

Berekening van de rivierwaterstanden rond 2050 als gevolg van klimaatverandering onder het W+ scenario

Februari 2011

Auteur

W. Terink
P. Droogers

Opdrachtgever

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden



FutureWater

Costerweg 1G
6702 AA Wageningen
The Netherlands

+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Gegevens	3
3	Methode en resultaten	4
3.1	Afvoer Lobith	4
3.2	Waterhoogte Wijk bij Duurstede	5
3.3	Waterhoogte Gemaal de Koekoek	8
3.4	Waterhoogte ARK inlaat	12
	Bijlage 1: Procentuele debiet veranderingen bij Lobith 2050 W+	16



1 Inleiding

In het kader van de Knikpunten studie, welke Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden in samenwerking met Waternet en het Hoogheemraadschap van Rijnland uitvoert, is het van belang om de waterstanden in de rivieren te bepalen als gevolg van klimaatverandering. Als gevolg van klimaatverandering is het mogelijk dat de waterstanden in de rivieren dusdanig laag worden, dat het niet meer mogelijk is om water in te laten.

Ter ondersteuning van de Knikpunten studie heeft Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden FutureWater gevraagd om de rivier waterstanden rond 2050 voor het KNMI W+ scenario als gevolg van klimaatverandering te bepalen op een drietal locaties in het beheersgebied van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Het gaat hierbij om de volgende drie locaties:

1. Wijk bij Duurstede
2. ARK inlaat
3. Gemaal de Koekoek

2 Gegevens

Om de waterstanden rond 2050 te kunnen bepalen, zijn gegevens nodig van afvoeren en waterstanden van de huidige situatie (1971-2005). Deze periode wordt beschouwd als de referentie periode (huidig klimaat). De procentuele veranderingen in de afvoer rond 2050 ten opzichte van het huidige klimaat zijn alleen bekend voor Lobith. Daarom zal er een relatie gezocht moeten worden tussen de afvoer bij Lobith en de waterstanden op de drie locaties van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. In Tabel 1 is voor elk van de locaties de data beschikbaarheid weergegeven. De afvoeren en waterstanden zijn online beschikbaar via de "waterbase"-applicatie (<http://live.waterbase.nl>) van Rijkswaterstaat. Dit is een web applicatie waarmee waterdata uitgelezen kan worden die opgeslagen is in de database DONAR (Data Opslag Natte Rijkswaterstaat).

Tabel 1: Beschikbaarheid gegevens

Locatie	Afvoer	Waterstand	Qh-relatie
Lobith	1989-2009	1824-2010	Ja
Wijk bij Duurstede	-	1813-1989	Ja ¹
Gemaal de Koekoek ²	-	01-07-2003 t/m 21-11-2005	Nee
ARK inlaat	-	-	Nee

Het waterschap wil de waterstanden weten die rond 2050 kunnen optreden. Als referentie periode wordt uitgegaan van 1971-2005. Uit Tabel 1 blijkt dat voor de zojuist genoemde periode niet voor elke locatie de benodigde gegevens beschikbaar zijn. Voor Lobith ontbreekt de afvoer voor de periode 1971-1988. Voor Wijk bij Duurstede is alleen de waterstand bekend voor 1971-1989, en ontbreekt de periode 1990-2005. Voor Gemaal de Koekoek is vrijwel geen data beschikbaar. Bij de ARK inlaat is geen afvoer en geen waterstand gemeten.

Om toch de benodigde waterstanden te verkrijgen kan gebruik gemaakt worden van de waternormalen³. Dit wordt uitgebreid besproken in Hoofdstuk 3.

¹ Qh-relatie voor afvoer bij Lobith en waterhoogte bij Wijk bij Duurstede

² Gegevens gekregen van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

³ http://live.waternormalen.nl/waternormalen_waterstanden.cfm?taal=nl



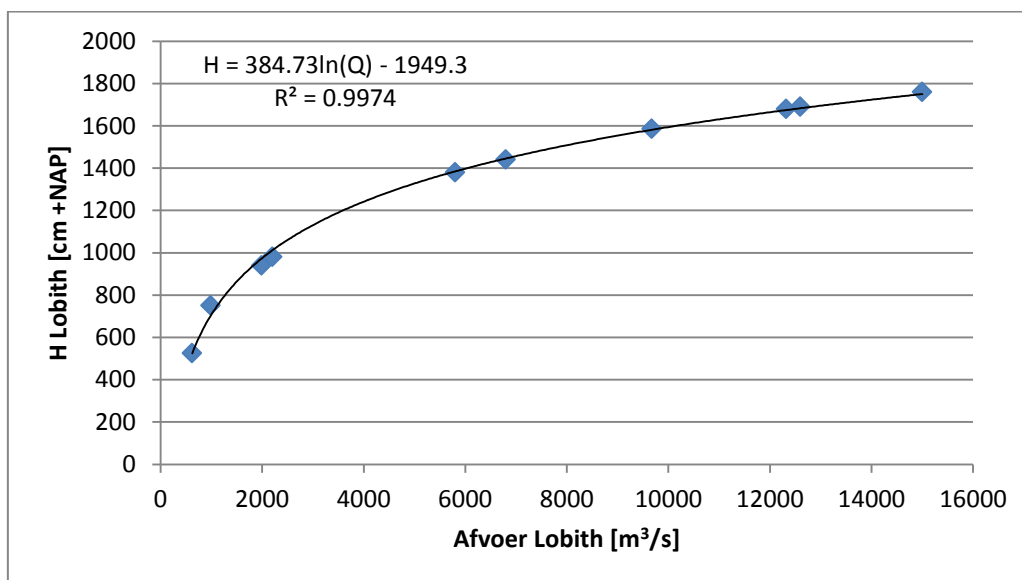
3 Methode en resultaten

3.1 Afvoer Lobith

Van Deursen (2006) heeft de debietveranderingen in de Rijn als gevolg van klimaatverandering berekend met het Rhineflow model. Van Deursen (2006) heeft daarvoor de KNMI '06 scenario's gebruikt. Daarbij zijn de procentuele debietveranderingen bij Lobith berekend voor 2050 t.o.v. 1961-1995, gebruik makend van het G, G+, W, en W+ scenario. Voor de berekening van de rivierwaterstanden wordt gebruik gemaakt van het W+ scenario. Voor de periode 1971-1988 zijn geen afvoeren bekend bij Lobith. Deze zijn berekend met de Qh-relatie die is afgeleid uit de tabel met overschrijdingsfrequenties (Tabel 2).

Tabel 2: Overschrijdingsfrequenties bij Lobith (bron: http://live.waternormalen.nl/NL/tab_waterstanden/LOBH.html).

Overschrijdingsfrequentie	Afvoer Lobith in m ³ /s	Waterhoogte in cm + NAP
1x per 1.250 jaar	15000	1760
hoogst bekende afvoer 3 jan 1926 17h	12600	1690
1 x per 100 jaar	12320	1680
1 x per 10 jaar	9670	1585
1 x per 2 jaar grensafvoer (-peil)	6800	1440
1 x per jaar	5800	1380
gemiddelde afvoer	2200	980
gemiddelde zomer afvoer	1985	940
overeengekomen lage afvoer / OLR 1991.0	984	750
laagst bekende ijsvrije afv. 4 nov 1947	620	524



Figuur 1: Qh-relatie bij Lobith. De vergelijking voor het berekenen van de waterhoogte (H) bij een bepaalde afvoer (Q) staat in de grafiek vermeld.

De vergelijking in Figuur 1 berekent de waterhoogte bij een bepaalde afvoer. De vergelijking voor het berekenen van de afvoer bij een bepaalde waterhoogte is:



$$Q = \exp^{\frac{H+1949.3}{384.73}}$$

Met behulp van deze vergelijking kan de afvoer bij Lobith voor 1971-2005 geconstrueerd worden. De procentuele veranderingen rond 2050 bij Lobith zijn berekend t.o.v. de periode 1961-1995. Om de verandering t.o.v. 1971-2005 te bepalen zal de procentuele verandering geschaald moeten worden naar de zojuist genoemde periode. Daarbij wordt eerste de procentuele verandering per jaar berekend door de totale verandering te delen door het aantal jaren tussen 2050 en het midden van de periode 1961-1995 (1978). Dit is de totale procentuele verandering gedeeld door 73 jaar. Deze resultaten staan per 10-daagse periode weergegeven in Bijlage 1. Vervolgens is voor elke dag in de periode 1971-2005 de afvoer berekend met onderstaande vergelijking:

$$Q_{W+}(d) = Q(d) + (Q(d) * (2050 - 1988 + 1) * \Delta Q_{gem}(decade))$$

Waarin: $Q_{W+}(d)$ = Afvoer 2050 W+ op dag d ;
 $Q(d)$ = Afvoer 1971-2005 op dag d ;
 $\Delta Q_{gem}(decade)$ = Procentuele verandering afvoer per jaar op decade;

Bovenstaande vergelijking genereert dus 35 tijdreeksen (van elk 1 jaar lang) van mogelijke afvoeren die rond 2050 bij Lobith kunnen optreden onder het W+ scenario.

3.2 Waterhoogte Wijk bij Duurstede

Nu de afvoeren bij Lobith rond 2050 onder het W+ scenario bekend zijn kan de waterhoogte bij Wijk bij Duurstede berekend worden. Daarbij is gebruik gemaakt van de tabel met overschrijdingsfrequenties (Tabel 3), waaruit een Qh-relatie tussen Lobith en Wijk bij Duurstede afgeleid kan worden. Deze Qh-relatie is weergegeven in Figuur 2. Hierin is tevens de vergelijking opgenomen waarmee de waterhoogte berekend kan worden.

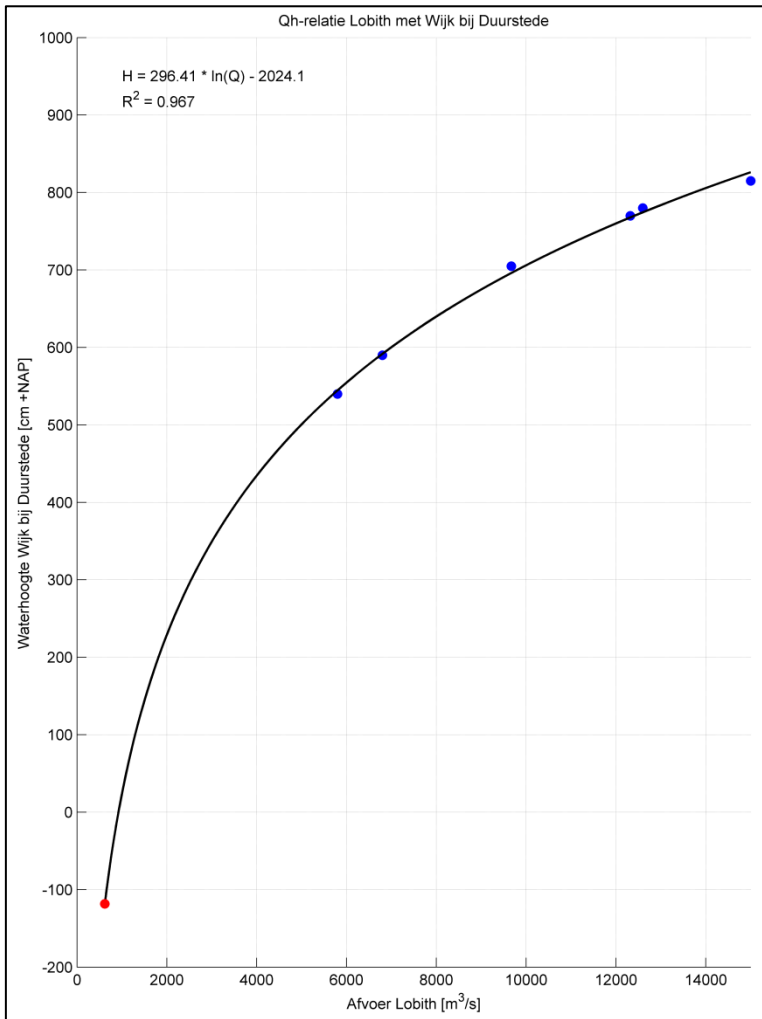
Tabel 3: Overschrijdingsfrequenties bij Wijk bij Duurstede (bron: http://live.waternormalen.nl/NL/tab_waterstanden/WIJKBDSDE.html).

Overschrijdingsfrequentie	Afvoer Lobith in m ³ /s	Waterhoogte Wijk bij Duurstede cm + NAP
1x per 1.250 jaar	15000	815
hoogst bekende afvoer 3 jan 1926 17h	12600	780
1 x per 100 jaar	12320	770
1 x per 10 jaar	9670	705
1 x per 2 jaar grensafvoer (-peil)	6800	590
1 x per jaar	5800	540
laagst bekende ijsvrije afv. 4 nov 1947	620	-118*

* Berekend uit Qh-relatie.

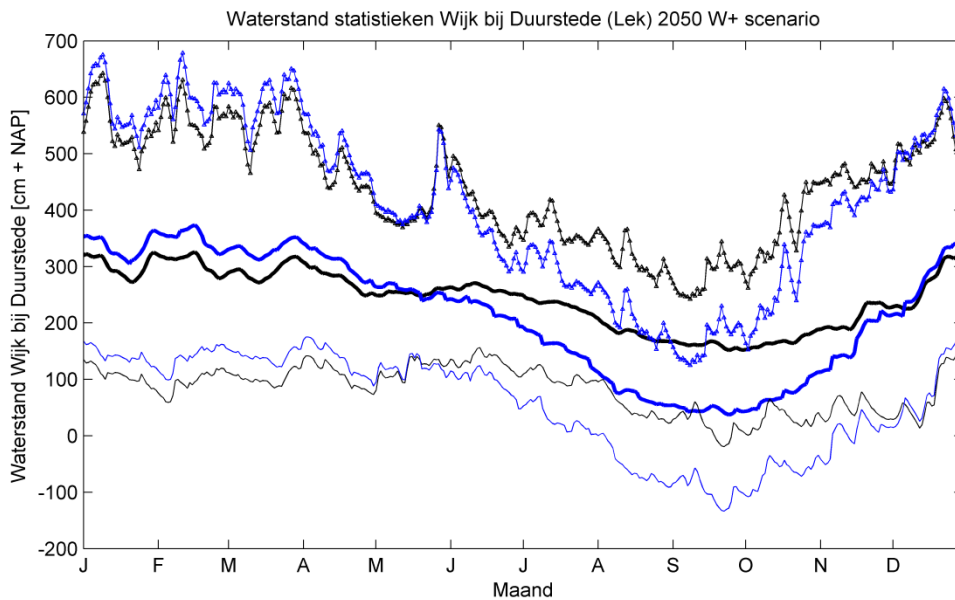
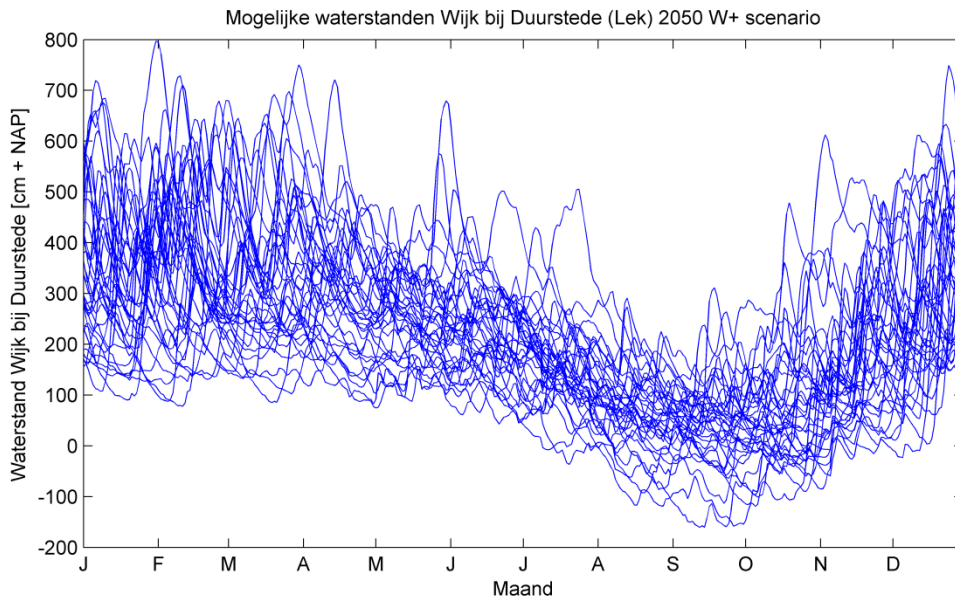
De waterstanden die rond 2050 onder het W+ scenario kunnen optreden bij Wijk bij Duurstede zijn weergegeven in Figuur 3. Hieruit blijkt dat de waterstanden in 2050 gedurende december t/m mei hoger zijn dan in het huidige klimaat. Gedurende de maanden juni t/m november is de waterstand echter aanzienlijk lager dan in het huidige klimaat. Dit kan in het ergste geval ruim 1 meter lager zijn dan in het huidige klimaat. Een aantal statistieken van de waterstanden bij Wijk bij Duurstede zijn samengevat in Tabel 4.





Figuur 2: Qh-relatie Lobith met Wijk bij Duurstede. De vergelijking voor het berekenen van de waterhoogte (H) bij een bepaalde afvoer (Q) staat in de grafiek vermeld. De rode cirkel is een berekende waterhoogte.





— Gemiddeld huidig — Gemiddeld 2050 W+ — P5 huidig — P95 huidig — P5 W+ — P95 W+

Figuur 3: Boven: mogelijke waterstanden (35 reeksen) die in 2050 bij Wijk bij Duurstede op kunnen treden. Onder: Statistieken van de huidige waterstanden en de waterstanden rond 2050.

Tabel 4: Statistieken per maand van waterstanden bij Wijk bij Duurstede (2050 W+).

	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Gemiddeld	336	351	331	309	257	227	160	77	46	71	164	280
Min	90	78	85	87	75	43	-37	-119	-160	-154	-85	-23
Max	797	794	750	742	680	673	506	319	311	479	612	749
P05	122	100	122	101	95	64	3	-88	-132	-106	-48	16
P95	670	667	647	572	538	469	342	265	209	371	455	609



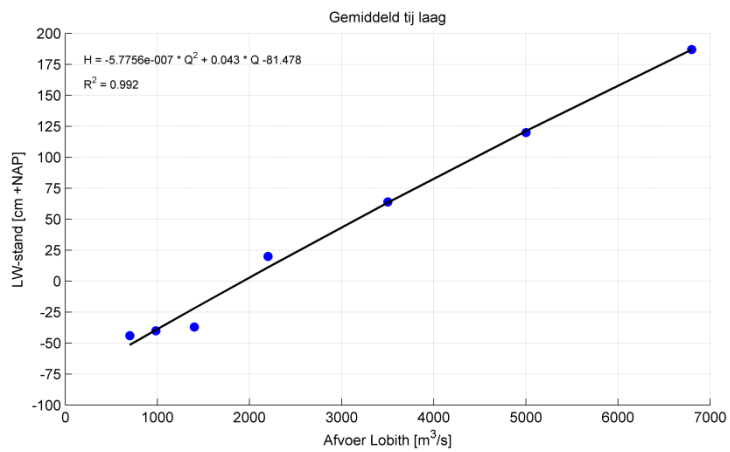
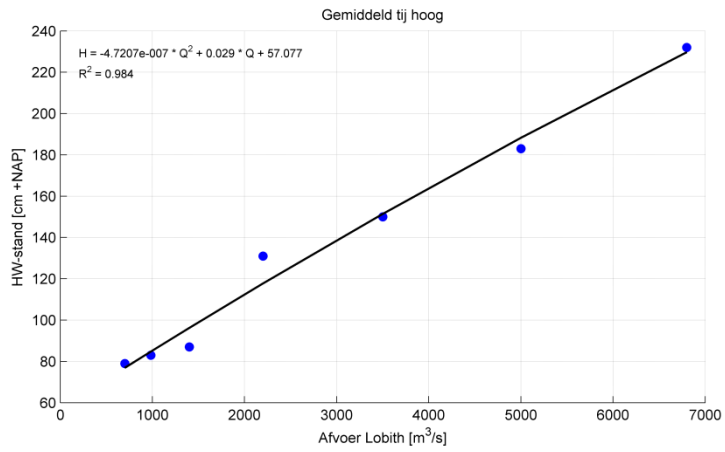
3.3 Waterhoogte Gemaal de Koekoek

Uit Tabel 1 blijkt dat voor Gemaal de Koekoek nauwelijks gegevens beschikbaar zijn. Hier komt nog bij dat het getij invloed heeft op de waterhoogte bij Gemaal de Koekoek. Om de waterhoogte bij Gemaal de Koekoek te bepalen, is de waterstand tussen een punt bovenstrooms (Hagestein beneden) en een punt bovenstrooms (Schoonhoven) van Gemaal de Koekoek geïnterpoleerd. Voor zowel Hagestein beneden als voor Schoonhoven zijn de hoogwaterstanden en laagwaterstanden bekend bij gemiddeld tij, springtij en doottij, alle in relatie tot de afvoer gemeten bij Lobith. De waterstanden voor springtij en doottij lijken binnen de range van waterstanden bij gemiddeld tij te vallen. Daarom zijn alleen de hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij in dit rapport gebruikt. Deze waarden staan vermeld in Tabel 5. Omdat er sprake is van getij bewegingen is het niet mogelijk een Qh-relatie af te leiden. Wel kan er een 2^e orde polynoom door deze punten gefit worden. Deze fit is weergegeven in Figuur 4 voor zowel de hoogwaterstand als de laagwaterstand. De mogelijke waterstanden die in 2050 kunnen optreden bij Gemaal de Koekoek zijn weergegeven in Figuur 5 voor gemiddeld tij hoogwater en in Figuur 6 voor gemiddeld tij laagwater. Hierbij is de mogelijke zeespiegelstijging niet meegenomen in de analyse. Dit vergt een veel diepgaander en uitgebreider onderzoek. De statistieken van de waterstanden voor gemiddeld tij hoog water en gemiddeld tij laag water staan samengevat in Tabel 6 en in Tabel 7.

Tabel 5: Hoog- en laagwaterstanden bij Gemaal de Koekoek (geïnterpoleerd tussen Schoonhoven en Hagestein benden) in relatie tot de afvoer bij Lobith.

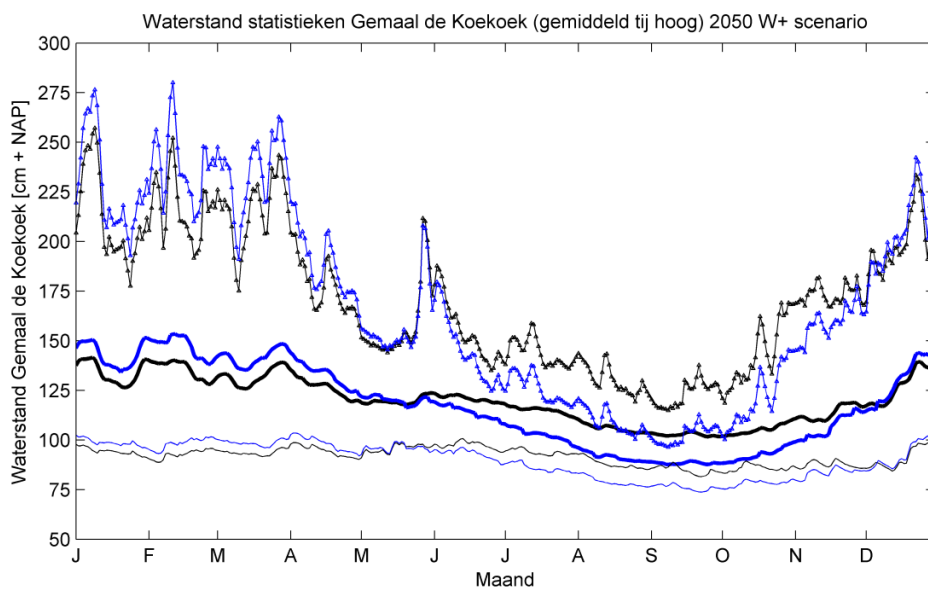
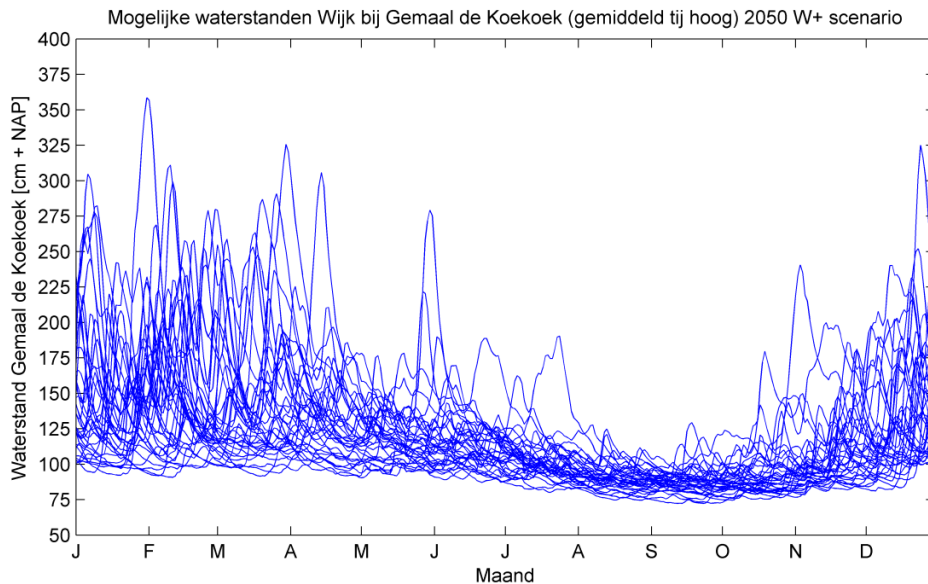
Afvoer Lobith in m ³ /s	Gemiddeld tij Gemaal de Koekoek in cm +NAP	
	HW-stand	LW-stand
700	79	-44
984	83	-40
1400	87	-37
2200	131	20
3500	150	64
5000	183	120
6800	232	187





Figuur 4: Hoog- en laagwaterstanden bij gemiddeld tij bij Gemaal de Koekoek in relatie tot de afvoer bij Lobith.





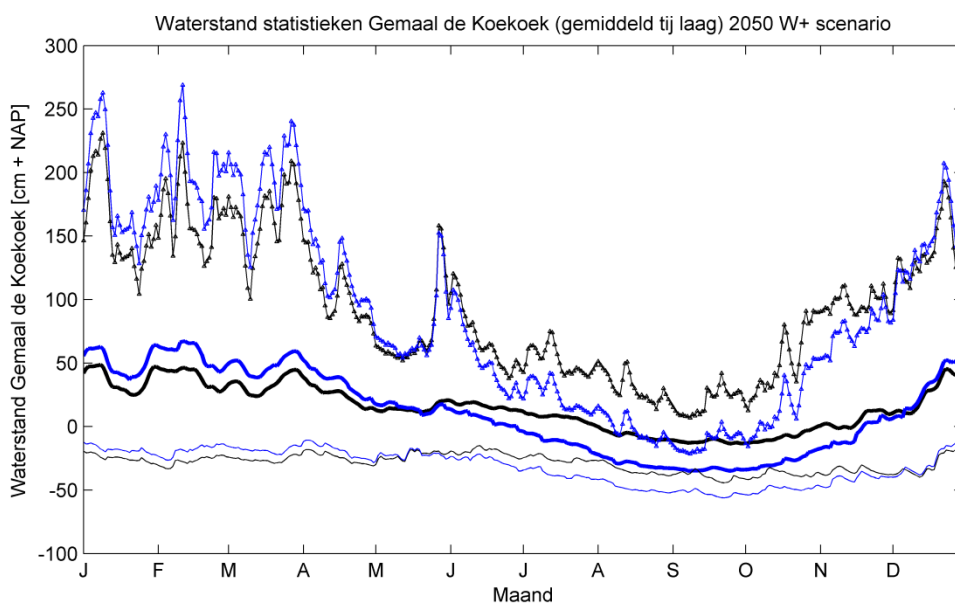
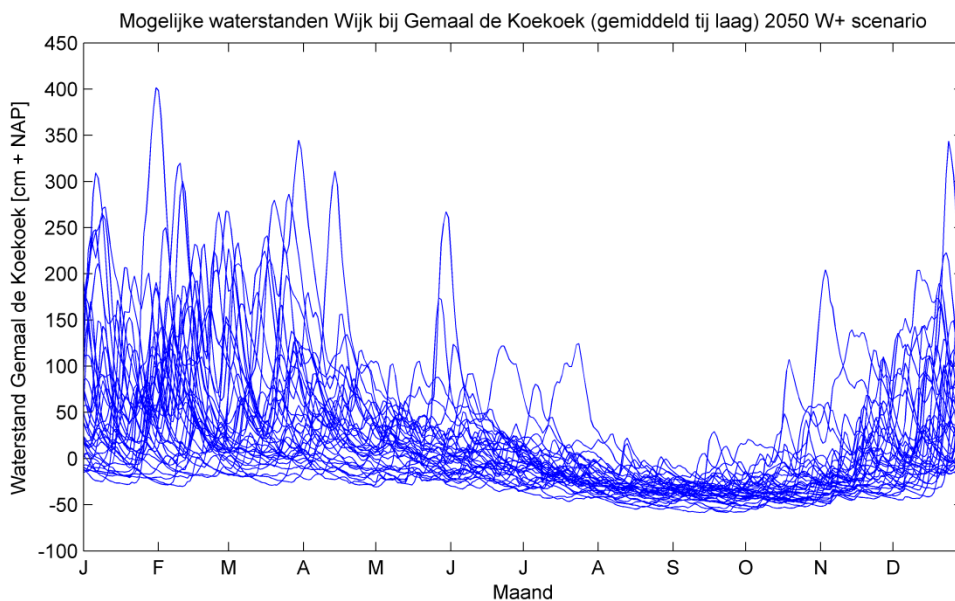
— Gemiddeld huidig — Gemiddeld 2050 W+ — P5 huidig — P95 huidig — P5 2050 W+ — P95 2050 W+

Figuur 5: Boven: mogelijke waterstanden (35 reeksen) die in 2050 bij Gemaal de Koekoek op kunnen treden bij gemiddeld tij hoog. Onder: Statistieken van de huidige waterstanden en de waterstanden rond 2050.

Tabel 6: Statistieken per maand van waterstanden bij Gemaal de Koekoek bij gemiddeld tij hoog water (2050 W+).

	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Gemiddeld	143	147	142	134	120	115	103	92	88	92	106	130
Min	92	91	92	92	90	87	80	75	72	73	77	81
Max	359	357	326	320	279	275	190	131	129	180	241	325
P05	96	93	96	93	93	89	83	76	74	75	79	85
P95	273	273	261	220	206	178	137	119	109	145	171	240





— Gemiddeld huidig — Gemiddeld 2050 W+ — P5 huidig — P5 2050 W+ — P95 huidig — P95 2050 W+

Figuur 6: Boven: mogelijke waterstanden (35 reeksen) die in 2050 bij Gemeaal de Koekoek op kunnen treden bij gemiddeld tij laag. Onder: Statistieken van de huidige waterstanden en de waterstanden rond 2050.

Bij gemiddeld tij hoogwater zal de waterstand in de zomermaanden gemiddeld ca. 15 cm lager zijn als in het huidige klimaat. In de maanden december t/m april wordt de waterstand gemiddeld hoger dan in het huidige klimaat. Dit varieert van ca. 5 tot 15 cm hoger. Voor gemiddeld tij laagwater geldt ongeveer dezelfde situatie. Wederom is de waterstand in de zomermaanden lager dan in het huidige klimaat. Dit kan gemiddeld 25 cm lager zijn dan in de huidige situatie. De waterstanden in de winter kunnen gemiddeld gezien 20 cm hoger worden in vergelijking met het huidige klimaat.



Tabel 7: Statistieken per maand van waterstanden bij Gemaal de Koekoek bij gemiddeld tij laag water (2050 W+).

	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Gemiddeld	51	58	49	36	15	6	-11	-29	-34	-28	-6	30
Min	-28	-30	-29	-28	-31	-36	-46	-55	-58	-58	-52	-45
Max	402	398	345	335	267	261	124	32	29	108	204	344
P05	-22	-26	-22	-26	-27	-32	-41	-52	-56	-54	-48	-40
P95	257	258	237	171	149	105	41	14	-2	53	94	203

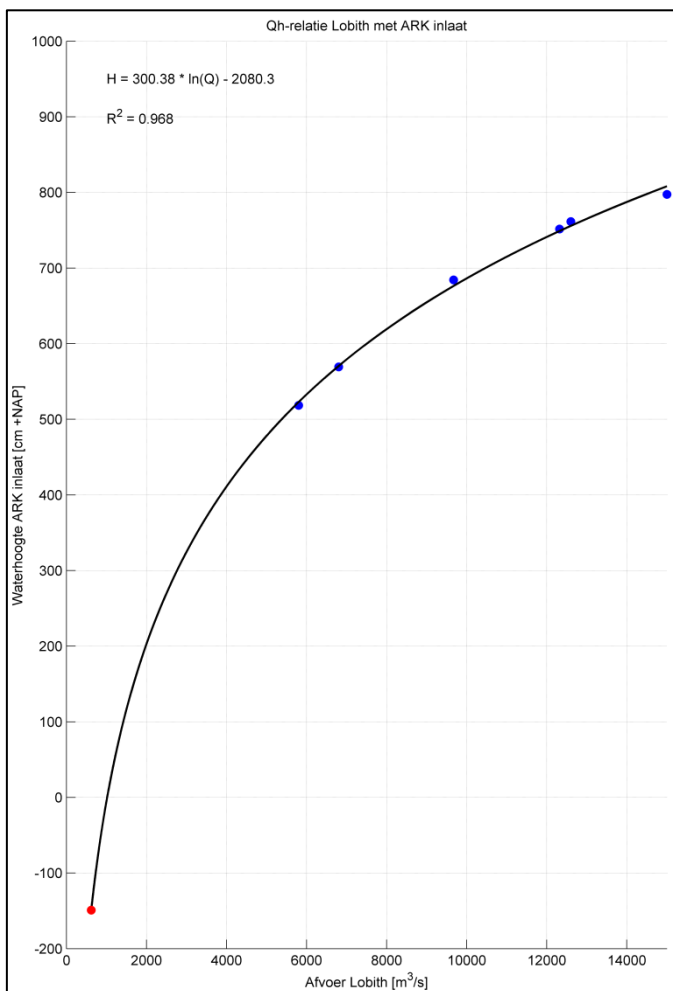
3.4 Waterhoogte ARK inlaat

Uit Tabel 1 blijkt dat voor de ARK geen afvoer en geen waterstanden bekend zijn. Om de waterstand bij de ARK inlaat te bepalen zijn de waterstanden tussen Culemborg brug en Wijk bij Duurstede geïnterpoleerd. Zowel bij Culemborg brug, als bij Wijk bij Duurstede zijn de waterstanden in relatie tot de afvoer bij Lobith bekend (via de waternormalen). De geïnterpoleerde waterstanden bij ARK inlaat in relatie tot de afvoer bij Lobith staan vermeld in Tabel 8. Uit de waarden van deze tabel kan de Qh-relatie tussen Lobith en de ARK inlaat worden afgeleid. Deze Qh-relatie met bijbehorende vergelijking is weergegeven in Figuur 7.

Tabel 8: Waterhoogten bij de ARK inlaat (geïnterpoleerd tussen Culemborg brug en Wijk bij Duurstede) in relatie tot de afvoer bij Lobith.

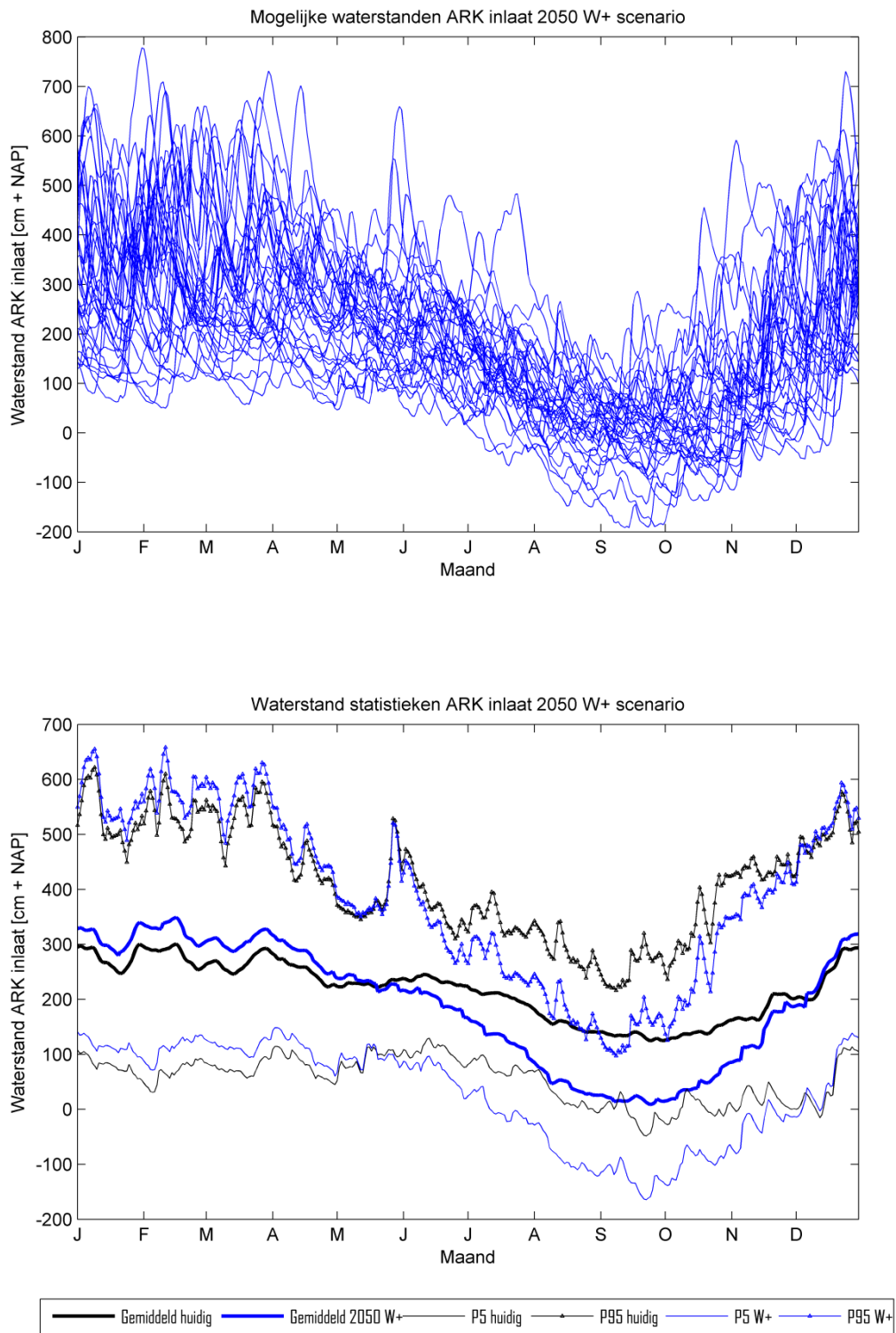
Afvoer Lobith in m ³ /s	Waterhoogte ARK inlaat in cm + NAP
15000	797
12600	762
12320	752
9670	684
6800	569
5800	519





Figuur 7: Qh-relatie Lobith met ARK inlaat. De vergelijking voor het berekenen van de waterhoogte (H) bij een bepaalde afvoer (Q) staat in de grafiek vermeld. De rode cirkel is een berekende waterhoogte.

De mogelijke waterstanden die rond 2050 bij de ARK inlaat kunnen optreden zijn weergegeven in Figuur 8. Het patroon van mogelijke waterstanden rond 2050 is vergelijkbaar met de voorgaande twee punten. Gedurende de maanden december t/m april zien we een gemiddelde toename in de waterstand. Deze toename bedraagt maximaal 50 cm (februari-maart). Gedurende mei t/m november zien we aanzienlijke afname in de gemiddelde waterstand. Met name gedurende augustus t/m oktober kan deze gemiddeld 1 tot 1,5 meter lager zijn dan in het huidige klimaat. In het uitzonderlijke geval is een waterstand van -200 cm +NAP zelfs mogelijk. In Tabel 9 zijn de statistieken van de waterstanden bij de ARK inlaat per maand weergegeven.



Figuur 8: Boven: mogelijke waterstanden (35 reeksen) die in 2050 bij de ARK inlaat op kunnen treden bij gemiddeld tij hoog. Onder: Statistieken van de huidige waterstanden en de waterstanden rond 2050.



Tabel 9: Statistieken per maand van waterstanden bij de ARK inlaat (2050 W+).

	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Gemiddeld	311	327	306	284	231	201	134	49	18	43	138	255
Min	63	50	57	60	46	14	-66	-149	-192	-186	-115	-53
Max	778	776	731	723	660	653	483	294	286	456	591	730
P05	95	72	95	73	67	36	-26	-119	-163	-137	-78	-13
P95	649	647	626	550	516	447	318	239	183	346	432	588



Bijlage 1: Procentuele debiet veranderingen bij Lobith 2050 W+



<i>Decade in het jaar</i>	<i>Verandering (%)</i>	<i>/100</i>	<i>Gemiddelde verandering per jaar (gemiddeld over 73 jaar)</i>
1	13.5	0.135	0.00185
2	12.8	0.128	0.00175
3	16.3	0.163	0.00223
4	16.6	0.166	0.00227
5	20.2	0.202	0.00277
6	17.8	0.178	0.00244
7	17.2	0.172	0.00236
8	17	0.17	0.00233
9	14.3	0.143	0.00196
10	13.9	0.139	0.00190
11	12.3	0.123	0.00168
12	9.4	0.094	0.00129
13	6	0.06	0.00082
14	2.1	0.021	0.00029
15	-3.1	-0.031	-0.00042
16	-7.9	-0.079	-0.00108
17	-11.8	-0.118	-0.00162
18	-16	-0.16	-0.00219
19	-20.1	-0.201	-0.00275
20	-25.5	-0.255	-0.00349
21	-27.9	-0.279	-0.00382
22	-31.8	-0.318	-0.00436
23	-35	-0.35	-0.00479
24	-36.2	-0.362	-0.00496
25	-36.9	-0.369	-0.00505
26	-37.9	-0.379	-0.00519
27	-37.1	-0.371	-0.00508
28	-35.7	-0.357	-0.00489
29	-33.2	-0.332	-0.00455
30	-29.8	-0.298	-0.00408
31	-26.1	-0.261	-0.00358
32	-17.9	-0.179	-0.00245
33	-11.7	-0.117	-0.00160
34	-5.4	-0.054	-0.00074
35	4.8	0.048	0.00066
36	6.8	0.068	0.00093
37	10.1	0.101	0.00138

