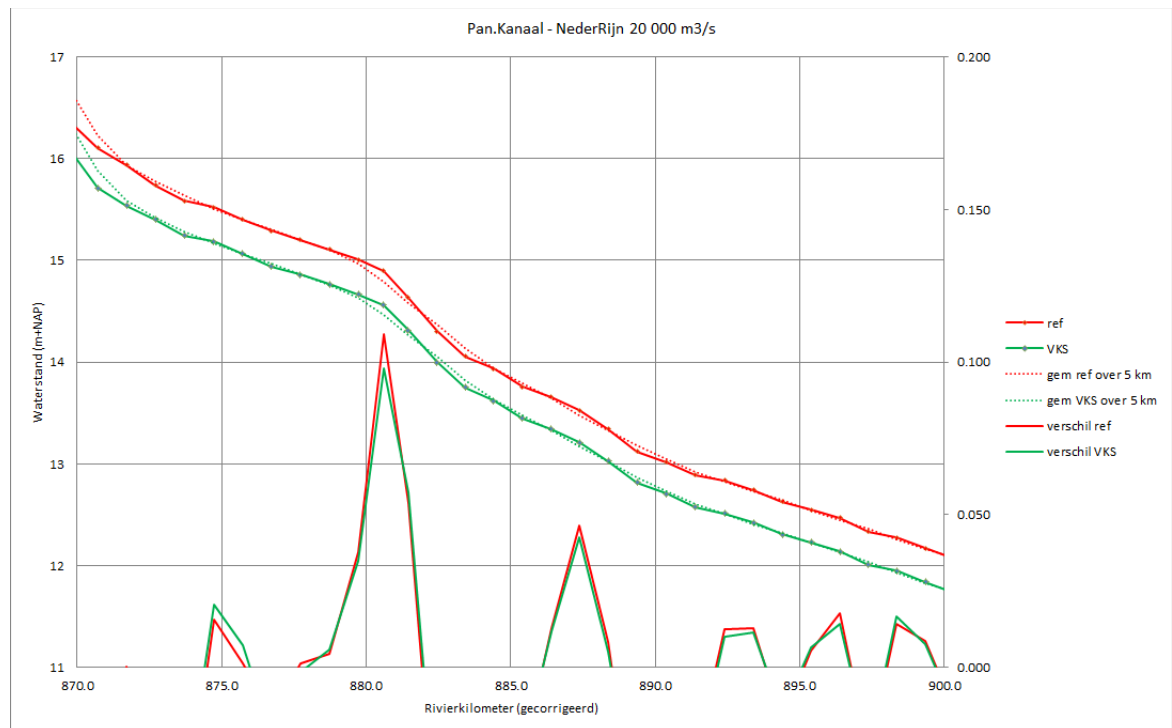
- de berekende waterstand in de referentiesituatie is weergegeven met een groene *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de berekende waterstand na uitvoering van de VKS is weergegeven met een rode *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de gemiddelde waterstand over 5 kilometer wordt voor beide weergegeven met *stippellijnen* in dezelfde kleuren
- het verschil tussen de berekende lokale waterstand en de gemiddelde waterstand wordt ten opzichte van de rechter y-as weergegeven door *doorgetrokken* lijnen zonder markering (dit zijn veelal de 'piekerige' lijnen aan de onderkant van de grafiek).

6.2.1 Pannerden – Wageningen (km 870-900)

Figuur 6.3 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier op het traject Pannerden-Wageningen. Het grootste knelpunt bevindt zich bij km 881. Dit is de vernauwing bij Arnhem Bakenhof met de werken rond de IJsselkop, die mede de afvoerverdeling over Nederrijn en IJssel moeten 'regelen'.

Bij km 887 bevindt zich de spoorbrug in de Rosandepolder bij Oosterbeek. Deze is weliswaar doorlatend gemaakt, maar leidt blijkbaar toch nog tot enige opstuwing.

Het knelpunt bij km 893 wordt veroorzaakt door de hoogwatervrije terreinen (steenfabriek) en hoge kades in de Doorwerthsche Waarden, mogelijk in combinatie met de bruggenhoofden van de A50 (deze laatste zijn in het kader van Ruimte voor de Rivier aangepakt)



Figuur 6.3 Berekende waterstand op het Pannerdensch kanaal en de Nederrijn-Lek, traject Pannerden - Wageningen

Bij km 896 is sprake van een zeer smalle doorgang omdat aan de rechterzijde vrijwel geen ruimte is door de stuwwal terwijl zich op de linker oever een hoogwatervrij terrein bevindt (steenfabrieken in de Randwijksche Uiterwaarden tegenover Renkum), dat met een dam met de dijk is verbonden.

Bij km 899 (kmr 900) speelt veerweg van Lexkesveer op de noordoever bij Wageningen mogelijk een belemmerende factor.

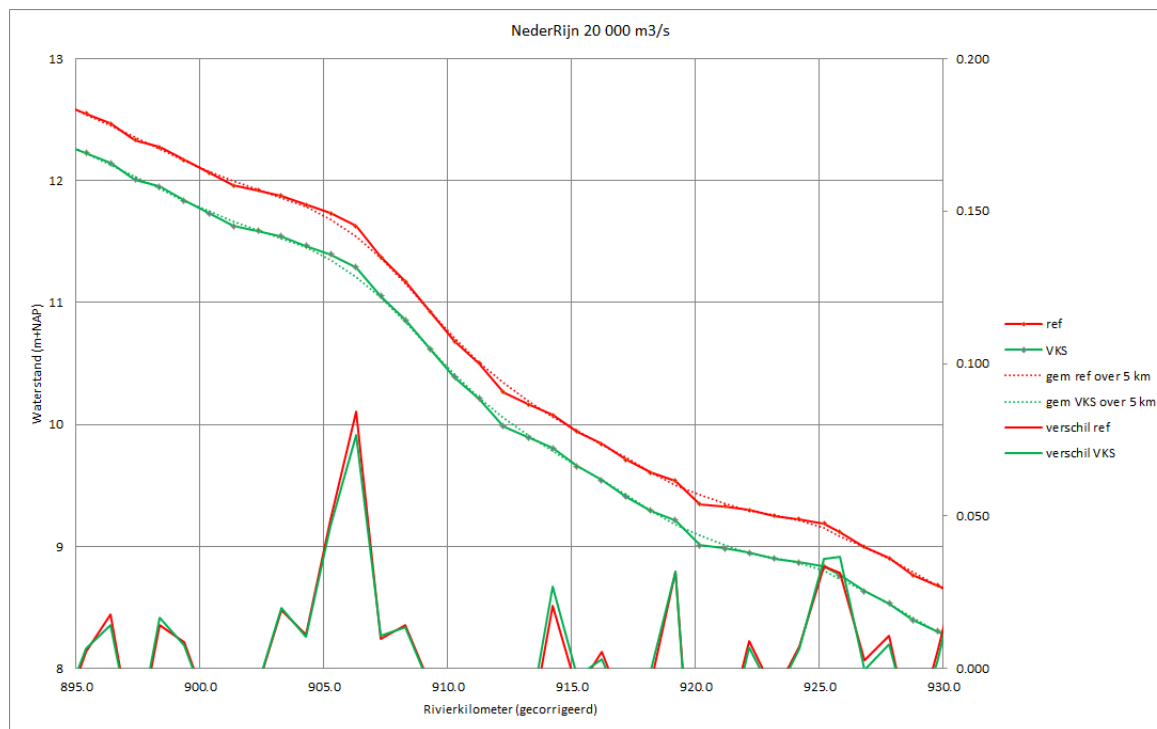
6.2.2 Wageningen – Ravenswaaij (km 900-930)

Op dit traject bevindt het grootste knelpunt zich bij km 906 (kmr 907). Dit is ter hoogte van net bovenstrooms van de Blauwe Kamer. Waarschijnlijk wordt het veroorzaakt door de schaardijk bij Kesteren en fortificatie De Spees (Grebbeinie) die tegenover de stuwwal van de Grebbeberg liggen.

Kleinere knelpunten zijn te vinden bij km 914 (ongecorrigeerd km 915), km 919 (920) en rond km 925 (927).

- Het knelpunt bij km 914 bevindt zich net bovenstrooms van Elst. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door de kades met veerwegen loodrecht op de rivier.
- Het knelpunt bij km 919 valt samen met de bovenstroomse kant van het Eiland van Maurik. Doorstroming via de rechter uiterwaard wordt belemmerd door aanwezigheid van het sluiscomplex en de weg daar naar toe. Op de linker oever bevindt zich een hoogwatervrij terrein met een hooggelegen ontsluitingsweg dwars op de rivier.

- Bij km 925-926 (ongecorrigeerd kmr 927-928) spelen waarschijnlijk de kades bij de verbinding met het Amsterdam-Rijnkanaal (bij Wijk bij Duurstede) een rol. Deze zijn echter in het kader van Ruimte voor de Rivier aangepakt. Mogelijk was het knelpunt vroeger dus groter.



Figuur 6.4 Berekende waterstand op de Nederrijn-Lek, traject Wageningen - Ravenswaaij

6.2.3 Ravenswaaij – Tienhoven (km 930-960)

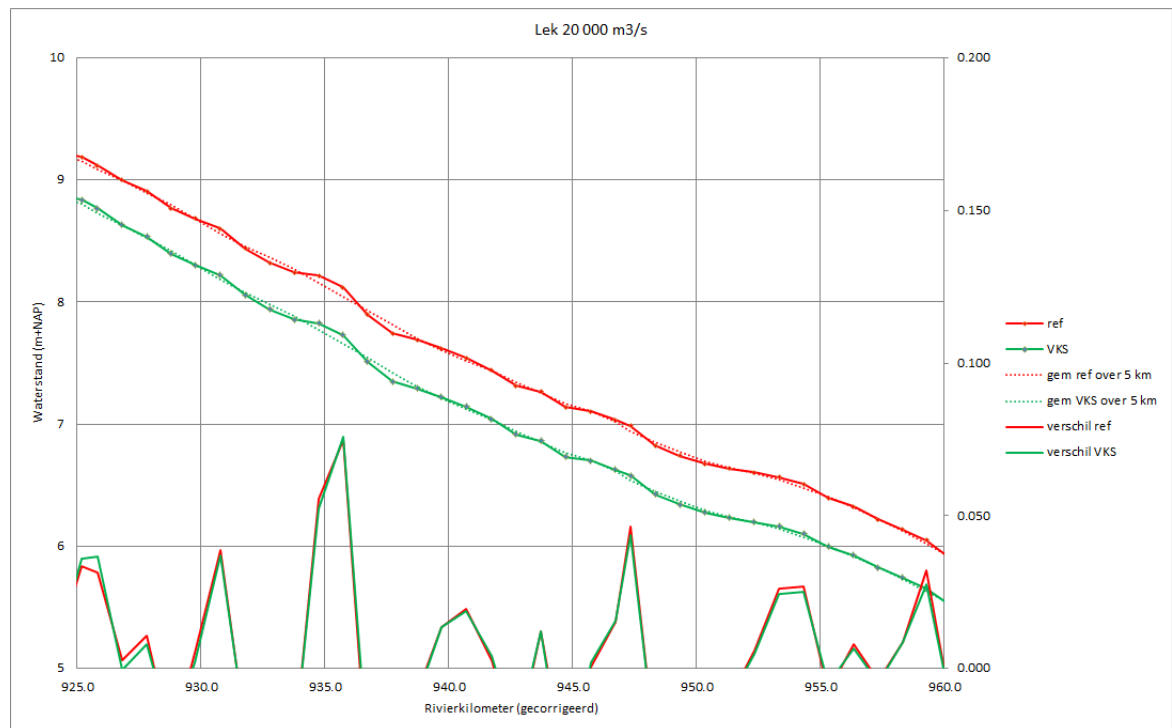
Op dit traject bevindt zich één redelijk groot knelpunt en een zevental kleine knelpunten.

Het grootste knelpunt ligt bij km 936 (ongecorrigeerd kmr 939). Op de rechter oever belemmert de weg naar de veerboot bij Culemborg de doorstroming. Op de linkeroever liggen hoogwatervrije terreinen.

Kleinere knelpunten zijn te zien bij:

- Km 931 (kmr 933), Beusichemse waard. Hier ligt een kade met weg dwars op de rivier. Bovendien is de kade rond deze uiterwaard relatief hoog.
- Km 940-941 (kmr 942-943), bovenstrooms van Everdingen. De oorzaak van dit knelpunt is waarschijnlijk fort Everdingen.
- Km 944 (kmr 946) valt samen met de stuw bij Hagestein.
- Km 947 (kmr 950), bij Vreeswijk (Nieuwegein). Het stadsfront steekt hier uit richting de rivier. Ook de landhoofden van de brug in de A2 kunnen een rol spelen. Hier is in het kader van Ruimte voor de Rivier een maatregel getroffen. Mogelijk was het knelpunt voor die tijd groter.
- Km 954 (kmr 957) is de bocht bij Lexmond. Deze bocht is erg scherp doordat de linker bandijk dicht bij de rivier komt te liggen (schaardijk; op de linkeroever is geen uiterwaard meer).

- Km 959 (kmr 962) wordt veroorzaakt door de vernauwing bij Ameide-Tienhoven. Hier ligt de dijk aan de linkeroever tegen de rivier aan. Op de rechter oever is de uiterwaard ook relatief smal.



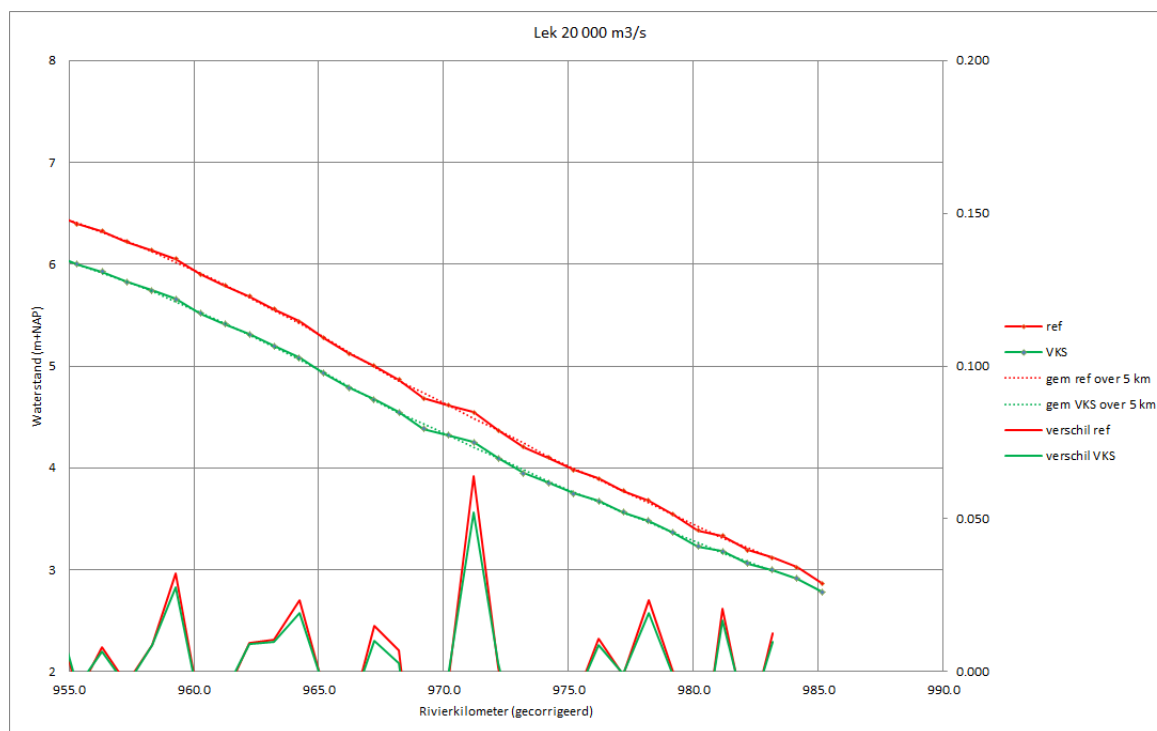
Figuur 6.5 Berekende waterstand op de Nederrijn-Lek, traject Ravenswaaij - Tienhoven

6.2.4 Tienhoven - Krimpen (km 960-985)

Het grootste knelpunt op dit traject bevindt zich bij km 971 (ongecorrigeerd kmr 974). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de vernauwing bij Ammerstol.

Kleinere knelpunten zijn te vinden bij:

- Km 964 (967), niet duidelijk wat de oorzaak is
- Km 968 (971) vernauwing bij Schoonhoven
- Km 971 (974) vernauwing bij Ammerstol
- Km 976-978 (979-981), vernauwing door schaadijken bij Streefkerk
- Km 981 (984), vernauwing bij Lekkerkerk (rechts schaadijk, links hoogwatervrij terrein)



Figuur 6.6 Berekende waterstand op de Nederrijn-Lek, traject Tienhoven - Krimpen

6.3 Samenvattend overzicht

Wanneer naar de verhanglijnen van de Nederrijn-Lek in hun geheel wordt gekeken, dan valt op dat zich bij middelhoge afvoeren (circa 6.000 m³/s te Lobith) geen hydraulische knelpunten voordoen. Bij hogere afvoeren springt een aantal knelpunten in het oog met een effect over maximaal een kilometer of 5 (deze zijn vermeld in Tabel 6.1), maar ook is sprake van een knelpunt met een effect op een groter schaalniveau. Dit knelpunt wordt veroorzaakt door de smaller wordende uiterwaarden benedenstrooms van Lexmond. Dit zorgt voor opstuwing (en een geringer verhang) in een traject bovenstrooms van Lexmond (tussen Maurik en Lexmond).

Een overzicht van de kleinschaligere knelpunten is gegeven in Tabel 6.1

Het grootste knelpunt op de Nederrijn/Lek doet zich voor bij Arnhem, gevolgd door de knelpunten bij de Blauwe Kamer en Culemborg. In de studie van WL Delft hydraulics en RIZA (1999) werd Arnhem ook als belangrijkste knelpunt genoemd. De Blauwe Kamer en Culemborg komen niet in het samenvattende overzicht voor. Wel werden Driel (kmr 891), Elst (kmr 916), Amerongen (kmr 922), en Hagestein (kmr 947) als knelpunten genoemd. Deze knelpunten komen hier niet, of slechts in beperkte omvang, naar voren. Arnhem komt ook naar voren als het grootste knelpunt in de studie van HKV (1997).

In de VKS zijn geen rivierverruimende maatregelen voorzien op de Nederrijn-Lek. Er is dus geen verandering te verwachten in de waargenomen knelpunten. De beperkte afname van het knelpunt bij Arnhem hangt waarschijnlijk samen met een geringe waterstandsval bij de IJssel Kop door Klimaatpark IJsselpoort op de bovenloop van de IJssel.

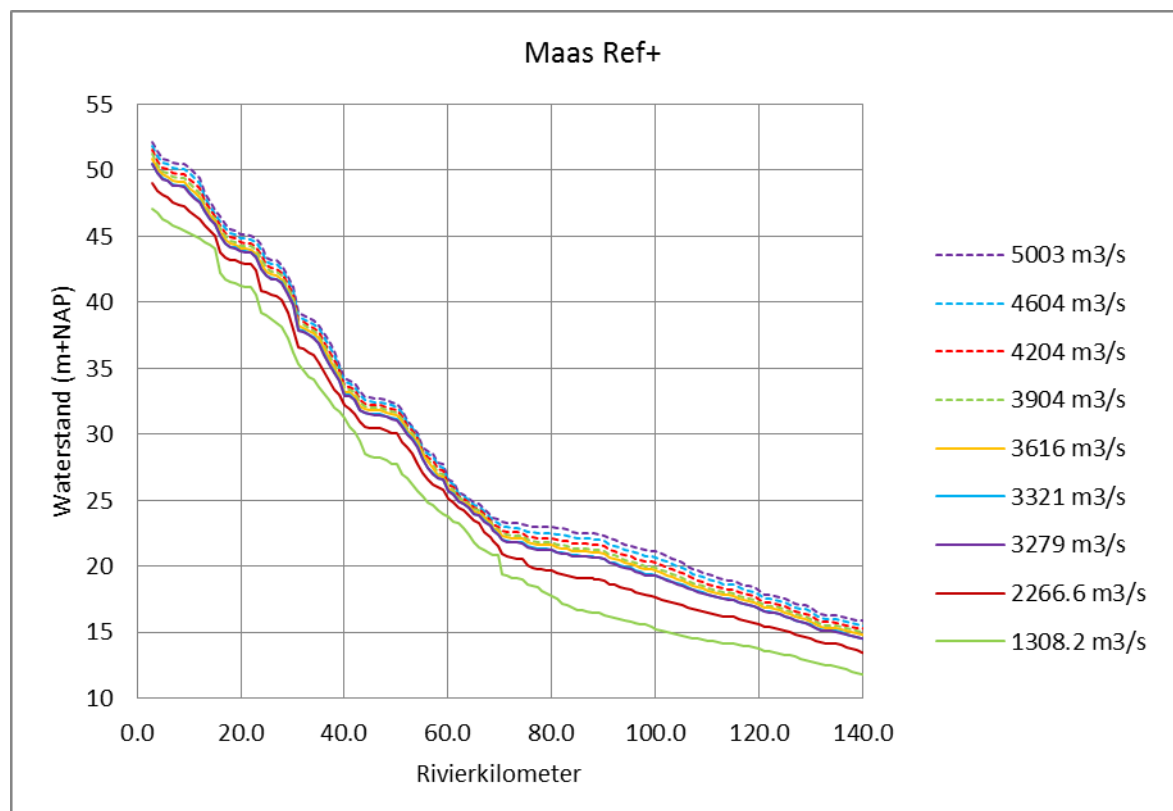
Tabel 6.1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Nederrijn-Lek. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
881 (881)	Arnhem	11	10	Vernauwing Arnhem Bakenhof	1	IJsselpoort?
906 (907)	Blauwe Kamer	8	8	Schaardijk Kesteren en fortificatie De Spees	0	
936 (939)	Culemborg	8	8	Rechter oever: weg naar veerboot, linker oever: hoogwatervrij terrein	0	
971 (974)	Ammerstol	6	6	Vernauwing	0	
887 (888)	Oosterbeek	4	4	Spoorbrug	0	
926 (928)	Wijk bij Duurstede	4	4	Kades bij verbinding met Amsterdam-Rijnkanaal.	0	
931 (933)	Beusichem	4	4	Kade met weg dwars op rivier	0	
947 (950)	Vreeswijk	4	4	Stadsfront steekt uit richting rivier. Evt. i.c.m. landhoofden A2	0	
914 (915)	Elst	3	3	Waarschijnlijk kades met veerwegen	0	
919 (920)	Eiland van Maurik	3	3	Rechteroever sluiscomplex + toegangsweg, linkeroever hoog terrein + toegangsweg	0	
954 (957)	Lexmond	3	3	Bocht, extra scherp door schardijk linkeroever	0	
959 (962)	Ameide	3	3	Smal traject Ameide-Tienhoven	0	
941 (943)	Everdingen	2	2	Fort Everdingen	0	
964 (967)	Waal	2	2	Niet duidelijk	0	
977 (980)	Streefkerk	2	2	Vernauwing door schardijken	0	
981 (984)	Lekkerkerk	2	2	Rechts schardijk, links hoogwatervrij terrein	0	
893 (894)	Heteren	1	1	Hoogwatervrije terreinen + hoge kades mogelijk i.c.m. brug A50	0	
896 (897)	Renkum	1	1	Stuwwal en hoogwatervrije terreinen	0	
899 (900)	Wageningen	1	1	Veerweg Lexkesveer	0	
944 (946)	Hagestein	1	1	stuwcomplex	0	
968 (971)	Schoonhoven	1	1	Vernauwing	0	

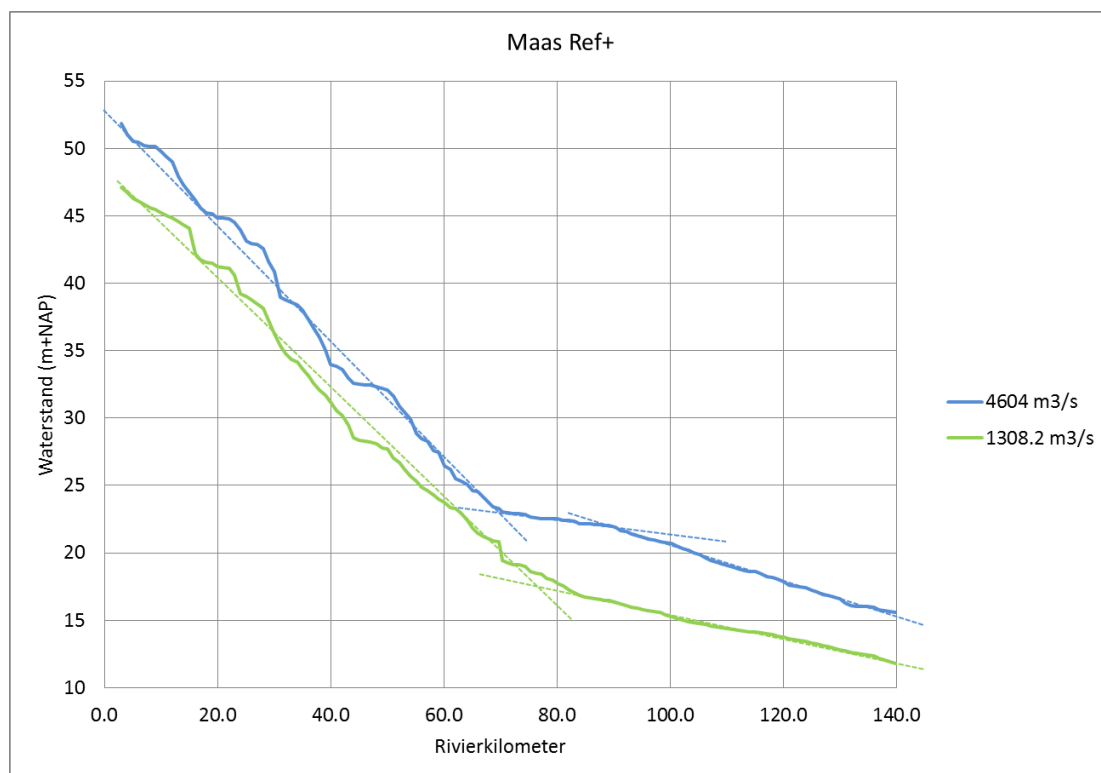
7 Bevindingen Limburgse Maas

7.1 Globaal beeld Limburgse Maas

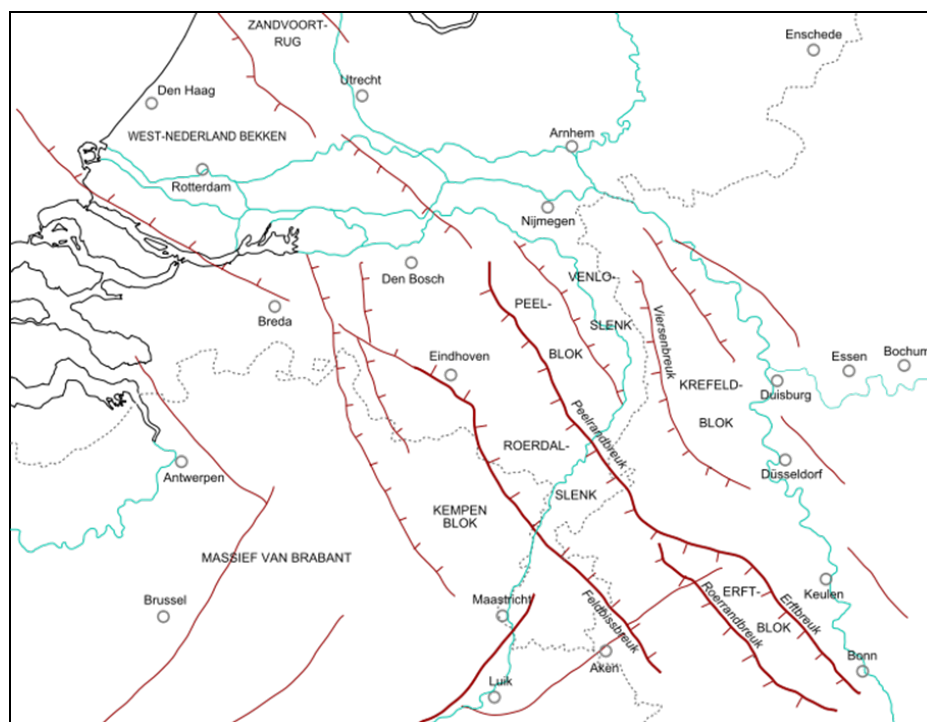
Figuur 7.1 toont de waterstanden zoals berekend voor de referentiesituatie op de Limburgse Maas bij een reeks aan afvoeren te Eijsden. Wat als eerste opvalt is dat het verhang bovenstrooms van km 70 (ongecorrigeerd kmr 68N, ofwel bij stuw Linne) veel groter is dan benedenstrooms hiervan. Bij lagere afvoeren (1300 en 2266 m³/s) zou je dit deel van de Maas in 2 trajecten op kunnen delen. Boven- en benedenstrooms van km 70. Bij hogere afvoeren lijkt sprake te zijn van een driedeling. Bovenstrooms van km 70 is het verhang het grootst (orde 27 meter over 60 km). Daarna komt een traject met een veel flauwer verhang, tot ongeveer Roermond. Tussen km 70 en km 90 bedraagt het verval maar 0,8 m. Dit gebied bevindt zich in de Roerdal Slenk (Figuur 7.3, ookwel Centrale Slenk genoemd). Door de afname van het verhang en daarmee het transporterend vermogen van de rivier is hier veel zand afgezet. Dit is deels afgegraven (Maasplassen). Voorbij Roermond, als de Maas door de Peelhorst snijdt, neemt het verhang weer toe. Over de volgende 20km bedraagt het verval meer dan 3 m. Deze verschillende verhangen worden geïllustreerd met behulp van de (op het oog ingetekende) lijnen in Figuur 7.2.



Figuur 7.1 Berekende waterstand op de Limburgse Maas op de as van de rivier voor verschillende afvoeren te Eijsden



Figuur 7.2 Verschillen in verval op de Limburgse Maas

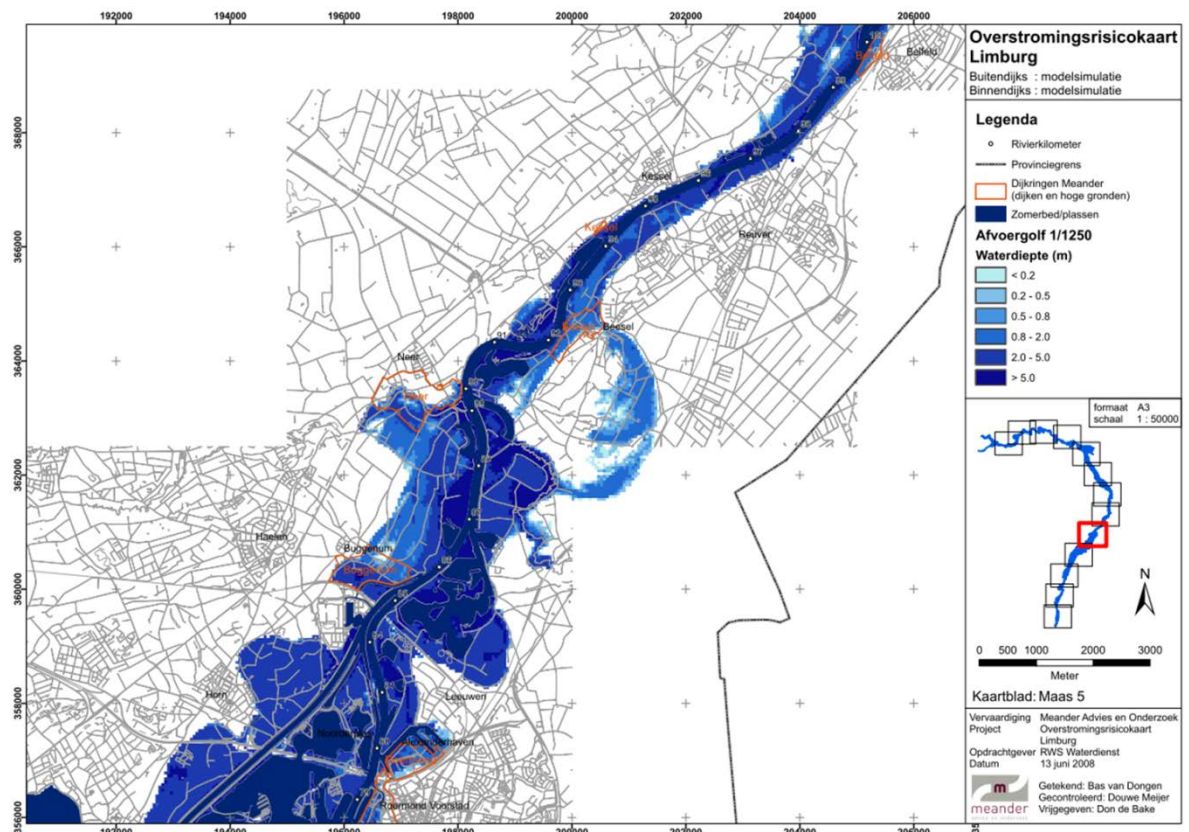


Figuur 7.3 Ligging van de Roerdalslenk en de Peelhorst (bron: Wikipedia)

De afname van het verhang tussen km 70 en 90 bij hoge afvoeren duidt op een grootschalig knelpunt. De oorzaak van dit knelpunt is de beëindiging van de Roerdalslenk door de Peelhorst (ook Peelploek genoemd). Bovenstrooms van km 90 bevindt de Maas zich in een breed dal (Maasplassengebied). Daarna wordt het dal veel smaller (zie ook Figuur 7.4). Dit

levert grootschalige opstuwing op van geologische oorsprong. Gezien de geologische origine is dit grootschalige knelpunt moeilijk oplosbaar met rivierverruiming.

Het verschil in verhang kan deels samenhangen met een artefact: in het Maasplassengebied snijdt de rivier tijdens hoogwater de bochten af. De lengte van de rivier is dan dus korter dan gesuggereerd door de rivierkilometers langs de thalweg van de rivier.



Figuur 7.4 Waterdieptekaart voor de Limburgse Maas tussen Roermond en Belfeld

Daarnaast is op de Limburgse Maas zowel bij middelhoge als bij hoge afvoeren een groot aantal kleinere knelpunten te zien. Deze knelpunten worden hieronder nader toegelicht.

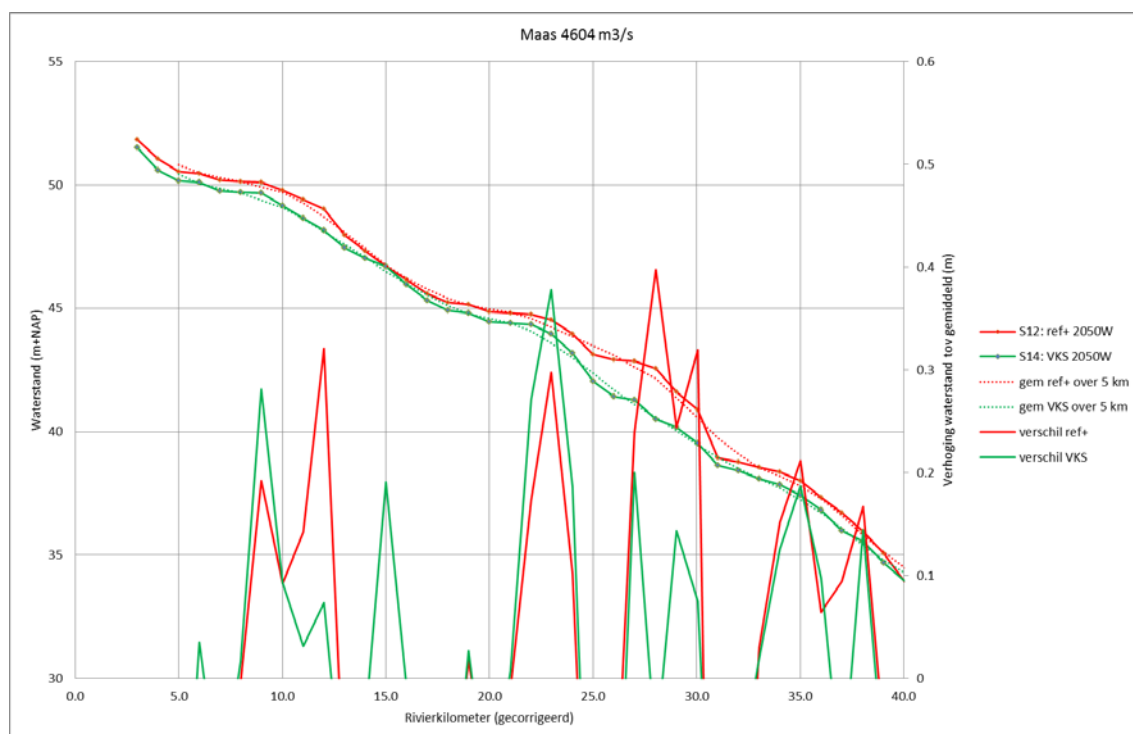
7.2 Resultaten in detail

Voor alle figuren in deze en volgende hoofdstukken geldt:

- de berekende waterstand in de referentiesituatie is weergegeven met een groene *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de berekende waterstand na uitvoering van de VKS is weergegeven met een rode *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de gemiddelde waterstand over 5 kilometer wordt voor beide weergegeven met *stippellijnen* in dezelfde kleuren
- het verschil tussen de berekende lokale waterstand en de gemiddelde waterstand wordt ten opzichte van de rechter y-as weergegeven door *doorgetrokken* lijnen zonder markering (dit zijn veelal de 'piekerige lijnen aan de onderkant van de grafiek).

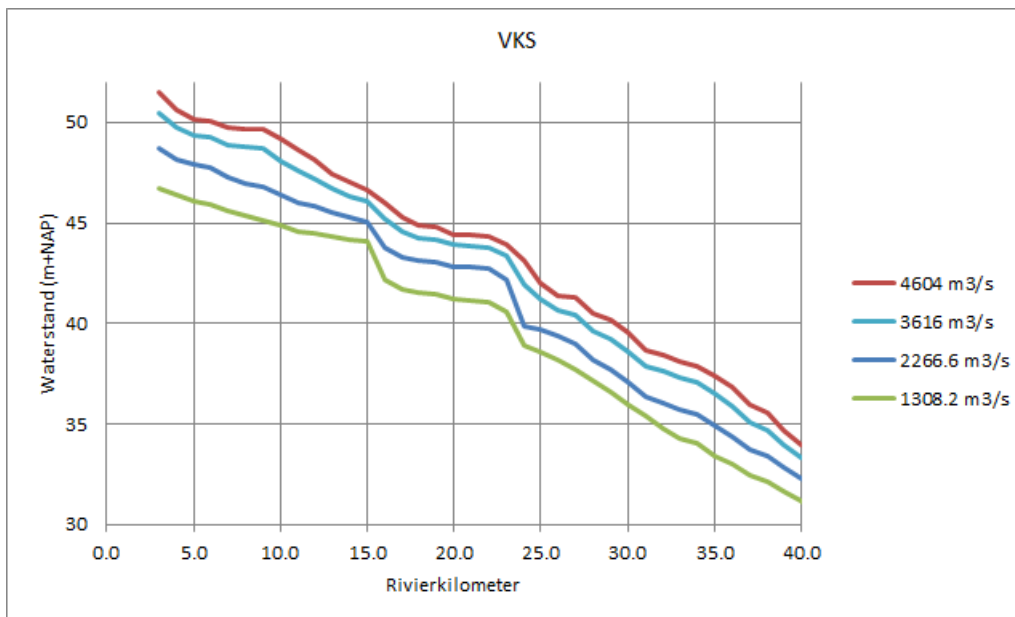
7.2.1 Eijsden – Stokkem (km 2,5 - 40)

Figuur 7.5 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier op het traject Eijsden - Stokkem. Het meest bovenstrooms gelegen knelpunt bevindt zich bij km 12. Dit hangt samen met de smalle corridor in Maastricht. De rivier wordt tussen Petit Lanaye en Maastricht steeds smaller. Na realisatie van de rivierverruimende maatregelen uit de VKS is het knelpunt ter hoogte van de Kennedybrug afgenomen, maar is dat bij km 9 (benedenstrooms van Petit Lanaye) toegenomen.



Figuur 7.5 Berekende waterstand op de Maas, traject Eijsden - Stokkem

Bij km 15 (aftakking Julianakanaal, net bovenstrooms van de stuw bij Borgharen) bevindt zich een knelpunt dat in de huidige situatie niet opvalt. Na realisatie van de VKS is het echter wel duidelijk zichtbaar in de verhanglijnen. De VKS zorgt er voor dat de waterstanden boven en benedenstrooms van dit punt duidelijk omlaag gaan, terwijl dat op dit punt veel minder het geval is. Dit resulteert in een knik in de verhanglijn. Wanneer gekeken wordt naar meerdere rivierafvoeren, dan blijkt dat het knelpunt bij lagere afvoeren veel duidelijker aanwezig is dan bij hogere afvoeren (zie Figuur 7.6). Het knelpunt bij km 15 is bij lagere afvoeren ($1300 \text{ m}^3/\text{s}$ te Eijsden) veel nadrukkelijker aanwezig dan bij hoge afvoeren. Bij dergelijke afvoeren zijn de stuwen wel al gestreken, maar vormen de stuwcomplexen met toegangswegen nog belangrijke obstakels. Bij hogere afvoeren stroomt het water over alle kades en wegen heen en neemt de omvang van de opstuwing af. Dit beeld (afname van het knelpunt bij hogere afvoeren) is vaak zichtbaar bij stuwen. Bij andere knelpunten is vaak het tegenovergestelde zichtbaar. Ter vergelijking, de situatie bij rivierkilometer 9 geeft bij lage afvoeren geen opstuwing (de verhanglijn is hier recht). Juist bij hogere afvoeren blijkt er sprake te zijn van een knelpunt (bij de hoogste twee doorgerekende afvoeren is een duidelijke knik zichtbaar in de verhanglijn).



Figuur 7.6 Verhanglijnen op de Maas tussen Eijsden en Stokkem na realisatie van de VKS bij diverse afvoeren

Het volgende duidelijke knelpunt bevindt zich rond km 23. Dit wordt veroorzaakt door de kaden van Uikhoven en Geulle aan de Maas.

Bij km 27-30 zit een groot knelpunt dat samenhangt met de scherpe en nauwe bocht tussen Elsloo en Meers. Met name tussen Meers en Geneut (km 31) is de rivier smal. De maatregelen uit de VKS lossen dit knelpunt voor een groot deel op (vooral het bovenstrooms gelegen deel rond km 28).

Het meest benedenstrooms gelegen knelpunt op dit traject bevindt zich bij km 35-38 (Maasband – Berg). De rivier is bij Berg relatief smal.

7.2.2 Meers – Linne (km 30 - 70)

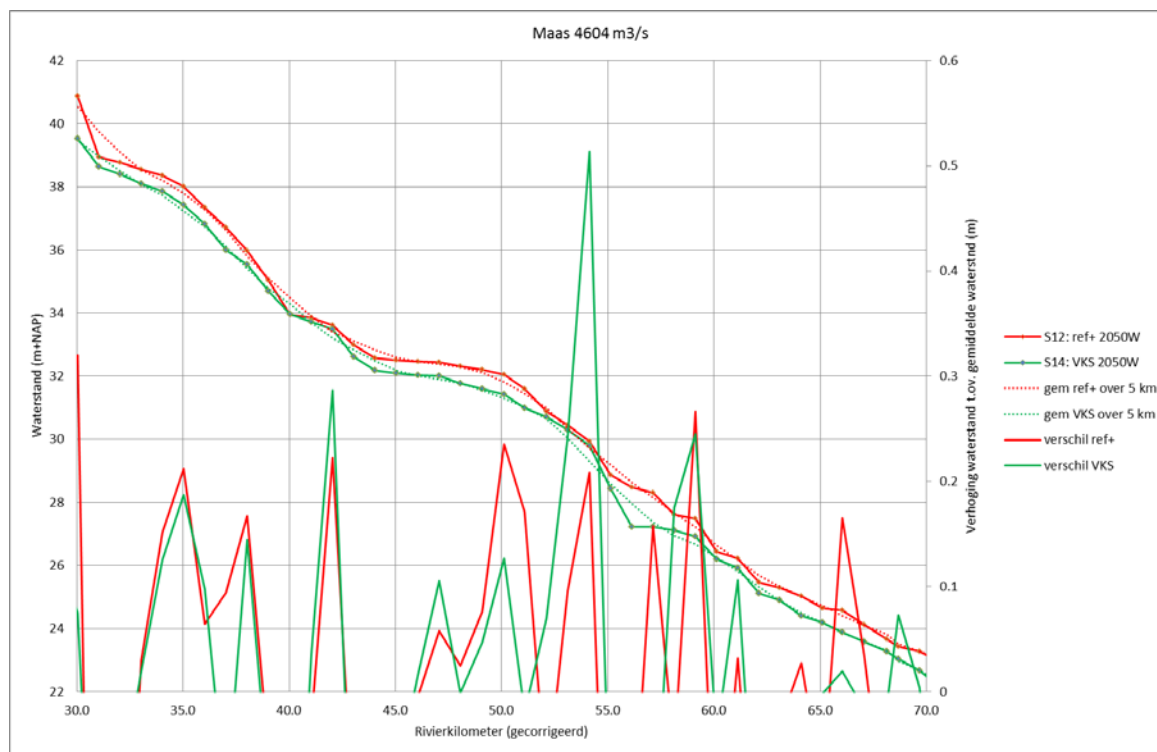
Na km 38 wordt de rivier breder. De eerst volgende versmalling zit nabij Grevenbicht (km 42/43). Dit punt is als knelpunt zichtbaar in Figuur 7.7.

Vanaf km 47 bevinden zich meerdere knelpunten vlak na elkaar:

- Km 47: Kades op rechter oever?
- Km 50: bovenstrooms Roosteren. Niet duidelijk
- Km 53: Nauwe doorgang i.v.m. brug N296 tussen Roosteren en Maaseik
- Km 57 vernauwing bij Ohé waar bovendien een aantal hoge kades rond een jachthaven dwars op de stroomrichting liggen.
- Km 59 nauw traject tussen Laak (NL) en Ophoven (B), mogelijk ook invloed veerweg?
- Km 61 Stevensweert ligt dicht op rivier, aan Belgische zijde een hoge kade. Belemmerde doorstroming.
- Km 67 (ongecorrigeerd 67Z) zeer smalle doorgang bij Wesseem (mede door brug A2)
- Km 69 (ongecorrigeerd 68N) stuw Linne

De VKS zorgt er voor dat een aantal knelpunten in belang afneemt (km 33-38, km 50 en km 67). Het knelpunt bij km 54 komt echter veel nadrukkelijker in beeld. Boven- en

benedenstrooms van dit punt daalt de waterstand wel aanzienlijk, maar op dit punt is de waterstandsval minimaal. Dit resulteert in de situatie na uitvoering van de VKS in een nog veel nadrukkelijker aanwezige knik in de verhanglijn.



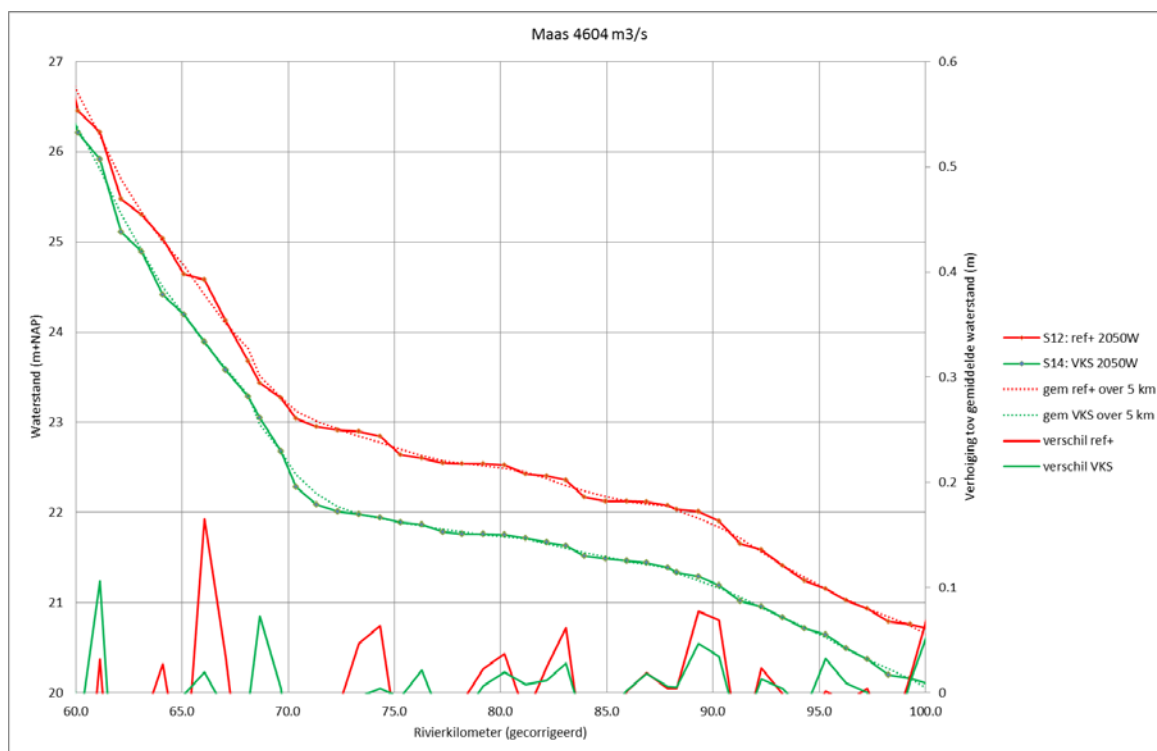
Figuur 7.7 Berekende waterstand op de Maas, traject Meers - Linne

7.2.3 Linne – Belfeld (km 70 - 100)

Op dit traject, dat deels het Maasplassengebied omvat, bevindt zich een aantal knelpunten:

- Km 74 (ongecorrigeerd km 73): niet geheel duidelijk...mogelijk vindt opstuwing plaats tussen sluizencomplex en een kade aan de zuidzijde van de Oolderplas bij Herten?
- Km 76 (75): niet duidelijk en alleen zichtbaar na uitvoering VKS
- Km 80 (79): belemmerde doorstroming door weglichaam N280 bij Roermond
- Km 83 (84): bovenstrooms spoorbrug Roermond
- Km 90 (90): versmalling bij Neer
- Km 93 (93): in smaller deel bij Beesel. Niet duidelijk waarom dit als klein knelpunt naar voren komt
- Km 96 (96): tussen Kessel en Reuver. Ook hier is niets bijzonders te zien.

De knelpunten bij de spoorbrug bij Roermond (km 84) en bij Neer (km 90) zijn duidelijk in de verhanglijn waarneembaar en hebben een duidelijke oorzaak. Ook het knelpunt bij km 74 is op het oog duidelijk waarneembaar. De oorzaak hiervan is echter niet duidelijk (Silvia, misschien weet jij wat oorzaak kan zijn?). De VKS heeft op alle drie de knelpunten een positief effect.



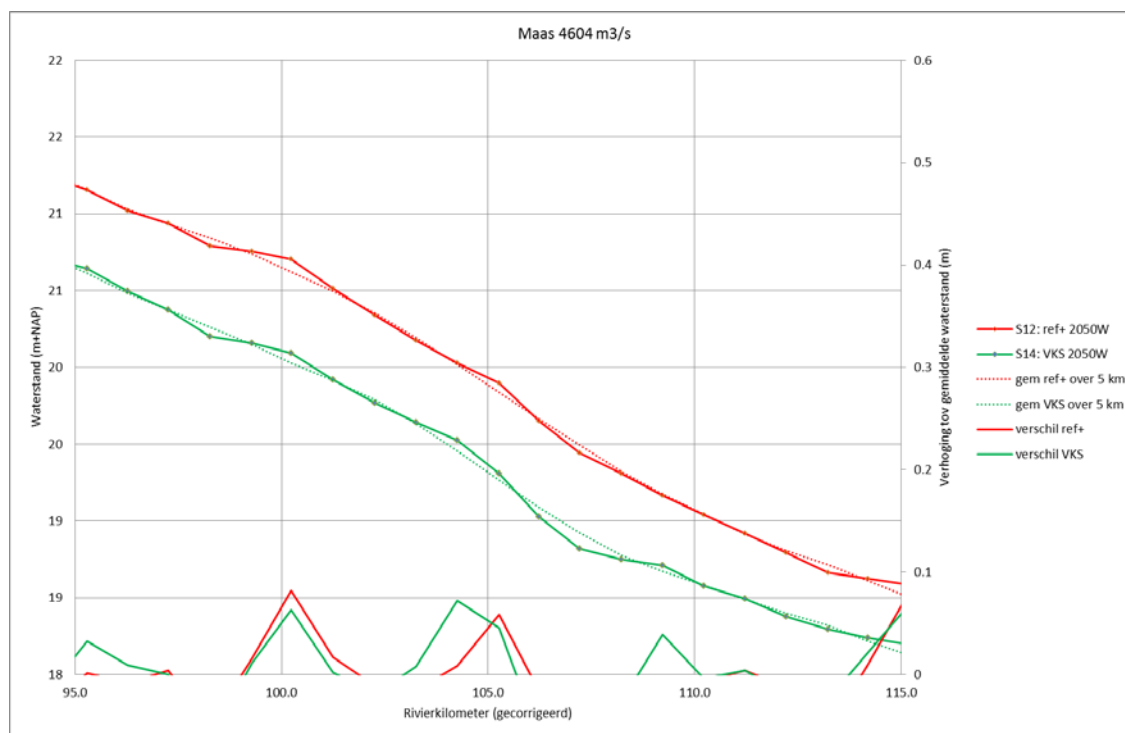
Figuur 7.8 Berekende waterstand op de Maas, traject Linne - Belfeld

7.2.4 Belfeld – Grubbenvorst (km 100 - 115)

Dit traject bevindt zich rondom Venlo. Op dit traject zijn knelpunten te zijn bij:

- Km 100 (102): Benedenstrooms van Belfeld. Waarschijnlijk invloed van de stuw
- Km 104 (106): zuidelijke brug bij Venlo (N275)
- Km 105 (107): spoorbrug + weg bij Venlo
- Km 109 (111): noordelijke brug bij Venlo

Een uitgebreider verslag van de eerder uitgevoerde analyses rond Venlo is te vinden in de Bijlagen.

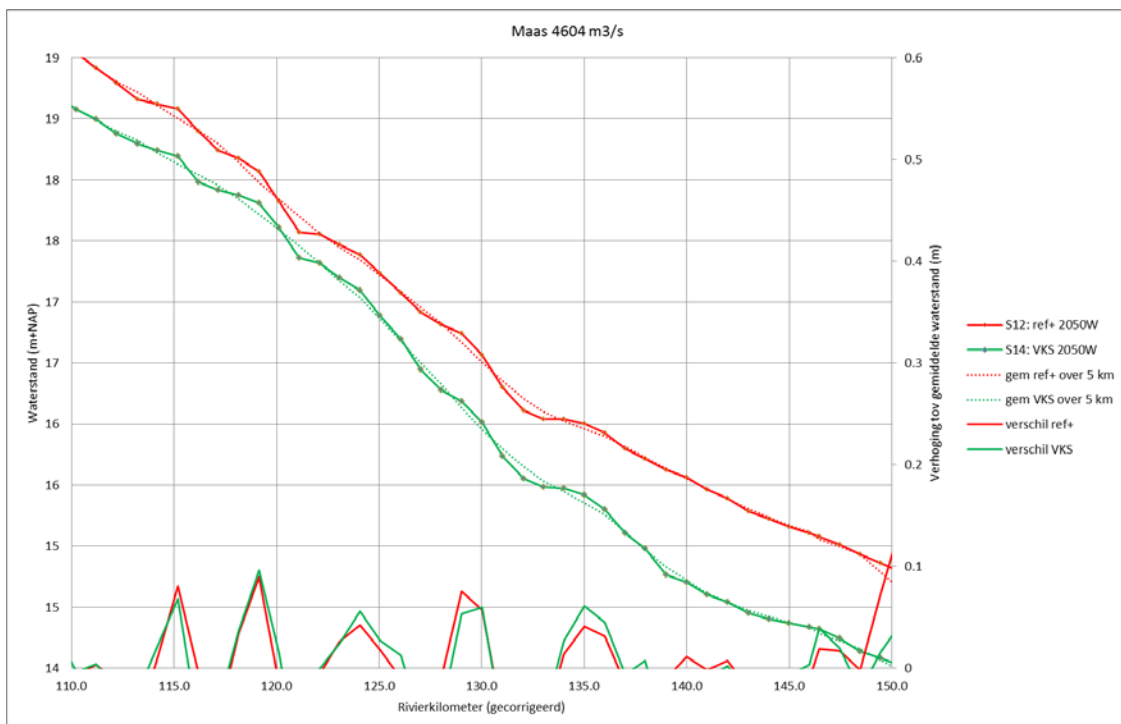


Figuur 7.9 Berekende waterstand op de Maas, traject Belfeld - Grubbenvorst

7.2.5 Venlo – Boxmeer (km 110 - 150)

Op dit traject zijn de volgende knelpunten te zien:

- Km 115 (ongecorrigeerd kmr 117): versmalling bij Lomm
- Km 119 (kmr 121): versmalling bij Arcen
- Km 124 (kmr 126): lokaal versmalling bij Ooijen
- Km 129 (kmr 131): versmalling door brug en het plaatsje Well
- Km 135 (kmr 137): lokale versmalling bij Maashees
- Km 147 (kmr 151): brug (A77) nabij Boxmeer



Figuur 7.10 Berekende waterstand op de Maas, traject Venlo - Boxmeer

7.3 Samenvattend overzicht

Wanneer van enige afstand naar de verhanglijnen van de Limburgse Maas in z'n geheel wordt gekeken, dan valt op dat bij hoge afvoeren sprake is van een zeer sterke afname van het verhang tussen km 70 en 90. Stroomafwaarts hiervan neemt het verhang weer toe. Dit grootschalige 'knelpunt' van geologische origine wordt veroorzaakt door de Peelhorst die het water in de Roerdalslenk opstuwt. Bovenstrooms van km 90 bevindt de Maas zich in een breed dal (Maasplassengebied). Daarna wordt het dal veel smaller.

Een overzicht van de kleinschaliger knelpunten is geven in Tabel 7.1 en Tabel 7.2. Tabel 7.1 toont de resultaten voor de Limburgse Maas bovenstrooms van kilometer 70. De knelpunten op dit traject zijn in een aparte tabel vermeld omdat de afwijkingen van ten opzichte van het gemiddelde verhang hier groter zijn. Dit duidt niet op een groter knelpunt, maar hangt samen met het feit dat het verhang op dit traject ongeveer vier keer groter is dan op het mee benedenstrooms gelegen traject. Dat wil zeggen dat een knelpunt met een 'omvang' met waarde 10 op het bovenstroomse traject duidt op een relatief klein knelpunt (groen gekleurd) terwijl het verder benedenstrooms duidt op een knelpunt dat nadrukkelijke aanwezig is (oranje/bruin gekleurd). De legendaklassen zijn te vinden in Bijlage C. De klassen voor de Grensmaas zijn anders dan voor de overige riviertakken in verband met het veel grotere verhang.

Het grootste knelpunt in het bovenstroomse traject van de Limburgse Maas bevindt zich bij Elsloo. Bovenstrooms van Elsloo bevinden zich ook twee grote knelpunten bij Maastricht en Herbricht. Alle drie de knelpunten zijn ook genoemd in de visuele analyse van HKV (2000).

Tabel 7.1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Limburgse Maas, bovenstrooms van kilometer 70. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde rivierkilometers (kmr) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
27-30 (27-30)	Elsloo	40	20	Bocht en relatief smal tussen Meers en Geneut	20	Kotem weerdverlaging FHL2-I-AO
9-12 (9-12)	Maastricht	32	29	Smalle corridor bij Maastricht	3	
23 (23)	Herbricht	30	38	Vernauwing na scherpe bocht?	-8	
59 (59)	Laak	27	24	Relatief smal, mogelijk ook invloed veerweg?	3	
50 (50)	Roosteren	23	13	bovenstrooms Roosteren. Niet duidelijk	10	
42 (42)	Grevenbicht	22	29	Versmalling	-7	
53 (53)	Maaseik	21	52	Nauwe doorgang i.v.m. brug N296	-31	
35-38 (35-38)	Maasband-Berg	21	19	Versmalling van het winterbed	2	
67 (672)	Wessem	17	2	Smalle doorgang (mede door brug A2)	15	
57 (57)	Ohé	16	0	vernauwing en aantal hoge kades rond jachthaven	16	
47 (47)	Elen	6	10	Kades op rechter oever?	-4	
61 (61)	Stevensweert	3	11	Plaats dicht op rivier, aan Belgische zijde hoge kade.	-8	
15 (15)	Aftakking Julianakanaal, stuw Borgharen	0	20	Stuw Borgharen. Niet zichtbaar in huidige situatie, wel na realisatie VKS.	-20	knelpunt wordt zichtbaar doordat waterstands daling door afvoer via Julianakanaal (ma_g4_a1)
69 (68N)	Linne	0	7	stuw	-7	benedenstrooms van dit punt veel groter is

De VKS lost het grootste knelpunt bij Elsloo voor een groot deel op. Het knelpunt bij Herbricht komt door de maatregelen uit de VKS juist prominenter in beeld. Dit laatste geldt ook voor het knelpunt bij Maaseik (km 53) en bij Borgharen (km 15). Bij Maaseik (km 53) zorgt de VKS boven- en benedenstrooms van de brug voor forse waterstands daling. Bij de brug zelf zet deze waterstands daling niet door. Het levert een nog duidelijkere knik op in de verhanglijnen. Het knelpunt bij Borgharen is in de huidige situatie niet zichtbaar, maar komt realisatie van de VKS naar voren doordat de waterstand benedenstrooms veel sterker zakt dan bovenstrooms. Dit komt doordat in de VKS een deel van de afvoer via het Julianakanaal wordt afgevoerd. Mogelijk is dit dus meer een artefact doordat de afvoer benedenstrooms wat geringer is dan een echt knelpunt.

Tabel 7.2 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Limburgse Maas, benedenstrooms van kilometer 70. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde rivierkilometers (kmr) staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect VKS	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS			
119 (121)	Arcen	9	9	versmalling	0	
100 (102)	Belfeld	9	7	Waarschijnlijk invloed van de stuw	2	
115 (117)	Lomm	8	7	versmalling	1	
129 (131)	Well	8	6	versmalling door brug en het plaatsje	2	
90 (90)	Neer	8	5	versmalling	3	
83 (84)	Roermond	7	3	bovenstrooms spoorbrug Roermond	4	
74 (73)	Heel	7	1	Niet duidelijk mogelijk vindt opstuwing plaats tussen sluizencor	6	
105 (107)	Venlo	6	5	spoorbrug + weg bij Venlo	1	
135 (137)	Maashees	4	6	lokale versmalling	-2	
124 (126)	Ooijen	4	5	lokaal versmalling	-1	
80 (79)	Roermond	4	2	belemmerde doorstroming door weglichaam N280 bij Roermond	2	
147 (151)	Boxmeer	2	4	brug (A77)	-2	
93 (93)	Beesel	2	1	Niet duidelijk	1	
104 (106)	Venlo	0	8	zuidelijke brug bij Venlo (N275)	-8	
109 (111)	Venlo	0	4	noordelijke brug bij Venlo	-4	
96 (96)	Reuver	0	3	Niet duidelijk	-3	
76 (75)	Beegden	0	2	Niet duidelijk	-2	

Benedenstrooms van kilometer 70 zijn geen zeer grote knelpunten waarneembaar. Een aantal matig grote knelpunten bevindt zich bij Arcen, Belfeld, Lomm, Well en Neer. Gezien het zeer flauwe verhang bij Roermond zou ook Roermond nog tot de matig grote knelpunten kunnen worden gerekend. Geen van deze knelpunten zijn door HKV (2000) opgenomen in het lijstje met de meest extreme knelpunten op dit traject. In dat lijstje staat wel het hele traject bij Venlo als knelpunt genoemd. In deze studie is in de huidige situatie niet of nauwelijks sprake van een knelpunt bij Venlo. Na realisatie van de maatregelen uit de VKS

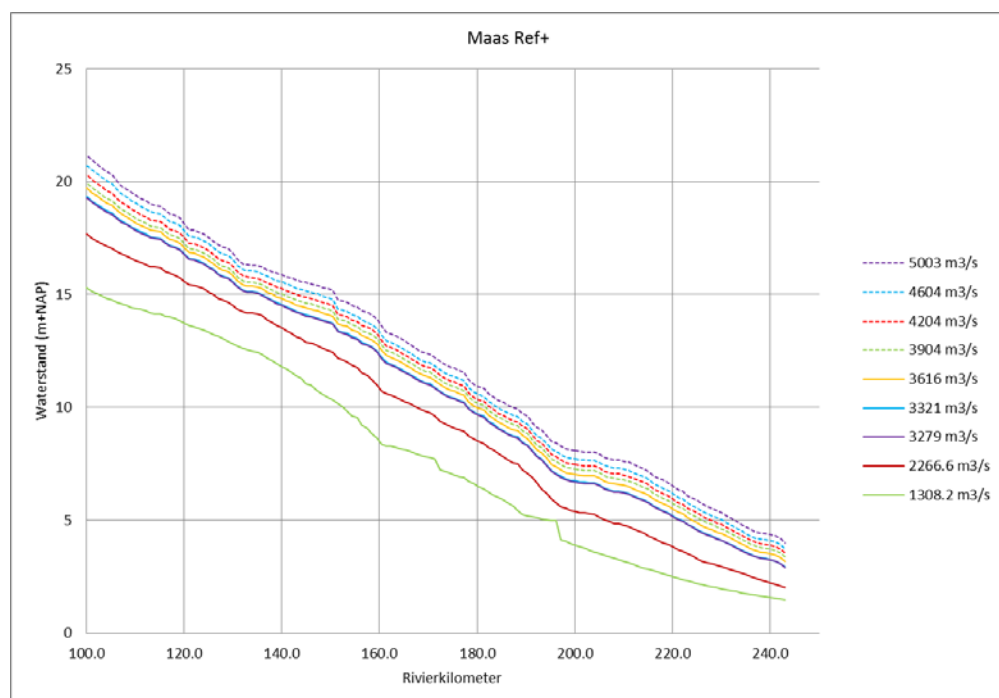
lijkt de zuidelijke brug wel wat nadrukkelijker in beeld te komen. De VKS heeft ook een positief effect op de knelpunten bij Roermond (km 80, kmr 79) en Heel (km 74, kmr 73).

8 Bevindingen Brabantse Maas

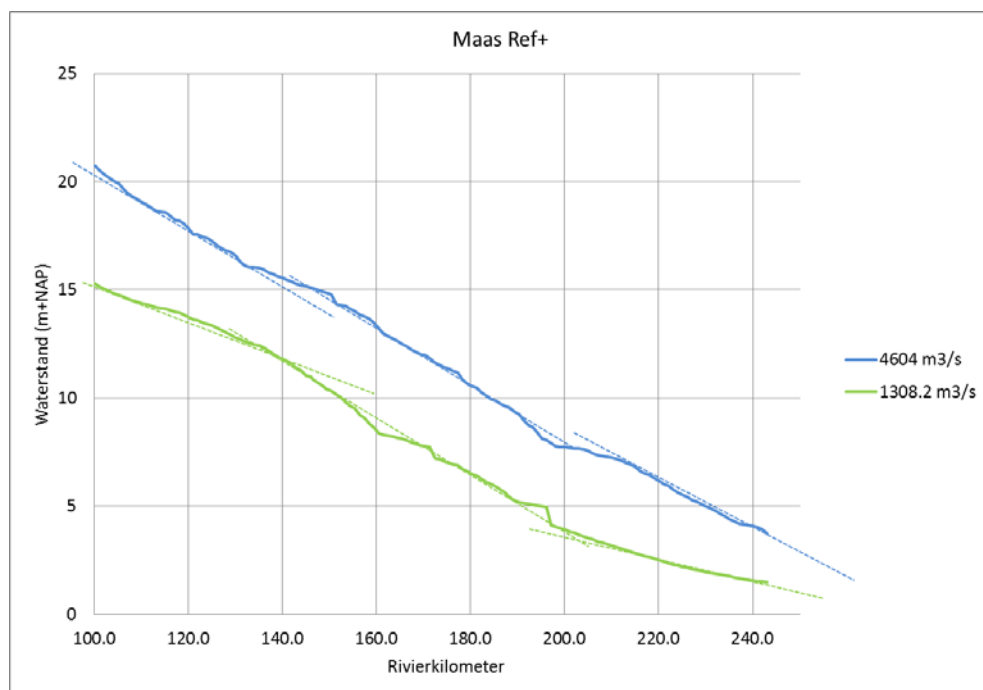
8.1 Globaal beeld Brabantse Maas

Ook voor de Brabantse Maas zijn de verhanglijnen voor meerdere afvoeren te Eijsden in een figuur geplot (Figuur 8.1). Om sprongen in het verhang beter zichtbaar te maken is voor 2 afvoeren een aparte figuur gemaakt waar op het oog lijnen in zijn getekend om het gemiddelde verval aan te geven (Figuur 8.2). Bij lagere afvoeren neemt het verval iets toe voorbij km 140 (waarschijnlijk voorbij de stuw bij Boxmeer). Vanaf km 200 (204, voorbij stuw Lith) neemt het verhang weer af. Bij lage afvoeren zijn dus vooral de stuwen duidelijk herkenbaar in de verhanglijnen.

Bij hoge afvoeren zijn 3 trajecten te onderscheiden met een vergelijkbaar verhang (Figuur 8.2). Tussen deze trajecten neemt het verhang iets af. Dit is (bij benadering) tussen km 130 en 150 (ongecorrigeerd 132 – 154) en tussen km 195 en 210 (ongecorrigeerd bij km 199 – 214). Het eerste traject zou kunnen duiden op een knelpunt bij Gennep. Daar begint de bedijking. Vroeger bevond zich daar de Beerse overlaat, die hoge afvoeren 'accommodeerde'. Toen die werd gesloten werd de Maas mogelijk 'te krap'? Of dit echt de verklaring is, is niet op voorhand te zeggen. De reden dat de Beerse overlaat in werking trad hing immers vooral samen met het feit dat het water dat bij de Heerewaardense overlaat naar de Maas stroomde voor opstuwing zorgde. Het tweede traject met een geringer verhang duidt op een knelpunt bovenstrooms van Den Bosch. Wat deze knelpunten precies veroorzaakt is niet duidelijk. Mogelijk hangt het samen met de dijkkring Alem en de dam daar naar toe. Maar ook de aanwezigheid van schaarlijken in meanderbochten kan een rol spelen.



Figuur 8.1 Berekende waterstand op de Brabantse Maas op de as van de rivier voor verschillende afvoeren te Eijsden



Figuur 8.2 Verschillen in verval op de Brabantse Maas

Bij lage afvoeren is een aantal knelpunten waarneembaar. Deze worden veroorzaakt door de stuwen bij Grave (km 171, ongecorrigeerd km 175) en bij Lith (km 197, ongecorrigeerd km 201). De kleinere knelpunten die zichtbaar zijn bij hogere afvoeren worden hieronder toegelicht.

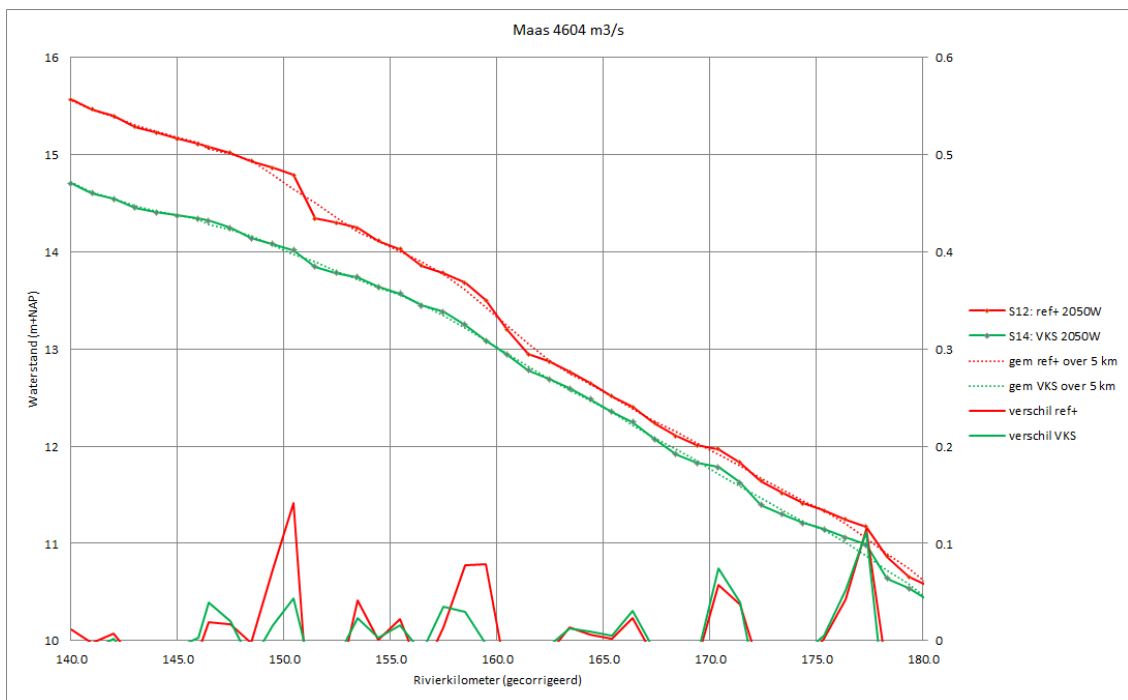
8.2 Resultaten in detail

Voor alle figuren in dit hoofdstuk geldt:

- de berekende waterstand in de referentiesituatie is weergegeven met een groene *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de berekende waterstand na uitvoering van de VKS is weergegeven met een rode *doorgetrokken* lijn (met markering op de rekenpunten);
- de gemiddelde waterstand over 5 kilometer wordt voor beide weergegeven met *stippellijnen* in dezelfde kleuren
- het verschil tussen de berekende lokale waterstand en de gemiddelde waterstand wordt ten opzichte van de rechter y-as weergegeven door *doorgetrokken* lijnen zonder markering (dit zijn veelal de 'piekerige lijnen aan de onderkant van de grafiek).

8.2.1 Boxmeer – Grave (km 150 - 176)

Figuur 8.3 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier op het traject Boxmeer - Grave. Het knelpunt bij km 150 (ongecorrigeerd kmr 154) wordt veroorzaakt door de vernauwing bij Gennep. De uiterwaard op de rechteroever is smal doordat de N271 hier dichterbij de rivier ligt dan boven- en benedenstrooms van dit punt. Ook de landhoofden van de brug zorgen waarschijnlijk voor opstuwing.



Figuur 8.3 Berekende waterstand op de Maas, traject Boxmeer - Grave

Bij km 154-156 (ongecorrigeerd 158-160) zorgt de steenfabriek of de veerstoep voorbij Milsbeek mogelijk voor enige opstuwing.

Het knelpunt bij km 158-159 (162-163) lijkt samen te hangen met de vernauwing bij Cuijk.

Km 164-166 (168-170) wordt gekenmerkt door een versmalling na de brug bij Heumen. Dit geeft enige opstuwing zoals blijkt uit het kleine knelpunt.

Het knelpunt bij km 170-171 (174-175) wordt veroorzaakt door de stuw bij Grave en mogelijk ook door de brug van de N324.

8.2.2 Grave – Lith (km 176 - 200)

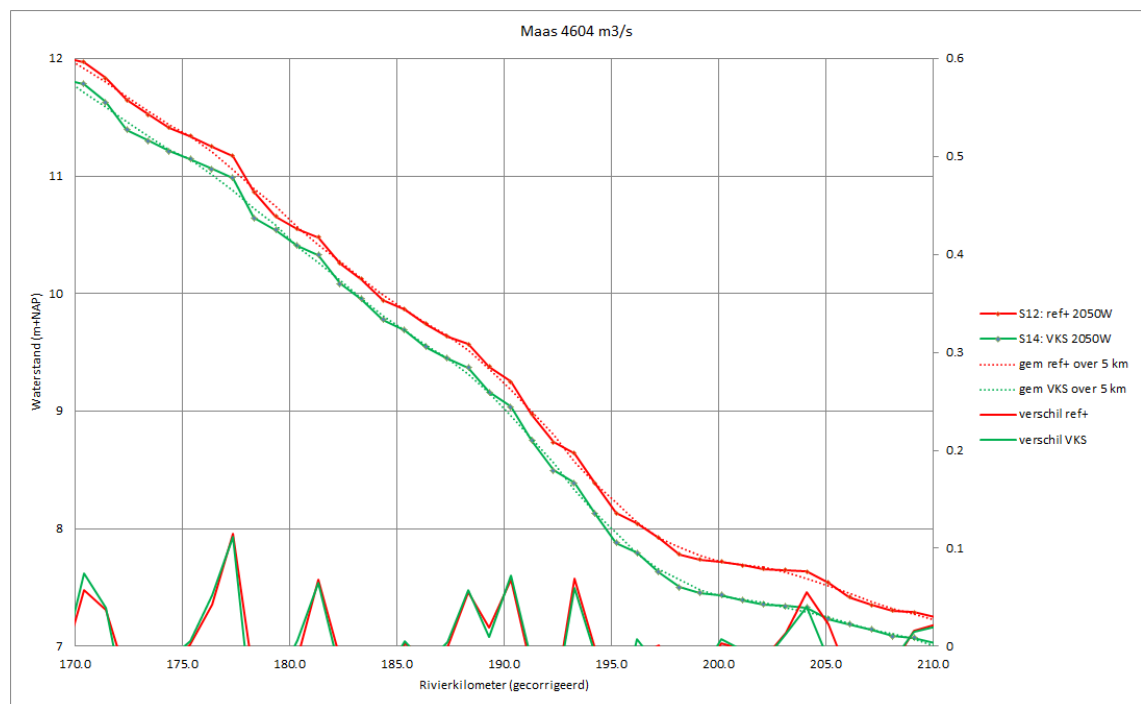
Het eerste knelpunt op dit traject ligt bij km 177 (ongecorrigeerd km 181) en wordt veroorzaakt door de vernauwing bij Ravenstein. Hier bevindt zich ook de brug van de A50.

Het knelpunt bij km 181 (185) wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de vernauwing bij Batenburg.

Tussen Megen en Maasbommel is de rivier smal en is het verloop, wanneer men rekening houdt met stroming van water door uiterwaarden, hoekig. Dit resulteert in het knelpunt bij Km 188-190(192-194).

Km 193 (197) wordt ook gekenmerkt door een klein knelpunt. De oorzaak is niet eenduidig vast te stellen. Mogelijk speelt de geringe afname van de breedte bij Greffeling (bovenstrooms van Alphen) een rol.

De Maas lijkt vrijwel geen hinder te ondervinden van de stuw bij Lith: deze locatie is nauwelijks als knelpunt waarneembaar (km 197, ongecorrigeerd km 201).



Figuur 8.4 Berekende waterstand op de Maas, traject Boxmeer - Grave

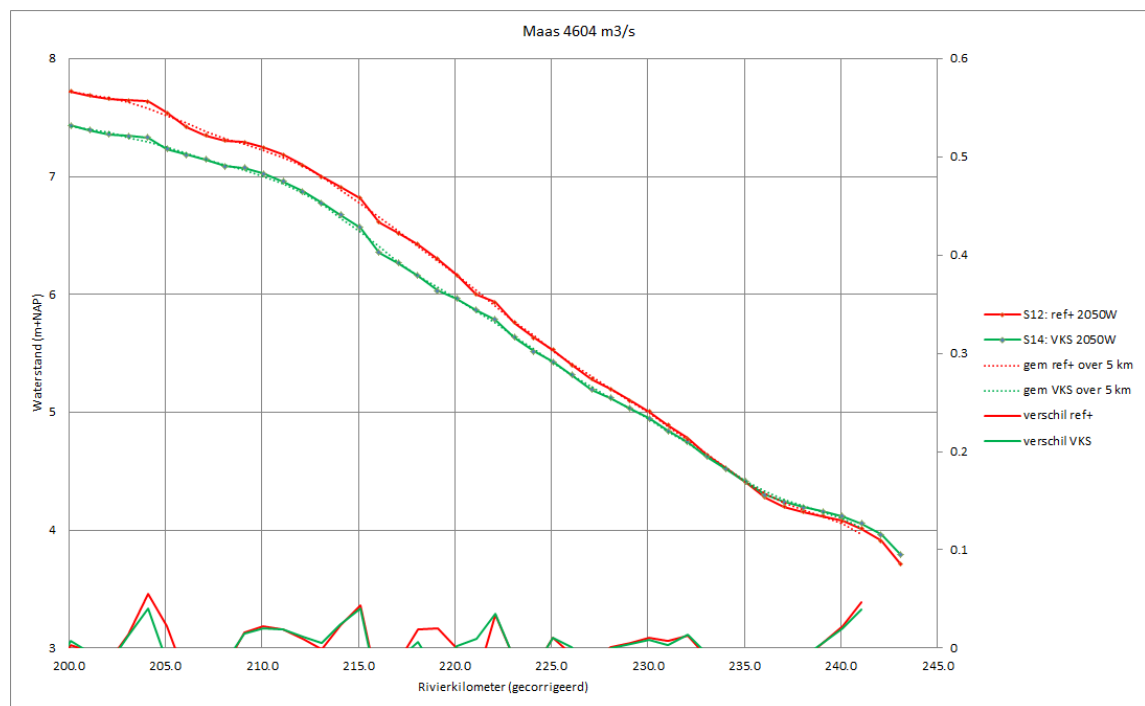
8.2.3 Lith – Raamsdonksveer (km 200 - 245)

Het knelpunt bij km 204 (ongecorrigeerd km 208) wordt veroorzaakt door de vernauwing bij Sint Andries.

In het traject tussen km 210-215 (214-219) kruist een drietal bruggen de Maas. De landhoofden zijn mogelijk verantwoordelijk voor de knelpunten bij deze rivierkilometers.

De vernauwing bij Well kan de aanleiding zijn voor het beperkte knelpunt bij km 222 (ongecorrigeerd km 226).

Verder benedenstrooms doen zich nog een aantal kleine knelpunten voor. De oorzaak is niet goed te achterhalen. De rivier heeft hier een relatief constante breedte. Wel is bij km 230 (234) sprake van een oversteek van het water van de rechter naar de linker oever. Bovenstrooms van dit punt (bij Oeveren/Genderen) bevindt zich alleen een uiterwaard op de rechter oever. Benedenstrooms van dit punt (bij Drongelen) is juist alleen sprake van een uiterwaard op de linker oever. Mogelijk zorgt dit voor een iets minder vloeiende doorstroming.



Figuur 8.5 Berekende waterstand op de Maas, traject Lith - Raamsdonksveer

8.3 Samenvattend overzicht

Wanneer naar de verhanglijn van de Brabantse Maas in zijn geheel wordt gekeken, dan valt op dat bij hoge afvoeren sprake is van een afname van het verhang tussen km 130 en 150 (ongecorrigeerd 132 – 154) en tussen km 195 en 210 (ongecorrigeerd bij km 199 – 214). Het eerste traject zou kunnen duiden op een knelpunt bij Gennep. Daar begint de bedijking. Het tweede traject met een geringer verhang duidt op een knelpunt bovenstrooms van Den Bosch. Wat deze knelpunten precies veroorzaakt is niet duidelijk. Mogelijk hangt het samen met de dijkkring Alem en de dam daar naar toe. Maar ook de aanwezigheid van schaarlijken in meanderbochten kan een rol spelen.

Een overzicht van de kleinschaligere knelpunten is geven in Tabel 8.1. De meest pregnante knelpunten staan bovenaan en zijn oranje-rood gekleurd. De duidelijkste knelpunten bevinden zich bij Gennep en Ravenstein. De VKS lost het eerst genoemde knelpunt grotendeels op. De VKS heeft ook een positief effect op de knelpunten bij Cuijk en Milsbeek. Wat opvalt is dat er relatief veel locaties zijn waar de VKS geen effect op heeft. In tegenstelling tot veel andere riviertakken leidt de VKS hier vrijwel niet tot een 'toename' van een bestaand knelpunt of het zichtbaar worden van een nieuw knelpunt.

Tabel 8.1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Brabantse Maas. Kilometer betreffen gecorrigeerde kilometers. Ongecorrigeerde kilometers staan tussen haakjes.

Km (kmr)	Locatie	Omvang knelpunt		Verklaring	effect	maatregel met pos effect in VKS
		Ref	VKS		VKS	
150 (154)	Gennep	14	4	Vernauwing (weg dicht bij rivier), mogelijk i.c.m. landhoofden brug	10	groene rivier Oeffelt?
177 (181)	Ravenstein	12	12	Vernauwing en brug (A50)	0	
159 (163)	Cuijk	8	4	vernauwing	4	weerdverlaging?
170 (174)	Grave	7	8	Stuw mogelijk i.c.m. brug (N324)	-1	
181 (185)	Batenburg	7	7	vernauwing	0	
188-190				Smalle rivier met een 'hoekig' verloop (voor stroming door		
(192-194)	Megen – Maasbommel	7	7	uiterwaarden)	0	
193 (197)	Greffeling (Alphen)	7	7	Niet duidelijk. Mogelijk kleine afname breedte.	0	
204 (208)	Sint Andries	5	4	Vernauwing	1	
210-215						
(214-219)	Den Bosch	4	4	Mogelijk veroorzaakt door drietal bruggen	0	
155 (159)	Milsbeek	4	2	Mogelijk enige opstuwing door veerstoept	2	
222 (226)	Well	3	3	vernauwing	0	
165 (169)	Heumen	2	2	Geleidelijke versmalling voorbij brug	0	

9 Conclusies

Het doel van dit rapport was om aan te geven:

- 5 waar langs de Rijntakken en de Maas bij hoogwater sprake is van een hydraulisch knelpunt, en
- 6 in hoeverre de bestaande hydraulische knelpunten worden opgelost door de rivierverruimende maatregelen die in de VKS zijn voorgesteld.

Geconcludeerd wordt dat sprake is van een beperkt aantal grootschalige knelpunten. Deze zijn vaak geologisch bepaald, of hangen samen met een systeemingreep. Het effect is merkbaar over relatief grote afstanden (soms tot 20 km). Gegeven de oorzaak van het knelpunt zijn ze niet eenvoudig met rivierverruiming oplosbaar. Voorbeelden van dergelijke grootschalige knelpunten zijn:

- Op de Waal benedenstrooms van de voormalige overlaat bij Sint Andries.
- Langs de Nederrijn-Lek bij Lexmond (smaller wordende uiterwaarden)
- Op de IJssel ter hoogte van Zwolle. Bij lagere afvoeren (t/m 13.000 m³/s te Lobith ook bij Veessen. Bij hogere afvoeren 'verdwijnt' dit knelpunt, door de inzet van de bypass bij Veessen-Wapenveld.
- In de Maasvallei stroomafwaarts van km 90 (Peelhorst waardoor water in Roerdalslenk opstuwt)
- Op de bedijkte Maas bij Gennep (begin van bedijking) en nabij Den Bosch (mogelijk effect dijkkring Alem en de dam daar naar toe).

Op de Rijntakken is verder sprake van een bewust gecreëerd knelpunt bij de splitsingspunten (i.v.m. sturing van de afvoerverdeling). Aangenomen mag worden dat bij een vrij afstromende rivier (zonder regelwerken en geleidingskades) een groter deel van de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en de IJssel zou gaan. Na realisatie van de rivierverruimende maatregelen uit de VKS komt ook de IJsselkop nadrukkelijker als 'knelpunt' naar voren. Beide knelpunten zijn voor een groot deel bewust door de mens gemaakt om de beleidsmatige afvoerverdeling te kunnen handhaven. Wanneer de regelwerken bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop geheel zouden worden open gezet, en de kades bij de Pannerdensch Kop zouden worden verwijderd, zou de omvang van deze knelpunten afnemen of verdwijnen, maar zou een groter deel van de afvoer via het Pannerdensch Kanaal en de IJssel naar het noorden stromen. De vraag is of dat wenselijk is.

Ook is sprake van een veel groter aantal kleinschalige knelpunten. Deze hebben effect over kortere afstanden (orde 5 km of minder). Oorzaken voor deze kleinere knelpunten zijn onder andere smalle uiterwaarden of schaar dijken, hoge kades in uiterwaarden, steenfabrieken (vooral langs de Waal), bruggen, en veerstoepen en stadsfronten die tot aan de rivier liggen (met name langs de IJssel). Een overzicht van alle kleinschalige knelpunten is te vinden in de tabellen in de samenvatting voor in het rapport.

Sommige van deze knelpunten worden opgelost door de rivierverruimende maatregelen uit de VKS. Deze maatregelen dragen dus bij aan een gelijkmatigere doorstroming en daarbij aan een 'robuuster riviersysteem'. Veel knelpunten zijn niet, of slechts gedeeltelijk, opgelost. Dit kan komen doordat een zeer dure ingreep nodig is (aanpassing bruggenhoofden), of omdat het een zeer grote ingreep vergt die op maatschappelijke weerstand stuit (bijvoorbeeld by passes om de stedelijke knelpunten langs de IJssel op te lossen).

De knelpuntanalyse kan gebruikt worden bij de actualisatie van de VKS, omdat verwijdering van knelpunten de meest effectieve manier zijn van rivierverruiming. Ze zorgen er tevens voor dat het effect van benedenstrooms gelegen rivierverruimende maatregelen verder bovenstrooms merkbaar is. In dit opzicht verdienen de splitsingspunten extra aandacht.

10 Referenties

- Deltaprogramma Rivieren (2014) Synthesedocument Rivieren, Achtergronddocument B6.
- HKV (1997) Hydraulische knelpunten Nederlandse Rijntakken – een inventarisatie. HKV rapport PR116.
- Riza en WL|Delft Hydraulics (1999) Aanvullende analyses RvR. Stedelijke knelpunten: een verkenning van mogelijke oplossingen. RVR-rapport 99.11
- Van der Lee, W. en M. Visser (2000) Inventarisatie lokale hydraulische knelpunten Maas. HKV rapport PR162.70

A Hydraulische knelpuntenanalyse 2015 Waal

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
18 augustus 2015	1220041-000-VEB-0034	91
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Nathalie Asselman David Kroekenstoel	+31(0)88335 8527	nathalie.asselman@deltares.nl

Onderwerp
Globale analyse hydraulische knelpunten Waal

Inleiding

Door DGRW (Wim de Vries) is op 8 juli 2015 gevraagd om een figuur te maken waaruit blijkt dat er in de Waal/Merwedese een aantal hydraulische knelpunten zitten en waar deze knelpunten zich bevinden. Dit memo gaat eerst in op de gevolgde werkwijze om tot een dergelijke figuur te komen en geeft vervolgens een overzicht van de gevonden hydraulische knelpunten. De analyse is uitgevoerd door Nathalie Asselman en David Kroekenstoel.

Werkwijze

De in dit memo gepresenteerde hydraulische knelpunten zijn geïdentificeerd op basis van sprongen in de verhanglijn op de rivier. De volgende stappen zijn doorlopen:

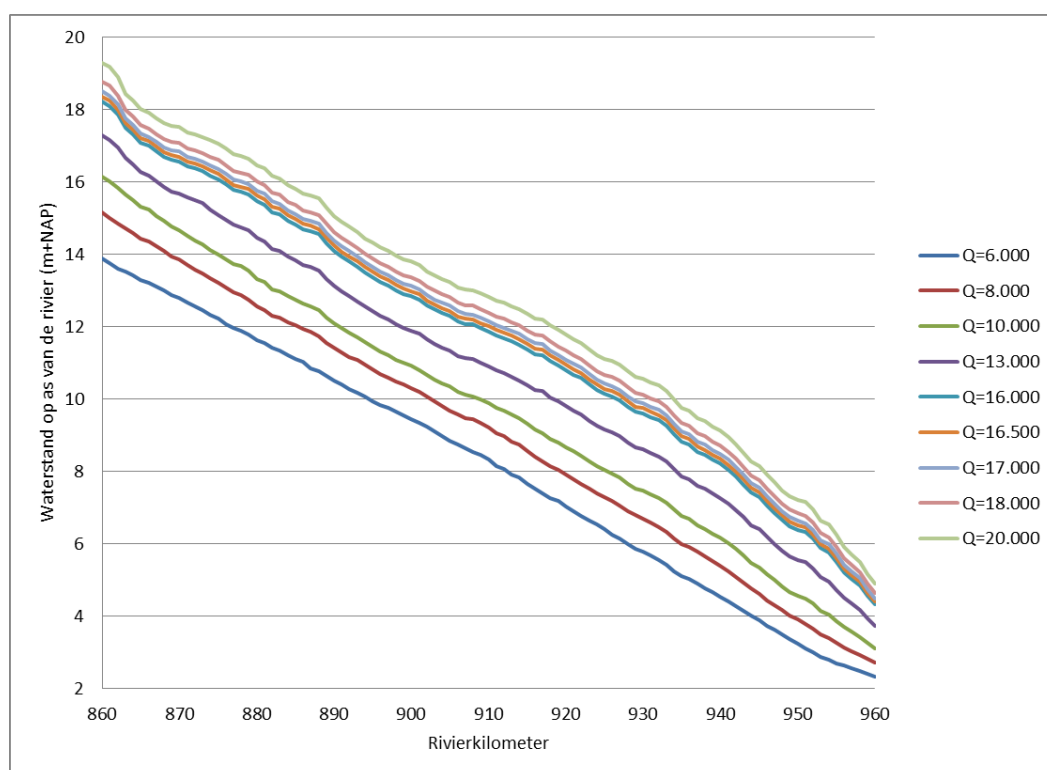
- Waterstanden op de Waal zijn berekend voor verschillende afvoerniveaus te Lobith. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met het Deltamodel in opdracht van het Deltaprogramma Rivieren. De resultaten zijn beschikbaar in het bestand "DPR_rijn_2100W_as_WS_S10.mdb". Het betreft waterstanden op de as van de rivier, berekend per rivierkilometer.
- De waterstanden zijn geplot in grafieken om zo (op het oog) hydraulische knelpunten te identificeren. Bij een knelpunt neemt het verhang sterk af, om vervolgens juist sterk toe te nemen. Dit resulteert in 'bobbels' in de geplotte waterstandslijnen.
- Er zijn ook grafieken gemaakt van het gemiddelde verhang over een traject van 2 of 5 km lengte. Het voordeel van deze grafieken is dat kleine onregelmatigheden worden uitgefilterd en alleen de grotere knelpunten zichtbaar blijven.

Om na te gaan of en in welke mate de voorkeursstrategie (VKS) de hydraulische knelpunten oplost, is een vergelijkbare analyse uitgevoerd voor de situatie na uitvoering van de VKS. Hiervoor is eveneens gebruik gemaakt van berekeningen uitgevoerd met het deltamodel (bestand "DPR_rijn_2100W_as_WS_S15.mdb"). De doorlopen stappen zijn gelijk aan die hierboven beschreven voor de huidige situatie.

Resultaten huidige situatie

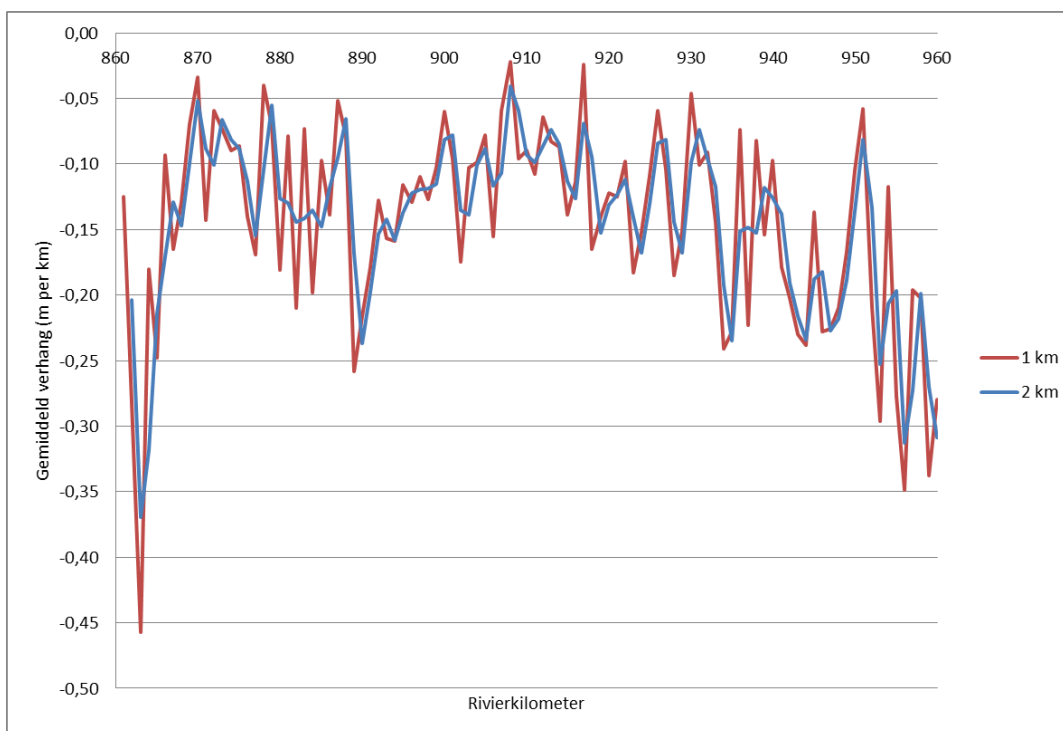
Figuur 1 toont de berekende waterstanden op de as van de rivier de Waal. Een aantal dingen valt op:

- Bij lage afvoeren (6.000 m³/s) resulteren de geplote waterstanden in een redelijk rechte lijn. Er is onder die omstandigheden dus geen sprake van belangrijke hydraulische knelpunten.
- Bij hogere afvoeren (10.000 of 13.000 m³/s) wordt de lijn 'bobbeliger', wat duidt op hydraulische knelpunten.
- Bij zeer hoge afvoeren (16.000 – 20.000 m³/s) is een aantal duidelijke knelpunten te zien. Bovenstrooms van deze punten neemt het verhang af en loopt de waterstandslijn dus iets meer horizontaal. Dit treedt onder meer op bij rivierkilometer 888 (Oosterhout), 901 (Dodewaard), 927 (Heesselt) en 952 (Woudrichem).



Figuur 10.1 Berekende waterstand op de Waal op de as van de rivier voor verschillende afvoeren te Lobith

Figuur 2 toont het berekende verhang bij hoogwater op de Waal. De rode lijn geeft het verhang per kilometer. Omdat dit sterk kan variëren (zie bijvoorbeeld het traject tussen rivierkilometer 880 en 890) is ook het verhang gemiddeld over 2 km weergegeven. Bij een hydraulisch knelpunt neemt het verhang eerst af (lijn gaat omhoog), om benedenstrooms van het knelpunt weer toe te nemen (lijn gaat omlaag). De knelpunten zijn dus als pieken naar boven in de figuur zichtbaar.



Figuur 10.2 Variaties in verhang bij hoogwater op de Waal (gemiddeld verhang over 1 of 2 km lengte)

Een overzicht van de knelpunten is gegeven in Tabel 1. De meest prominente knelpunten hebben een uitroepteken gekregen.

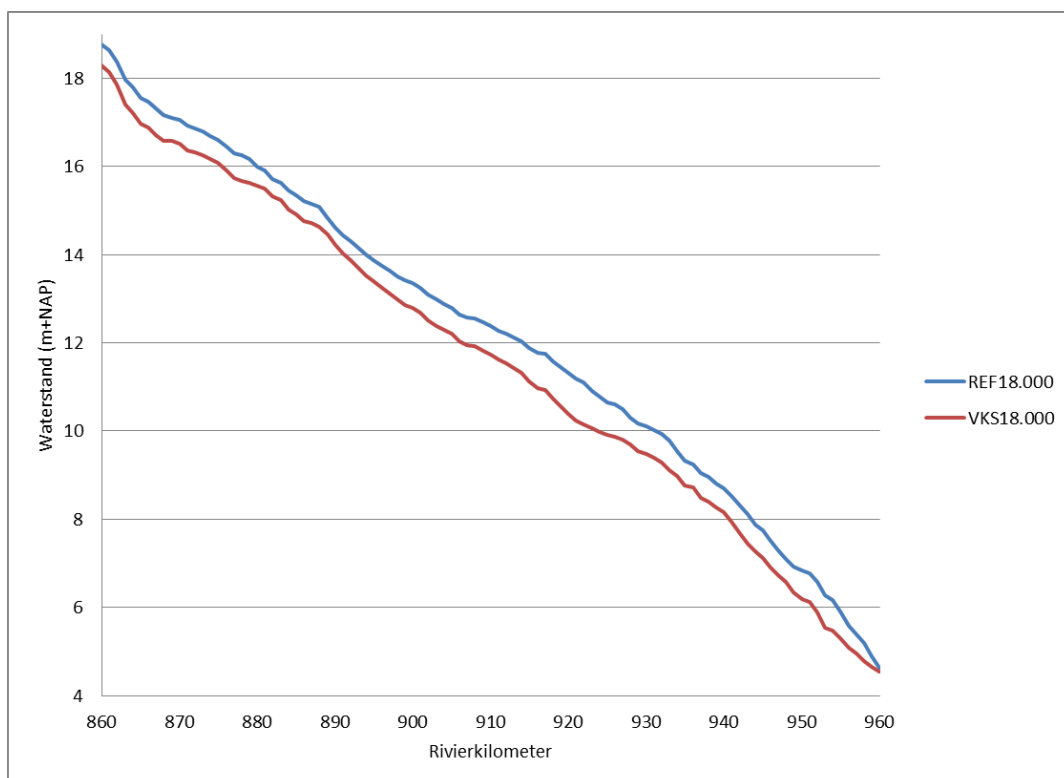
Tabel 1 Geïdentificeerde hydraulische knelpunten op de Waal en Merwede

km	Locatie	Verklaring
873	Gendtsche Polder	
879	Steenfabriek Bommel	
888 !	Oosterhout	Schaardijk
901	Dodewaard	Schaardijk
908	IJzerdoorn	Hoge dwarskade in uiterwaard naar Hoogwatervrij terrein
913	Wamel	vernauwing bovenstrooms aantakking Amsterdam-Rijnkanaal
917	Tiel Passewaaij	Schaardijk
922	bovenstrooms Varik	vernauwing bocht
927	Heesselt	lokale vernauwing in bocht
932 !	Waardenburg (Rijswaard)	lokale vernauwing (o.a. A2 en spoorbrug Zaltbommel)
939 !	Haften	lokale vernauwing
945	Brakel	lokale vernauwing
951 !	Woudrichem	lokale vernauwing (net benedenstrooms RvdR maatregel Munnikerland)
955	Sleeuwijk	vernauwing in combinatie met brug
958	Sleeuwijk	vernauwing

De bocht bij Varik-Heesselt komt als twee knelpunten naar voren (knelpunten op km 922 en km 927). Apart behorend deze knelpunten niet tot de meest prominente knelpunten langs de Waal.

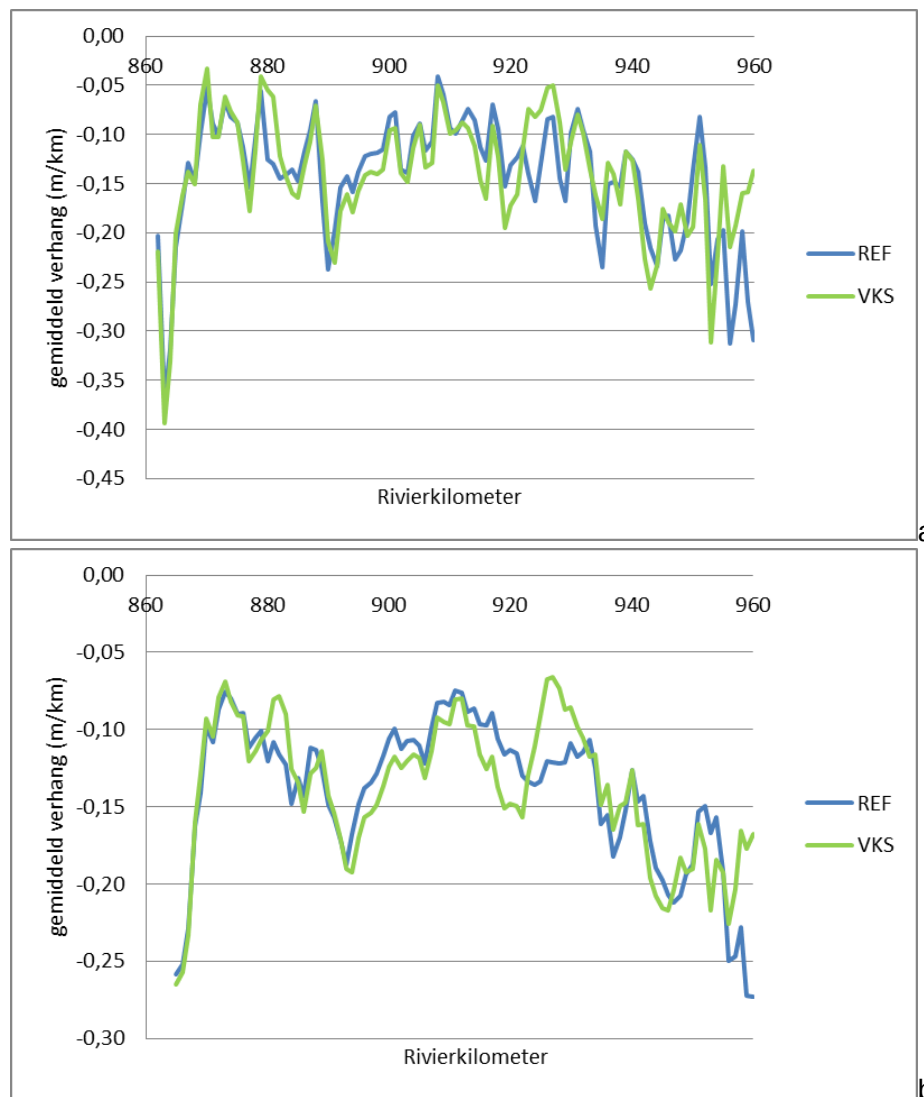
Effect van de voorkeursstrategie

Om na te gaan of en in welke mate de voorkeursstrategie (VKS) de hydraulische knelpunten oplost, is een vergelijkbare analyse uitgevoerd voor de situatie na uitvoering van de VKS. De verhanglijnen voor de huidige situatie (referentie) en de situatie na uitvoering van de VKS zijn te zien in Figuur 3. Figuur 4 toont de variatie in verhang langs de rivier in meer detail. Figuur 4a toont variaties in het gemiddelde verhang over 2 km (voor referentie situatie en na uitvoering van de VKS). Figuur 4b toont hetzelfde maar dan op basis van het gemiddelde verhang over 5 km.



Figuur 3 Berekende waterstand op de Waal op de as van de rivier voor een afvoer van 18.000 m³/s te Lobith, uitgaande van de huidige situatie (REF) en de situatie na uitvoering van de voorkeursstrategie voor zichtjaar 2100 (VKS)

Figuur 3 toont aan dat de waterstand over de gehele Waal aanzienlijk lager uitvalt na uitvoering van de VKS, maar dat niet alle knelpunten zijn opgelost. Figuur 4 bevestigt dit beeld: de variaties in verhang zijn nog steeds aanzienlijk.



Figuur 4 Variaties in verhang bij hoogwater op de Waal gemiddeld verhang over (a) 2 km en (b) 5 km

Wanneer in meer detail gekeken wordt (Figuur 4), dan valt op dat de by-pass bij Varik-Heesselt weliswaar resulteert in een zeer grote waterstandsdeling, maar dat het knelpunt bij Heesselt eerder prominenter dan minder prominent is geworden. Dit komt mogelijk doordat de waterstand net benedenstrooms van Heesselt onvoldoende is afgenomen (of in ieder geval veel minder dan bovenstrooms van Heesselt). Dit impliceert dat een aanvullende rivierverruimende maatregel net benedenstrooms van Heesselt voor relatief veel extra waterstand kan zorgen bovenstrooms. Het hydraulische knelpunt dat resulteert na realisatie van de by-pass Varik-Heesselt is mogelijk het gevolg van de schaarndijk bij Hurwenen, welke als een 'punt' in de rivier steekt (deze schaarndijk bevindt zich ten noorden van de plaatsnaam Rossum in Figuur 5). Dijkteruglegging bij Hurwenen lijkt geen optie, maar mogelijk biedt een aanvullende maatregel in de Heesseltsche uiterwaarden of het verleggen van het uitstroompunt van de by-pass in noordwestelijke richting uitkomst. Dit zou verder kunnen worden onderzocht.



Figuur 5 By-pass Varik-Heesselt

B Hydraulische knelpuntenanalyse (2015) Venlo

Memo

Aan
Koos Beurskens

Datum
23 september 2015

Aantal pagina's
91

Van
Nathalie Asselman

Doorkiesnummer
+31(0)88335 8527

E-mail
nathalie.asselman@deltares.nl

Onderwerp
Knelpunten nabij Venlo

Inleiding

Overwogen wordt om benedenstrooms van Venlo rivierverruimende maatregelen uit te voeren. Deze maatregelen zouden tot waterstandsdeling (moeten) leiden benedenstrooms van Venlo, maar mogelijk ook ter hoogte van Venlo zelf. In welke mate het effect bovenstrooms merkbaar is, is mede afhankelijk van eventuele knelpunten ter plaatse. De vraag die daarom aan Deltares is gesteld is om na te gaan of de bruggen bij Venlo mogelijk een belemmering vormen. Wanneer dit zo is zou rivierverruiming benedenstrooms van Venlo pas echt effectief zijn wanneer ook deze bruggen worden aangepakt.

Dit memo

Om antwoord te geven op de vraag of de bruggen bij Venlo van invloed zijn op de effectiviteit van rivierverruiming benedenstrooms van Venlo, is gekeken naar het verloop van de waterstanden (verhanglijn) op de Maas bij Venlo bij verschillende afvoeren. Dit memo betreft de verslaglegging van deze analyse.

Werkwijze

De in dit memo gepresenteerde hydraulische knelpunten zijn geïdentificeerd op basis van sprongen in de verhanglijn op de rivier. De volgende stappen zijn doorlopen:

- Waterstanden op de Maas zijn berekend voor verschillende afvoerniveaus te Eijsden. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met het Deltamodel in opdracht van het Deltaprogramma Rivieren. De resultaten voor de VKS2050 zijn beschikbaar in het bestand "DPR_maas_2050W_as_WS_S14.mdb". Het bestand eindigend op S1 geeft vergelijkbare resultaten voor de referentiesituatie en S12 bevat resultaten voor de situatie met als naam "referentie plus". Het betreft waterstanden op de as van de rivier, berekend per rivierkilometer.
- De waterstanden zijn geplot in grafieken om zo (op het oog) hydraulische knelpunten te identificeren. Bij een knelpunt neemt het verhang sterk af, om vervolgens juist sterk toe te nemen. Dit resulteert in 'bobbels' in de geplotte waterstandslijnen.

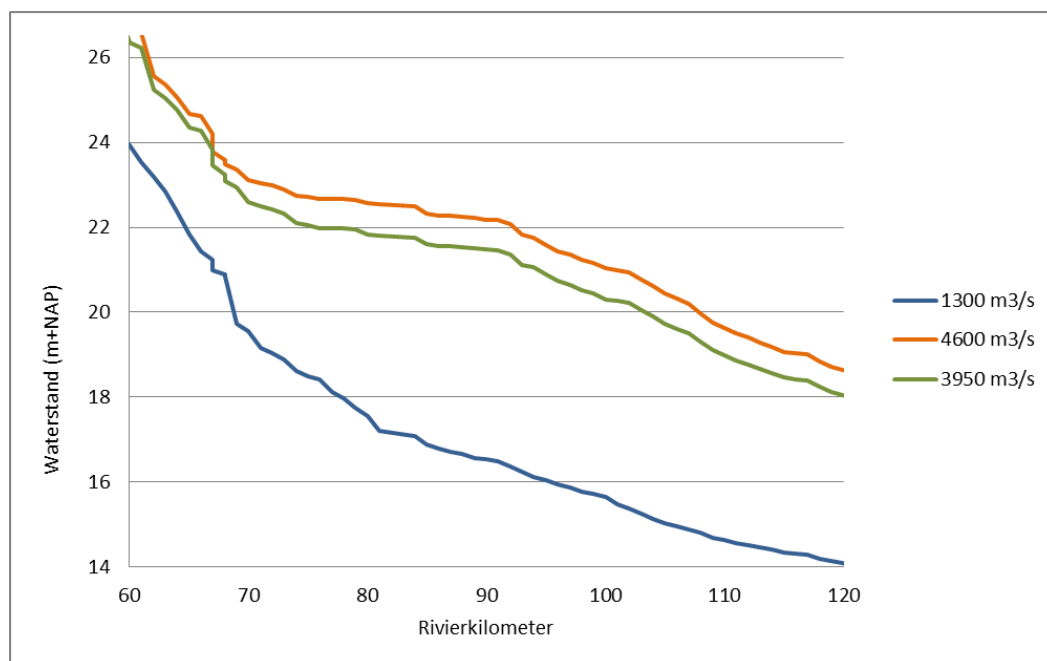
Om na te gaan of en in welke mate de voorkeursstrategie (VKS) de hydraulische knelpunten oplost, is een vergelijking uitgevoerd voor de situatie voor en na uitvoering van de VKS.

Knelpunten in de huidige situatie

Om te illustreren hoe hydraulische knelpunten zichtbaar worden in de verhanglijnen is in Figuur 1 toont de berekende waterstanden op het traject tussen Linne en Lottum (km 60 tot km 120). Venlo ligt tussen km 105 en km 110 (ongeveer). Hydraulische knelpunten uit zich in deze figuur doordat de lijn steeds meer horizontaal gaat lopen en daarna plots sterk naar beneden buigt. Dit resulteert in een duidelijke knik. Bij zeer lage afvoeren zouden stuwen dus moeten resulteren in duidelijk knikken in de verhanglijn (stuwen zijn immers aangelegd om het water zo veel mogelijk 'tegenhouden' en op te stuwen. Bij de laagste afvoer die is doorgerekend met het Deltamodel (1300 m³/s) zijn de stuwen waarschijnlijk al helemaal geopend. Toch zijn ze nog zichtbaar in de figuur (blauwe lijn). Bij km 68 ligt de stuw van Linne. Deze stuw levert een zeer sterke knik op in de blauwe lijn: de doorgang is nauw en de overlaat bij Linne stroomt nog niet mee. De stuw bij Belfeld (km 101) is minder duidelijk zichtbaar en resulteert slechts in een zeer flauw knikje in de blauwe lijn.

Bij hogere afvoeren zijn de stuw en de lus van Linne minder duidelijk zichtbaar in de figuur. Bij afvoeren boven de 1000 m³/s staan de meeste stuwen op de Maas geheel open. En volgens Kurstjens et al. (2008) begint de overlaat bij Linne mee te stromen bij afvoeren tussen de 1550 en 1650 m³/s. Bij de hier doorgerekende hoge afvoeren stroomt de lus dus volop mee. De omgeving van Maasbracht lijkt nu eerder het knelpunt te zijn (een paar kilometer bovenstrooms). Bij stuw Belfeld blijft een klein knikje zichtbaar.

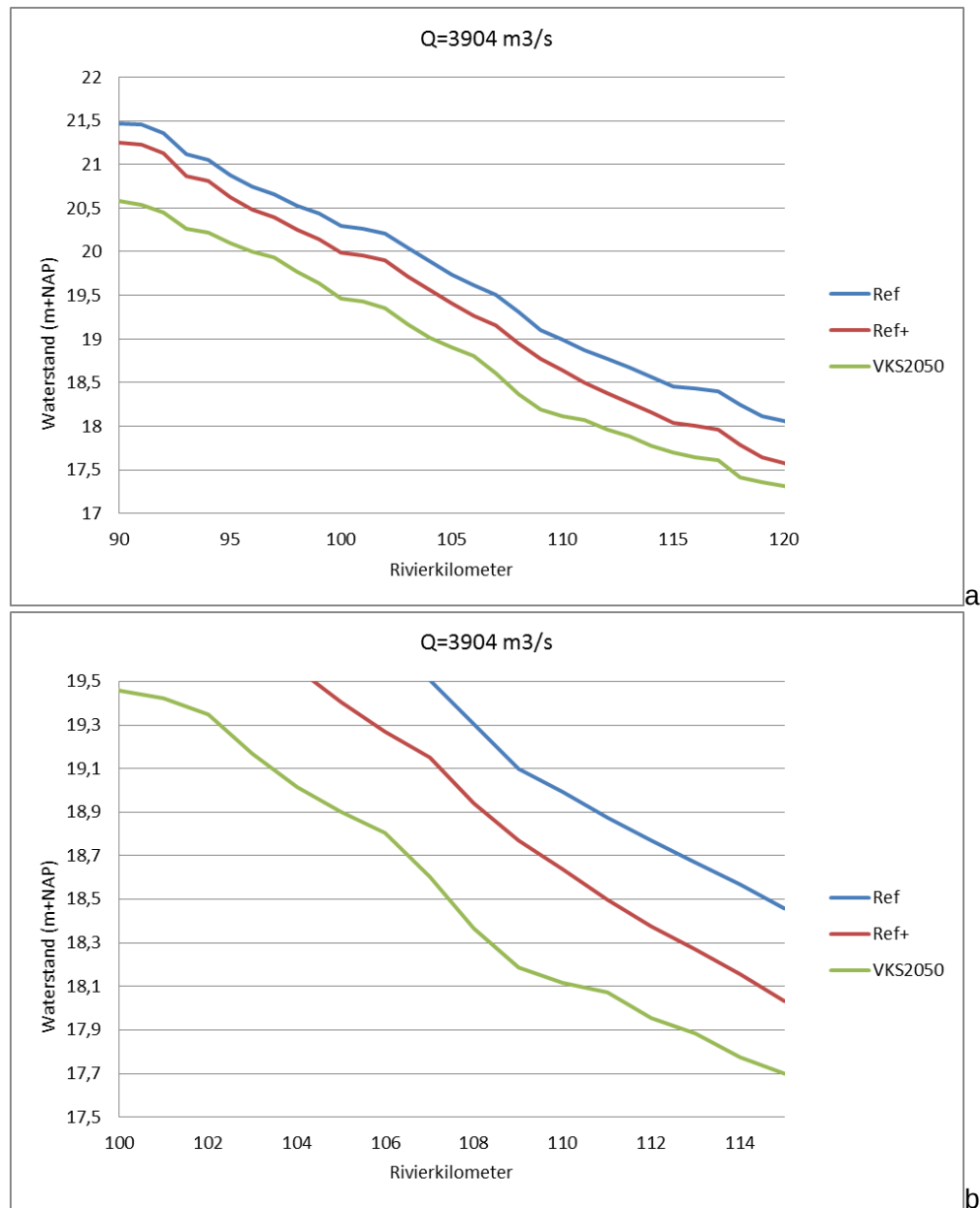
Wat echter vooral opvalt in Figuur 1 is dat het verhang bij hogere afvoeren sterk afneemt op het traject tussen km 70 en km 92. Bij lage afvoeren (1300 m³/s) is het verhang hier veel groter dan bij hogere afvoeren (3900 m³/s of meer). Het knikje bij km 84 kan samenhangen met de spoorbrug bij Roermond. De knik bij km 90 (nabij Neer) is minder duidelijk te verklaren. Mogelijk is het doorstroomprofiel van de Maasvallei hier relatief smal. Nabij Venlo zijn een paar kleinere knikjes zichtbaar. Hier gaan we in de volgende paragraaf op in.



Figuur 1 Berekende waterstanden op de Maas tussen Linne en Lottum (Venlo ligt nabij km 105-110), bij verschillende afvoeren te Eijsden.

Detailanalyse omgeving Venlo

Figuur 2 toont de berekende waterstanden nabij Venlo bij een afvoer van 3900 m³/s en voor drie verschillende situaties: de referentiesituatie (Ref), de referentie-plus (Ref+) en de situatie na uitvoering van de VKS.



Figuur 2 Berekende waterstanden nabij Venlo (nabij km 105-110), bij verschillende afvoeren te Eijsden (figuur b is een detail uit figuur a).

Wat valt op?

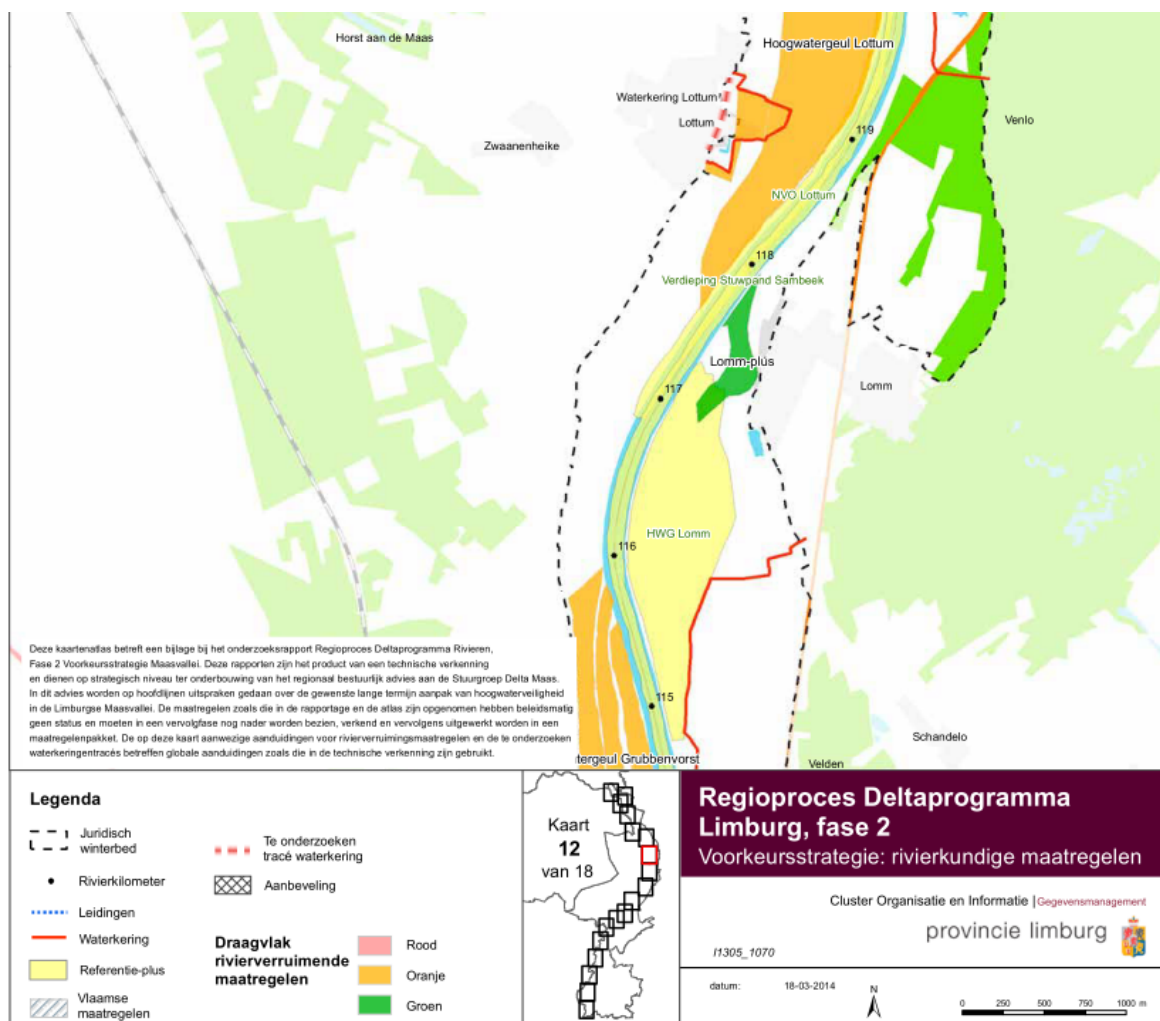
- In alle drie de situaties is een knik waarneembaar rond km 102. Deze knik hangt waarschijnlijk samen met de stuw bij Belfeld. Hoewel de maatregelen uit de Ref+ en de VKS de waterstand op dit traject wel verlagen, is het knelpunt zelf niet opgelost.
- In de referentiesituatie zit een klein knikje bij km 107. Na uitvoering van de VKS lijkt dit bij km 106 te zitten. Dit punt zit tussen de Zuiderbrug (A73) en de spoorbrug in en schuift dus op richting de Zuiderbrug. Op basis van de ze figuren is niet goed te zeggen of het knelpunt samenhangt met het oostelijke landhoofd van de brug dat iets de rivier in

lijkt te komen (zie foto 1 in de bijlage) of met het feit dat de Maas hier sowieso vrij smal is (zie ook foto 2).

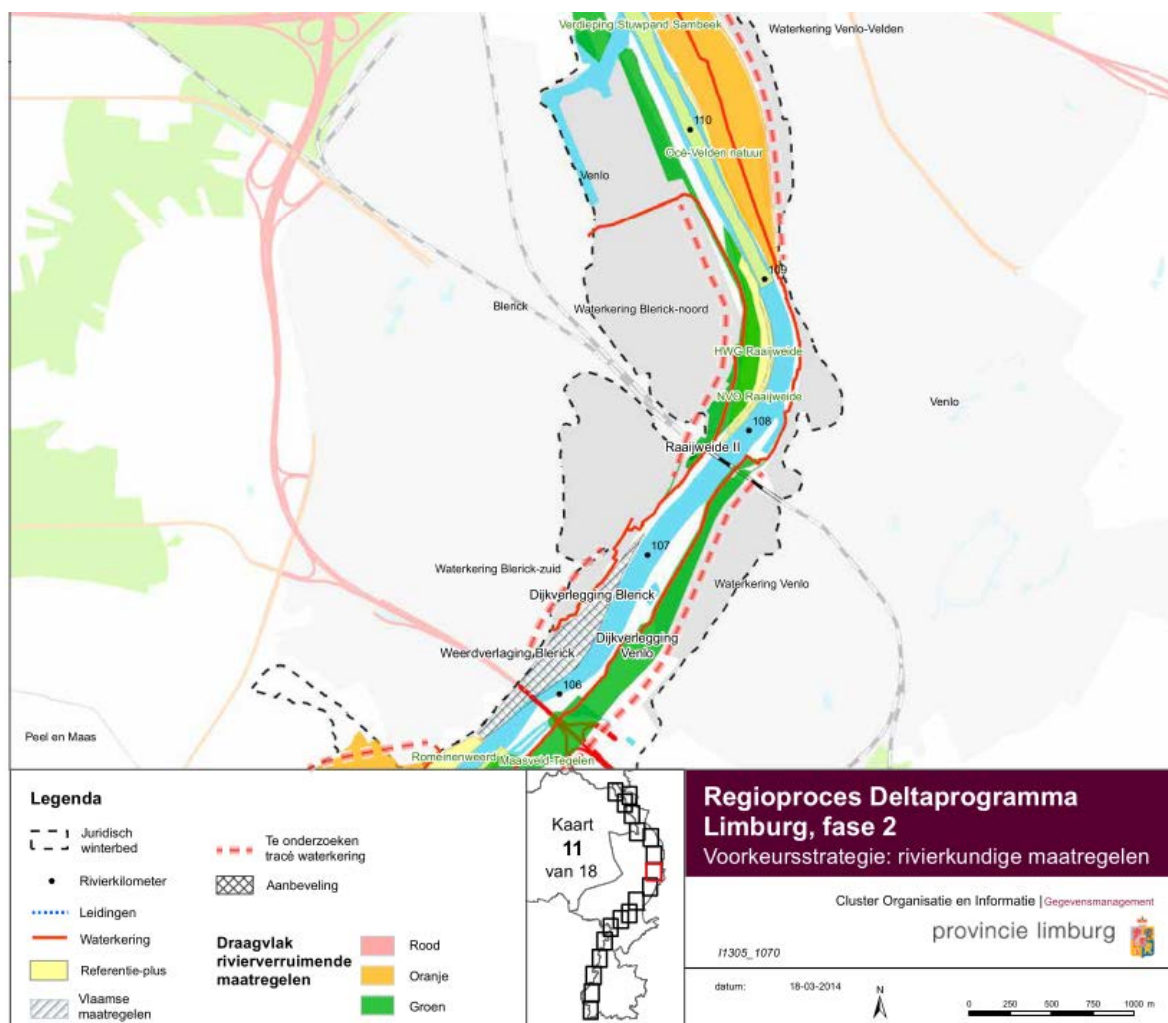
- Het volgende knelpunt bevindt zich bij km 117, nabij Lomm. De Maas is hier relatief smal. In de VKS zijn hier in dit gebied 2 dijkterugleggingen en een aantal nevengeulen voorzien (Tabel 1 en Figuur 3). Toch blijft het knelpunt bij km 177 bestaan. Mogelijk is de verbinding (aangegeven in groen in Figuur 3) tussen de grootschalige maatregelen wat te beperkt om het knelpunt op te lossen.
- Bij de VKS is een maatregel uitgevoerd die de waterstand rond km 108 'extra' laat dalen. De waterstandsdeling zet zich niet door bovenstrooms van km 106 (daar zit een flauw knikje in de groene lijn). Km 106 valt samen met de **Zuiderbrug**. Wanneer de waterstand bij het centrum van Venlo nog verder wordt verlaagd zou dit knelpunt nog duidelijker zichtbaar kunnen worden. De reden hiervoor is mij niet helemaal duidelijk omdat Figuur 4 suggereert dat de rivier in de VKS op dit traject flink wordt verbreed en dat ook het landhoofd wordt weggehaald.
- Na uitvoering van de VKS wordt bovendien een knelpunt zichtbaar bij km 111. Km 111 valt samen met de **Noorderbrug**. Blijkbaar daalt de waterstand bij deze brug minder dan boven en benedenstrooms hiervan. De reden hiervoor is mij niet helemaal duidelijk omdat Figuur 4 suggereert dat de rivier in de VKS op dit traject flink wordt verbreed en dat ook het landhoofd wordt weggehaald.

Tabel 1 Rivierverruimende maatregelen nabij Maas km 117, opgenomen in de VKS voor de Maas (Bron: Berkhof et al., 2013)

Naam	Type	Km van	Km tot	LMR	Meekoppelkansen	Draagvlak	Toelichting (t.a.v. draagvlak)	fasering
Velden (Regio)	Dijkteruglegging weerdverlaging en hoogwatergeul	109	114	R		geel	RWS: voorkeur voor droge geul (groene rivier). Meer inzichten nodig over de invulling van deze maatregel.	2030
Hoogwatergeul Grubbenvorst	Nevengeul / Hoogwatergeul	113	116	L		geel	een natte geul heeft niet de voorkeur.	2030
Hoogwatergeul Lomm plus	Nevengeul / Hoogwatergeul	117	118	R		-		2030
Hoogwatergeul Lottum incl. teruglegging waterkering bij kasteel	Nevengeul / Hoogwatergeul	118	121	L		geel	niet voorgelegd aan regio, door inbreng laatste moment. CDA-plan heeft instemming, maar dijkteruglegging onbekend.	2050
NVO Lottum	NVO	119	120	L		-		ref-plus
Verleggen Dijkkring Arcen (Regio)	Dijkverlegging	116	123	R		groen	-	2030



Figuur 3 Rivierverruimende maatregelen bij Maas kilometer 2017 uit de VKS Maas



Figuur 4 Rivierverruimende maatregelen bij Venlo uit de VKS Maas

Conclusie

Na uitvoering van de VKS komen de Zuiderbrug en de Noorderbrug bij Venlo duidelijker als knelpunt naar voren. De rivierverruimende maatregelen nabij Venlo zorgend dus blijkbaar voor een grotere waterstandsvaling boven- en benedenstrooms van de bruggen dan bij de bruggen zelf. Bij een nog verdere waterstandsvaling zouden deze knelpunten zich nog nadrukkelijker kunnen manifesteren. De reden voor deze knelpunten blijkt echter niet uit het aangeleverde kaartmateriaal (Figuur 4). Dit suggereert namelijk dat de rivier ook ter hoogte van de brug wordt verbreed. De modelresultaten wekken echter de indruk dat de landhoofden van de bruggen mogelijk minder ver worden teruggelegd zodat deze voor opstuwing zorgen. (Op foto 5 en 6 in de bijlage is te zien dat de huidige landhoofden van de Noorderbrug relatief ver doorlopen naar de rivier).

Referenties

- A.M. Berkhof, D.G. Meijer, H. Leushuis (2013) REGIOPROCES DELTAPROGRAMMA: VOORKEURSSTRATEGIE MAASVALLEI. ONDERZOEKSRAPPORTAGE FASE 2 REGIOPROCES.
- DELTAPROGRAMMA RIVIEREN: VOORKEURSSTRATEGIE MAASVALLEI. BIJLAGE 2: KAARTATLAS BIJ ONDERZOEKSRAPPORTAGE FASE 2 REGIOPROCES

Bijlagen

Zuiderbrug A73 (lengte 330m)



Foto 1: Zuiderbrug (bron: <http://www.wegenwiki.nl/Zuiderbrug>)

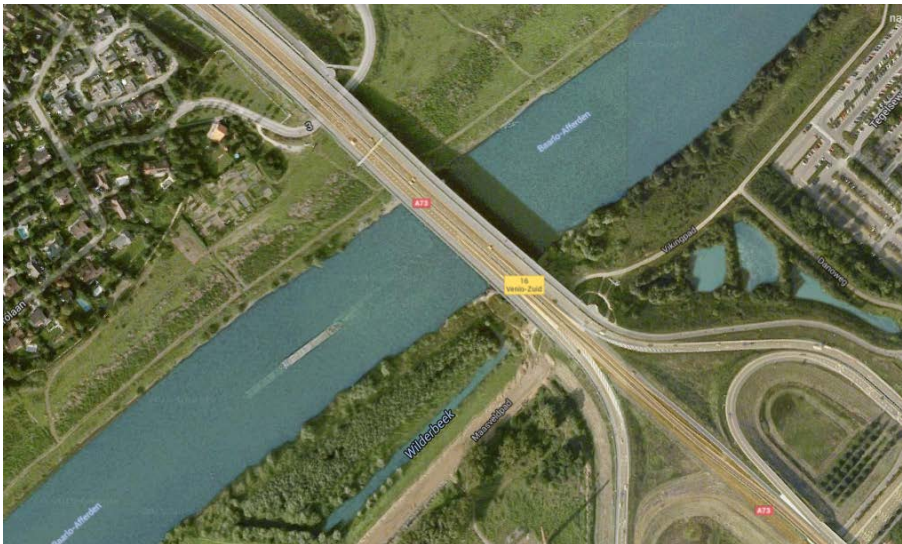


Foto 2: Zuiderbrug (bron: Google earth)

Maasbrug Venlo (lengte 216m)



Foto 3: Maasbrug Venlo (bron: <http://www.wegenwiki.nl/>)



Foto 4: Maasbrug Venlo (bron: Google earth)

Noorderbrug A67 (lente 405m)



Foto 5: Noorderbrug (A67) te Venlo



Foto 5: Noorderbrug (A67) te Venlo (bron: Google Earth)

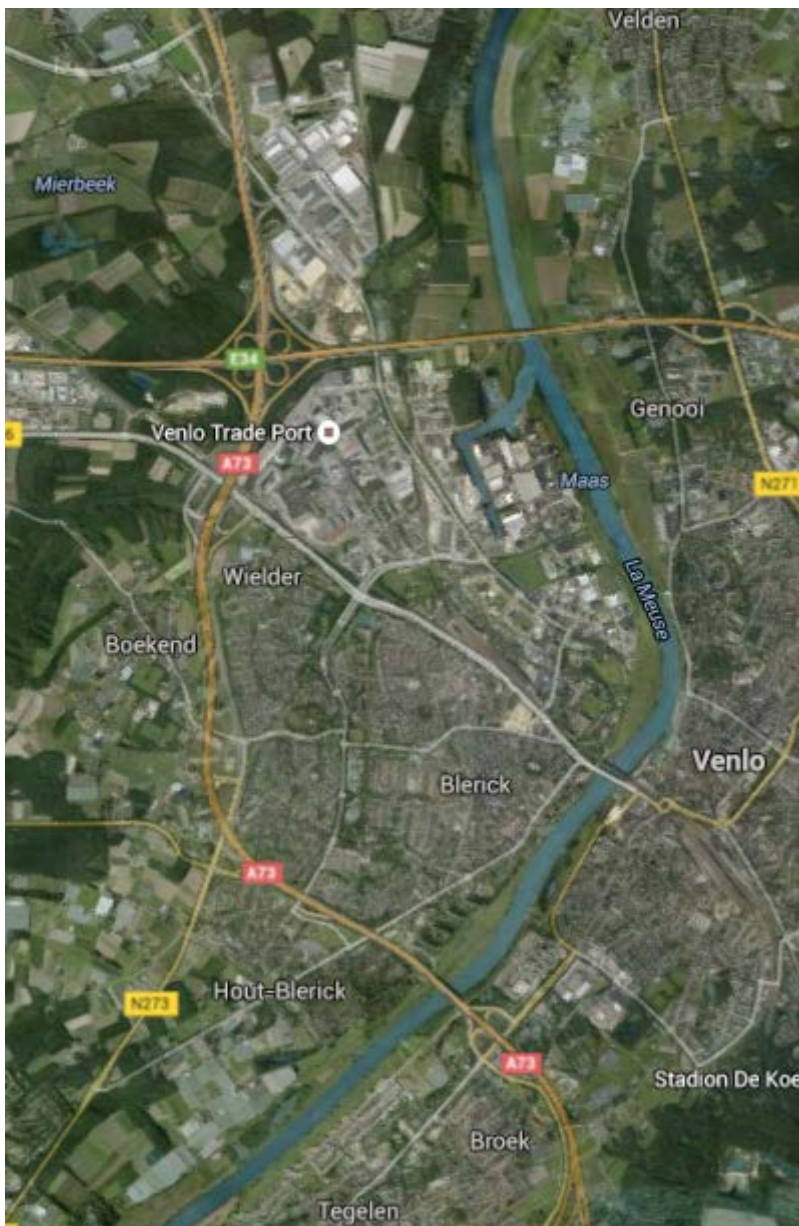


Foto 7: bruggen bij Venlo (bron: Google earth)

C Legenda samenvattende tabellen

De klasse-indeling van de knelpunten op de Grensmaas is als volgt.

Omvang knelpunt (verschil berekende waterstand en gemiddelde waterstand)

	<15 cm
	15-19 cm
	20-29 cm
	30-39 cm
	>40 cm

Het effect van de VKS op de gevonden knelpunten is als volgt geclassificeerd

	toename knelpunt met > 10cm
	toename met 5-10 cm
	toename met < 5 cm
	geen effect
	afname met < 5 cm
	afname met 5-10 cm
	afname met >10 cm

Voor de overige riviertakken is de volgende indeling gehanteerd.

Omvang knelpunt (verschil berekende waterstand en gemiddelde waterstand)

	< 6 cm
	6-7 cm
	8-9 cm
	10-19 cm
	>20 cm

Het effect van de VKS op de gevonden knelpunten

	toename knelpunt met > 3 cm
	toename met 2-3 cm
	toename met 1 cm
	geen effect
	afname met 1 cm
	afname met 2-3 cm
	afname met >3 cm