



Slim Watermanagement

Nadere uitwerkingen faalkansanalyse
Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij
wateroverlast

Opdrachtgever



HydroLogic

Rijkswaterstaat, Hoogheemraadschap van
Rijnland, Waternet/Waterschap Amstel, Gooi en
Vecht, Hoogheemraadschap Hollands
Noorderkwartier en Hoogheemraadschap De
Stichtse Rijnlanden



Slim Watermanagement

Nadere uitwerkingen faalkansanalyse
Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij
wateroverlast
Eindrapport



Auteurs

C. Vermeulen
M. van den Brink

PR3393.20
januari 2019

Samenvatting

In 2017 is in het project Slim Watermanagement Noordzeekanaal/-Amsterdam-Rijnkanaal (NZK-ARK) gekeken naar de kans van optreden van hoge waterstanden bij wateroverlast op het NZK-ARK, de invloed van klimaatveranderingen hierop en naar mogelijkheden voor Slim Watermanagement. De resultaten uit dit onderzoek gaven aanleiding tot aanvullende en verdiepende vragen over het functioneren van het watersysteem.

Belangrijke conclusie uit de faalkansstudie was dat falen van het gemaal IJmuiden een dominante invloed heeft op het optreden van hoge waterstanden op het NZK-ARK. Het nu uitgevoerde onderzoek laat zien dat de faalkans van IJmuiden aansluit op de ervaring van de beheerder en op de juiste wijze is meegenomen bij de berekening van overschrijdingsfrequentie. Er is daarom geen reden tot bijstelling van de resultaten van de faalkansenstudie uit 2017.

Gevoeligheidsanalyses van de aanvoer naar - en afvoer van – het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bevestigen nogmaals het beeld dat hoge waterstanden op het NZK-ARK vooral optreden in situaties waarin het gemaal IJmuiden faalt. Het realiseren van pompcapaciteit, onafhankelijk van gemaal IJmuiden, om te voorkomen dat alle gemaalcapaciteit tegelijk wegvalt leidt tot een veel kleinere kans op waterstanden boven NAP-0,20 m. Onafhankelijkheid in pompcapaciteit kan worden gerealiseerd als zelfstandige installatie op het bestaande gemaal IJmuiden of elders aan het NZK-ARK. De faalkansen van IJmuiden en Zeeburg hebben dezelfde orde van grootte. Door de grote capaciteit werkt de faalkans van IJmuiden (veel) harder door op de overschrijdingsfrequenties van waterstanden op het NZK-ARK. Het verdelen van de gemaalcapaciteit over onafhankelijke gemalen heeft bovendien een grotere impact dan het verlagen van de faalkans of het vergroten van de gemaalcapaciteit bij IJmuiden met 20 procent.

De locatie van extra pompcapaciteit heeft regionale effecten: voor het ARK en de Amstellandboezem is een gemaal naar de Lek gunstig (hierin is alleen het effect op de overschrijdingsfrequentie in beschouwing genomen; er is niet gekeken naar andere effecten van de locatiekeuze zoals doorspoeling, verzilting, kosten, enzovoort).

Beheer en onderhoud van de pompen heeft effect op de beschikbaarheid van pompen en heeft daardoor een negatief effect op de faalkans van het NZK-ARK. Voor het nadenken over extra pompcapaciteit is het daarom van belang dat beheer en onderhoud van pompen en het daardoor minder beschikbaar zijn van gemaalcapaciteit wordt meegenomen.

De zeespiegelstijging vergroot de kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK. Een zeespiegelstijging van een halve meter reduceert de spuimogelijkheden tot 20% ten opzichte van de huidige situatie. Vanaf één meter is de bijdrage van spuien bij IJmuiden verwaarloosbaar. Bij een zeespiegelstijging van één meter wordt NAP gemiddeld eens in de tien jaar overschreden; met elke halve meter extra zeespiegelstijging neemt de

overschrijdingskans met circa een factor 3 toe (bij 1,5 m zeespiegelstijging 1 keer per 3 jaar en bij 2 meter zeespiegelstijging 1 keer per jaar). Het effect van zeespiegelstijging is zo sterk dat het belangrijk is om de werkelijke stijging nauwkeurig te volgen. Als deze stijging sneller gaat dan waar de huidige klimaatscenario's vanuit gaan, komt de houdbaarheid van het systeem - spuien en malen via een rechtstreekse verbinding naar zee - binnen de levensduur van een nieuw gemaal in het gedrang.

De maatregel 'selectieve onttrekking'¹ is ontworpen als mitigerende maatregel om extra verzilting op het NZK-ARK te voorkomen bij de realisatie van de Nieuwe Grote Zeesluis bij IJmuiden. Het effect van de maatregel 'selectieve onttrekking' op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden NZK-ARK is onderzocht. De berekeningen laten zien dat de maatregel 'selectieve onttrekking' overwegend een negatief effect heeft op de faalkans van het NZK/ARK. Het effect van de selectieve onttrekking op de waterstanden wordt in sterke mate bepaald door de dynamiek van zoet, zout en brak/zilt water op het NZK, het Binnenspuikanaal en het buitenwater. Hierdoor zijn op dit moment geen conclusies te trekken over het effect van selectieve onttrekking op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK. Daarvoor is nader onderzoek nodig naar de dynamiek van zoet, zout en brak/zilt water op het NZK. Aanbevolen wordt de modellering van de maatregel 'selectieve onttrekking' aan te passen door het meenemen van de variatie in de dichtheidsverschillen. Op basis van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse met een sterk vereenvoudigde modellering van de maatregel 'selectieve onttrekking' kan beargumenteerd worden dat de maatregel in afvoersituaties leidt tot een grotere kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK. Extra pompcapaciteit als compenserende maatregel om dit negatieve effect te niet te doen zal niet veel effect hebben, omdat de faalkans van het gemaal dominant is in maatgevende situaties. Beter is het om de extra pompcapaciteit onafhankelijk van het gemaal IJmuiden te realiseren.

¹ In december 2018 wordt gewerkt aan het projectplan voor realisatie van de maatregel selectieve onttrekking. In het projectplan wordt meegenomen dat de noodzaak voor compenserende maatregelen om de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK niet te laten toenemen nog wordt onderzocht.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Leeswijzer	1
2	Faalkans van gemaal IJmuiden	3
2.1	Samenvatting	3
2.2	Inleiding	3
2.3	Modellering faalkansen IJmuiden	4
2.4	Assetmanagement en quick-wins	5
2.5	Gevoeligheidsberekeningen faalduur	6
3	Functioneren watersysteem	9
3.1	Samenvatting	9
3.2	Pompcapaciteit vanaf het NZK-ARK	10
3.2.1	Overschrijdingsfrequentie NZK-ARK	10
3.2.2	Overschrijdingsfrequentie regionale systeem	15
3.3	Afvoer naar het Markermeer onder vrij verval	16
3.4	Veranderingen aanvoer naar het NZK-ARK	19
3.5	Alternatieve afvoer regionale systeem	21
3.6	Ander beheer AGV boezem	23
4	Aanvoer NZK-ARK	25
4.1	Samenvatting	25
4.2	Berekening aanvoerduurlijnen	25
5	Zeespiegelstijging	29
5.1	Samenvatting	29
5.2	Effect zeespiegelstijging op waterstanden NZK-ARK	29
6	Selectieve onttrekking	33
6.1	Samenvatting	33
6.2	Maatregel selectieve onttrekking	33
6.2.1	Verval over SO-middel	34
6.2.2	Invloed van de dichtheidsverschillen	35
6.3	Effect maatregel selectieve onttrekking	36
6.4	Kwalitatieve beschouwing selectieve onttrekking	39

7	Synthese	41
8	Referenties	45
	Bijlagen	47
A	Resultaten berekeningen faalkans IJmuiden	49
B	Resultaten berekeningen pompdebiet	51
C	Resultaten berekeningen verandering aanvoer op NZK-ARK	67
D	Modellering selectieve onttrekking	75
E	Resultaten berekeningen selectieve onttrekking	91
F	Relatie met de vragen uit de projectgroep	99

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In de studie Slim Watermanagement Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal (2017) is een analyse uitgevoerd naar de herhalingstijden van waterstanden op het Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal en op de boezem van Waterschap Amstel, Gooi en Vecht. Deze studie heeft diverse inzichten opgeleverd in de faalkans van het watersysteem (onder falen wordt verstaan het overschrijden van NAP+0,00 m), de afhankelijkheid van het spui- en maalcomplex IJmuiden en het effect van Slim Watermanagementmaatregelen op de faalkans van het watersysteem.

Deze inzichten leidden tot aanvullende vragen. Soms om zaken gedetailleerder in beeld te brengen, soms om nieuwe ontwikkelingen te toetsen en tenslotte ook om de blik te verruimen van de huidige toestand en de mogelijkheden binnen het operationeel beheer (slim watermanagement) naar de 'systeemopgave' op de lange termijn (toekomstbestendig waterbeheer).

De aanvullende vragen zijn door de projectgroep Slim Watermanagement gebundeld tot een aantal analyses naar de mate van beïnvloeding en de gevoeligheid van de faalkans van het NZK-ARK systeem. Deze analyses zijn door HKV/Hydrologic uitgevoerd. De resultaten van de analyses zijn opgenomen in voorliggende rapportage.

Naast de in dit rapport beschreven analyses zijn als onderdeel van dit project ook de slim watermanagement redeneerlijnen geactualiseerd. Deze zijn separaat gerapporteerd (Brink en Coonen, 2018).

1.2 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport komt overeen met de vier hoofdonderwerpen van de uitgevoerde analyses:

- Faalkans van gemaal IJmuiden (H2)
Hier is nader onderzocht in hoeverre de modellering van de kans op falen en de hersteltijden van gemaal IJmuiden plausibel en consistent is
- Functioneren watersysteem (H3)
Er is een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd naar het functioneren van het huidig watersysteem, waarmee meer inzicht verkregen is in de bandbreedte van de eerder verkregen resultaten. Daarnaast is, met het oog op een toekomstbestendig waterbeheer, een aantal berekeningen uitgevoerd met extra afvoercapaciteit bij IJmuiden, Zeesluis Muiden en/of de Beatrixsluizen.
- Aanvoer NZK ARK (H4)
Vanuit de Vervangings- en Renovatieopgave van spui- en maalcomplex IJmuiden is een specifieke vraag gesteld over de te verwachten aanvoer vanuit het gebied onder verschillende omstandigheden.

- Zeespiegelstijging (H5)
Verkenning van de effecten zeespiegelstijging op de overschrijdingsfrequentie van het NZK-ARK.
- Selectieve onttrekking (H6)
Als onderdeel van de realisatie van de Nieuwe Grote Zeesluis bij IJmuiden wordt als mitigerende maatregel een selectieve onttrekking uitgewerkt². In voorliggende studie is het effect van deze maatregel op de faalkans onderzocht.
- Synthese (H7)
Bevindingen uit het onderzoek, gerelateerd aan de bevindingen uit de faalkansstudie uit 2017 (Vermeulen et al, 2017a).

In de bijlagen zijn de rekenresultaten van de DEZY-berekeningen opgenomen. Dit omvat:

- Resultaten berekeningen faalkans IJmuiden (bijlage A)
Details van de berekeningen van overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK bij andere faalkansen en -duren van het gemaal IJmuiden.
- Resultaten berekeningen pompdebiet (bijlage B)
Details van de berekeningen met verschillende uitgangspunten voor de pompcapaciteit vanaf het NZK-ARK, inclusief afvoer onder vrij verval naar het Markermeer.
- Resultaten berekeningen verandering aanvoer op NZK-ARK (bijlage C)
Details van berekeningen met verandering van de aanvoer vanuit de waterschappen naar het NZK-ARK.
- Modellerings selectieve onttrekking (bijlage D)
Beschrijving van de modellering van de maatregel selectieve onttrekking en de wijze waarop dit is geïmplementeerd in DEZY.
- Resultaten berekeningen selectieve onttrekking (bijlage E)
Details van de berekeningen met verschillende aannames voor het spuislot van de sluisluis IJmuiden.
- Relatie met vragen uit de projectgroep (bijlage F)
Toelichting op de interpretatie en beantwoording van de vragen uit de offerteaanvraag.

² In december 2018 wordt gewerkt aan het projectplan voor realisatie van de maatregel selectieve onttrekking. In het projectplan wordt meegenomen dat de noodzaak voor compenserende maatregelen om de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK niet te laten toenemen nog wordt onderzocht.

2 Faalkans van gemaal IJmuiden

2.1

Samenvatting

Op basis van de review concluderen de experts dat de in DEZY gehanteerde modellering van de faalkans van IJmuiden gebaseerd is op relevante gegevens, waarin de belangrijkste faalmechanismen zijn meegenomen. De faalkansen zijn exclusief gepland klein of groot onderhoud. De resulterende faalkansen worden op basis van praktijkervaring plausibel geacht. Dit betekent dat het falen van gemaal IJmuiden goed is meegenomen in de berekeningen van overschrijdingsfrequentie van het NZK-ARK (mogelijk zelfs iets te conservatief aangenomen). Er is geen reden tot bijstelling van de resultaten van de faalkansenstudie uit 2017 (Vermeulen et al, 2017a). Rijkswaterstaat heeft een actieplan opgesteld om de faalduur van gemaal IJmuiden terug te brengen tot maximaal 168 uur (één week). De effecten van deze ambitie zijn doorgerekend door aan te nemen dat faalgebeurtenissen met een hersteltijd van meer dan een week in één week zijn hersteld. Als deze ambitie wordt gerealiseerd neemt de kans van optreden van waterstanden boven NAP-0,20 m af: de kans dat NAP optreedt, gaat van eens in de 72 jaar naar eens in de 92 jaar. Als de ambitie niet volledig wordt gerealiseerd is het effect op de overschrijdingsfrequentie minimaal.

De meest robuuste oplossing voor het verkleinen van de impact van falen van gemaal IJmuiden op de faalkans van NZK-ARK is het realiseren van een tweede gemaal dat onafhankelijk functioneert van gemaal IJmuiden (eigenlijk de kans verkleinen dat alle gemaalcapaciteit tegelijk langdurig uitvalt). Voor de huidige situatie bij IJmuiden is dat lastig te realiseren, maar het is wel een belangrijk aandachtspunt voor de Vervanging en Renovatie gemaal IJmuiden en voor het traject Toekomstbestendig NZK-ARK).

2.2

Inleiding

De faalkans van het gemaal en spuisluis IJmuiden heeft een dominante invloed op de faalkans van waterstanden op het Noordzeekanaal. Over de faalkans en de invloed op het optreden van hoge waterstanden is veel discussie (geweest) en is aanleiding tot veel vragen. Immers, voor een lagere faalkans van het ARK/NZK systeem als geheel is investeren in het verbeteren van de faalkans IJmuiden een effectieve maatregel.

Hoge waterstanden op het NZK-ARK treden met name op in situaties waarin het gemaal IJmuiden langdurig faalt. De herhalingstijd van het bereiken van NAP+0,00m bedraagt in het geval van het meenemen van het falen van IJmuiden 72 jaar. Wordt de faalkans van het complex buiten beschouwing gelaten, is de herhalingstijd van diezelfde waterstand 3737 jaar.

Gezien deze grote invloed is een analyse uitgevoerd, waarbij de volgende vragen aan de orde zijn gekomen:

- is de manier waarop de faalkans en de hersteltijden in DEZY is gemodelleerd plausibel?
- In hoeverre zijn verschillende typen onderhoud (klein, groot) in de faalkans meegenomen?
- Zijn er quick-wins te identificeren, waarmee de faalkans significant verlaagd kan worden?

De analyse is uitgevoerd door een gezamenlijke review van de faalkansmodellering door experts van DEZY (HKV), faalkansmodellering IJmuiden (Delta Pi), de assetmanager IJmuiden (RWS WNN) en twee vertegenwoordigers vanuit de begeleidende projectgroep. Ter ondersteuning is daarna met DEZY de gevoeligheid bepaald van het terugbrengen van de maximale herstelduur.

2.3

Modellering faalkansen IJmuiden

De faalkansen zoals gebruikt in DEZY zijn ontleend aan een memo en de onderliggende gegevens van Delta Pi (2016). Deze gegevens zijn verzameld en gebruikt voor het opstellen van de instandhoudingsplannen (t.b.v. prestatiegestuurd beheer van het gemaal).

Er worden in het algemeen vier 'typen' falen onderscheiden:

1. Techniek;
2. Software;
3. externe oorzaken (bijv. bliksem/brand, stroomstoring);
4. menselijk falen.

Voor de instandhoudingsplannen is alleen gekeken naar falen van de techniek. Daarnaast zijn specifiek voor de analyse van waterstanden NZK-ARK, beknopte analyses van Common Cause Failure (CCF) en de externe gebeurtenis brand uitgevoerd. Brand wordt verondersteld de meest dominante externe gebeurtenis te zijn. De faalkansen van het gemaal & spuisluis IJmuiden t.g.v. CCF en brand zijn opgenomen in de memo van Delta Pi uit 2016. De gehanteerde faalkansen zijn daarom falen van de pomp op moment dat je deze wil inzetten; *onderhoud valt hier dus niet onder*. De experts van Delta Pi schatten in dat voor gemaal en spuisluis het falen van de techniek dominant is boven de andere faalmechanismen.

Voor de faalkansen en -duren is – samen met specialisten van RWS – zowel voor een 'oude' pomp (1 t/m 4) als een 'nieuwe' pomp (5 en 6) gekeken naar wat kan falen. De 'kans' is bepaald op basis van expertschattingen van de levensduur (MTTF); de faalduur op basis van expertschattingen van reparatieduur (MTBF). Vervolgens zijn de gebeurtenissen samengevoegd in de verschillende faalmodi. Delta Pi heeft een spreadsheet (ook in memo van 2016 opgenomen) met alle onderscheiden faalgebeurtenissen. Uit de getallen blijkt dat er gemiddeld eens per maand een storing optreedt. Deze frequentie wordt vanuit het assetmanagement herkend, waarbij wordt opgemerkt dat

dit ook storingen met een korte herstelduur betreft en dat lang niet elke storing effect heeft op de waterstand van het NZK.

De faalkansen en -duren zijn bepaald vanuit een beheer oogpunt: als er een storing is wordt de pomp teruggebracht in de 'originele' staat. Er is dus sprake van volledig herstel van de pomp; noodmaatregelen t.b.v. functioneel herstel is in de beschouwing niet meegenomen. Dit betekent dat de overschrijdingskansen van het NZK-ARK worden overschat. De kansen zijn bepaald onder de aanname dat er fatsoenlijk preventief onderhoud wordt gevoerd: in de huidige situatie naar de mening van de experts een verantwoord uitgangspunt. Overigens is in de analyse niet-acuut falen (o.a. corrosie) wel meegenomen. Dit is echter slechts op een beperkt aantal gebeurtenissen/faalmodi van toepassing en is van beperkte invloed op de faalkans als geheel, zeker die van gebeurtenissen met een lange faalduur.

Gepland onderhoud

In 2017 is een separate analyse uitgevoerd naar het effect van gepland onderhoud op de faalkans van het NZK-ARK systeem. Het meenemen ervan is als optie aan DEZY toegevoegd.

In de analyses die zijn uitgevoerd naar de faalkans van het NZK-ARK in 2017 en ook in voorliggend rapport is het gepland onderhoud buiten beschouwing gelaten. De belangrijkste redenen hiervoor zijn dat het effect beperkt is (het gaat bij onderhoud immers bijna altijd om één pomp tegelijk, terwijl het falen van het systeem gedomineerd wordt door gebeurtenissen waarbij meerdere pompen gelijktijdig falen) en dat het modelleren van het onderhoud (met name het moment) dwingt tot arbitraire keuzes, terwijl in de praktijk bij het kiezen van het moment ook rekening wordt gehouden met afvoerverwachtingen.

In het probabilistisch model DEZY wordt gerekend met perioden van dertig dagen. Voor het gemaal wordt een maximale faalduur van 1 maand aangehouden, hetgeen betekent dat faalduren van een maand en langer zijn samengenomen in DEZY. In de modellering van DEZY worden in de periode van 30 dagen 5 momenten gehanteerd waarin wel/niet falen kan optreden.

2.4

Assetmanagement en quick-wins

Vanuit het assetmanagement is voor het complex IJmuiden een actieplan opgesteld. Onderdeel van dit actieplan is het doel om de maximale faalduur terug te brengen tot 168 uur (1 week). Een maximale faalduur van 168 uur wordt door de expert faalkansmodellering niet haalbaar geacht. Er blijven faalgebeurtenissen – zoals brand op het gemaal – die altijd een lange reparatietijd hebben.

Voor de hand liggende maatregelen (quick-wins) om de faalduur te verkleinen, zoals redundantie en op het op voorraad houden van belangrijke onderdelen, zijn al in werking of opgenomen in het actieplan. De inschatting is dat dit belangrijke maatregelen zijn, met name voor kortdurende

storingen, maar weinig invloed hebben op de kans van optreden van hoge waterstanden op het NZK-ARK. Aan langdurende faalduren (30 dagen of meer) liggen complexe(re) oorzaken ten grondslag met een relatief lange herstelduur als gevolg.

2.5

Gevoeligheidsberekeningen faalduur

Ter indicatie van het effect van het terugbrengen van de faalduur zijn in DEZY twee gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd:

1. Maximale faalduur 1 week;
2. Kans op faalduur langer dan 1 week gehalveerd.

Hierbij zijn de faalkansen van de gebeurtenissen met een faalduur van één week of langer aangepast (zie Tabel 1).

*Tabel 1
Faalkansen bij
ambitieniveaus.*

Berekening	Faalduren tot 1 week	Faalduur 1 week	Faalduren langer dan 1 week
Referentie	P_1	P_2	P_3
Maximale faalduur 1 week	P_1	$P_2 + P_3$	0
Kans op faalduren langer dan 1 week gehalveerd	P_1	$P_2 + 0,5P_3$	$0,5P_3$

Hierbij geeft de eerste optie het effect weer van het volledig realiseren van de ambitie. Bij de tweede optie wordt er vanuit gegaan dat het lukt om in de helft van de gevallen de faalduur te beperken tot een week.

Resultaten

Het verkorten van de hersteltijd bij falen van het gemaal IJmuiden heeft effect op de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden op het NZK-ARK, waterstanden boven NAP-0,20 m. Opvallend hierbij is dat als de ambitie om de hersteltijd terug te brengen voor de helft wordt gerealiseerd dat dit nauwelijks invloed heeft op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden tot NAP, zie Figuur 1 en Tabel 2.

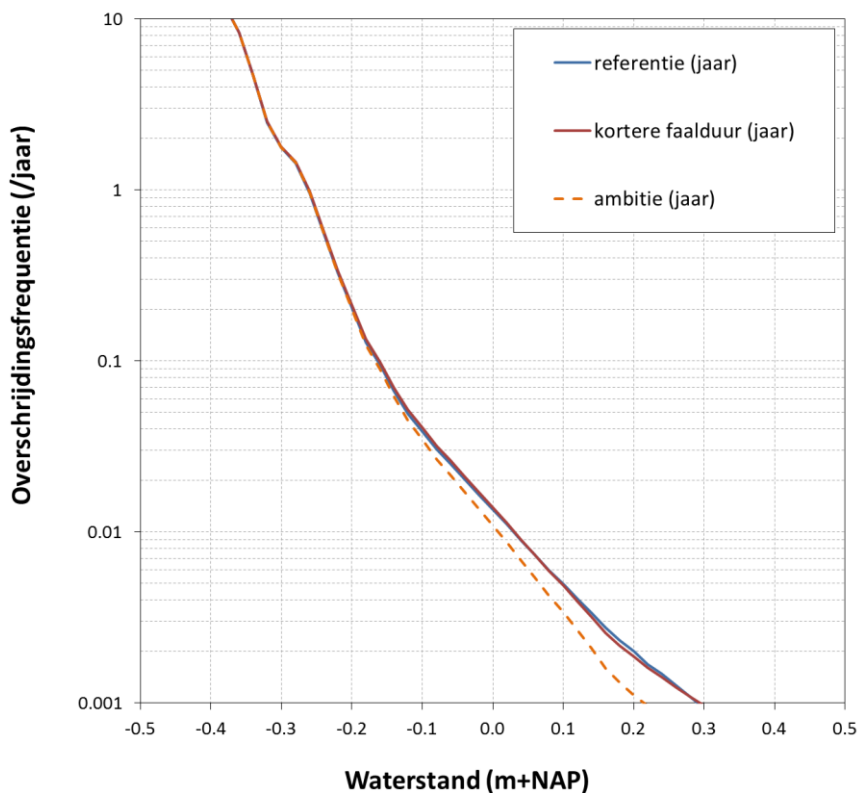
*Tabel 2
Herhalingstijden van
waterstanden voor
verschillende
faalduren van
gemaal IJmuiden.*

waterstand	huidig	NZK-ARK		Amstellandboezem		
		maximale faalduur	kans faalduur langer dan 1 week	maximale faalduur	kans faalduur langer dan 1 week	
		1 week	week gehalveerd	1 week	week gehalveerd	
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	5	5	5	5	5	5
NAP-0,1 m	25	29	25	27	27	26
NAP+0,0 m	72	92	72	85	89	83

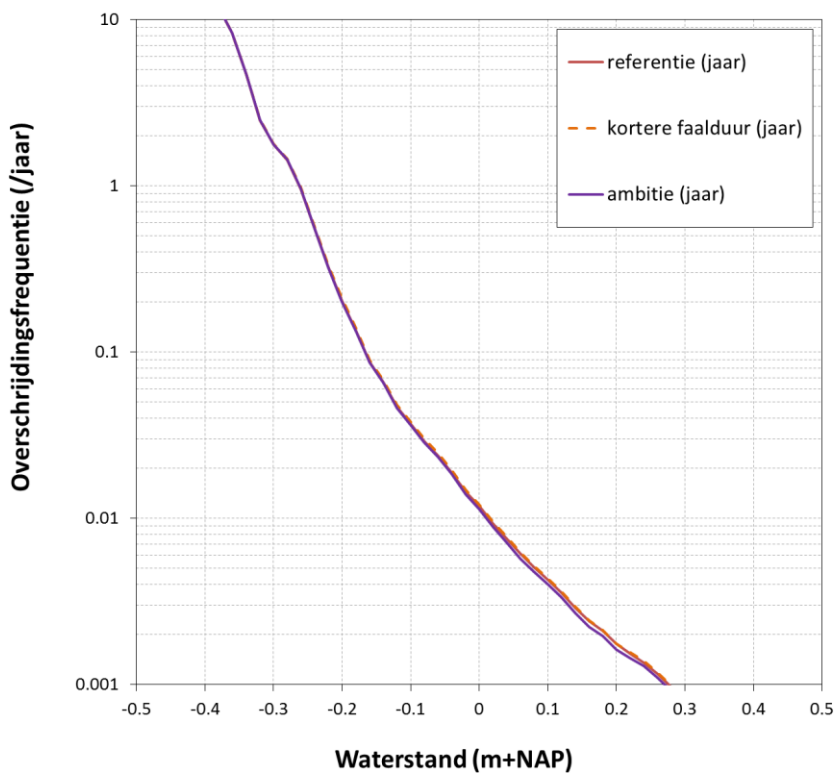
Uitval van het gemaal IJmuiden langer dan een week blijft, ondanks de kleinere faalkansen een belangrijke bijdrage geven aan het optreden van hoge waterstanden. Daarnaast wordt de bijdrage van falen met herstelduur van een week uiteraard belangrijker: primair omdat de kans daarop groter is (in de berekeningen is uitgegaan dat de kans op een faalgebeurtenis gelijk blijft, alleen de herstelduur bij falen is aangepast, zie Tabel 1), maar ook omdat

een week uitval van het gemaal een belangrijke invloed heeft op de waterstanden.

*Figuur 1
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK voor verschillende faalkansen gemaal IJmuiden.*



*Figuur 2
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem voor verschillende faalkansen gemaal IJmuiden.*



De kortere hersteltijden hebben nauwelijks effect op de gemiddelde waterstanden op de Amstellandboezem. Dit is verklaarbaar omdat de kortere herstelduur pas effect hebben op de waterstanden op het NZK-ARK boven NAP-0,20 m en dan is de Amstellandboezem afgesloten van het NZK-ARK.

3 Functioneren watersysteem

3.1

Samenvatting

In dit hoofdstuk komt een aantal gevoeligheidsberekeningen aan bod naar het functioneren van het NZK-ARK systeem en van enkele beheeropties en toekomstige maatregelen.

- Veranderingen in afvoer vanaf het NZK-ARK;
- Veranderingen in de aanvoer naar het NZK-ARK;
- Ander beheer van de AGV boezem.

In de eerste plaats zijn berekeningen uitgevoerd met verschillende maximale pompcapaciteiten bij gemaal IJmuiden. Ook is onderzocht wat het effect is van het splitsen van de gemaalcapaciteit over meerdere onafhankelijke objecten - waarbij de kans op gelijktijdig falen zeer klein is. Tenslotte is ook een verkenning uitgevoerd naar het effect van verschillende locaties van een eventueel tweede afvoerpunt.

Uit deze analyse komt naar voren dat het splitsen van de afvoercapaciteit over twee objecten de faalkans van het NZK-ARK sterk verbetert. De faalkansen van IJmuiden en Zeeburg zijn van dezelfde orde van grootte. Door de grote capaciteit werkt de faalkans van gemaal IJmuiden (veel) harder door op de overschrijdingsfrequenties van waterstanden op het NZK-ARK. Een onafhankelijke extra gemaalcapaciteit heeft daarom een groter effect op het omlaag brengen van de overschrijdingsfrequentie; het handhaven van de huidige maalcapaciteit verdeeld over twee objecten is voor de overschrijdingsfrequentie gunstiger dan het uitbreiden van de maalcapaciteit bij IJmuiden met 20 procent.

Uit de verkenning naar de regionale effecten van de locatiekeuze van een tweede afvoerpunt komt naar voren dat een locatie aan de zuidkant van het NZK-ARK, bijvoorbeeld nabij de Beatrixsluizen, voor de overschrijdingsfrequentie van het watersysteem als geheel gunstiger is dan een locatie aan de noordkant, bijvoorbeeld Muiden, omdat er minder verhang nodig is op het ARK om dezelfde hoeveelheid water af te voeren. Hierbij is geen rekening gehouden met andere effecten, zoals de zouttong op het ARK, of andere overwegingen die een rol spelen bij een locatiekeuze (bereikbaarheid, energievoorziening, investerings- en exploitatiekosten, etc.).

Als tweede gevoeligheidsanalyse is het effect van een aantal maatregelen verkend:

- **Afvoer naar het Markermeer**
Verkend is wat het effect is van het afvoeren via de Oranjesluizen, naast de reguliere afvoer via Muiden naar het Markermeer. De berekeningen

laten zien dat deze extra afvoer gunstig is voor zeer extreme omstandigheden (vanaf een waterstand van NAP -0,15 op het NZK). Voor meer reguliere waterstanden is het effect op de herhalingstijden klein, omdat de waterstand op het Markermeer meestal te hoog is om veel water af te voeren met huidige kunstwerk. Dit neemt niet weg dat extra afvoer benut kan worden - en gunstig is - wanneer de mogelijkheid zich voordoet. De eventuele effecten op de waterkwaliteit op het Markermeer zijn in deze studie niet meegenomen.

- **Verminderen van de aanvoer naar het NZK-ARK**

Verkend is de gevoeligheid van het NZK-ARK systeem voor de gezamenlijke afvoercapaciteit (vanuit het NZK-ARK geredeneerd: aanvoercapaciteit) van de regionale watersystemen. Verminderen van de gezamenlijke afvoercapaciteit heeft meer effect dan een extra pompcapaciteit van gemaal IJmuiden. Dit wil zeggen dat het vergroten van een regionaal (boezem)gemaal met bijvoorbeeld 30 m³/s niet automatisch gecompenseerd kan worden met een uitbreiding van gemaal IJmuiden met 30 m³/s.

- **Ander beheer AGV boezem**

Het permanent afsluiten van Amstelland van het NZK-ARK heeft voor de huidige situatie een positief effect op waterstanden op het NZK-ARK. Het permanent afsluiten van de Vechtboezem is met het bestaande rekenmodel DEZY niet mogelijk. Aanbevolen wordt rekenmodel DEZY aan te passen om dit effect te kunnen kwantificeren.

3.2

Pompcapaciteit vanaf het NZK-ARK

Gemaal IJmuiden is het belangrijkste kunstwerk voor het waterbeheer van het NZK-ARK. Uitval van één of meer pompen van dit gemaal heeft direct effect op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK. In dit hoofdstuk wordt het effect van extra pompen (steeds met een capaciteit van 50 m³/s, overeenkomstig met een 'nieuwe' pomp van gemaal IJmuiden) gekwantificeerd. In eerste instantie wordt gekeken naar het effect op de gemiddelde waterstand op het NZK-ARK en op de Amstellandboezem. Voor de overschrijdingsfrequentie van *gemiddelde* waterstanden op het NZK-ARK maakt het niet uit waar de pompcapaciteit is geplaatst (paragraaf 3.2.1). Bij de locatiekeuze zullen andere effecten (o.a. chlorideconcentratie op het ARK) en lokale effecten een belangrijke rol spelen.

In een vervolgstap zijn de lokale effecten van een extra gemaal op het regionale systeem in beeld gebracht (paragraaf 3.2.2) binnen boezemgebied van AGV en op het zuidelijk deel van het Amsterdam-Rijnkanaal.

3.2.1

Overschrijdingsfrequentie NZK-ARK

Voor de gemiddelde waterstand op het NZK-ARK maakt het niet uit waar de beschikbare gemaalcapaciteit is geplaatst, omdat gerekend wordt met gemiddelde waterstanden op het NZK-ARK. Wel is belangrijk of de extra pompcapaciteit onafhankelijk van gemaal IJmuiden kan functioneren, zodat

in geval van falen van gemaal IJmuiden in ieder geval een deel van de pompcapaciteit nog beschikbaar is. Vergelijk gemaal Zeeburg: als gemaal IJmuiden faalt dan kan gemaal Zeeburg nog afvoeren (naar het Markermeer). De kans dat gemaal Zeeburg tegelijk met gemaal IJmuiden faalt, is bijzonder klein.

Gekeken is naar situaties met een totale pompcapaciteit vanuit het NZK-ARK van 210, 260, 310 en 360 m³/s. Hierbij is ook de situatie beschouwd waarin de pompcapaciteit 50 m³/s minder is dan in de huidige situatie. Als de extra pompcapaciteit bij gemaal IJmuiden wordt geplaatst gaan we uit van een gecorrleerde faalkans: als gemaal IJmuiden faalt, faalt ook de extra pompcapaciteit. In de berekeningen is de extra pompcapaciteit, onafhankelijk van gemaal IJmuiden, meegenomen als een uitbreiding van de pompcapaciteit van gemaal Zeeburg en daarmee volledig gecorrleerd met de faalkans van gemaal Zeeburg (zie ook Tabel 3). De faalkansen van gemaal Zeeburg zijn vergelijkbaar met de faalkansen van gemaal IJmuiden (Vermeulen et al, 2017b). Het IJ-front blijft hierbij open, anders wordt bij hoge waterstanden alleen de Amstelboezem bemalen. Extra pompcapaciteit onafhankelijk van IJmuiden betekent in praktijk dat er drie onafhankelijk opererende gemalen zijn (IJmuiden, Zeeburg en de extra pompcapaciteit), waardoor in de berekeningen de overschrijdingsfrequentie iets worden overschat.

*Tabel 3
Overzicht
berekeningen
afvoercapaciteit van
het NZK in termen
van capaciteit en
faalkans*

Totale pompcapaciteit	Pompcapaciteit	Extra pompcapaciteit	Faalkans situatie
	IJmuiden		
210 m ³ /s	210 m ³ /s	--	afhankelijk
260 m ³ /s	260 m ³ /s	--	afhankelijk
	210 m ³ /s	50 m ³ /s	onafhankelijk
310 m ³ /s	310 m ³ /s	--	afhankelijk
	260 m ³ /s	50 m ³ /s	onafhankelijk
360 m ³ /s	260 m ³ /s	100 m ³ /s	onafhankelijk

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal

In Tabel 4 zijn de herhalingstijden van overschrijden van gemiddelde waterstanden (per jaar) weergegeven voor verschillende afvoercapaciteiten, de overschrijdingsfrequentie van de gemiddelde waterstand is weergegeven in Figuur 3. De configuraties waarin de extra pompcapaciteit onafhankelijk functioneert van gemaal IJmuiden leiden tot een aanzienlijk lagere overschrijdingsfrequentie³, anders gezegd de herhalingstijd van overschrijden neemt sterk toe. Uitgaande van de huidige situatie betekent één pomp onafhankelijk van gemaal IJmuiden (situatie '210+50' versus '260') een sterke afname van de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK. De berekeningen bevestigen de meerwaarde van onafhankelijkheid

³ De gemiddelde herhalingstijd en de overschrijdingsfrequentie zijn elkaars reciproke: herhalingstijd = 1/overschrijdingsfrequentie. Uitdrukkelijk wordt de gemiddelde herhalingstijd genoemd: een herhalingstijd van 10 jaar betekent dat tussen twee opeenvolgende gebeurtenissen gemiddeld tien jaar ligt. Het kan best voorkomen dat de tijd tussen de gebeurtenissen korter, of juist langer is. Over een lange periode beschouwd zal het gemiddelde tien jaar zijn.

in faalkansen van de pompen. Dit is conform verwachting omdat uit Vermeulen et al (2017a) al bekend is dat het optreden van hoge waterstanden op het NZK-ARK gedomineerd wordt door het falen van gemaal IJmuiden.

Tabel 4
Herhalingstijd van overschrijden gemiddelde waterstanden op het NZK-ARK bij verschillende pompcapaciteiten op het NZK-ARK.

waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal					
	pompcapaciteit in m ³ /s					
	210	210+50	260	260+50	310	260+100
NAP-0,3 m	0	1	1	2	1	3
NAP-0,2 m	2	14	5	60	23	110
NAP-0,1 m	5	100	25	157	68	314
NAP+0,0 m	15	286	72	355	177	704

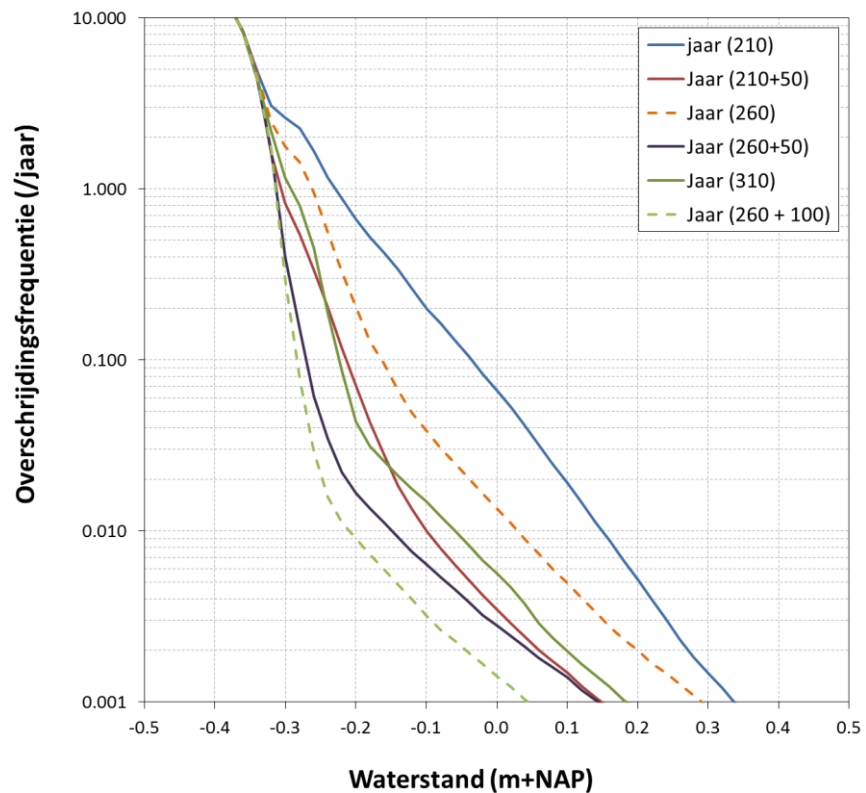
Het effect van extra pompcapaciteit op het NZK-ARK heeft een significant effect op de overschrijdingsfrequentie van de gemiddelde waterstand op het NZK-ARK. Pompcapaciteit van 310 m³/s in IJmuiden betekent een ruime verdubbeling van de herhalingstijd. Eén extra pomp van 50 m³/s, waarvan het falen onafhankelijk is van gemaal IJmuiden) betekent een factor 4 in de herhalingstijden. Twee extra pompen onafhankelijk van gemaal IJmuiden, dus 100 m³/s extra, betekenen bijna een factor 10 ten opzichte van de huidige situatie (en bijna een factor 2 ten opzichte van één pomp extra). Belangrijkste oorzaak hiervan is dat de relatief grote pompcapaciteit van gemaal IJmuiden zodat falen van gemaal IJmuiden de afvoermogelijkheden van het NZK-ARK sterk beperkt.

In de berekeningen is de extra pompcapaciteit, onafhankelijk van gemaal IJmuiden, meegenomen als een uitbreiding van de pompcapaciteit van gemaal Zeeburg en daarmee volledig gecorreleerd met de faalkans van gemaal Zeeburg. Als de beschikbaarheid van de extra 50 m³/s (of 100 m³/s) onafhankelijk is van gemaal IJmuiden en van gemaal Zeeburg zal het effect nog positiever zijn, maar dat effect is beperkt omdat de kans op gelijktijdig falen van gemaal IJmuiden en gemaal Zeeburg zeer klein is.

Aanbevolen wordt om waar mogelijk pompcapaciteit onafhankelijk te installeren zodat bij falen van het gemaal niet alle pompcapaciteit wegvalt. Dit kan gerealiseerd worden door pompcapaciteit op andere locaties dan IJmuiden te realiseren, maar mogelijk kan in het project "Vervanging en Renovatie gemaal IJmuiden" dit aspect expliciet in het ontwerp worden meegenomen.

Minder afvoercapaciteit vanuit het NZK-ARK is geen reële optie. De berekeningen geven aan dat waterstanden op het NZK-ARK boven NAP-0,20 m dan gemiddeld eens per 2 jaar optreden en gemiddeld eens in de 15 jaar NAP bereiken. Tijdens beheer en onderhoud van het gemaal is een pomp over langere tijd niet beschikbaar. Deze berekening met minder afvoercapaciteit geeft een bovengrensbepaling (namelijk de situatie dat er altijd één pomp in onderhoud is): de faalkans gaat van gemiddeld eens in de 72 jaar naar eens in de 15 jaar. Aanbevolen wordt bij de vervanging en renovatie van complex IJmuiden rekening te houden met beheer en onderhoud van het gemaal.

*Figuur 3
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK bij verschillende pompcapaciteiten.*



Opvallend is dat de situaties '310' en '210+50' elkaar tweemaal kruisen. De verklaring hiervoor ligt waarschijnlijk in de verschillende faalkansen voor IJmuiden en Zeeburg (inclusief extra pompcapaciteit), in combinatie met het afsluiten van de Amstellandboezem boven NAP-0,20 m.

Pompcapaciteit en faalkans gemaal IJmuiden

- De faalkansen van IJmuiden en Zeeburg zijn ordegrrootte gelijk/ontlopen elkaar niet veel;
- Door de groter capaciteit werkt de faalkans van gemaal IJmuiden (veel) harder door op de overschrijdingsfrequenties van het peil.
- Onafhankelijke extra gemaalcapaciteit heeft (daarom) een groter effect op het omlaag brengen van de overschrijdingsfrequentie; het handhaven van de huidige maalcapaciteit verdeeld over twee objecten is voor de overschrijdingsfrequentie gunstiger dan het uitbreiden van de maalcapaciteit bij IJmuiden met 20 procent;
- Verdelen van de gemaalcapaciteit over onafhankelijke gemalen heeft een grotere impact dan het verlagen van de faalkans of het vergroten van de gemaalcapaciteit bij IJmuiden.

Amstellandboezem

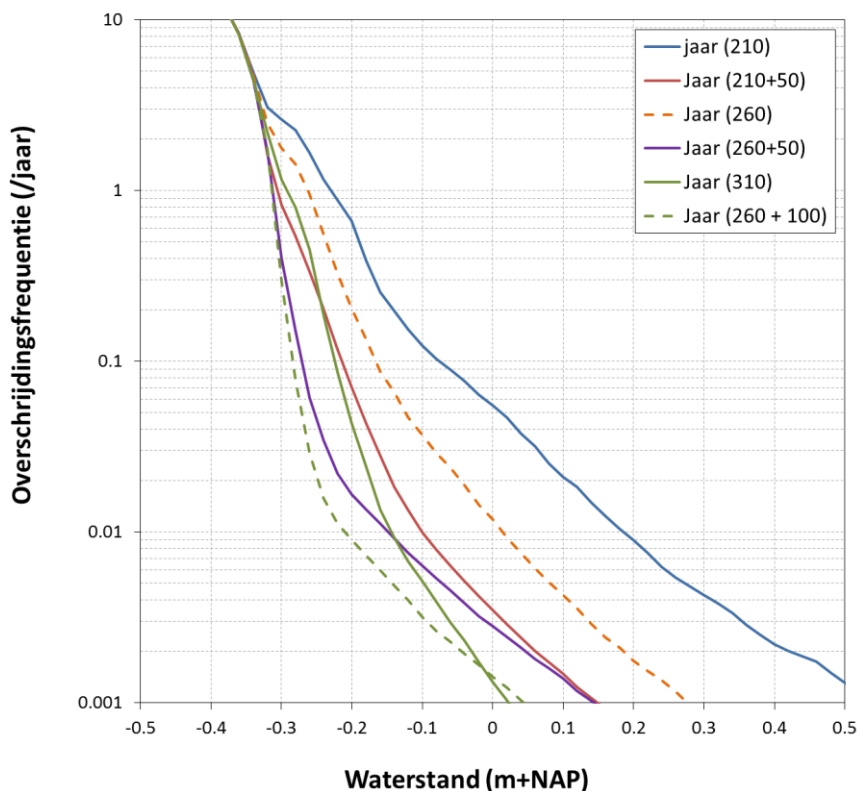
Voor de gemiddelde waterstand in de Amstellandboezem is (extra) pompcapaciteit onafhankelijk van gemaal IJmuiden uiteraard ook gunstig. Tot en met NAP-0,20 m zijn de resultaten gelijk aan het effect op het ARK-NZK door de open verbinding en profiteert Amstelland van de lagere overschrijdingsfrequentie op het NZK-ARK. Bij hoge waterstanden wordt de Amstellandboezem afgesloten van het NZK-ARK en is de extra gemaalcapaciteit extra gunstig. De duur van waterstanden boven NAP-0,20 m neemt af, waardoor de Amstellandboezem minder vaak gesloten hoeft te worden. Dit heeft een positief effect op de herhalingstijden van de Amstellandboezem.

Minder afvoercapaciteit op het NZK-ARK heeft ook voor de Amstellandboezem als consequentie dat hoge waterstanden frequent zullen optreden. Afsluiten van de Amstellandboezem bij een waterstand van NAP-0,20 m heeft maar zeer beperkt effect op de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden.

Tabel 5
Herhalingstijd van overschrijden gemiddelde waterstanden op de Amstellandboezem bij verschillende pompcapaciteiten op het NZK-ARK.

waterstand	Amstellandboezem pompcapaciteit in m ³ /s					
	210	210+50	260	260+50	310	260+100
NAP-0,3 m	0	1	1	2	1	3
NAP-0,2 m	2	14	5	60	23	110
NAP-0,1 m	8	100	27	157	193	314
NAP+0,0 m	18	286	85	355	759	704

Figuur 4
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem bij verschillende pompcapaciteiten.

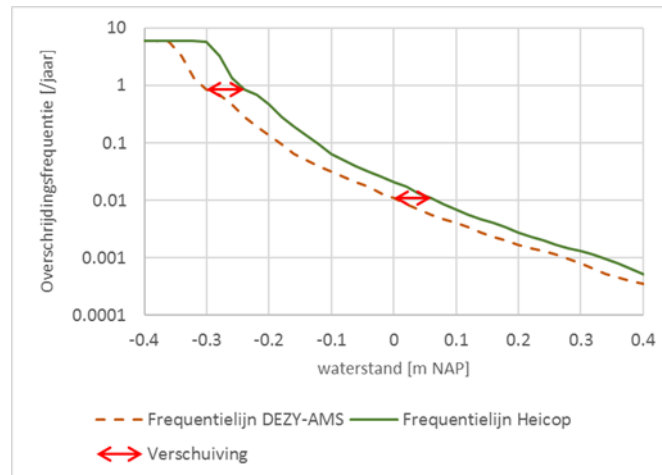


3.2.2

Overschrijdingsfrequentie regionale systeem

De overschrijdingsfrequenties in het regionale systeem (AGV en/of zuidelijk ARK) worden berekend met 'Sobek'. Een Sobek-berekening bestaat uit het doorrekenen van 16 losse gebeurtenissen, die in de faalkansstudie zijn geselecteerd uit de DEZY-resultaten (Vermeulen et al, 2017b) en de relevante elementen uit een gebeurtenis (seizoen, buivolume, ...) zo breed mogelijk afdekken. De berekende waterstandsverlopen worden voor 12 uitvoerlocaties omgezet naar een 'gemiddelde maximale verschuiving' ten opzichte van het door DEZY berekende referentiepunt (NZK of Amstelboezem). De met DEZY afgeleide frequentielijnen worden aldus 'vershoven' tot een frequentielijn voor het uitvoerpunt. Zie Figuur 5.

*Figuur 5
Illustratie
berekening
overschrijdingsfre-
quenties regionale
systeem.*



Voor details wordt verwezen naar het achtergrondrapport van de faalkansstudie uit 2017 (Vermeulen et al, 2017b).

In Tabel 6 is de herhalingstijd gegeven van een waterstand van NAP +0,00m voor de verschillende doorgerekende varianten en voor 11 uitvoerlocaties op het ARK en op de boezem van AGV.

*Tabel 6
Herhalingstijd
waterstanden in het
beheergebied van
AGV en het zuidelijk
deel van het ARK.*

locatie	Herhalingstijden NAP +0,00m				
	pompcapaciteit in m ³ /s				
	260 Ref	210+50 Beatrix	210+50 Muiden	260+50 Beatrix	260+50 Muiden
Amsterdam Oost	115	280	278	333	333
Amstel Ouderkerk	83	259	230	304	263
Abcoude	44	177	139	239	204
Uithoorn	71	256	205	284	224
Amstelkade	58	231	186	240	201
Groote Heicop	38	185	134	235	164
Vreeland	31	170	193	233	223
Maarsseveen	15	130	103	182	120
ARK bij Leidsche Rijn		178	114	228	133
ARK bij Zuidersluis		176	115	224	133
ARK bij Irenesluizen		135	63	174	111

Uit Tabel 6 blijkt, in overeenstemming met de resultaten uit de vorige paragraaf, dat het splitsen van de afvoermogelijkheden over twee objecten - met bijbehorende onafhankelijke faalkansen - meer effect heeft dan het vergroten van de afvoercapaciteit.

Bij wijze van verkenning is ook de locatie van een eventueel nieuw afvoerpunt gevarieerd. Er is gerekend met een gemaal van 50 m³/s, ofwel bij Muiden, ofwel bij de Beatrixsluizen. Hiermee wordt een beeld verkregen van de effecten van de keuze voor een locatie op de herhalingstijden binnen het watersysteem van NZK-ARK. Deze effecten kunnen worden meegewogen in een bredere afweging van aspecten bij de vervanging en renovatie van complex IJmuiden.

Uit de verkenning blijkt dat de locatie Beatrixsluizen voor alle locaties gunstiger is, met uitzondering van het noordelijk deel van de Vecht (locatie Vreeland), dat dichtbij Muiden is gelegen. Een nieuw afvoerpunt bij de Beatrixsluizen is voor de meeste locaties gunstiger omdat er minder verhang nodig is op het ARK om dezelfde hoeveelheid water af te voeren. Ook nu geldt dat het splitsen van de afvoercapaciteit over twee onafhankelijke objecten meer invloed heeft dan de locatiekeuze van een eventuele tweede gemaal. Hierbij is uitsluitend gekeken naar het effect op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden, niet naar andere effecten zoals bijvoorbeeld doorspoeling, verzilting en kosten. Nader onderzoek naar de locatiekeuze is daarom nodig.

3.3

Afvoer naar het Markermeer onder vrij verval

In situaties van dreigend hoogwater wordt bij Schellingwoude, Muiden (en de Ipenslotersluis) water van het NZK-ARK onder vrij verval water afgevoerd naar het Markermeer. In de berekeningen is uitgegaan dat er *nooit* water onder wordt afgevoerd van het NZK-ARK naar het Markermeer (Vermeulen et al, 2017b). Verkend is wat het effect is als er wel via de Oranjesluizen wordt afgevoerd naar het Markermeer; mits de waterstand op het Markermeer lager is dan op het Noordzeekanaal. In de berekening is uitgegaan van een streefpeil op het Markermeer van NAP-0,40 m in de winter en NAP-0,20 m in de zomer.

*Tabel 7
Herhalingstijd van
overschrijden
gemiddelde
waterstanden met
en zonder afvoer
naar het
Markermeer onder
vrij verval.*

waterstand	NZK-ARK		Amstelland	
	referentie	vrij verval	referentie	vrij verval
NAP-0,3 m	1	1	1	1
NAP-0,2 m	5	5	5	5
NAP-0,1 m	25	30	27	27
NAP+0,0 m	72	104	85	85

Tabel 7 geeft voor waterstanden op het NZK-ARK en op de Amstelland-boezem de herhalingstijden voor situaties met en zonder afvoer onder vrij verval naar het Markermeer.

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal

Figuur 6 geeft de overschrijdingsfrequenties voor het NZK-ARK waarbij het effect van afvoeren van het NZK-ARK naar het Markermeer zichtbaar wordt. Voor het NZK-ARK heeft afvoeren bij de Oranjesluizen pas effect bij waterstanden boven NAP-0,15 m. Opgemerkt wordt dat er hoogwatersituaties zijn waarin afvoer van het NZK-ARK naar het Markermeer ook meerwaarde heeft bij lagere waterstanden op het NZK-ARK.

Kentallen

Voor het bepalen van bepaalde kentallen van pompduur en spuien zijn tijdsgemiddelde waarden berekend voor de analyse van de effecten. De kentallen zijn een gewogen gemiddelde over alle gebeurtenissen met behulp van de bijbehorende kansen.

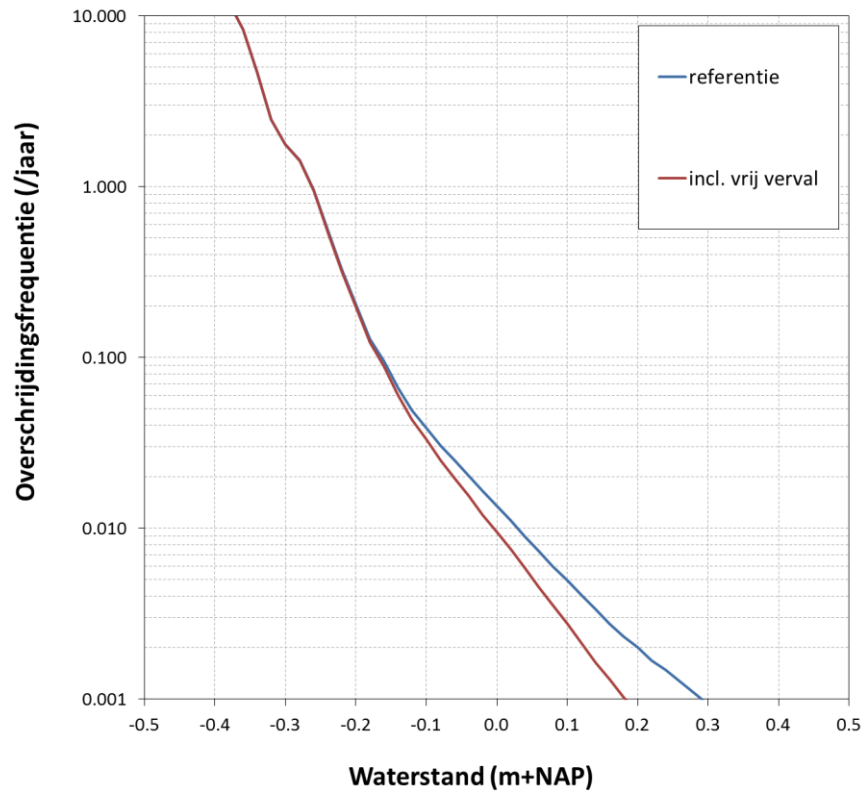
Voor het pompen wordt aangegeven hoeveel tijd (% van het winter- of zomerhalfjaar) wordt gepompt en wat het gemiddelde pompdebiet is. De gemiddelde pomptijd wordt daarbij nog opgesplitst in een periode met positieve opvoerhoogte en een periode met negatieve opvoerhoogte, inclusief het gemiddelde van deze positieve en negatieve opvoerhoogte. Voor de spuidebieten op de verschillende locaties wordt de tijd (%), het gemiddelde debiet (m^3/s) en het gemiddelde verval (m) berekend.

Als gekeken wordt naar de gemiddelde spuiwaarden blijkt dat de afvoer naar het Markermeer onder vrij verval verwaarloosbaar is. De afvoer is effectief bij hoge waterstanden op het NZK-ARK. De afvoer bij de Oranjesluizen (naar het Markermeer) is zo gering, dat de spuiwaarden van IJmuiden niet afwijken van de referentiesituatie (waarin bij de Oranjesluizen/Schellingwoude geen water onder vrij verval wordt afgevoerd van het NZK-ARK).

*Tabel 8
Gemiddelde
spuiwaarden met en
zonder afvoer onder
vrij verval naar het
Markermeer.*

Locatie	tijd [%]	gem. debiet [m^3/s]	gem. verval [m]
Oranjesluizen (naar NZK)	16,2	9,4	0,18
Oranjesluizen (naar Markermeer)	0,1	0	0,03
Zeesluis Muiden	10	2,2	0,02
IJmuiden	7,5	35,7	0,31

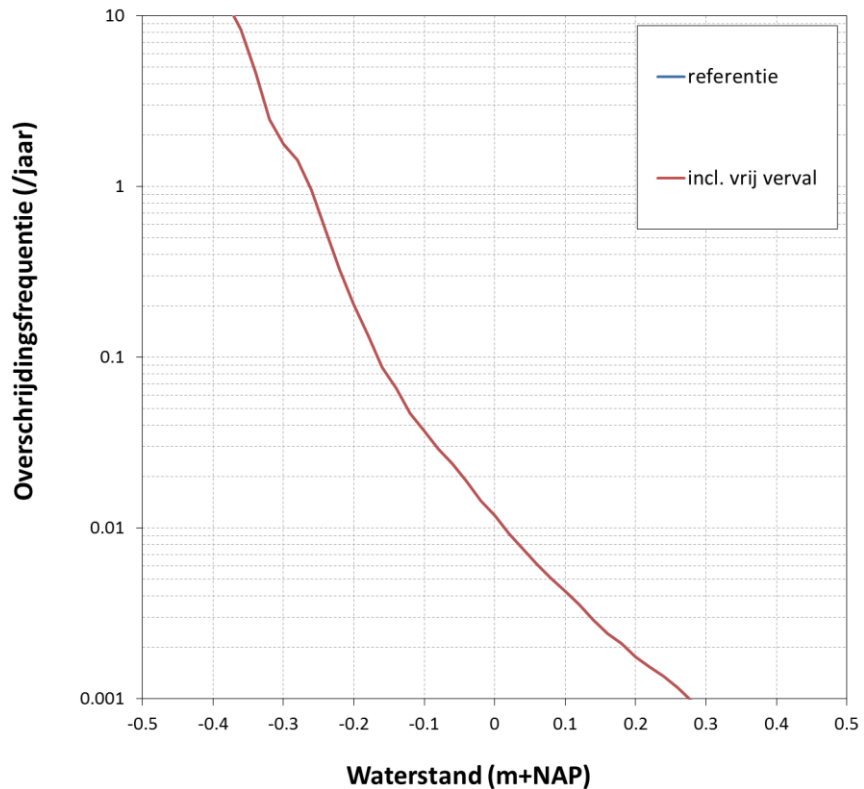
*Figuur 6
Overschrijdingsfrequentie gemiddeld
waterstand op het
NZK-ARK met en
zonder natuurlijke
afvoer naar het
Markermeer.*



Amstellandboezem

Voor de Amstellandboezem liggen resultaten van de referentieberekening en de berekening met afvoer naar het Markermeer onder vrij verval over elkaar (Figuur 7). Het effect van afvoeren naar het Markermeer onder vrij verval heeft dus een verwaarloosbaar effect op de gemiddelde waterstanden in de Amstellandboezem. Dit resultaat is verklaarbaar omdat in de berekeningen pas bij NAP-0,20 m wordt afgevoerd en de Amstelboezem bij deze waterstand is afgesloten van het NZK-ARK en het afvoeren naar het Markermeer onder vrij verval pas effect heeft bij hogere waterstanden op het NZK-ARK.

*Figuur 7
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem met en zonder natuurlijke afvoer naar het Markermeer.*



3.4

Veranderingen aanvoer naar het NZK-ARK

Als alternatieve benadering is geanalyseerd wat het effect is van een veranderde aanvoer naar het NZK-ARK. Om een vergelijk mogelijk te maken met de extra pompcapaciteit (zie paragraaf 3.2) wordt de maximale aanvoercapaciteit vanuit de waterschappen veranderd met 50 m³/s. De huidige maximale aanvoercapaciteit is 361 m³/s; dus geanalyseerd is wat het effect is met 50 m³/s minder (maximale aanvoer 311 m³/s) en 50 m³/s meer (maximale aanvoer 411 m³/s). De verandering van de maximale aanvoercapaciteit naar het NZK-ARK is per waterschap bepaald naar rato van de huidige relatieve aanvoercapaciteit.

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal

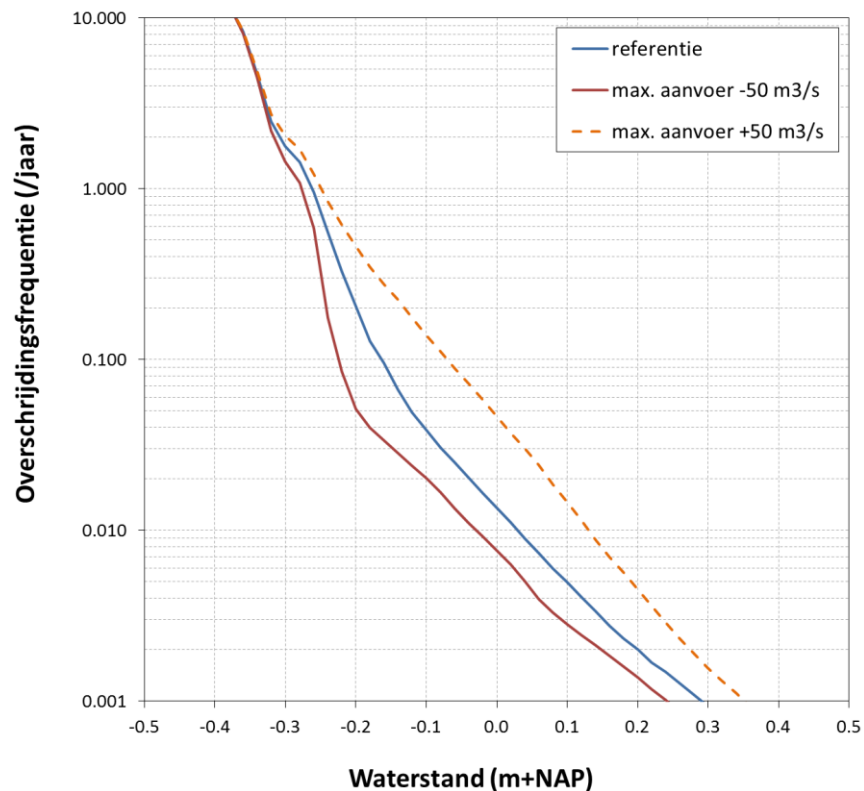
De resultaten voor het NZK-ARK zijn weergegeven in Figuur 8 en Tabel 9.

*Tabel 9
Herhalingstijd van overschrijden gemiddelde waterstanden op het NZK-ARK met 50 m³/s meer en minder aanvoer naar het NZK-ARK.*

waterstand	NZK-ARK			Amstellandboezem		
	referentie	-50 m ³ /s	+50 m ³ /s	referentie	-50 m ³ /s	+50 m ³ /s
NAP-0,3 m	1	1	0	1	1	0
NAP-0,2 m	5	19	2	5	19	2
NAP-0,1 m	25	50	7	27	481	7
NAP+0,0 m	72	131	21	85	4441	15

Het effect van verlagen van de aanvoer naar het NZK-ARK heeft meer effect op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK, dan het verminderen van de pompcapaciteit van gemaal IJmuiden. Dit wordt enerzijds veroorzaakt doordat gemaal IJmuiden kan falen (in de aanvoer naar het NZK-ARK is falen van poldergemalen verwaarloosd) en anderzijds omdat de verhouding aanvoer/pompcapaciteit op het NZK-ARK relatief kleiner is (een verhouding van 1,2 (311/260) bij een verminderde aanvoer naar het NZK-ARK ten opzichte van een van 1,9 (361/210) bij verminderde pompcapaciteit) en er dus relatief minder m^3/s op het NZK-ARK wordt aangevoerd. Dit verklaart ook waarom een toename van aanvoer op het NZK-ARK een grotere invloed heeft op de overschrijdingsfrequentie van het NZK-ARK dan een afname van de aanvoer op het NZK-ARK.

*Figuur 8
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK met 50 m^3/s meer en minder aanvoer naar het NZK-ARK.*

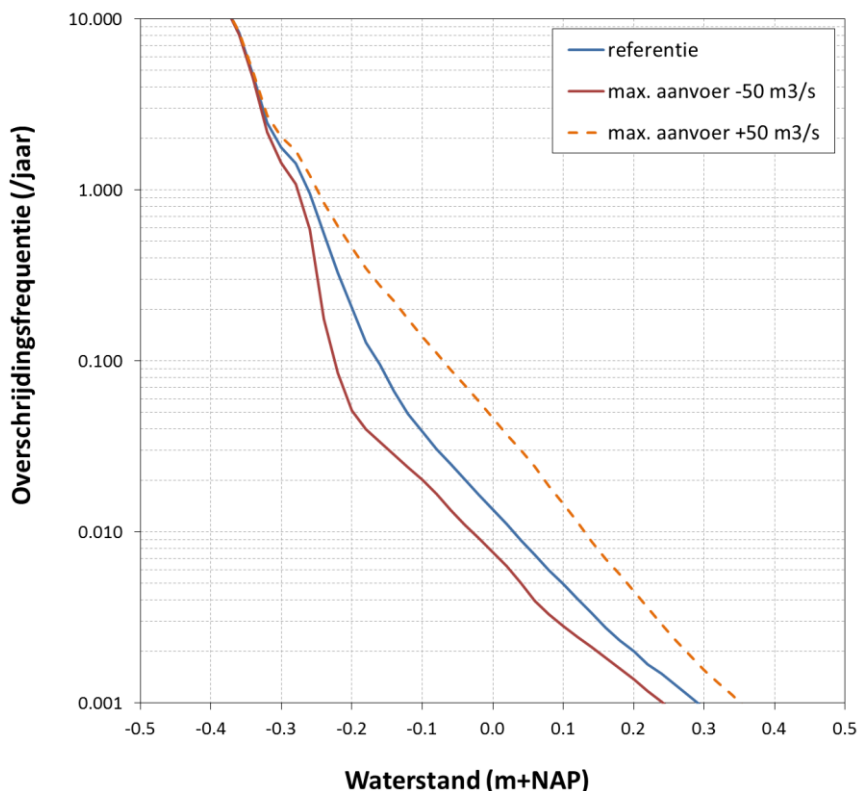


Amstellandboezem

De herhalingstijden van de gemiddelde waterstanden op de Amstellandboezem zijn tot en met NAP-0,20 m gelijk aan die van die van het NZK-ARK omdat tot die waterstand het NZK-ARK en de Amstellandboezem één watersysteem zijn. Bij NAP-0,20 m wordt de Amstellandboezem afgesloten. Als de aanvoer vanuit de waterschappen afneemt wordt er dus minder aangevoerd op de Amstellandboezem en neemt de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden af. Dit effect is vrij sterk omdat een afgesloten Amstellandboezem bemalen wordt met gemaal Zeeburg en de netto aanvoer op de Amstellandboezem kleiner wordt. Andersom geldt dat bij extra aanvoer vanuit de waterschappen de netto aanvoer op de Amstellandboezem groter wordt.

Relatief, ten opzichte van de gemaalcapaciteit van Zeeburg, is de verandering in netto aanvoer bij een toename groter, waardoor het effect op de overschrijdingsfrequentie ook sterker is (oranje en blauwe lijn in Figuur 9 liggen verder uit elkaar dan blauwe en rode lijn).

*Figuur 9
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem met 50 m³/s meer en minder aanvoer naar het NZK-ARK.*



3.5

Alternatieve afvoer regionale systeem

Alternatieve afvoer van het regionale systemen betekent dat de capaciteit van de gemalen van HHR en HHNK die niet naar het NZK-ARK pompen wordt vergroot. In de berekening is aangenomen dat de capaciteit van deze gemalen van HHR en HHNK met totaal 50 m³/s toeneemt (om een vergelijk met de andere berekeningen mogelijk te maken).

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal

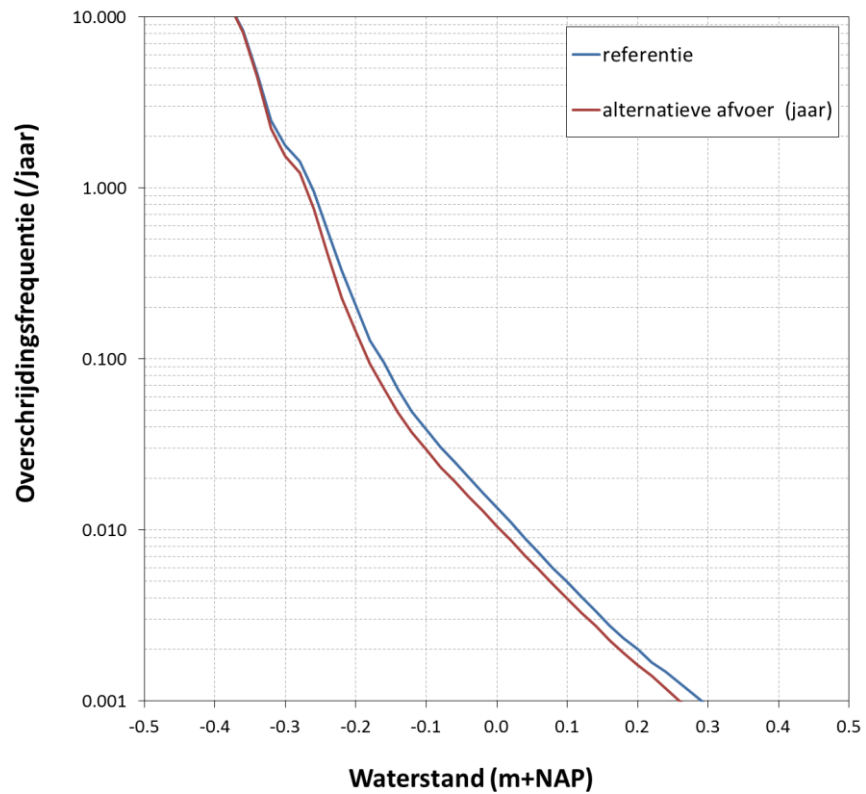
De resultaten voor het NZK-ARK zijn weergegeven in Figuur 10 en Tabel 10. Het vergroten van de afvoercapaciteit van de gemalen die niet aanvoeren op het NZK-ARK heeft enig effect,

*Tabel 10
Herhalingstijd van overschrijden gemiddelde waterstanden op het NZK-ARK met alternatieve afvoer 50 m³/s groter.*

waterstand	NZK-ARK		Amstellandboezem	
	referentie	alternatieve afvoer	referentie	alternatieve afvoer
NAP-0,3 m	1	1	1	1
NAP-0,2 m	5	7	5	7
NAP-0,1 m	25	34	27	33
NAP+0,0 m	72	95	85	100

Doordat HHR en HHNK minder water aanvoeren op het NZK-ARK neemt de overschrijdingsfrequentie af en komen hoge waterstanden minder vaak voor.

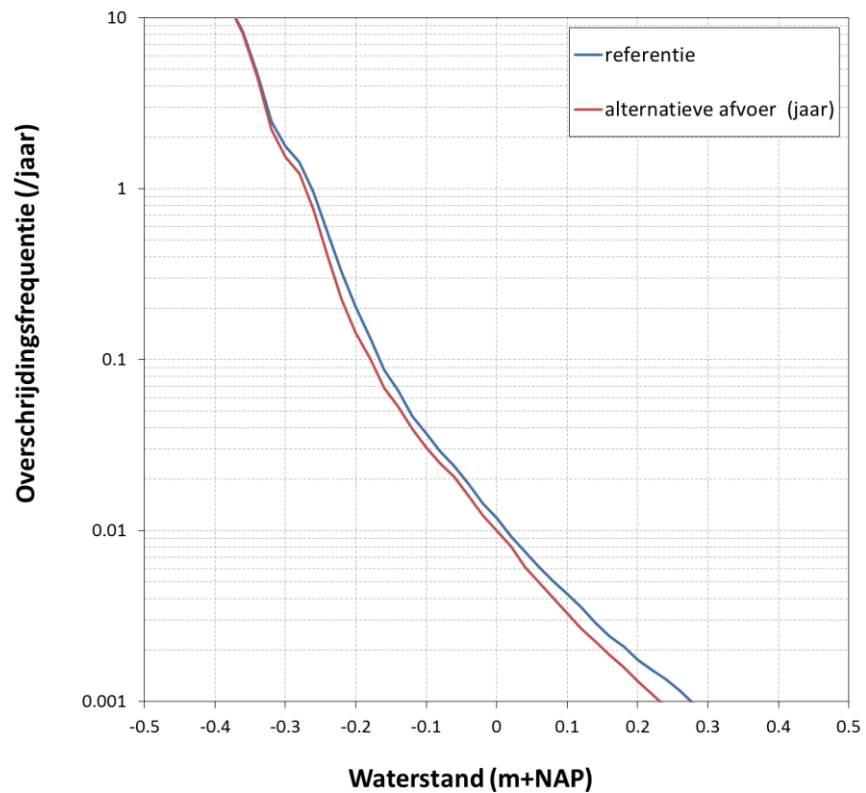
*Figuur 10
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK met alternatieve afvoer 50 m³/s groter.*



Amstellandboezem

Het effect voor de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden in Amstelland is logischerwijs vergelijkbaar. De overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden op het NZK-ARK nemen af omdat de er minder water wordt aangevoerd op het NZK-ARK. Tot NAP-0,20 m staat de Amstellandboezem in open verbinding, daarboven is het een apart watersysteem.

*Figuur 11
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem met alternatieve afvoer 50 m³/s groter.*



3.6

Ander beheer AGV boezem

Bekeken is of het afsluiten van de boezem van AGV van het NZK-ARK op termijn een relevante maatregel kan zijn. Hiervoor kunnen twee varianten worden onderscheiden:

1. Isoleren van de Amstellandboezem van het NZK-ARK;
2. Isoleren van de Vechtboezem.

Een derde variant zou zijn om beide boezemsystemen te isoleren van het NZK-ARK.

De effecten van het isoleren van de Amstellandboezem zijn beschreven in bijlage C.3. Hierbij is alleen gekeken naar een winterhalfjaar. De resultaten zijn berekend voor de huidige situatie (2015) en 2050 en 2085 met klimaatscenario W_H (worst-case), inclusief falen IJmuiden.

Het permanent afsluiten van Amstelland van het NZK-ARK heeft voor de huidige situatie een positief effect op waterstanden op het NZK-ARK lager dan NAP. Voor de zichtjaren 2050 en 2085 treden hoge waterstanden vaker op en is de situatie slechter dan in de referentie. Echter, uit de faalkansstudie van 2017 (Vermeulen, 2017a) is bekend dat klimaatveranderingen leiden tot een sterke toename van overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden in het NZK-ARK, waardoor dit beeld logisch is.

Voor de tweede optie, de Vechtboezem isoleren, kunnen de effecten op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden niet gekwantificeerd worden met het bestaande rekenmodel (DEZY). Een work-around waarbij in de berekeningen de eigenschappen van de Amstellandboezem en de

Vechtboezem worden omgewisseld is geen realistische optie vanwege de verschillen in afvoermogelijkheden (Amstelland heeft een gemaal en de Vechtboezem natuurlijke afvoer bij de sluis Muiden), en omdat ook een extra gemaal nodig is om de geïsoleerde Vechtboezem te bemalen. Zonder dit geven berekeningen van de waterstanden op het NZK-ARK geen realistisch beeld. Voor het doorrekenen van het isoleren van de Vechtboezem is aanpassing van het rekenmodel DEZY noodzakelijk.

4 Aanvoer NZK-ARK

4.1

Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn aanvoerduurlijnen voor het NZK-ARK bepaald. De aanvoerduurlijnen representeren de gemiddelde aanvoer naar het NZK-ARK over een periode van één of meerdere etmalen voor herhalingstijden van 10, 100 en 1000 jaar.

De maximale pompcapaciteit naar het NZK-ARK is 361 m³/s, terwijl de maximale pompcapaciteit van de gemalen IJmuiden en Zeeburg samen 317 m³/s bedraagt. De gemiddelde aanvoerdebieten naar het NZK-ARK verschillen weinig voor perioden van 1 tot 5 dagen. Dit komt omdat de aanvoer naar het NZK-ARK voornamelijk wordt bepaald door de pompcapaciteit naar het NZK-ARK en aanvoerpieken vooral worden opgevangen in het polder-boezemsysteem van de waterschappen.

4.2

Berekening aanvoerduurlijnen

Vanuit het project "Vervanging en Renovatie gemaal IJmuiden" is gevraagd wat de maximale 'aanvoer naar het Noordzeekanaal' is. Echter, 'aanvoer naar het Noordzeekanaal' is geen eenduidig gedefinieerd begrip. De duur van de aanvoer, het gevoerde beheer (afsluiten Amstellandboezem) en externe omstandigheden (falen van kunstwerken) spelen hierbij een rol. De piekaanvoer door de waterschappen op het Noordzeekanaal is 361 m³/s; dit is de maximale momentane pompcapaciteit van polder- en boezemgemalen die uitslaan op het NZK-ARK. Vervolgens is van belang hoe lang de waterschappen maximaal blijven aanvoeren op het NZK-ARK.

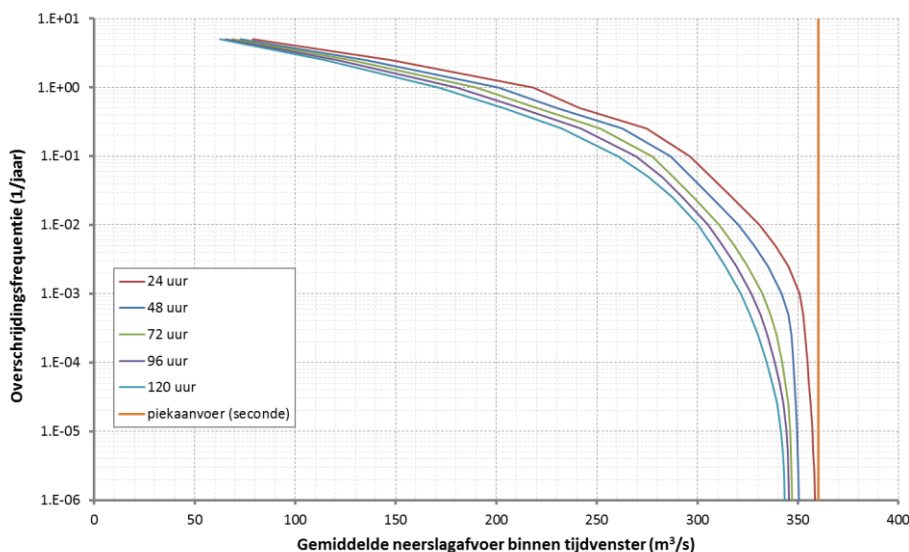
Om de aanvoer op het NZK-ARK te bepalen zijn aanvoerduurlijnen afgeleid. Een aanvoerduurlijn is een grafische weergave van de gemiddelde aanvoer naar het NZK-ARK, in een periode van een bepaalde duur en die met een bepaalde frequentie wordt overschreden. Door uit te gaan van een gemiddelde aanvoer naar het NZK-ARK kunnen verschillende periodes onderling worden vergeleken en wordt een relatie gelegd met de pompcapaciteit voor afvoer van het NZK-ARK.

De aanvoerduurlijnen zijn bepaald met DEZY voor de huidige situatie in een winterhalfjaar. Uitgangspunt is dat het gemaal niet faalt en het IJ- en Amstelfront niet worden gesloten.

Figuur 12 geeft de resultaten voor gemiddelde aanvoer naar het NZK-ARK over perioden van 1 tot 5 dagen. Tabel 11 geeft de gemiddelde aanvoer bij verschillende herhalingstijden. Bij dezelfde herhalingstijd is de aanvoer naar het NZK-ARK gemiddeld over één dag hoger dan die gemiddeld over 5 dagen: de kans op een neerslaggebeurtenis die vijf dagen lang aanhoudt is nu eenmaal kleiner.

De maximale daggemiddelde aanvoer is 360 m³/s: dit is een gebeurtenis waarin 24 uur lang de waterschappen maximaal aanvoeren op het NZK-ARK. Het daggemiddelde over twee dagen of meer is circa 350 m³/s.

*Figuur 12
Aanvoerduurlijnen
van de gemiddelde
aanvoer naar het
NZK-ARK voor
verschillende
perioden van
piekafvoer.*



Tabel 11 illustreert nogmaals dat – bij dezelfde herhalingsstijden - de gemiddelde afvoer naar het NZK-ARK afneemt naarmate de beschouwde periode waarover het gemiddelde wordt bepaald, toeneemt.

De huidige pompcapaciteit van het NZK-ARK is 317 m³/s, waarvan 260 m³/s in IJmuiden en 57 m³/s in Zeeburg). Uitval van de pompen buiten beschouwing gelaten betekent dit dat er netto aanvoer op het NZK-ARK veel minder vaak dan eens in de 10 jaar voorkomt.

*Tabel 11
Herhalingstijden
gemiddelde aanvoer
naar het NZK-ARK
voor verschillende
perioden van
piekafvoer voor een
winterhalfjaar.*

Aanvoer naar het NZK-ARK					
Herhalingstijd	24 uur	48 uur	72 uur	96 uur	120 uur
10 jaar	297 m ³ /s	289 m ³ /s	278 m ³ /s	270 m ³ /s	261 m ³ /s
100 jaar	331 m ³ /s	320 m ³ /s	311 m ³ /s	305 m ³ /s	300 m ³ /s
1000 jaar	351 m ³ /s	342 m ³ /s	332 m ³ /s	327 m ³ /s	322 m ³ /s

Uit Tabel 11 volgt dat de aanvoerdebieten relatief weinig verschillen voor de berekende duren (bijvoorbeeld bij een herhalingstijd van 100 jaar ligt de gemiddelde aanvoer op het NZK-ARK tussen de 300 tot 331 m³/s voor duren tussen 24 en 120 uur). Dit wordt verklaard uit het feit dat de aanvoer naar het NZK-ARK gemaximeerd is, omdat bijna alle aanvoer via gemalen plaatsvindt, die niet meer kunnen afvoeren dan hun maximale pompcapaciteit. Eventuele aanvoerpieken worden daarom vooral in de regionale polder-boezemsystemen opgevangen. Deze systeemeigenschap zorgt er ook voor dat de aanvoer naar het NZK-ARK weinig gevoelig is voor klimaatverandering en de bijbehorende verandering in neerslagvolumes en intensiteiten. Grote veranderingen in de aanvoer naar het NZK-ARK zijn dan ook alleen te verwachten als de maalcapaciteit van de waterschappen naar het NZK of ARK wordt vergroot.

Aanvoerduurlijnen voor 2050 en 2085 worden daarom sterk bepaald door externe ontwikkelingen in het beheergebied (zoals de verandering capaciteit poldergemalen).

5 Zeespiegelstijging

5.1 Samenvatting

In dit hoofdstuk is gekeken naar het effect van zeespiegelstijging op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK. Uitgegaan is van de situatie 2015 inclusief falen van het gemaal.

De zeespiegelstijging vergroot de kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK. Een zeespiegelstijging van een halve meter reduceert de spuiomogelijkheden tot 20% ten opzichte van de huidige situatie. Vanaf één meter is de bijdrage van spuien bij IJmuiden verwaarloosbaar. Bij een zeespiegelstijging van één meter wordt NAP gemiddeld eens in de tien jaar overschreden; met elke halve meter extra zeespiegelstijging neemt de overschrijdingskans met circa een factor 3 toe.

5.2 Effect zeespiegelstijging op waterstanden NZK-ARK

De zeespiegelstijging heeft een grote invloed op overschrijdingsfrequenties van waterstanden op het Noordzeekanaal. Het beperkt namelijk de spuiomogelijkheden (zowel duur als verval) en de werking van de pompen (omdat de maximale opvoerhoogte eerder wordt bereikt). Het meest extreme klimaatscenario (W_h , KNMI'14) gaat uit van een zeespiegelstijging van 30 cm in 2050 en in 2085 een stijging van 62,5 cm. Gevraagd is om in beeld te brengen hoe de zeespiegelstijging de overschrijdingsfrequentie op het NZK-ARK beïnvloedt. Om dit effect te kwantificeren zijn – uitgaande van de situatie in 2015 – berekeningen uitgevoerd met verschillende waarden voor de zeespiegelstijging, waarbij alle overige condities, zoals de neerslag, wind en faalkansen gemaal, gelijk zijn gehouden. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een winterhalfjaar.

In Tabel 12 en Tabel 13 zijn de effecten weergegeven voor waterstanden op het NZK-ARK, respectievelijk de Amstellandboezem. Duidelijk is dat met toenemende zeespiegelstijging hoge waterstanden veel vaker gaan voorkomen. Bij een zeespiegelstijging van een meter wordt NAP al elke 10 jaar bereikt. Bij deze zeespiegelstijging moeten het IJ-front en Amstelfront elke twee jaar worden gesloten en bij verdere zeespiegelstijging neemt de frequentie alleen maar toe.

*Tabel 12
Herhalingstijden per waterstand op het Noordzeekanaal bij verschillende zeespiegelstijgingen op de Noordzee (winterhalfjaar).*

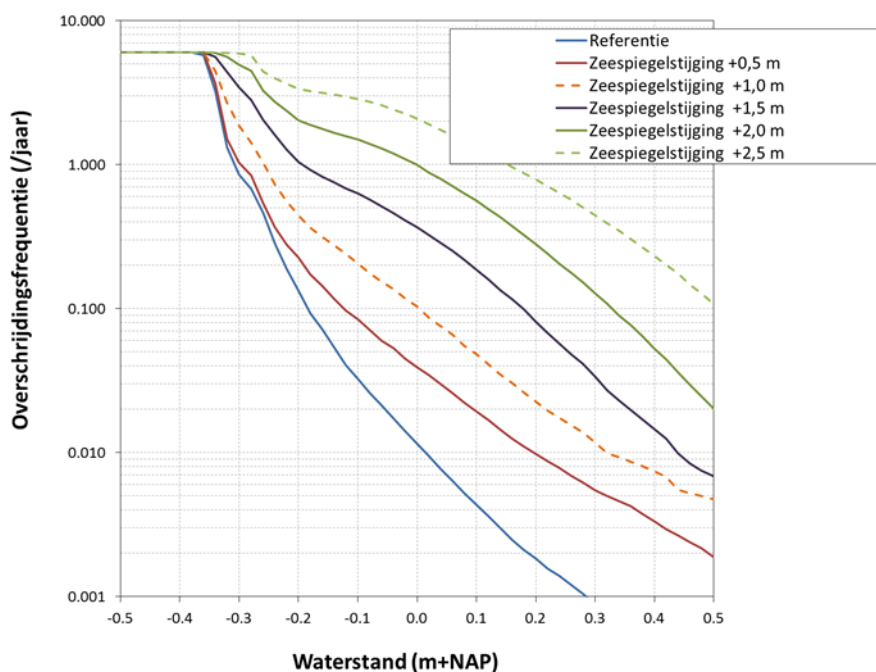
waterstand	Zeespiegelstijging					
	referentie	+0,5 m	+1,0 m	+1,5 m	+2,0 m	+2,5 m
NAP-0,3 m	1	1	1	< 1	< 1	< 1
NAP-0,2 m	7	4	2	1	< 1	< 1
NAP-0,1 m	31	12	5	2	< 1	< 1
NAP+0,0 m	85	25	10	3	1	< 1

Tabel 13
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem bij verschillende zeespiegelstijgingen op de Noordzee (winterhalfjaar).

waterstand	referentie	zeespiegelstijging				
		+0,5 m	+1,0 m	+1,5 m	+2,0 m	+2,5 m
NAP-0,3 m	1	1	1	< 1	< 1	< 1
NAP-0,2 m	7	4	2	1	< 1	< 1
NAP-0,1 m	32	15	8	5	5	6
NAP+0,0 m	93	28	14	9	9	11 ⁴

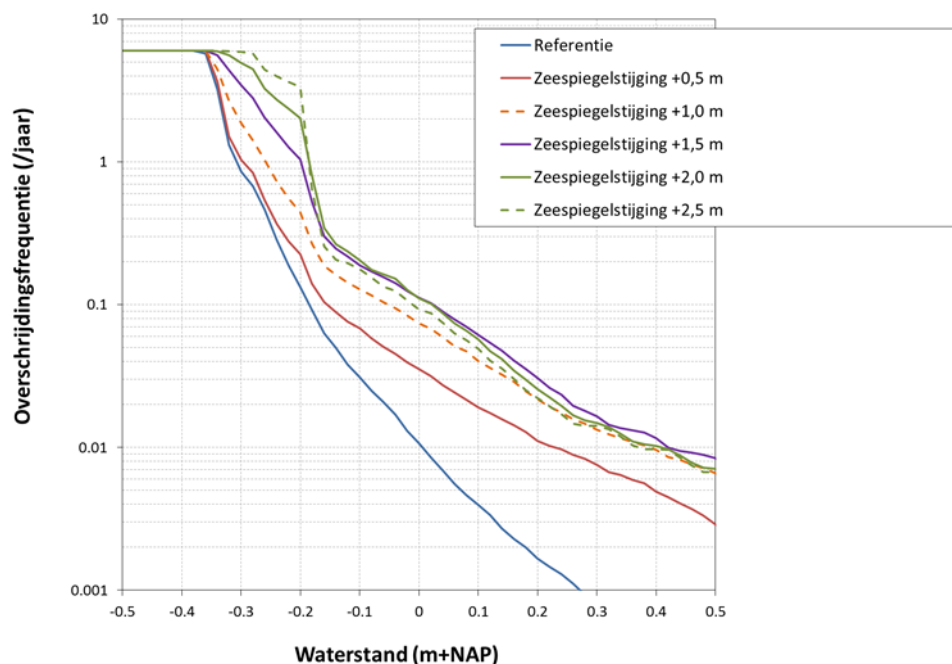
Dit effect is zichtbaar in Figuur 13 (NZK-ARK) en Figuur 14 (Amstellandboezem). Figuur 14 laat duidelijk de effecten van het sluiten van de fronten zien, waarna de Amstellandboezem onafhankelijk opereert van het NZK-ARK. Het effect van de zeespiegelstijging op de Amstellandboezem wordt veroorzaakt doordat het gedurende langere periode is afgesloten en niet kan profiteren van dalingen op het NZK-ARK zoals in de referentiesituatie.

Figuur 13
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK bij verschillende zeespiegelstijgingen op de Noordzee (winterhalfjaar).



⁴ De resultaten van 2,5 meter zeespiegelstijging op de overschrijdingsfrequentie in Amstelland geven een verkeerd beeld (herhalingstijd neemt toe, terwijl een kleine daling wordt verwacht). Dit is omdat DEZY bij het openen van de fronten de waterstanden van NZK-ARK en Amstelland in één rekenstap nivelleert.

*Figuur 14
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem bij verschillende zeespiegelstijgingen op de Noordzee (winterhalfjaar).*



Tabel 14 laat zien dat met name de gemiddelde positieve opvoerhoogte toeneemt met de zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 0,5 meter verdubbelen de gemiddelde pompduur en het gemiddelde pompdebiet. Voor een zeespiegelstijging van 1,0 meter en hoger verandert de gemiddelde pompduur vrijwel niet meer en neemt het gemiddelde pompdebiet af. De maximum opvoerhoogte wordt vaker bereikt en hier ligt blijkbaar een optimum in de inzetbaarheid van het gemaal IJmuiden. De spuiduur en het spuidebiet nemen af met het toenemen van de zeespiegelstijging, zoals ook te verwachten is. Bij een zeespiegelstijging van 1,0 meter en hoger is het effect van de spui verwaarloosbaar. De spuimogelijkheden bij de Zeesluis Muiden nemen af, maar blijft wel mogelijk (omdat de Zeesluis Muiden niet direct beïnvloed wordt door de zeespiegelstijging).

*Tabel 14
Gemiddelde pompwaarden voor een winterhalfjaar bij verschillende zeespiegelstijgingen op de Noordzee.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gen. pos. opvoerh. [m]	Gen. neg. opvoerh. [m]
Berekening 1: Referentie IJmuiden	16.2	38.2	14.0	2.1	0.75	-0.10
Berekening 2: Zeespiegelstijging 0,5 m IJmuiden	32.2	80.4	31.2	1.0	1.04	-0.08
Berekening 3: Zeespiegelstijging 1,0 m IJmuiden	35.4	85.8	35.3	0.1	1.49	-0.08
Berekening 4: Zeespiegelstijging 1,5 m IJmuiden	37.1	81.8	37.1	0.0	1.90	-0.09
Berekening 5: Zeespiegelstijging 2,0 m IJmuiden	36.5	73.0	36.5	0.0	2.18	-0.08
Berekening 6: Zeespiegelstijging 2,5 m IJmuiden	33.2	57.0	33.2	0.0	2.36	-0.08

*Tabel 15
Gemiddelde
spuiwaarden voor
een winterhalfjaar
bij verschillende
zeespiegelstijgingen
op de Noordzee.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Gen. verval [m]
Berekening 1: Referentie			
Oranjesl. (-> NZK)	27.4	14.3	0.10
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.0	4.3	0.02
IJmuiden	9.5	46.3	0.32
Berekening 2: Zeespiegelstijging 0,5 m			
Oranjesl. (-> NZK)	20.1	14.4	0.19
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	1.3	0.3	0.01
IJmuiden	1.8	7.7	0.25
Berekening 3: Zeespiegelstijging 1,0 m			
Oranjesl. (-> NZK)	17.2	13.0	0.20
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	0.4	0.1	0.01
IJmuiden	0.1	0.4	0.27
Berekening 4: Zeespiegelstijging 1,5 m			
Oranjesl. (-> NZK)	14.0	10.7	0.21
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	0.7	0.2	0.02
IJmuiden	0.0	0.0	0.20
Berekening 5: Zeespiegelstijging 2,0 m			
Oranjesl. (-> NZK)	8.9	6.9	0.22
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	1.8	0.8	0.03
IJmuiden	0.0	0.0	0.28
Berekening 6: Zeespiegelstijging 2,5 m			
Oranjesl. (-> NZK)	3.7	2.9	0.25
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	6.3	3.0	0.05
IJmuiden	0.0	0.0	0.27

6 Selectieve onttrekking

6.1 Samenvatting

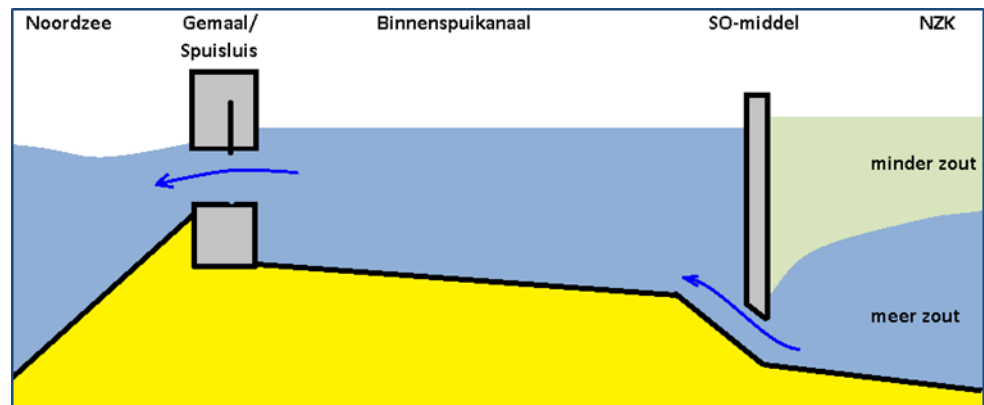
De berekeningen laten zien dat de maatregel 'selectieve onttrekking' overwegend een negatief effect heeft op de faalkans van het NZK/ARK. Afhankelijk van de situatie (gebeurtenis) heeft de selectieve onttrekking een positief of negatief effect op de maximale waterstand op het NZK-ARK. Het effect is afhankelijk van het spuislot (het minimale benodigde verval over de spuisluis om te kunnen spuien): de veranderde zoutconcentratie in het Binnenspuikanaal als gevolg van de maatregel selectieve onttrekking beïnvloedt de spuiomogelijkheden bij IJmuiden doordat het minimale verval waarbij de spuisluis kan worden ingezet veranderd. De waarde van het spuislot is gemiddeld 9 cm (Bijlsma, 2018). Afhankelijk van de zoutconcentratie op het Binnenspuikanaal varieert deze waarde tussen de 5 en 13 cm. De veranderde zoutconcentratie in het Binnenspuikanaal beïnvloedt ook de pompkarakteristiek door een afname van de maximale opvoerhoogte van een pomp. Deze afname is echter zo klein dat het effect op de overschrijdingsfrequentie verwaarloosbaar is. Variaties in de instellingen van het verval door een veranderde dichtheid (statisch verval) of in de doorstroomopening (dynamisch verval) hebben nauwelijks invloed op de overschrijdingsfrequentie van het NZK-ARK. Extra pompcapaciteit als compenserende maatregel om dit negatieve effect te niet te doen zal niet veel effect hebben, omdat de faalkans van het gemaal dominant is in maatgevende situaties. Beter is om de extra pompcapaciteit onafhankelijk van het gemaal IJmuiden te realiseren.

6.2 Maatregel selectieve onttrekking

De maatregel selectieve onttrekking en de effecten daarvan is uitgebreid beschreven door Rijkswaterstaat (Janssen, 2017). We volstaan hier met een beknopte samenvatting. De tekst daarvan is grotendeels overgenomen uit het genoemde memo.

Bij selectieve onttrekking wordt gebruik gemaakt van het gegeven dat het zwaardere, zoute water zich op een grotere diepte in de waterkolom bevindt dan het zoete water. Een vaste constructie met een diepgelegen opening verbindt deze zoute onderlaag in het Noordzeekanaal met het Binnenspuikanaal. Wanneer overtollig water op het Noordzeekanaal door middel van spuien en/of pompen wordt afgevoerd naar de Noordzee wordt water onttrokken aan de zoute onderlaag en op die manier kan het zoutbezwaar worden afgevoerd. In Figuur 15 is dit schematisch weergegeven.

*Figuur 15
Schematische
werking selectieve
onttrekking (bron:
Janssen, 2017).*



De invloed van selectieve onttrekking op de afvoercapaciteit is tweeledig. Enerzijds is er de hydraulische weerstand van de selectieve onttrekking. Anderzijds zijn er door de veranderingen in zoutgehalte dichtheidseffecten die op verschillende manieren van invloed zijn op de afvoercapaciteit. Op deze effecten wordt uitgebreid ingegaan in (Janssen, 2017). De belangrijkste elementen daaruit met betrekking tot de modellering binnen DEZY zijn het verval over het SO-middel en de invloed van de dichtheidsverschillen op de afvoercapaciteit van het gemaal en de spui IJmuiden. Dit wordt hieronder nader toegelicht.

De modellering van de maatregel in DEZY is beschreven in Bijlage D.

6.2.1

Verval over SO-middel

Dynamisch verval

De hydraulische weerstand van de selectieve onttrekking vertaalt zich in een verval over de constructie en daardoor een peilverlaging in het Binnenspuikanaal. Het verval is afhankelijk van de stroomsnelheid door de constructie en daarmee van de grootte van de opening, en de vormgeving ervan (afvoer coëfficiënt). Omdat dit verval uitsluitend optreedt wanneer er water wordt afgevoerd, noemen we dit het dynamische verval.

Het dynamische verval kan worden beschreven aan de hand van de volgende formule:

$$q = \mu A \sqrt{2g\Delta h} \quad (2)$$

Waarin q het afvoerdebiet (m^3/s), μ de afvoercoëfficiënt (-), A het oppervlak van de doorstroom-opening, g de gravitatieconstante (m/s^2) en Δh het verval (m).

Bij een afvoercoëfficiënt gelijk aan 1 vinden we de getallen zoals genoemd in paragraaf 3.2 van het memo van Rijkswaterstaat (Janssen, 2017), namelijk: bij een doorstroomopening van 560 m^2 en een debiet van $500 \text{ m}^3/\text{s}$ is het verval over de selectieve onttrekking circa 4 cm. Dit verval neemt

kwadratisch af met toename van de doorstroomopening. Bij een 20% groter oppervlak neemt het verval met ruim 40% af naar minder dan 3 cm.

Statisch verval

Het gevolg van selectieve onttrekking is dat door het toegenomen zoutgehalte de dichtheid in het Binnenspuikanaal zal toenemen t.o.v. de dichtheid op het Noordzeekanaal. Omdat ter hoogte van de opening onder de selectieve onttrekking de waterdruk aan beide zijden gelijk is, zal door de hogere dichtheid in het Binnenspuikanaal de waterstand lager zijn dan op het Noordzeekanaal. Dit geeft een extra verval over de selectieve onttrekking, dat afhankelijk is van de dichtheid op het Binnenspuikanaal en de diepte waarop de opening in de selectieve onttrekking zich bevindt. Dit verval is onafhankelijk van de afvoer en noemen we het statische verval.

In paragraaf 3.3 van het memo van Rijkswaterstaat (Janssen, 2017) wordt opgemerkt dat dit verval door dichtheidsverschillen ca. 5,5 cm bedraagt, uitgaand van de dichtheid die de selectieve onttrekking naar verwachting op het Binnenspuikanaal kan realiseren (gemiddeld ca. 1,012 kg/l).

6.2.2

Invloed van de dichtheidsverschillen

Door de maatregel selectieve onttrekking neemt de zoutconcentratie op het Binnenspuikanaal toe ten opzichte van de situatie zonder selectieve onttrekking.

Voor het **gemaal** betekent dit dat het opgepompte water relatief zwaarder is en daarom zal de pompkarakteristiek wijzigen. In DEZY is het mogelijk deze pompkarakteristiek aan te passen.

Voor de **spuisluis** geldt dat door de toegenomen zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal een geringer dichtheidsverschil overwonnen moet worden om het water vanuit het zoete Noordzeekanaal naar de zoute Noordzee te laten stromen. Het zeewater moet een aantal centimeter lager zijn dan de waterstand op het Noordzeekanaal. Dit waterstandsverschil wordt aangeduid met spuislot. In de huidige praktijk – zonder selectieve onttrekking – wordt een spuislot van 12 cm gehanteerd.

Het spuislot heeft wel grote invloed (zie paragraaf 6.3). Bij een spuislot van 9 cm (de gemiddelde waarde) heeft de maatregel selectieve onttrekking weinig effect op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK. Bij een groter spuislot (13 cm) neemt de overschrijdingsfrequentie toe (komen hoge waterstanden vaker voor), bij een lager spuislot nemen de overschrijdingsfrequentie zelfs iets af. De effecten van de maatregel selectieve onttrekking zijn berekend met een constante waarde van het spuislot over de gehele periode, een uitgangspunt dat bij nadere beschouwing niet houdbaar blijkt. Om het effect goed in beeld te brengen moet rekening worden gehouden met de variatie in het spuislot: nu wordt de conclusie bepaald door de aanname die met betrekking tot het spuislot wordt gemaakt.

In hoogwatersituaties is er sprake van een afvoersituatie en kan aangenomen worden dat het Binnenspuikanaal gemiddeld zoeter zal zijn en dat een spuislot van 9 cm een onderschatting zal zijn. In de berekeningen is een verandering van de pompkarakteristieken niet meegenomen. De maatregel selectieve onttrekking heeft tot gevolg dat de maximale opvoerhoogte van de pompen met circa 1,4 % zal afnemen. De effecten daarvan zijn niet gekwantificeerd, maar zullen naar verwachting hogere waterstanden op het NZK-ARK tot gevolg hebben. Dit betekent dat de maatregel selectieve onttrekking naar verwachting tot hogere overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK zal leiden.

Om dit beter te onderbouwen is meer inzicht nodig in de veranderingen van de zoutconcentratie op het Binnenspuikanaal (en ook aan de zeezijde, omdat de zoutconcentratie aan de buitenkant van de spui naar verwachting ook niet constant verondersteld mag worden). De gehanteerde modellering van de maatregel selectieve onttrekking, waarin uitgegaan wordt van een constante zoutconcentratie aan beide zijden van de sluis is onvoldoende.

De berekeningen met selectieve onttrekking zijn uitgevoerd zonder falen van IJmuiden. Verwacht wordt dat als gerekend wordt met falen van IJmuiden het beeld niet zal veranderen: de selectieve onttrekking heeft gemiddeld een positief effect op de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden. Mogelijk dat met falen er meer spuumogelijkheden zijn met een op voorhand moeilijk in te schatten effect van het spuislot daarvan. Om uitsluitsel te krijgen zijn berekeningen nodig met falen van IJmuiden.

In de berekeningen is uitgegaan dat de selectieve onttrekking niet faalt. Deze aanname lijkt verdedigbaar omdat de selectieve onttrekking een vaste, statische constructie wordt⁵.

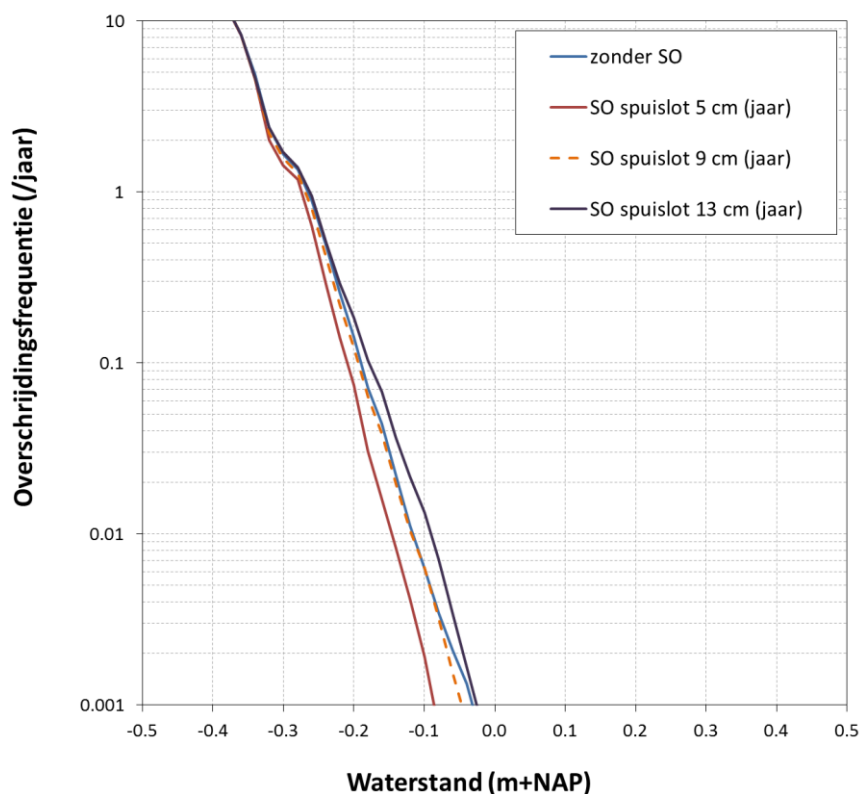
6.3

Effect maatregel selectieve onttrekking

De berekeningen met de maatregel selectieve onttrekking zijn uitgevoerd zonder falen van gemaal IJmuiden. Falen van het gemaal heeft een dominante invloed, door zonder falen te rekenen wordt het effect van de maatregel selectieve onttrekking op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden benadrukt. Omdat de keuze van de parameter spuislot het effect op de overschrijdingsfrequentie bepaalt is besloten dat berekeningen met falen weinig meerwaarde zouden leveren en zijn daarom niet uitgevoerd. Uit Figuur 16 blijkt dat de keuze van het spuislot een grote invloed heeft op de herhalingstijden van waterstanden op het NZK-ARK. Een waarde van 5 cm voor het spuislot heeft een positief effect op de overschrijdingsfrequentie, terwijl een waarde van 13 cm voor het spuislot juist een negatief effect heeft.

⁵ De selectieve onttrekking bevat een scheepvaartopening die geopend circa 20% extra doorstroomoppervlak toevoegt. Echter, wanneer die faalt heeft dat een positief effect op de afvoercapaciteit omdat het dynamisch verval dan kleiner wordt.

*Figuur 16
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2015, zonder falenemaal IJmuiden.*



Tabel 16 vertelt hetzelfde verhaal voor herhalingstijden van waterstanden op het NZK-ARK.

*Tabel 16
Herhalingstijd van overschrijden gemiddelde waterstanden op het NZK-ARK met en zonder maatregel selectieve onttrekking.*

Waterstand	selectieve onttrekking (zonder falenemaal IJmuiden)			
	referentie	spuislot 5 cm	spuislot 9 cm	spuislot 13 cm
NAP-0,3 m	1	1	1	1
NAP-0,2 m	7	14	8	5
NAP-0,1 m	159	521	159	75
NAP+0,0 m	3746	27567	5108	2525

Het effect van de maatregel selectieve onttrekking op de spuiwaarden bij IJmuiden is voorspelbaar: naarmate het spuislot groter is neemt de bijdrage van het spuien af. Bij een groter spuislot wordt er gemiddeld minder lang gespuid en neemt het gemiddelde debiet door de spuisluis ook af, ondanks het groter verval tijdens de periode van spuien.

*Tabel 17
Gemiddelde spuiwaarden voor een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende zichtjaren.*

Spuislot	Tijd [%]	Gem. debiet [m ³ /s]	Gem. verval [m]
referentie	7,5	35,7	0,31
5 cm	8,1	33,8	0,24
9 cm	7,4	32,9	0,26
13 cm	6,7	31,7	0,29

Bij een kleinere waarde van het spuislot is de gemiddelde inzetduur en pompdebiet ook kleiner, want omdat er meer via de spuisluis wordt afgevoerd hoeft er minder te worden gepompt.

Tabel 18
Gemiddelde
pompwaarden met
selectieve
onttrekking

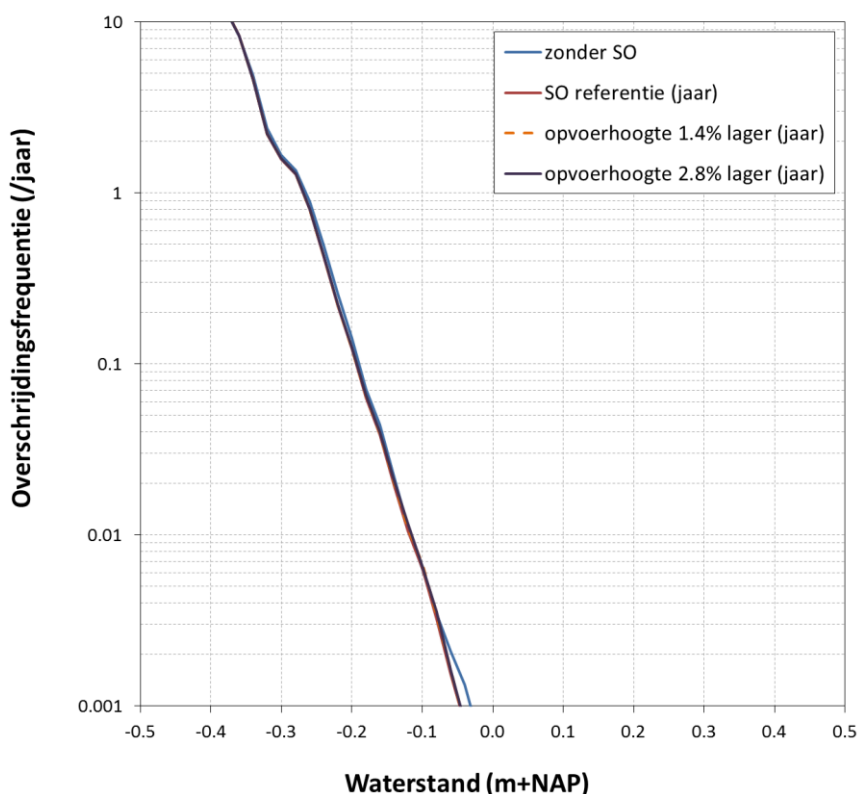
Spuislot	Tijd [%]	Gem. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerhoogte [%]	Tijd neg. opvoerhoogte [%]	Gem. pos. opvoerhoogte [m]	Gem. neg. opvoerhoogte [m]
ref.	9,8	22,6	8,4	1,4	0,71	-0,1
5 cm	10,3	24,1	9,0	1,3	0,74	-0,1
9 cm	10,6	24,9	9,3	1,4	0,73	-0,1
13 cm	11,1	25,8	9,6	1,5	0,74	-0,1

Gevoeligheidsberekeningen opvoerhoogte pompen

De hogere zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal heeft ook invloed op de maximale opvoerhoogte van de pompen. Deze invloed is geschat op 1,4% afname (mondeline toelichting Deltares). Op een maximale opvoerhoogte van 2,35 meter (oude pompen, nieuwe pompen is dit 2,75 meter) is dit slechts een paar centimeter (3 respectievelijk 4 centimeter). De invloed zal naar verwachting erg beperkt zijn. In de berekening is daarom ook uitgegaan dat het effect tweemaal zo groot is (7 respectievelijk 8 cm).

De berekening is uitgevoerd met een statisch verval van 5,5 cm (default) en een doorstroomopening van het kunstwerk selectieve onttrekking van 550 m² (default) en een spuislot van 9 cm.

Figuur 17
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking met verschillende maximale opvoerhoogte van de pompen.



Uit Figuur 17 blijkt dat het effect van de maximale opvoerhoogte op de overschrijdingsfrequenties zeer gering is. Tabel 16 vertelt hetzelfde verhaal voor herhalingstijden van waterstanden op het NZK-ARK.

Tabel 19
Herhalingstijd van
overschrijden
gemiddelde
waterstanden op het
NZK-ARK met
maatregel selectieve
onttrekking bij
verschillende
maximale
opvoerhoogte van
de pompen.

Waterstand	opvoerhoogte maximaal	opvoerhoogte 1.4% lager	opvoerhoogte - 2.8% lager
NAP-0,3 m	1	1	1
NAP-0,2 m	8	8	8
NAP-0,1 m	159	149	154
NAP+0,0 m	5108	5364	4887

6.4

Kwalitatieve beschouwing selectieve onttrekking

De effecten van de maatregel selectieve onttrekking zijn berekend onder de aanname dat de zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal constant is. Uit zoutmetingen en uit modelberekeningen is bekend dat de zoutconcentratie niet constant is (Bijlsma, 2018). Aan het eind van een spuiperiode is de zoutconcentratie duidelijk lager. Ook de inzet van het gemaal IJmuiden, voorafgaand aan de spuiperiode zal de zoutconcentratie verlagen. Variatie in zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal beïnvloedt ook het statisch verval over de selectieve onttrekking, maar het effect op de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden op het NZK-ARK is verwaarloosbaar (zie bijlage D.4). Het spuislot is hierin bepalend.

Ook aan de zeezijde van de spuisluis is de zoutconcentratie niet constant en varieert door de inzet van gemaal en spuisluis. Bijlsma (2018) geeft aan dat het spuislot zal variëren tussen circa 5 en 13 cm. Het effect van de maatregel selectieve onttrekking wordt daarmee bepaald door de keuze van het spuislot. Een keuze van 5 cm voor het spuislot is optimistisch omdat bij het berekenen van de overschrijdingsfrequentie uitgegaan wordt van afvoersituaties op het NZK-ARK. Het is dan aannemelijk dat een significant deel van de spuimogelijkheden voorafgegaan wordt door de inzet van het gemaal en het Binnenspuikanaal dan relatief zoet is (en dus uitgegaan moet worden van een groter spuislot).

Het spuislot wordt in praktijk gebruikt als vuistregel/instructie voor de inzet van de spuisluis. Om te voorkomen dat zeewater naar binnenstroomt wordt de spuisluis pas bij een minimale waterstandsverschil (het spuislot) geopend. In de huidige situatie, zonder selectieve onttrekking, wordt daarvoor een constante waarde van 12 cm gehanteerd. Uit praktische overwegingen zal met de maatregel selectieve onttrekking ook een constante waarde voor het spuislot worden gekozen, mede omdat het in praktijk nog niet haalbaar is om de waarde van het spuislot te baseren op actuele metingen. De instelling van het spuislot zal, om zoutindringing te voorkomen, aan de veilige kant gekozen worden.

De zoutconcentratie beïnvloedt ook de pompkarakteristiek van gemaal IJmuiden. Door de hogere zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal zal de pompcapaciteit (het debiet) alsmede de maximale opvoerhoogte veranderen. Verwacht wordt dat de invloed op de pompcapaciteit gecompenseerd kan worden door extra vermogen (met hogere energielasten voor het gemaal IJmuiden). De maximale opvoerhoogte zal door de maatregel selectieve onttrekking afnemen. Inschatting van Deltares⁶ is dat de maximale opvoerhoogte afneemt met het relatieve dichtheidsverschil (factor 0,0136, (Bijlsma, 2018)). Het effect hiervan is niet met berekeningen gekwantificeerd, maar zal door de beperking in pompen leiden tot hogere waterstanden op het NZK-ARK.

Bijlsma (2018) geeft aan dat de gemiddelde waarde van het spuislot 9 cm zal zijn, met een variatie van circa 4 cm als gevolg van de variantie in zoutconcentratie op het Binnenspuikanaal. Het is redelijk te veronderstellen om aan te nemen dat in afvoersituaties deze waarde iets groter zal zijn en daarmee zal de maatregel selectieve onttrekking leiden tot een toename van hoge waterstanden op het NZK-ARK.

⁶ Mondelinge toelichting op memo van Bijlsma (2018).

7 Synthese

In 2017 is in het project Slim Watermanagement Noordzeekanaal/-Amsterdam-Rijnkanaal (NZK-ARK) gekeken naar de kans van optreden van hoge waterstanden bij wateroverlast op het NZK-ARK, de invloed van klimaatveranderingen hierop en naar mogelijkheden voor Slim Watermanagement. De belangrijkste bevindingen uit het onderzoek waren dat hoge waterstanden op het NZK-ARK vaker voorkomen dan vooraf werd verwacht en dat de dominante factor hierin het falen van gemaal IJmuiden is. De faalkans van het NZK-ARK – het overschrijden van een waterstand van NAP+0,0 m – is 1/72 jaar. In de analyses die zijn uitgevoerd naar de faalkans van het NZK-ARK is het gepland onderhoud buiten beschouwing gelaten. De belangrijkste redenen hiervoor zijn dat het effect beperkt is (Kuiper, 2016). Bij onderhoud gaat het om één pomp tegelijk, terwijl het falen van het NZK-ARK gedomineerd wordt door gebeurtenissen waarbij meerdere pompen gelijktijdig falen.

Door veranderingen in het klimaat zullen hoge waterstanden vaker gaan voorkomen. Hierin is de verwachte stijging van de zeespiegel dominant. Effecten van de verwachte toename in neerslag worden gedempt door de beperking van de gemaalcapaciteit van de achterliggende polderboezemsystemen naar het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal. Dat wil zeggen: een toename van neerslagpieken zal vooral merkbaar zijn in de regionale systemen, en minder op het NZK-ARK.

Door toepassen van Slim Watermanagement maatregelen kan de kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK worden verkleind. Deze zijn echter onvoldoende om de berekende klimaateffecten te kunnen compenseren. Daarom zijn aanvullende maatregelen nodig om het watersysteem naar de toekomst toe goed te kunnen beheren.

Het onderzoek uit 2017 gaf aanleiding tot aanvullende en verdiepende vragen over het functioneren van het watersysteem. Er was behoefte om in meer detail te kijken naar het falen van gemaal IJmuiden: is het falen van het gemaal- en spuicomplex goed meegenomen in de modellering en sluiten de resultaten aan op de ervaringen bij de beheerder van het complex? Daarnaast is ook verkend wat effecten zijn van enkele maatregelen, aanvullend op de eerder berekende Slim Watermanagement maatregelen, voor het toekomstig waterbeheer van het Noordzeekanaal/-Amsterdam-Rijnkanaal. Tot slot is het effect verkend van de ontwikkeling van de selectieve onttrekking, onderdeel van de realisatie van de nieuwe grote zeesluis in IJmuiden. Resultaten van deze verkenning kunnen daarbij input zijn voor het project "Vervanging en Renovatie gemaal IJmuiden".

Faalkans gemaal IJmuiden

Het nu uitgevoerde onderzoek laat zien dat de faalkans van gemaal- en spuicomplex IJmuiden op de juiste wijze is meegenomen in de berekening van de overschrijdingsfrequentie van waterstanden. De gehanteerde faalkansen worden door de beheerder van het complex onderschreven en sluiten aan op de ervaring. Er is daarom geen reden tot bijstelling van de resultaten van de faalkansenstudie uit 2017. Dit betekent dus ook dat de faalkans van het complex IJmuiden van groot belang is en blijft voor het functioneren van het watersysteem als geheel.

Het belang van het functioneren van gemaal IJmuiden wordt door Rijkswaterstaat onderkend en er is een actieplan opgesteld om de hersteltijd bij falen terug te brengen tot maximaal 1 week. Gevoeligheidsberekeningen naar het effect van deze maatregel geven aan dat dit enigszins helpt - de herhalingstijd van overschrijden van NAP neemt toe van 72 jaar tot 92 jaar - maar dat hoge waterstanden dan nog steeds voor een belangrijk deel worden bepaald door falen van het gemaal. Een gerichte strategie om de belangrijkste faalmechanismen (kans en herstelduur) te identificeren en aan te pakken lijkt zinvol om de effectiviteit van de inspanningen te vergroten.

Op verzoek van Rijkswaterstaat is een analyse gemaakt van de maximaal te verwachten aanvoer vanuit het gebied naar het NZK-ARK. Deze aanvoer wordt grotendeels bepaald door de gezamenlijke pompcapaciteit van de regionale (boezem)gemalen. Deze heeft een sterk dempend effect op de aanvoergolf naar het NZK. De eens in de 100 jaar aanvoer bedraagt circa 300 tot 330 m³/s voor een duur van respectievelijk 1 week tot 1 dag. Zonder falen is de totale maalcapaciteit van het NZK-ARK 317 m³/s (260 m³/s van gemaal IJmuiden en 57 m³/s van gemaal Zeeburg). Het verkleinen van de faalkansen is dus belangrijk.

Aanvullende maatregelen waterbeheer NZK-ARK

Om de kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK te verkleinen is gekeken naar de effecten van extra afvoercapaciteit enerzijds (door realisatie van een extra gemaal) en naar vermindering van de aanvoercapaciteit anderzijds. Het verminderen van de aanvoercapaciteit naar het NZK-ARK (door de waterschappen op een of andere wijze te laten afvoeren op andere watersystemen dan het NZK-ARK, berging, ...) is daarin het meest effectief. Dit wordt met name veroorzaakt doordat falen van het gemaal IJmuiden dan minder een rol speelt. Het permanent afsluiten van Amstellandboezem heeft een positief effect op de overschrijdingsfrequentie van het NZK-ARK. Aanbevolen wordt het rekenmodel DEZY aan te passen zodat ook het effect van permanent afsluiten van de Vechtboezem kan worden gekwantificeerd. Extra gemaalcapaciteit heeft (uiteraard) ook een positief effect. Dit effect neemt sterk toe als deze extra capaciteit onafhankelijk is van falen van het gemaal IJmuiden, en dus gerealiseerd wordt als een zelfstandige installatie naast het bestaande gemaal of elders in het systeem. Als gemaal IJmuiden dan faalt, blijft de extra capaciteit tenminste nog beschikbaar waardoor hoge waterstanden minder vaak zullen voorkomen. De locatie van deze zelfstandige locatie heeft ook effect op de te verwachten waterstanden, zij het in mindere mate dan de keuze voor een onafhankelijk gemaal.

Voor het ARK en de boezem van AGV lijkt een afvoerpunt aan de zuidkant van het systeem (naar de Lek) gunstig. Hierbij wordt opgemerkt dat in deze studie alleen is gekeken naar waterstanden op het NZK-ARK; alle andere aspecten die van belang zijn bij de keuze voor gemaaluitbreiding en de locatie daarvan zijn buiten beschouwing gelaten. De resultaten vormen daarmee een bouwsteen in het verdere proces.

Zeespiegelstijging

De zeespiegelstijging heeft een grote invloed op overschrijdingsfrequenties van waterstanden op het Noordzeekanaal. Het beperkt namelijk de spui mogelijkheden (zowel duur als verval) en de werking van de pompen (omdat de maximale opvoerhoogte eerder bereikt wordt).

De spui mogelijkheden nemen met de toenemende zeespiegelstijging snel af, van circa 10% van de tijd nu, naar minder dan 2% bij een halve meter zeespiegelstijging. Vanaf 1 meter is de bijdrage van spuien bij IJmuiden verwaarloosbaar. In de komende jaren zal door de klimaatverandering (waaronder zeespiegelstijging) het belang van pompen bij gemaal IJmuiden dus steeds meer toenemen.

Vanaf een zeespiegelstijging van een meter komen waterstanden op het NZK-ARK boven NAP-0,20 m zeer frequent voor. De waarde van NAP wordt bij 1 meter zeespiegelstijging gemiddeld eens in de tien jaar overschreden en elke halve meter extra stijging neemt de herhalingsperiode met circa een factor 3 toe (bij 1,5 meter zeespiegelstijging 1 keer per 3 jaar en bij 2 meter zeespiegelstijging 1 keer per jaar). Deze effecten zijn zo sterk, dat het voor het beheergebied van het NZK-ARK zeer belangrijk is de werkelijke stijging van de zeespiegel nauwgezet te volgen. Wanneer de zeespiegel sneller stijgt dan waar de gehanteerde klimaatscenario's (KNMI'14) vanuit gaan, komt de houdbaarheid van het watersysteem - spuien en malen via een rechtstreekse verbinding naar zee - binnen de levensduur van een nieuw gemaal in het gedrang.

Maatregel selectieve onttrekking

Als onderdeel van de realisatie van de Nieuwe Grote Zeesluis bij IJmuiden is als mitigerende maatregel de 'selectieve onttrekking' ontworpen. Als onderdeel van deze studie is het mogelijke effect van deze maatregel onderzocht op de overschrijdingsfrequenties van waterstanden op het NZK-ARK. De berekeningen laten zien dat de maatregel 'selectieve onttrekking' overwegend een negatief effect heeft op de faalkans van het NZK/ARK. Het effect van de selectieve onttrekking op de waterstanden wordt in sterke mate bepaald door de dynamiek van zoet, zout en brak/zilt water op het NZK, het Binnenspuikanaal en het buitenwater. Het probabilistisch model DEZY is niet bedoeld voor en niet in staat om deze vloeistofdynamica te beschrijven.

De resultaten van de berekeningen worden bepaald door de uitgangspunten die worden gehanteerd in het model. Het dichtheidsverschil van het binnen- en buitenwater en is in het model constant verondersteld. Als het binnenwater 'zout' wordt verondersteld is het spuislot klein en nemen de spui mogelijkheden toe, waardoor de maatregel selectieve onttrekking een positief effect heeft op de overschrijdingsfrequentie.

Als het binnenwater 'zoet' wordt verondersteld heeft de maatregel selectieve onttrekking een negatief effect. In werkelijkheid varieert het dichtheidsverschil, afhankelijk van het gevoerde waterbeheer. De bandbreedte hierin is te groot om onderbouwde uitspraken te doen over welke uitgangssituatie (zoet of zout binnenwater) correct is. Aanbevolen wordt daarom de modellering van de maatregel 'selectieve onttrekking' te verbeteren door de variatie in de dichtheidsverschillen hierin mee te nemen. Hiertoe is verdiepend onderzoek nodig naar de dynamiek van zoet, zout en brak/zilt water op het NZK, het Binnenspuikanaal en het buitenwater. Voor afvoersituaties kan worden beargumenteerd dat het binnenwater bij IJmuiden relatief 'zoet' zal zijn, wat leidt tot de conclusie dat de maatregel selectieve onttrekking zal leiden tot een grotere kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK. Realisatie van extra pompcapaciteit heeft naar verwachting zeer beperkt effect omdat de faalkans van het gemaal dominant is in het optreden van hoge waterstanden. Belangrijk is dat bij falen niet alle pompcapaciteit (voor langere tijd) niet beschikbaar is: dus het realiseren van onafhankelijkheid in falen van pompcapaciteit.

8 Referenties

Brink, M van den, Coonen M, 2018.

Slim Watermanagement Redeneerlijnen Amsterdam-Rijnkanaal / Noordzeekanaal.

HKV lijn in water en HydroLogic, versie 2.0, december 2018.

Bijlsma, 2018.

Spuislot spuisluizen IJmuiden.

Memo, kenmerk 11203285-000-HYE-0002, 14 november 2018.

Delta Pi, 2016.

Afleiding faalkansen en hersteltijden voor Gemaal en Spuisluis IJmuiden.

Memo, versie 1.0 (definitief), 28 april 2016.

Geerse C, Kuijper B, 2015

Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied; Hoofdrapport van model DEZY. HKV lijn in water, in opdracht van Rijkswaterstaat-WVL.

Rapport PR3013.10, mei 2015.

Janssen H, 2017

Effect selectieve onttrekking IJmuiden op waterbeheer. Rijkswaterstaat memo, 23 september 2017.

Kuijper B, Versteeg R, Geerse C, 2016

Doorontwikkeling DEZY 2.0; Verbetering hydrologische modellering NZK-ARK. HKV lijn in water, in opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. Rapport PR3232.10, juni 2016.

Vermeulen C, Versteeg R, Brink M van den, 2017a.

Faalkansanalyse Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij wateroverlast (Hoofdrapport).

HKV lijn in water en HydroLogic, Rapport Pr3393.10, september 2017.

Vermeulen C, Versteeg R, Brink, M van den, 2017b.

Faalkansanalyse Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij wateroverlast (technisch achtergrondrapport).

HKV lijn in water en HydroLogic, Rapport Pr3393.10, september 2017.

Bijlagen

Opmerking

In de bijlagen zijn de resultaten opgenomen van de DEZY-berekeningen voor winter- en zomerhalfjaar (en gehele jaar).

Berekeningen uit de verkenning naar de aanvullende berekeningen zijn ook opgenomen in de bijlage; deze berekeningen zijn alleen uitgevoerd voor een winterhalfjaar. De verkennende berekeningen waren voor een eerste indruk van de gevoeligheid op overschrijdingsfrequentie en daaruit is door de projectgroep bestaande uit RWS en waterschappen de selectie gemaakt dit is gerapporteerd in de hoofdtekst.

A

Resultaten berekeningen faalkans IJmuiden

In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd van berekeningen met een aangepast faalkans voor het gemaal IJmuiden. Hierbij is gekeken naar het effect op de overschrijdingsfrequentie NZK-ARK is als de kans op een faalduur van meer dan 168 uur (een week) van gemaal IJmuiden kleiner zo zijn. Hierbij is gekeken naar (zie ook Tabel 1):

- Ambitieniveau
Alle gebeurtenissen die nu een herstelduur hebben van meer dan 168 uur zijn in één week hersteld;
- Kleinere faalkans
Van alle gebeurtenissen die nu een herstelduur hebben van meer dan 168 uur kan van de helft de herstelduur worden teruggebracht tot één week.

In Tabel 20 worden de herhalingstijden van waterstanden op het NZK-ARK (resp. Amstellandboezem) gegeven voor beide situaties, uitgesplitst naar winterhalfjaar, zomerhalfjaar en jaar⁷.

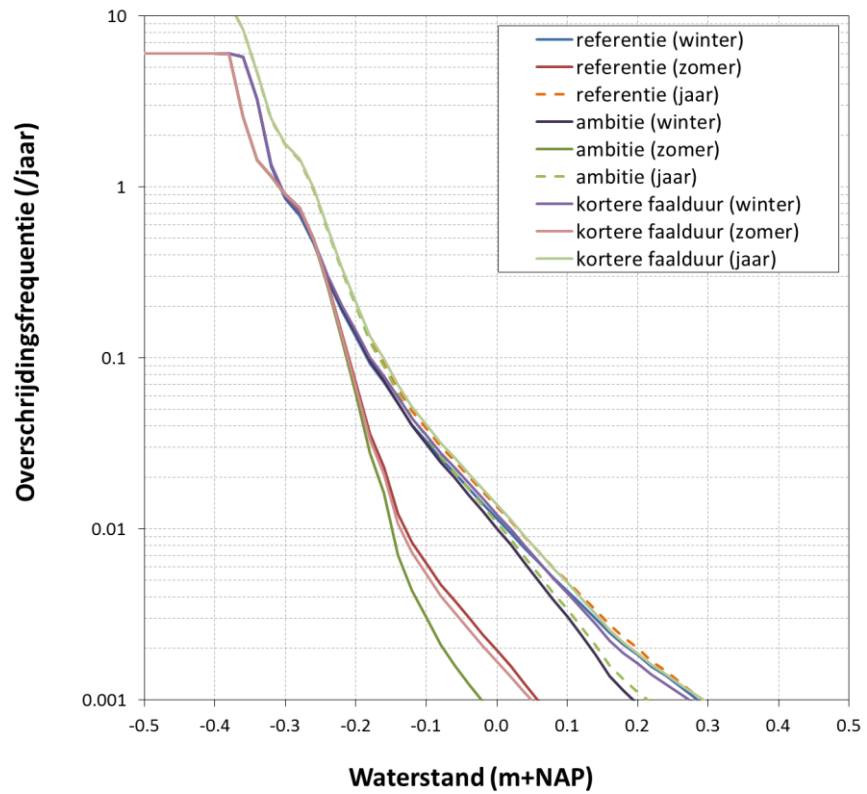
*Tabel 20
Herhalingstijden per
waterstand op het
NZK-ARK bij
verschillende
faalduren van
gemaal IJmuiden.*

Waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal					
	ambitie			kleinere faalkans		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	7	16	5	7	15	5
NAP-0,1 m	32	330	29	28	184	25
NAP+0,0 m	99	1254	92	82	595	72

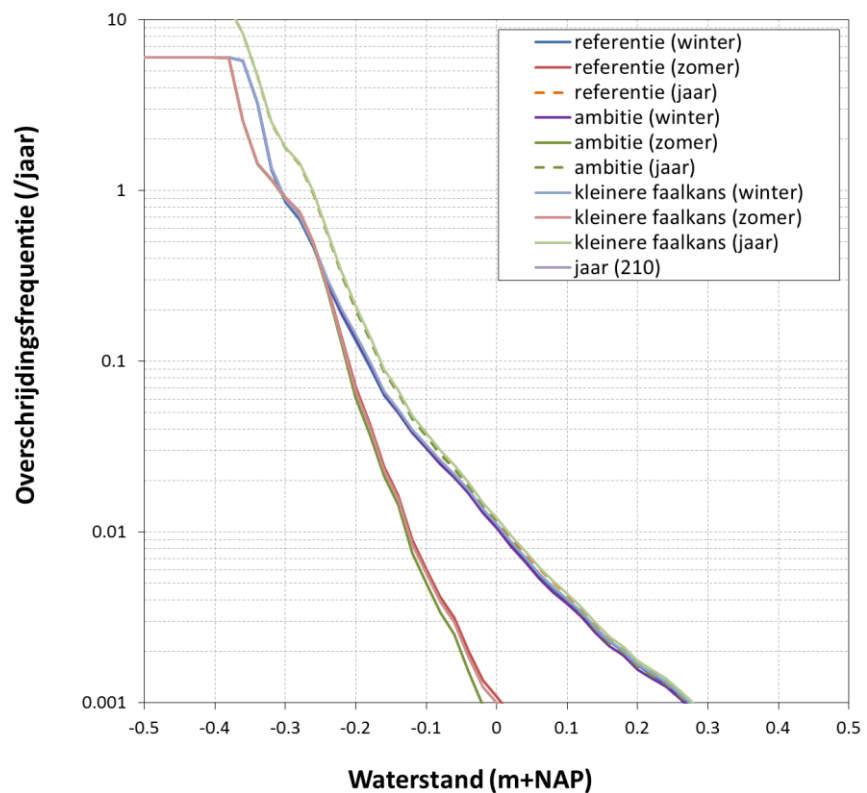
De overschrijdingsfrequentie in het winterhalfjaar is bepalen bij optreden van waterstanden boven NAP-0,2 m. Figuur 18 en Figuur 19 geven de overschrijdingsfrequentie van waterstanden voor het NZK-ARK (resp. de Amstellandboezem).

⁷ De opsplitsing in winter- en zomerhalfjaar is een gevolg van de functionaliteit in DEZY: daar wordt de overschrijdingsfrequentie per winter- of zomerhalfjaar berekend. De overschrijdingsfrequentie voor een jaar is dan de som van beide.

*Figuur 18
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK voor verschillende faalkansen gemaal IJmuiden.*



*Figuur 19
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem voor verschillende faalkansen gemaal IJmuiden.*



B

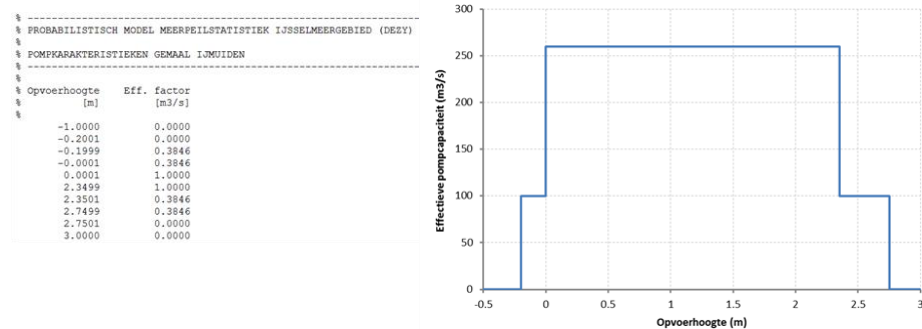
Resultaten berekeningen pompdebiet

Er zijn verschillende combinaties van beschikbare pompcapaciteit op het NZK-ARK door gerekend. Hierbij is het uitgangspunt geweest dat er pompcapaciteit met 50 m³/s veranderde. Deze pompcapaciteit kan worden toegevoegd aan het gemaal IJmuiden of elders aan het NZK-ARK worden geplaatst. Voor de overschrijdingsfrequentie op het NZK-ARK maakt het hierbij niet uit op welke locaties dat is omdat in de berekeningen uitgegaan wordt van een gemiddelde waterstand op het NZK-ARK (en op de Amstellandboezem).

In de berekeningen van extra pompcapaciteit is uitgegaan van de bestaande faalkansen voor gemaal IJmuiden en gemaal Zeeburg (Vermeulen et al, 2017b). In de berekeningen is uitgegaan dat de faalkansen van beide gemalen onafhankelijk van elkaar verondersteld mogen worden; dit betekent dat gelijktijdig falen van gemaal IJmuiden en gemaal Zeeburg zeer onwaarschijnlijk is.

De extra gemaalcapaciteit is in DEZY gemodelleerd door het aanpassen van de maximale gemaalcapaciteit, bij gelijkblijvende pompkarakteristiek (Figuur 20) en de vastgestelde faalkansen van gemaal IJmuiden en gemaal Zeeburg (Vermeulen et al, 2017b).

*Figuur 20
Pompkarakteristiek
IJmuiden bij
maximale capaciteit
van 260 m³/s (links:
invoer DEZY, rechts:
resulterende
effectieve
capaciteit).*



Door deze extra pompcapaciteit toe te kennen aan Zeeburg IJmuiden ontstaat een situatie waarin het falen van de extra pompcapaciteit onafhankelijk is van gemaal IJmuiden. Hiermee wordt een conservatieve inschatting van het effect gedaan omdat extra gemaalcapaciteit in Nieuwegein of Muiden (beter gezegd een andere locatie dan IJmuiden of Zeeburg) betekent dat deze onafhankelijk is van IJmuiden en Zeeburg. In Tabel 21 zijn de uitgevoerde berekeningen samengevat.

*Tabel 21
Overzicht
berekeningen
afvoercapaciteit van
het NZK in termen
van capaciteit en
faalkans*

Afvoercapaciteit	Totale pompcapaciteit NZK-ARK			Faalkanssituatie
	IJmuiden	Zeeburg	Extra	
210 m ³ /s	210 m ³ /s	57 m ³ /s	--	gecorrleerd
260 m ³ /s	260 m ³ /s	57 m ³ /s	--	gecorrleerd
	210 m ³ /s	57 m ³ /s	50 m ³ /s	ongecorrleerd
310 m ³ /s	310 m ³ /s	57 m ³ /s	--	gecorrleerd
	260 m ³ /s	57 m ³ /s	50 m ³ /s	ongecorrleerd
360 m ³ /s	260 m ³ /s	57 m ³ /s	100 m ³ /s	ongecorrleerd

In onderstaande paragrafen zijn de resultaten van de berekeningen gepresenteerd. De aanduiding '+50' refereert aan de situatie met extra pompcapaciteit (ten opzichte van gemaal IJmuiden), onafhankelijk van de faalkans van het gemaal IJmuiden.

B.1

Afvoercapaciteit 210 m³/s

De berekening met een afvoercapaciteit van 210 m³/s representeert de situatie waarin ene nieuwe pomp van gemaal IJmuiden wegvalt (bijvoorbeeld vanwege langdurig onderhoud).

*Tabel 22
Herhalingstijden per waterstand op het NZK-ARK bij een totale pompcapaciteit van 210 m³/s).*

Waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal			
	260 m ³ /s		Pompcapaciteit 210 m ³ /s	
	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	0
NAP-0,2 m	5	3	3	2
NAP-0,1 m	26	6	22	5
NAP+0,0 m	74	17	145	15

Het wegvallen van 50 m³/s pompcapaciteit heeft beperkt effect op de overschrijden van waterstanden tot NAP-0,20 m, maar voor hogere waterstanden is het effect groot.

*Tabel 23
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem bij een totale pompcapaciteit van 210 m³/s).*

Waterstand	Amstellandboezem			
	260 m ³ /s		Pompcapaciteit 210 m ³ /s	
	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	0
NAP-0,2 m	7	3	3	2
NAP-0,1 m	32	11	34	8
NAP+0,0 m	93	21	125	18

Voor de Amstellandboezem is het effect groter dan voor het NZK-ARK. Tot en met NAP -0,2 m zijn de resultaten gelijk door de open verbinding tussen het NZK-ARK en de Amstellandboezem.

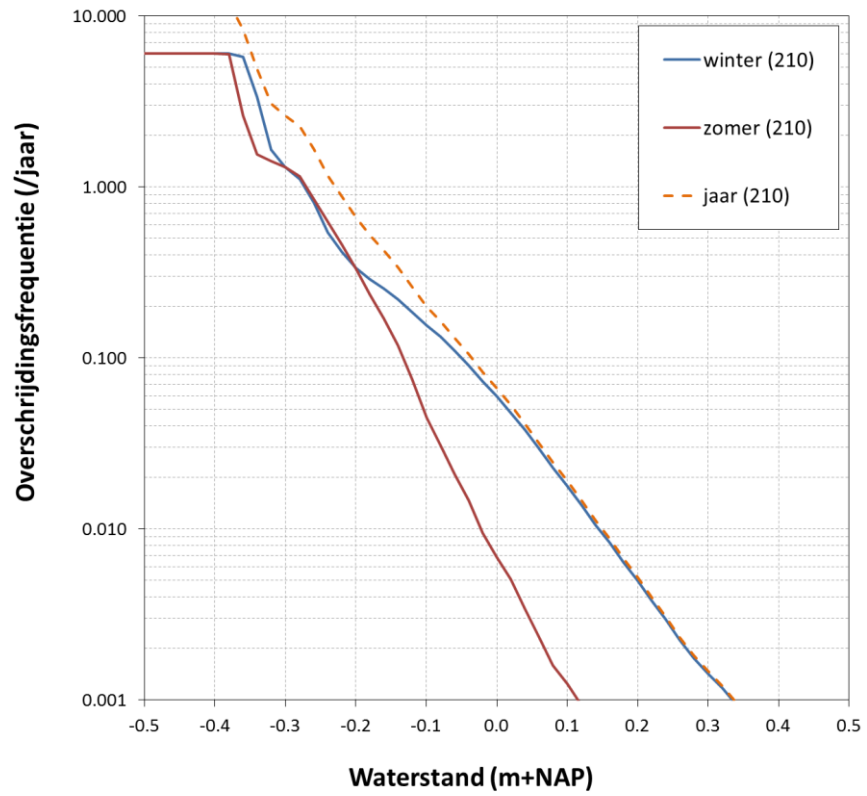
*Tabel 24
Gemiddelde spuiwaarden IJmuiden (afvoercapaciteit 210 m³/s).*

Locatie	winter		zomer		gem. verval [m]
	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]	tijd [%]	
IJmuiden	9,9	47,8	0,32	5,6	26

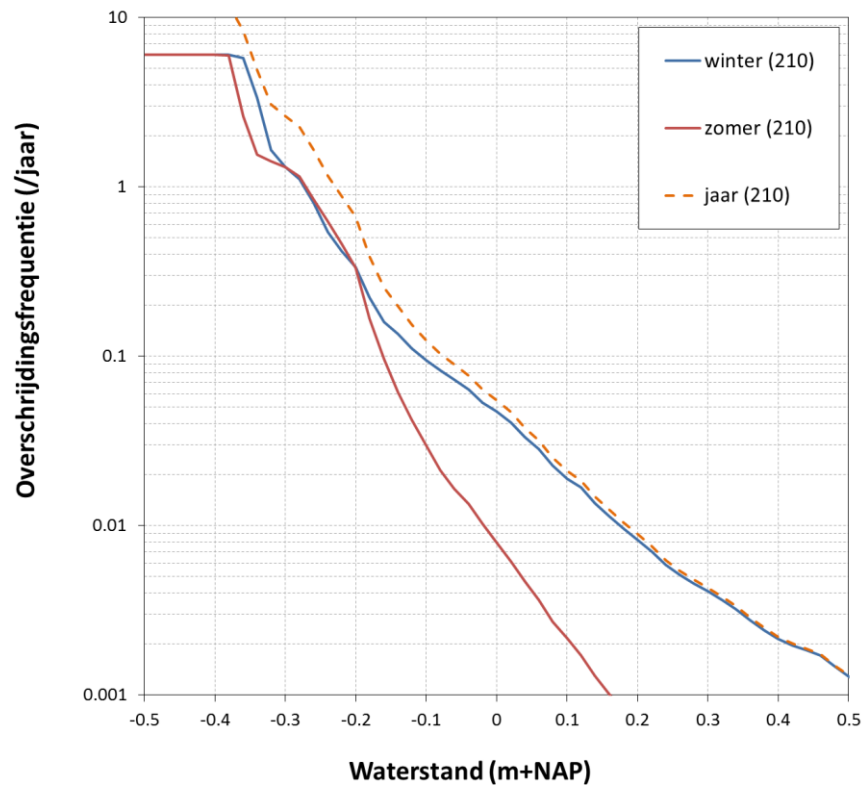
*Tabel 25
Gemiddelde pompwaarden IJmuiden (afvoercapaciteit 210 m³/s).*

	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	18,2	3,6	10,9
Gem. debiet [m ³ /s]	34,6	5,7	20,2
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	15,7	3	9,4
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,5	0,6	1,6
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,7	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0,1	-0,1	-0,1

*Figuur 21
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK bij een totale pompcapaciteit van 210 m³/s).*



*Figuur 22
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem bij een totale pompcapaciteit van 210 m³/s).*



Afvoercapaciteit 260 m³/s

Bij een afvoercapaciteit van 260 m³/s vergelijken we de huidige situatie bij IJmuiden met de situatie waarin 50 m³/s onafhankelijk opereert van gemaal IJmuiden: als IJmuiden faalt dat blijft deze extra afvoercapaciteit vrijwel zeker beschikbaar.

*Tabel 26
Herhalingstijden per
waterstand op het
NZK-ARK bij een
totale
pompcapaciteit van
260 m³/s).*

Waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal					
	Referentie (260 m ³ /s)			Pompcapaciteit (210+50 m ³ /s)		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	3	2	1
NAP-0,2 m	7	14	5	23	37	14
NAP-0,1 m	31	160	26	126	481	100
NAP+0,0 m	87	511	74	340	1794	286

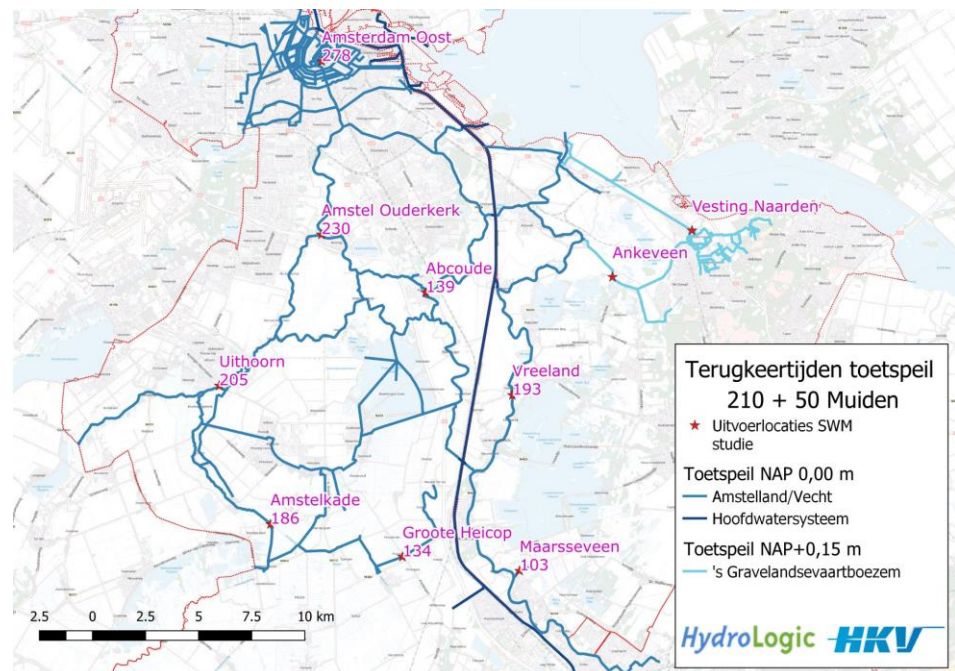
Het onafhankelijk opstellen van de extra pompcapaciteit (210+50 m³/s) zorgt ervoor dat de hoge waterstanden minder vaak optreden. Bij een onafhankelijke opstelling treedt NAP 0,0 m een factor 4 minder vaak op.

*Tabel 27
Herhalingstijden per
waterstand op de
Amstellandboezem
bij een totale
pompcapaciteit van
260 m³/s).*

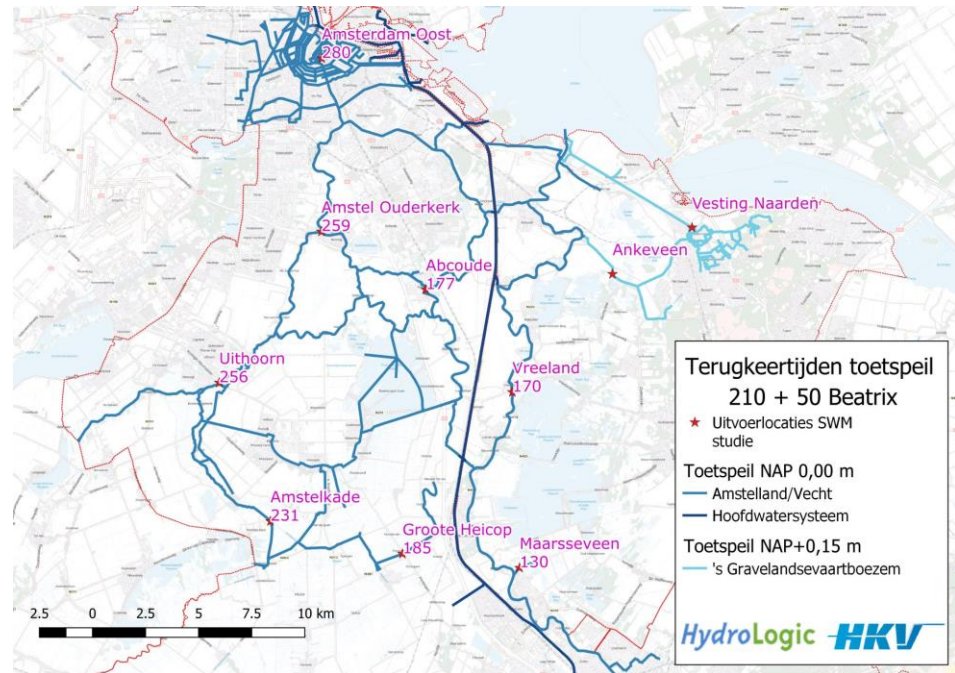
Waterstand	Amstellandboezem					
	Referentie (260 m ³ /s)			Pompcapaciteit (210+50 m ³ /s)		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	3	2	1
NAP-0,2 m	7	14	5	23	37	14
NAP-0,1 m	32	164	27	126	481	100
NAP+0,0 m	93	919	85	340	1794	286

In Figuur 23 en Figuur 24 zijn de bijbehorende herhalingstijden weergegeven van een waterstand van NAP 0,00 m voor de uitvoerlocaties op de boezem van AGV, waarbij het onafhankelijk gemaal is geplaatst bij Muiden (Figuur 23) of de Beatrixsluizen (Figuur 24).

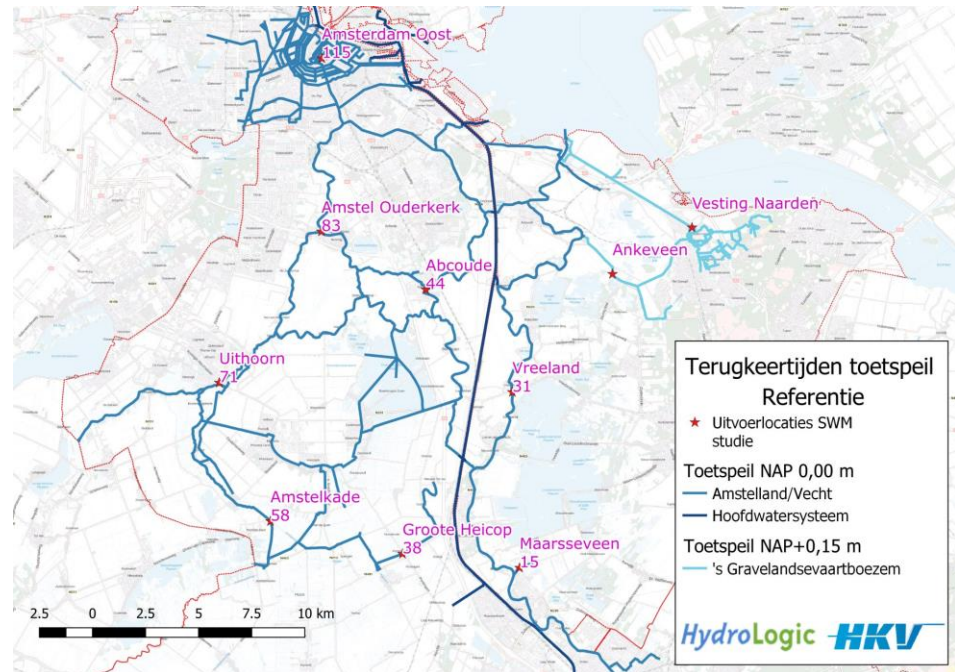
*Figuur 23
Herhalingstijden NAP
0,0 m voor enkele
uitvoerlocaties op de
boezem van AGV, bij
een pompcapaciteit
van 210 m³/s bij
IJmuiden en 50 m³/s
bij Muiden.*



*Figuur 24
Herhalingstijden NAP
0,0 m voor enkele
uitvoerlocaties op de
boezem van AGV, bij
een pompcapaciteit
van 210 m³/s bij
IJmuiden en 50 m³/s
bij de Beatrixsluizen.*



*Figuur 25
Herhalingstijden NAP
0,0 m voor enkele
uitvoerlocaties op de
boezem van AGV, bij
een pompcapaciteit
van 260 m³/s.*



Bij de figuren wordt opgemerkt dat de 's Gravelandsevaartboezem buiten beschouwing is gelaten, omdat dit een geheel onafhankelijk watersysteem vormt, waarvoor de DEZY-resultaten niet vertaald kunnen worden.

Voor de boezem is, net als voor het NZK en ARK, het installeren van een onafhankelijk afvoerpunt gunstig. Een locatie aan de zuidkant van het ARK (de Beatrixsluizen) is daarbij voor de meeste locaties gunstiger dan een locatie bij Muiden, uiteraard met uitzondering van de bovenloop van de Vecht zelf.

Tabel 28
Gemiddelde
spuiwaarden
IJmuiden
(afvoercapaciteit
totaal 260 m³/s).

Afvoer cap	winter			Zomer		
	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]
210+50	9,4	45,6	0,32	5,4	24,8	0,29
260	9,5	46,3	0,32	5,4	25,1	0,29

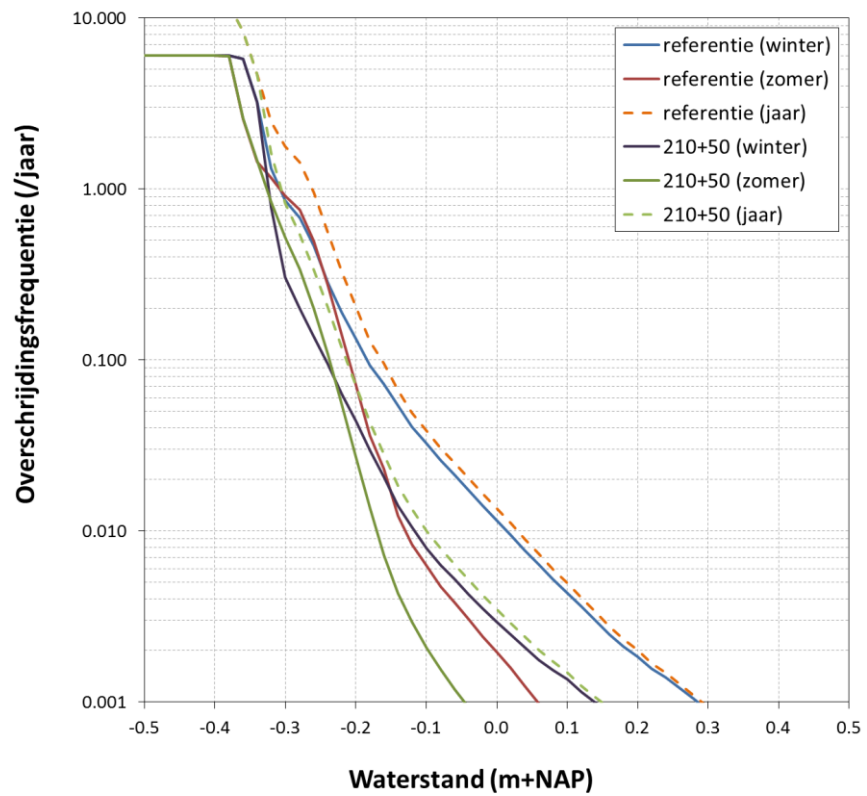
Tabel 29
Gemiddelde
pompwaarden
IJmuiden
(afvoercapaciteit
totaal 260 m³/s).

	210+50 m ³ /s			260 m ³ /s		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	15,5	3,2	9,4	16,2	3,4	9,8
Gem. debiet [m ³ /s]	36,7	6,6	21,7	38,2	6,9	22,3
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	13,4	2,7	8,1	14,0	2,8	8,4
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,0	0,5	1,3	2,1	0,6	1,4
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

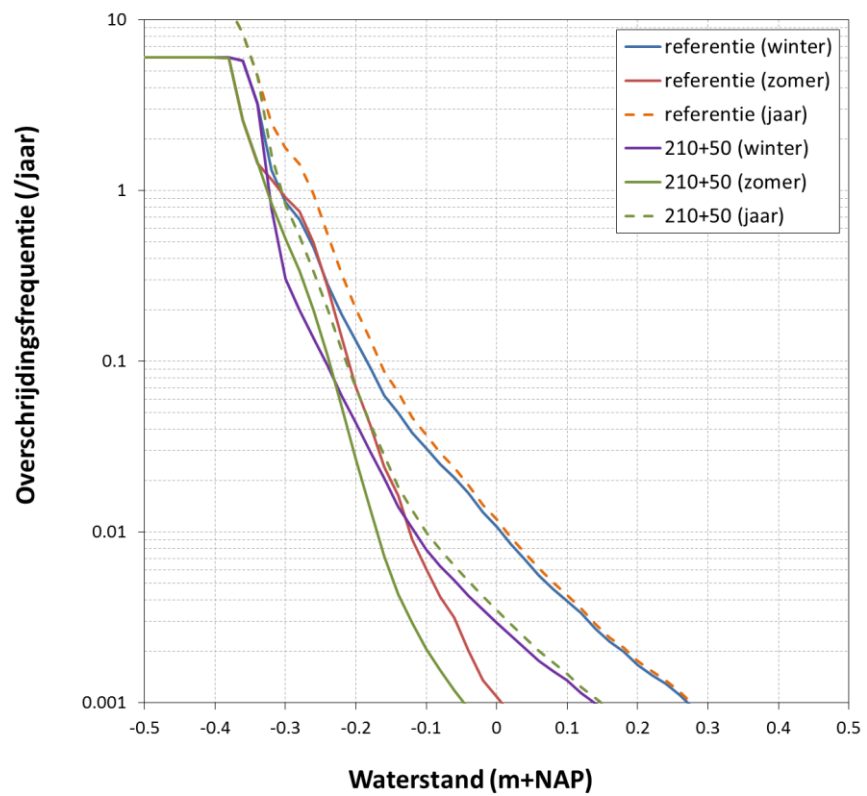
Tabel 30
Gemiddelde
pompwaarden
IJmuiden
(pompdebiet NZK-
ARK gelijk aan 260
m³/s).

	210+50 m ³ /s			260 m ³ /s		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	17.3	3.5	10.4	16.2	3.4	9.8
Gem. debiet [m ³ /s]	33.0	5.5	19.3	38.2	6.9	22.6
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	14.9	2.9	8.9	14.0	2.8	8.4
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2.3	0.6	1.5	2.1	0.6	1.4
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

*Figuur 26
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK bij een totale pompcapaciteit van 360 m³/s).*



*Figuur 27
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem bij een totale pompcapaciteit van 260 m³/s).*



Afvoercapaciteit 310 m³/s

Bij een afvoercapaciteit van 310 m³/s vergelijken we de situatie met 50 m³/s extra bij IJmuiden met de situatie waarin de extra pompcapaciteit van 50 m³/s onafhankelijk opereert van gemaal IJmuiden: als IJmuiden faalt dat blijft deze extra afvoercapaciteit vrijwel zeker beschikbaar.

*Tabel 31
Herhalingstijden per
waterstand op het
NZK-ARK bij een
totale
pompcapaciteit van
310 m³/s).*

Waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal					
	Pompcapaciteit (310 m ³ /s)			Pompcapaciteit (260+50 m ³ /s)		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	2	2	1	7	4	2
NAP-0,2 m	30	93	23	83	213	60
NAP-0,1 m	91	265	68	213	597	157
NAP+0,0 m	231	747	177	437	1898	355

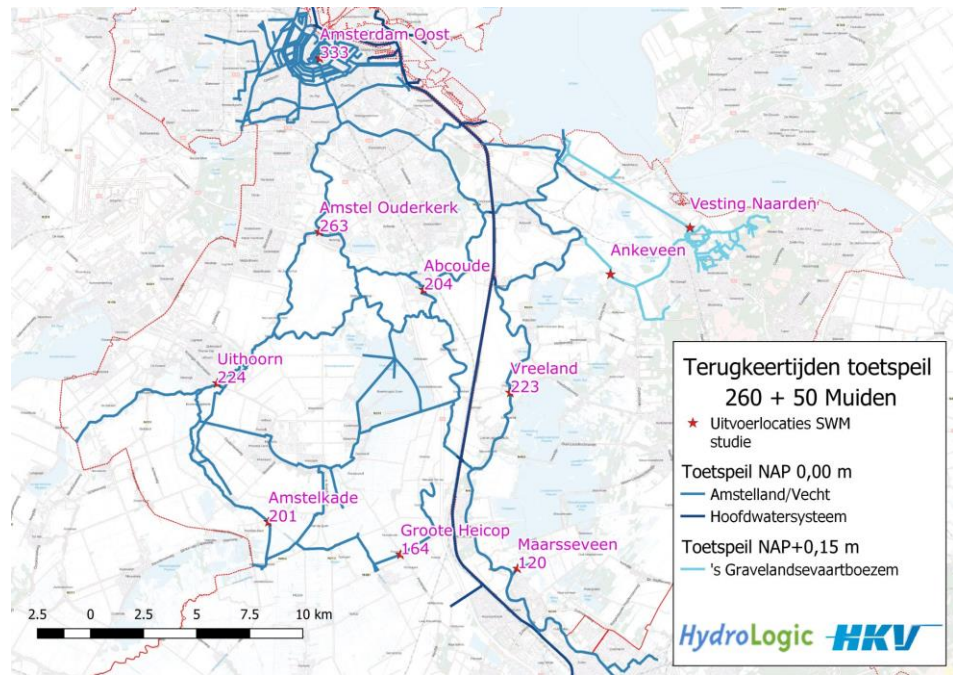
De extra pompcapaciteit heeft een positief effect op de herhalingstijden van waterstanden, maar in de situatie waarin de extra 50 m³/s onafhankelijk is van gemaal IJmuiden neemt het effect duidelijk toe. Dit onderstreept de meerwaarde van het onafhankelijk realiseren van pompcapaciteit.

*Tabel 32
Herhalingstijden per
waterstand op de
Amstellandboezem
bij een totale
pompcapaciteit van
310 m³/s).*

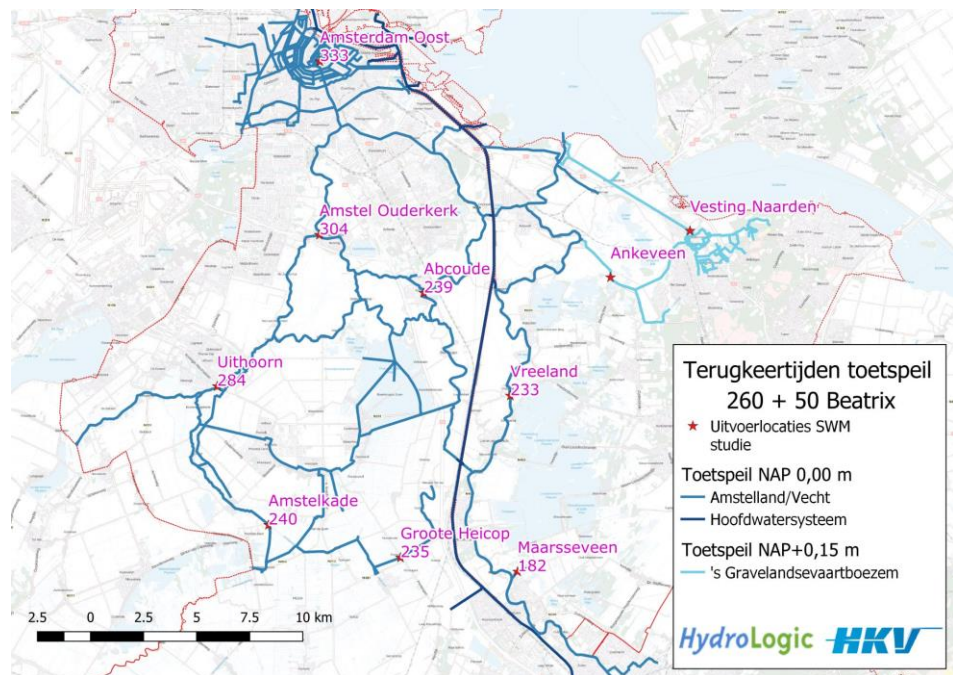
Waterstand	Amstellandboezem					
	Pompcapaciteit (310 m ³ /s)			Pompcapaciteit (260+50 m ³ /s)		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	2	2	1	7	4	2
NAP-0,2 m	30	93	23	83	213	60
NAP-0,1 m	227	1258	193	213	597	157
NAP+0,0 m	901	4801	759	437	1898	355

In Figuur 28 en Figuur 29 zijn de bijbehorende herhalingstijden weergegeven van een waterstand van NAP 0,00 m voor de uitvoerlocaties op de boezem van AGV, waarbij het onafhankelijk gemaal is geplaatst bij Muiden (Figuur 28) of de Beatrixsluizen (Figuur 29).

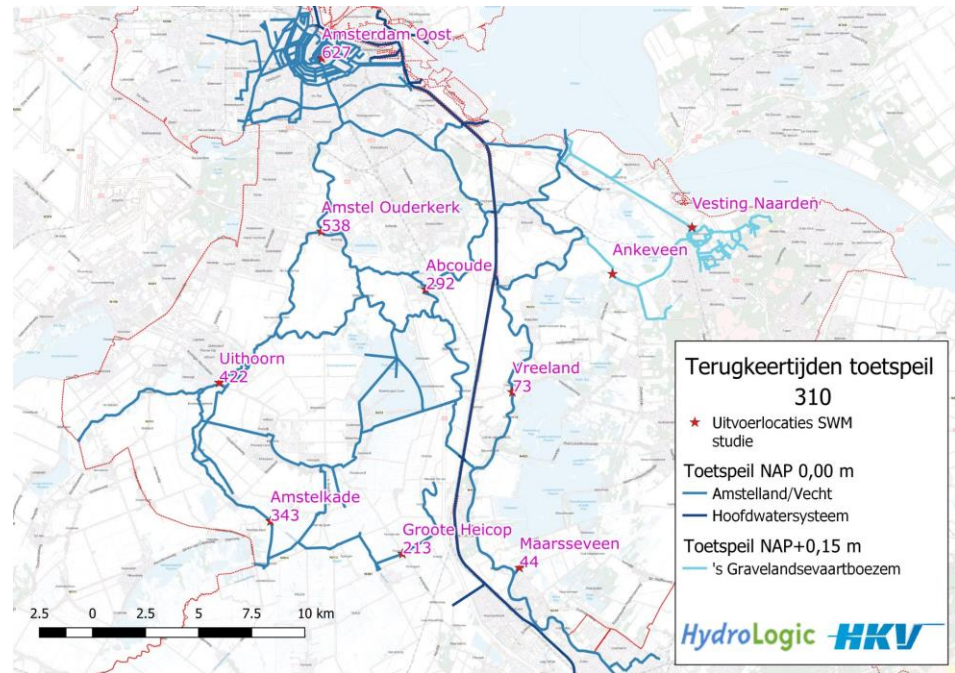
*Figuur 28
Herhalingstijden NAP
0,0 m voor enkele
uitvoerlocaties op de
boezem van AGV, bij
een pompcapaciteit
van 260 m³/s bij
IJmuiden en 50 m³/s
bij Muiden.*



*Figuur 29
Herhalingstijden NAP
0,0 m voor enkele
uitvoerlocaties op de
boezem van AGV, bij
een pompcapaciteit
van 260 m³/s bij
IJmuiden en 50 m³/s
bij de Beatrixsluizen.*



Figuur 30
Herhalingstijden NAP
0,0 m voor enkele
uitvoerlocaties op de
boezem van AGV, bij
een pompcapaciteit
van 310 m³/s bij
IJmuiden



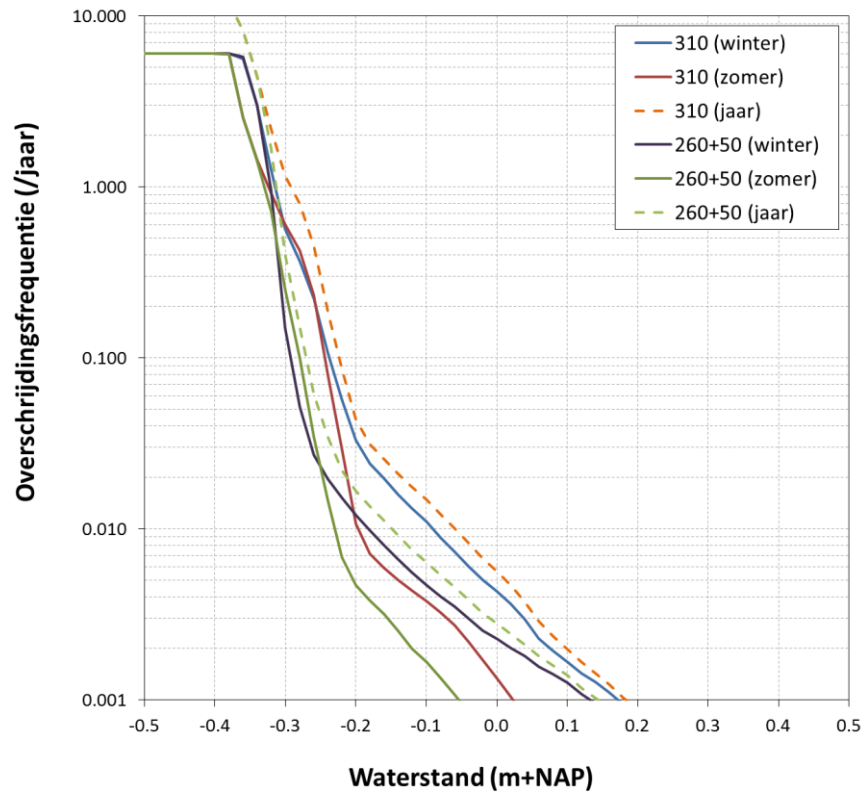
Tabel 33
Gemiddelde
spuiwaarden
IJmuiden
(afvoercapaciteit
totaal 310 m³/s).

Afvoer cap	tijd [%]	winter		Zomer		
		gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]
260+50	9,4	45,6	0,3	5,4	24,6	0,3
310	9,2	44,8	0,3	5,3	24,6	0,3

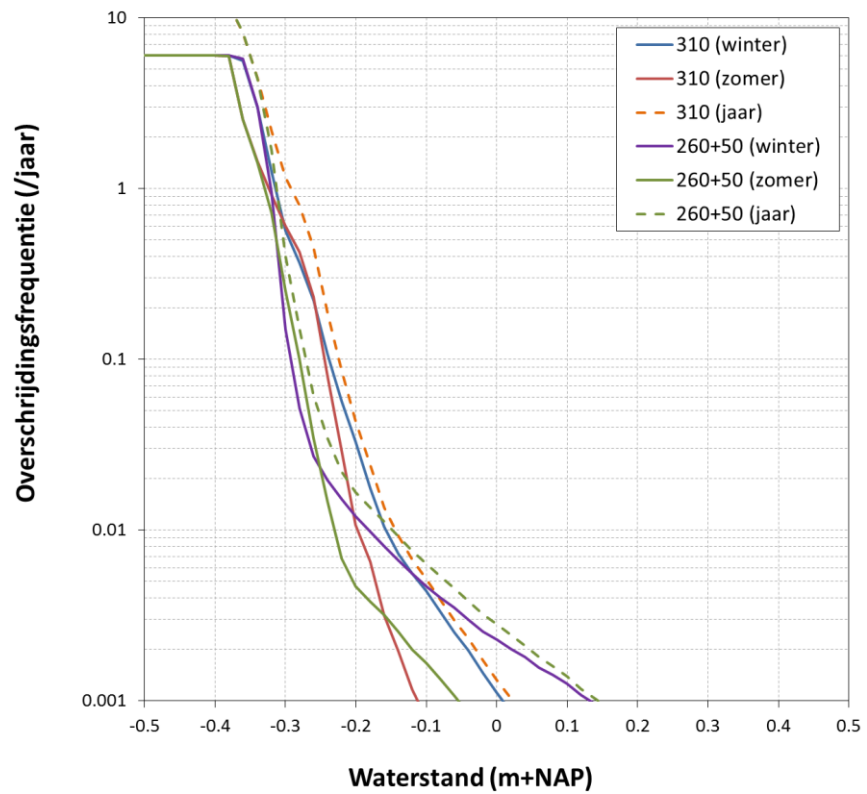
Tabel 34
Gemiddelde
pompwaarden
IJmuiden
(afvoercapaciteit
totaal 310 m³/s).

	260+50 m ³ /s			310 m ³ /s		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	15,5	3,2	9,4	14,9	3,1	9,0
Gem. debiet [m ³ /s]	36,7	6,6	21,7	41,6	7,7	24,7
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	13,4	2,7	8,1	12,9	2,6	7,8
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,0	0,5	1,3	2,0	0,5	1,3
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

*Figuur 31
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK bij een totale pompcapaciteit van 310 m³/s.*



*Figuur 32
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem bij een totale pompcapaciteit van 310 m³/s.*



Afvoercapaciteit 360 m³/s

In deze berekening is de totale pompcapaciteit van het NZK-ARK 360 m³/s (exclusief 57 m³/s van gemaal Zeeburg). De verdeling van de pompcapaciteit is de huidige capaciteit van gemaal IJmuiden (260 m³/s) plus 100 m³/s extra pompcapaciteit met een faalkans *onafhankelijk* van gemaal IJmuiden. In de berekening is uitgegaan van 100 m³/s extra pompcapaciteit op gemaal Zeeburg (dus totaal 157 m³/s).

Tabel 35
Herhalingstijden per waterstand op het NZK-ARK bij een totale pompcapaciteit van 360 m³/s.

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal Pompcapaciteit 360 m ³ /s			
Waterstand	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	9	5	3
NAP-0,2 m	155	381	110
NAP-0,1 m	419	1250	314
NAP+0,0 m	826	4799	704

Tabel 36
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem bij een totale pompcapaciteit van 360 m³/s.

Amstellandboezem Pompcapaciteit 360 m ³ /s			
Waterstand	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	9	5	3
NAP-0,2 m	155	381	110
NAP-0,1 m	419	1250	314
NAP+0,0 m	826	4799	704

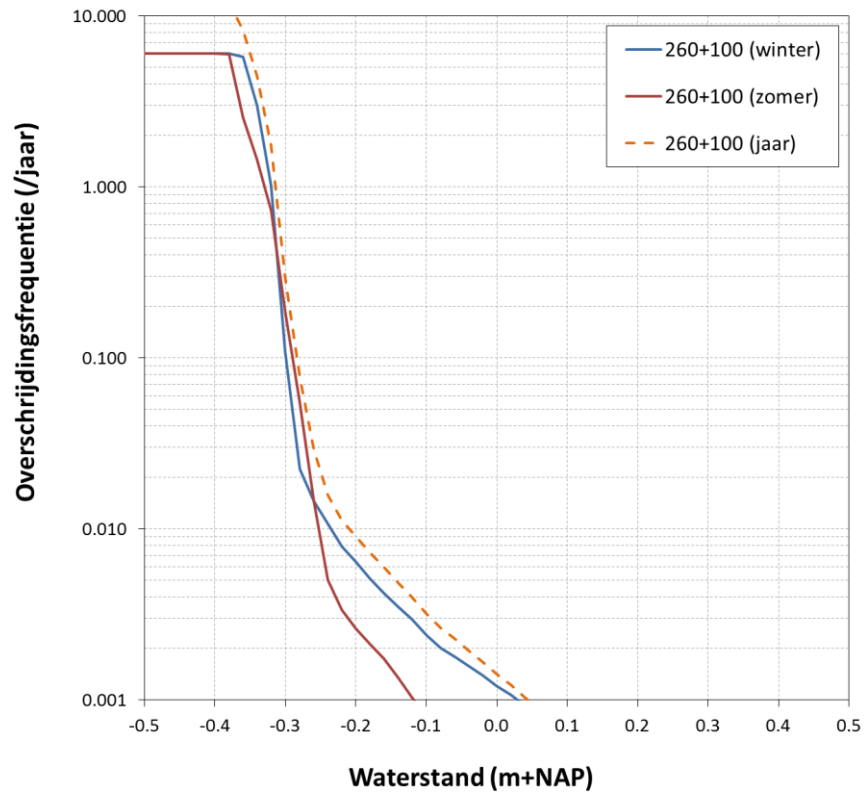
Tabel 37
Gemiddelde spuiwaarden bij een maximaal pompdebiet NZK-ARK van 360 m³/s.

Afvoer cap.	winter			zomer		
	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]
360 m ³ /s	9,3	45,4	0,3	5,4	24,7	0,3

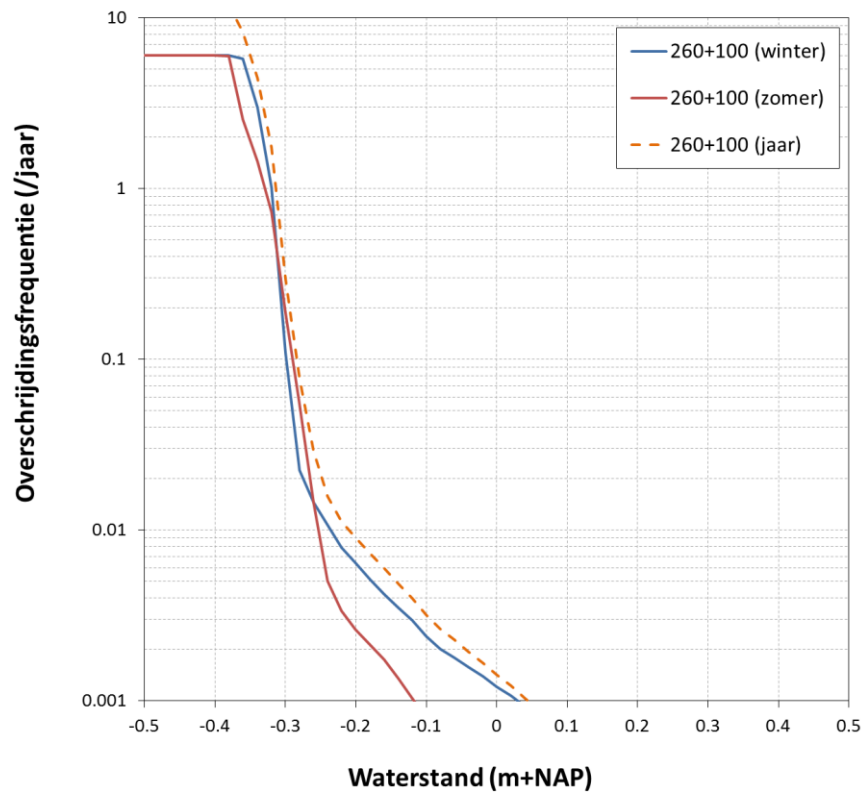
Tabel 38
Gemiddelde pompwaarden IJmuiden (pompdebiet NZK-ARK gelijk aan 360 m³/s).

	360 m ³ /s		
	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	15,2	3,1	9,2
Gem. debiet [m ³ /s]	36,1	6,5	21,3
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	13,2	2,6	7,9
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,0	0,5	1,3
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,7	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0,1	-0,1	-0,1

*Figuur 33
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK bij een totale pompcapaciteit van 360 m³/s).*



*Figuur 34
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem bij een totale pompcapaciteit van 360 m³/s).*



Afvoer naar Markermeer onder vrij verval

Onder normale omstandigheden wordt er geen water wordt afgevoerd van het NZK-ARK naar het Markermeer (via de Oranjesluizen bij Schellingwoude). Verkend is wat het effect is als er wel wordt afgevoerd naar het Markermeer. In de berekeningen is onder vrij verval water afgevoerd van het NZK-ARK naar het Markermeer.

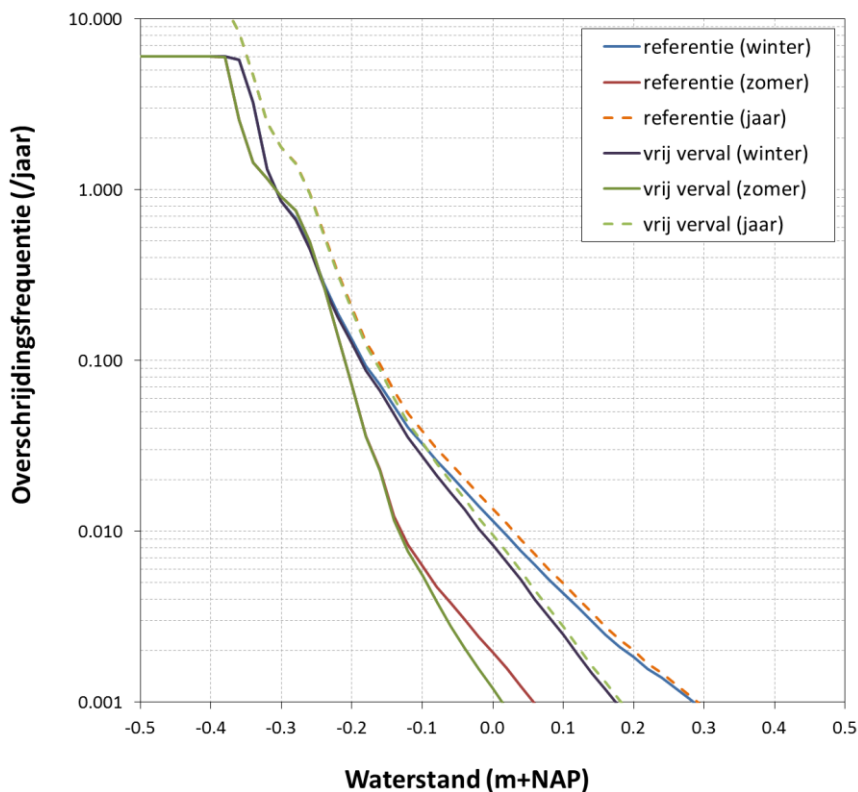
*Tabel 39
Herhalingstijden
gemiddelde
waterstand op het
NZK-ARK met en
zonder afvoer naar
het Markermeer
onder vrij verval.*

Waterstand	Noordzeekanaal/ Amsterdam-Rijnkanaal referentie			afvoer naar Markermeer		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	3	2	1
NAP-0,2 m	7	14	5	23	37	14
NAP-0,1 m	31	160	26	126	481	100
NAP+0,0 m	87	511	74	340	1794	286

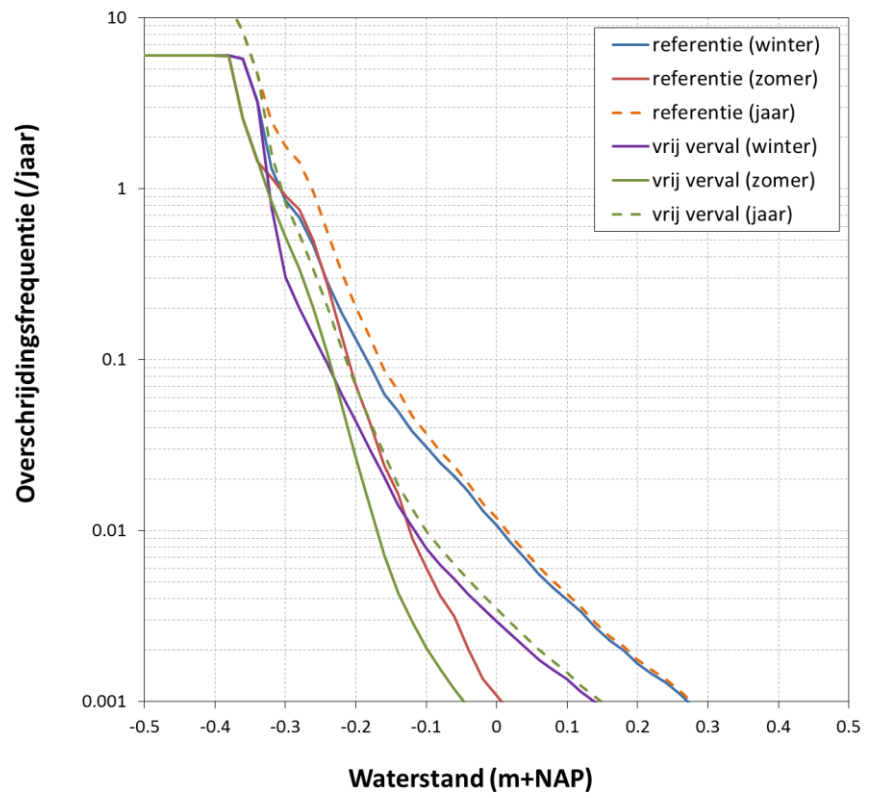
*Tabel 40
Herhalingstijden
gemiddelde
waterstand op de
Amstellandboezem
met en zonder
afvoer naar het
Markermeer onder
vrij verval.*

Waterstand	Amstellandboezem referentie			afvoer naar Markermeer		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	3	2	1
NAP-0,2 m	7	14	5	23	37	14
NAP-0,1 m	32	164	27	126	481	100
NAP+0,0 m	93	919	85	340	1794	286

*Figuur 35
Overschrijdingsfre-
quentie gemiddelde
waterstand op het
NZK-ARK met en
zonder afvoer naar
het Markermeer
onder vrij verval.*



*Figuur 36
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem met en zonder afvoer naar het Markermeer onder vrij verval.*



C

Resultaten berekeningen verandering aanvoer op NZK-ARK

In deze bijlage zijn berekeningen gerapporteerd naar verandering van de aanvoer van water naar het NZK-ARK. Aanvoerveranderingen zijn mogelijk door:

1. Verandering maximale regionale aanvoer naar NZK/ARK;
2. Alternatieve afvoer regionale systemen;
3. Ander beheer AGV-boezem.

c.1

Verandering aanvoer maximale aanvoer vanuit regionale systeem

In deze berekening wordt de maximale aanvoer naar het NZK/ARK vanuit de waterschappen veranderd met 50 m³/s. De toedeling van de veranderde capaciteit is naar rato van het aandeel in de aanvoer van het desbetreffende waterschap. De waterschappen HHNK en HHR voeren deels af naar het NZK/ARK en deels naar andere watersystemen. In de modellering aangehouden dat de totale afvoercapaciteit van HHNK (HHR) toeneemt met de toename van de maximale aanvoer naar het NZK-ARK.

*Tabel 41
Herhalingstijden
gemiddelde
waterstand op het
Noordzeekanaal met
een 50 m³/s meer of
minder van de
maximale aanvoer
naar het NZK-ARK
vanuit het regionale
systeem.*

Waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal					
	Max. aanvoer -50 m ³ /s			Max. aanvoer +50 m ³ /s		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	0
NAP-0,2 m	24	96	19	4	4	2
NAP-0,1 m	61	274	50	10	27	7
NAP+0,0 m	157	799	131	25	145	21

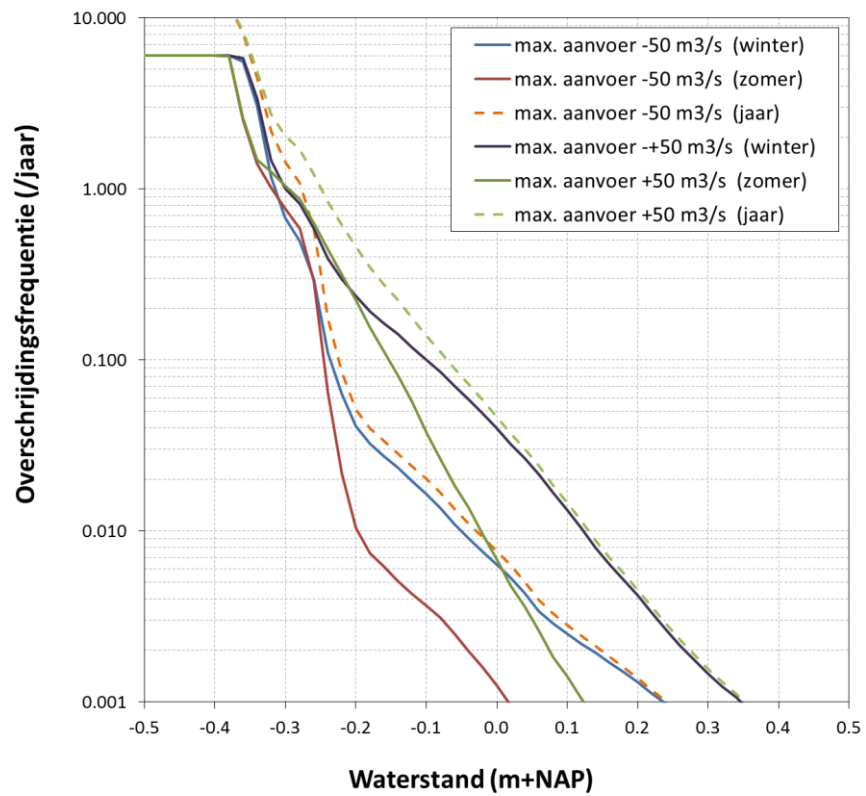
Figuur 37 en Tabel 41 geven aan dat het effect van veranderingen in de aanvoer naar NZK/ARK. De resultaten voor de Amstellandboezem staan in Figuur 38 en Tabel 42.

*Tabel 42
Herhalingstijden
gemiddelde
waterstand op de
Amstellandboezem
met een 50 m³/s
meer of minder van
de maximale
aanvoer naar het
NZK-ARK vanuit het
regionale systeem.*

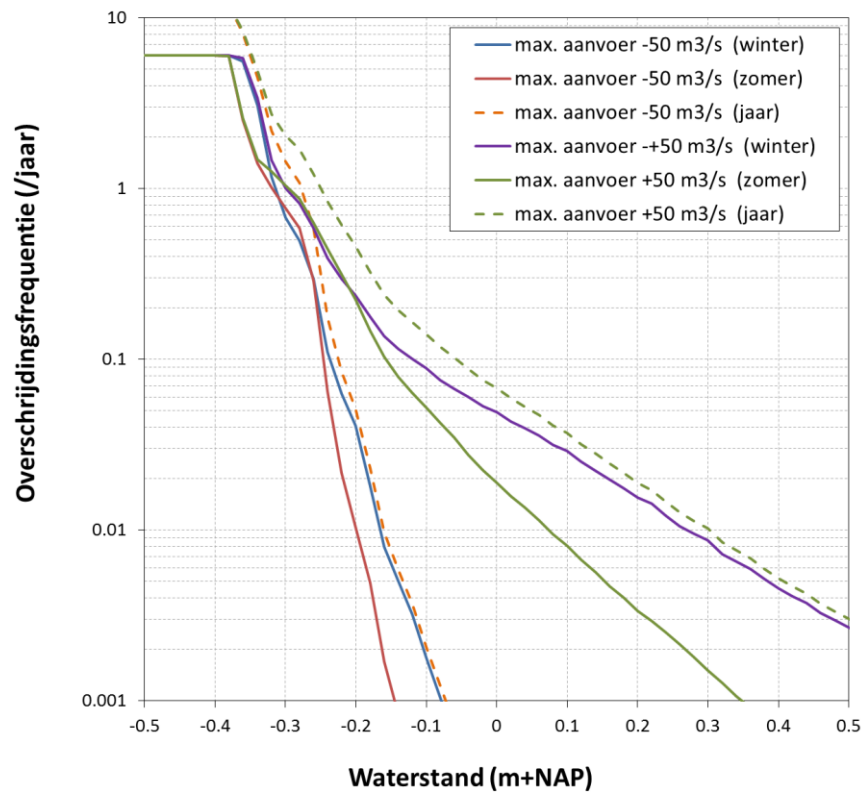
Waterstand	Amstellandboezem					
	Max. aanvoer -50 m ³ /s			Max. aanvoer +50 m ³ /s		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	0
NAP-0,2 m	24	96	19	4	4	2
NAP-0,1 m	555	3605	481	11	19	7
NAP+0,0 m	5565	21992	4441	20	53	15

Tot NAP-0,20 m zijn de resultaten voor de Amstellandboezem gelijk aan die van het NZK-ARK omdat beide watersystemen in open verbinding staan. Daarboven heeft een vermindering van de aanvoer veel effect. Dit komt omdat de AGV-west wordt bemalen door Zeeburg (met capaciteit van 57 m³/s). Een toename van de aanvoer naar het NZK/ARK heeft weinig effect, vanwege sluiten van de fronten en de relatieve toename van aanvoer vanuit Amstelland beperkt is.

*Figuur 37
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK met 50 m³/s minder of meer aanvoer in maximale aanvoer naar het NZK-ARK.*



*Figuur 38
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem met 50 m³/s minder of meer in maximale aanvoer naar het NZK-ARK.*



Alternatieve afvoer door regionale systeem

Het vergroten van de alternatieve afvoer van regionale systemen betekent dat de capaciteit van de gemalen van HHR en HHNK die *niet* naar het NZK-ARK pompen wordt vergroot. In de modellering wordt de capaciteit van deze gemalen met 50 m³/s vergroot, analoog aan de veranderingen in pompcapaciteit.

Het vergroten van de afvoercapaciteit van de gemalen die niet afvoeren naar het NZK-ARK heeft enig effect de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden op het NZK-ARK (Figuur 39 en Tabel 43). Het effect voor de overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden in Amstelland is veel groter (Figuur 40 en Tabel 44). Vanuit Amstelland kan meer aangevoerd worden op het NZK-ARK omdat HHR en HHNK een groter deel van hun waterbezwaar niet aanvoeren op het NZK-ARK. Waterstanden boven NAP-0,20 m komen daardoor minder vaak en minder lang voor waardoor de afsluiting van Amstelland het NZK-ARK ook kortstondiger zal zijn.

Tabel 43
Herhalingstijden per waterstand op het NZK-ARK 50 m³/s extra alternatieve afvoer.

Waterstand	Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal					
	referentie			alternatieve afvoer		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	7	14	5	10	21	7
NAP-0,1 m	31	160	26	41	197	34
NAP+0,0 m	87	511	74	111	627	95

Het wegvallen van 50 m³/s pompcapaciteit heeft beperkt effect op de overschrijden van waterstanden tot NAP-0,20 m, maar voor hogere waterstanden is het effect groot.

Tabel 44
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem bij 50 m³/s extra alternatieve afvoer.

Waterstand	Amstellandboezem					
	referentie			alternatieve afvoer		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	7	14	5	10	21	7
NAP-0,1 m	31	160	26	40	183	33
NAP+0,0 m	87	511	74	111	1013	100

Het vergroten van de pompcapaciteit van gemalen die niet afvoeren naar het NZK-ARK heeft een voorspelbaar effect op de pompwaarden van IJmuiden: deze nemen af omdat er zoals eerder gezegd minder water naar het NZK-ARK wordt afgevoerd. Ook de gemiddelde spuiduur en spuidebiet nemen af omdat de waterstanden lager worden.

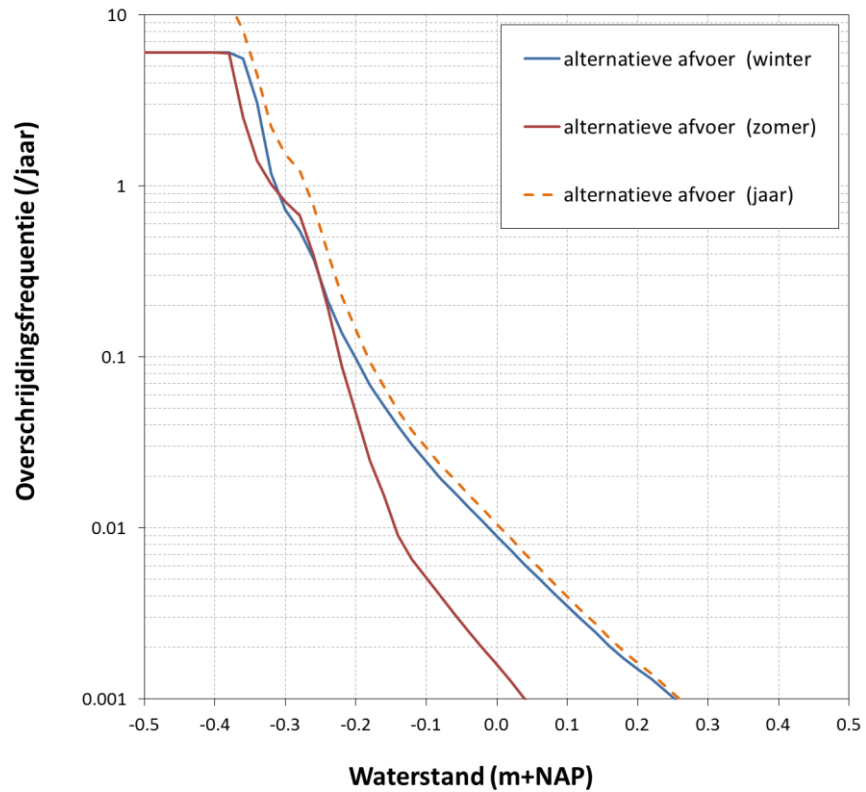
Tabel 45
Gemiddelde spuiwaarden IJmuiden (50 m³/s extra alternatieve afvoer).

Locatie	winter		gem. verval [m]	zomer		gem. verval [m]
	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]		tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	
IJmuiden	9,4	45,6	0,32	5,4	25	0,29

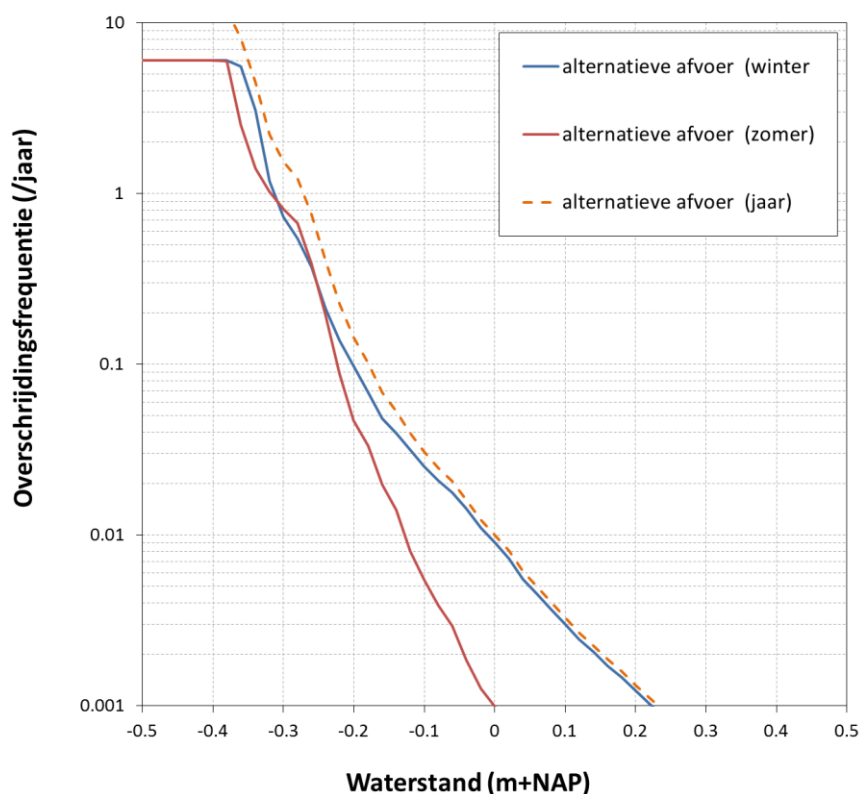
Tabel 46
Gemiddelde
pompwaarden
IJmuiden ($50 \text{ m}^3/\text{s}$
extra alternatieve
afvoer).

	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	15,4	3,3	9,4
Gem. debiet [m^3/s]	36,4	6,6	21,5
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	13,4	2,7	8,1
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,0	0,5	1,3
Gem. positieve opvoerhoogte [m^3/s]	0,8	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m^3/s]	-0,1	-0,1	-0,1

Figuur 39
Overschrijdingsfre-
quentie gemiddelde
waterstand op het
NZK-ARK bij $50 \text{ m}^3/\text{s}$
extra alternatieve
afvoer.



*Figuur 40
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde
waterstand op de
Amstellandboezem
bij 50 m³/s extra
alternatieve afvoer.*



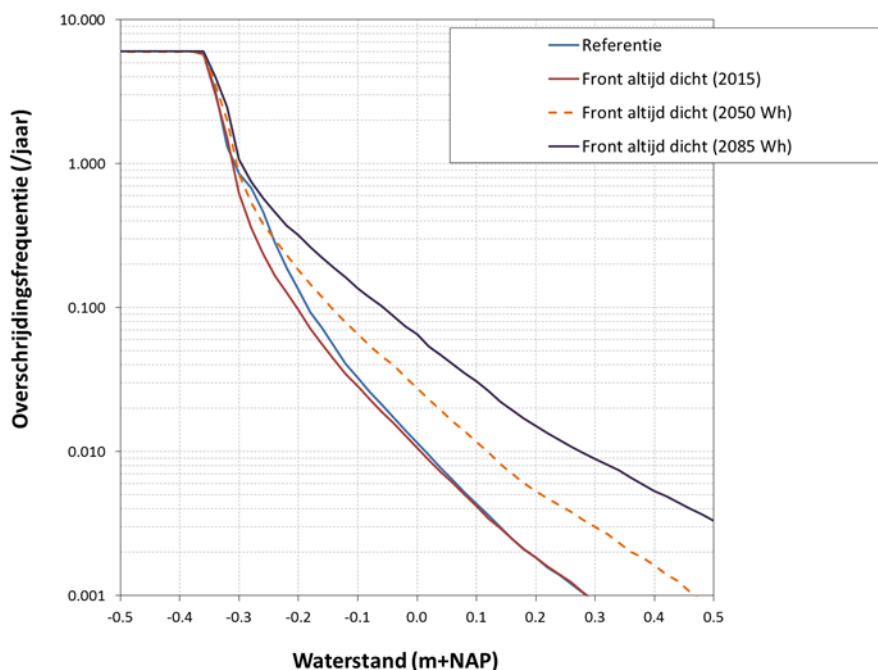
c.3

Ander beheer AGV boezem

Bekeken wordt of het afsluiten van de boezem van AGV van het NZK-ARK op termijn een relevante maatregel kan zijn. Het beheergebied van AGV wordt geïsoleerd van het NZK-ARK en bemaalt op een ander watersysteem (Markermeer). In de eerste verkenning wordt alleen gekeken naar het effect van afsluiten van Amstelland omdat dit zonder aanpassingen met DEZY kan worden berekend.

De berekening is uitgevoerd met een gesloten IJ-front en Amstelfront (Amstelland bemalen met Zeeburg). Berekeningen voor huidige situatie (2015) en 2050 en 2085 met klimaatscenario W_H (worst-case), inclusief falen IJmuiden.

*Figuur 41
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK voor een winterhalfjaar met de Amstellandboezem permanent afgesloten van het NZK-ARK voor verschillende zichtjaren.*



Het permanent afsluiten van Amstelland van het NZK-ARK heeft in de huidige situatie een positief voor waterstanden lager dan NAP op het NZK-ARK. Tot aan NAP-0,20 m zijn de resultaten vergelijkbaar, maar boven NAP-0,20 m tot aan NAP neemt de overschrijdingsfrequentie iets af. De inzet van Zeeburg op hoge waterstanden op het NZK-ARK is blijkbaar minder dan dat van de aanvoer vanuit Amstelland. Dit lijkt verklaarbaar doordat Zeeburg pas boven NAP-0,30 m wordt ingezet en omdat bij hoge waterstanden op het NZK-ARK er relatief veel wordt aangevoerd op het NZK-ARK.

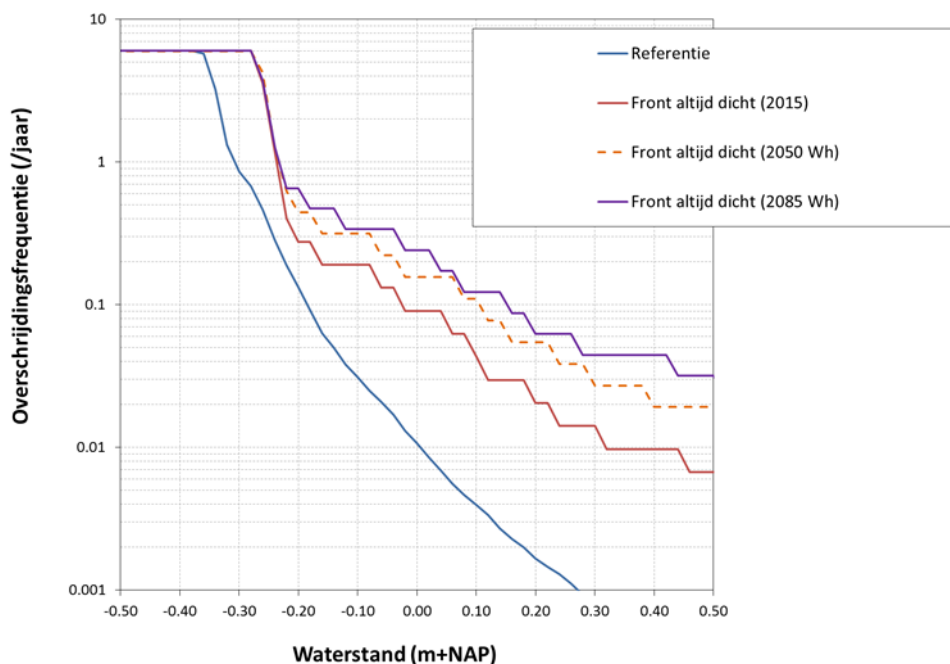
Figuur 41 laat zien dat voor 2050 en 2085 hoge waterstanden vaker gaan optreden en de situatie slechter is ten opzichte van de referentie. Echter, uit (Vermeulen, 2017) is al bekend dat klimaatveranderingen leiden tot een sterke toename van overschrijdingsfrequentie van hoge waterstanden in het NZK-ARK.

*Tabel 47
Herhalingstijden per waterstand voor een winterhalfjaar voor het NZK-ARK waarbij de Amstellandboezem permanent wordt afgesloten van het NZK-ARK voor verschillende zichtjaren.*

Waterstand	referentie	2015	2050	2085
NAP-0,3 m	1	2	1	1
NAP-0,2 m	7	10	5	3
NAP-0,1 m	31	35	15	7
NAP+0,0 m	85	94	36	15

Voor Amstelland betekent de situatie met permanent afsluiting van het NZK-ARK dat hoge waterstanden veel vaker gaan optreden. Een belangrijke oorzaak hiervan (in retrospectief) is dat het gemaal Zeeburg van bij NAP-0,28 m wordt ingezet. Meer dan een decimeter boven het inzetpeil van gemaal IJmuiden. Uit Figuur 42 blijkt dat tot circa eens per 5 jaar (NAP-0,25 m) het peil in Amstelland met Zeeburg kan worden gehandhaafd, daarna nemen de waterstanden snel toe.

*Figuur 42
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstanden in Amstelland voor een winterhalfjaar met de Amstellandboezem permanent afgesloten van het NZK-ARK voor verschillende zichtjaren.*



Figuur 42 laat geen 'glad' verloop zien van voor de berekeningen met permanent gesloten fronten. De resultaten weerspiegelen de discretisatie van het verloop in de neerslag, mede omdat Amstelland in DEZY één bak is met één totale aanvoer uit neerslag en één afvoer (Zeeburg).

*Tabel 48
Herhalingstijden per waterstand voor de Amstellandboezem voor een winterhalfjaar als deze permanent wordt afgesloten van het NZK-ARK voor verschillende zichtjaren.*

Waterstand	referentie	2015	2050	2085
NAP-0,3 m	1	0	0	0
NAP-0,2 m	7	4	2	2
NAP-0,1 m	32	5	3	3
NAP+0,0 m	93	11	6	4

*Tabel 49
Gemiddelde pompwaarden voor een winterhalfjaar waarbij de Amstellandboezem permanent wordt afgesloten van het NZK-ARK voor verschillende zichtjaren.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gen. pos. opvoerh. [m]	Gen. neg. opvoerh. [m]
Berekening 1: Referentie IJmuiden	16.2	38.2	14.0	2.1	0.75	-0.10
Berekening 2: Altijd gesloten IJ/ARK-front (2015) IJmuiden	15.3	36.1	13.2	2.1	0.74	-0.10
Berekening 3: Altijd gesloten IJ/ARK-front (2050 Wh) IJmuiden	25.0	60.4	22.6	2.4	0.84	-0.09
Berekening 4: Altijd gesloten IJ/ARK-front (2085 Wh) IJmuiden	34.3	85.8	33.3	1.0	1.05	-0.08

*Tabel 50
Gemiddelde
spuiwaarden voor
een winterhalfjaar
waarbij de
Amstellandboezem
permanent wordt
afgesloten van het
NZK-ARK voor
verschillende
zichtjaren.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Gen. verval [m]
Berekening 1: Referentie			
Oranjesl. (-> NZK)	27.4	14.3	0.10
Oranjesl. (-> MH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.0	4.3	0.02
IJmuiden	9.5	46.3	0.32
Berekening 2: Altijd gesloten IJ/ARK-front (2015)			
Oranjesl. (-> NZK)	33.7	19.0	0.11
Oranjesl. (-> MH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	17.9	3.9	0.02
IJmuiden	8.9	43.4	0.33
Berekening 3: Altijd gesloten IJ/ARK-front (2050 Wh)			
Oranjesl. (-> NZK)	33.3	21.5	0.16
Oranjesl. (-> MH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	8.6	1.8	0.01
IJmuiden	6.0	27.8	0.29
Berekening 4: Altijd gesloten IJ/ARK-front (2095 Wh)			
Oranjesl. (-> NZK)	27.3	21.3	0.21
Oranjesl. (-> MH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	0.9	0.2	0.01
IJmuiden	1.5	6.4	0.25

D Modelling selectieve onttrekking

D.1 Modelling spui/pomp IJmuiden

In deze paragraaf wordt de modellering van de spui en pomp van IJmuiden beschreven. Voor details wordt verwezen naar hoofdstuk 5 van het hoofdrapport van het model DEZY (Geerse en Kuijper, 2015).

D.1.1 Spuisluis

Voor de spuisluis is sprake van 7 trompetvormige spuiokers met een stroomvoerende breedte van 5,9 m per koker. De volgende formule is als beschrijving voor de spuisluis aangenomen in DEZY:

$$q = NaBH_{keel}\sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{B.1})$$

Waarin q het spuidebiet (m^3/s), N het aantal kokers, a de afvoercoëfficiënt, B de breedte per koker (m), H_{keel} de keelhoogte van de kokers (m), g de gravitatieconstante (m/s^2) en Δh het verval (m).

Er wordt gespuid bij IJmuiden wanneer de gemiddelde waterstand op het NZK-ARK boven streefpeil ligt, maar alleen dan wanneer het verval over de spuisluis groter is dan het zogeheten spuislot. (Dit betreft één waarde; er wordt in het model DEZY geen onderscheid gemaakt in een start- en een stopcriterium.)

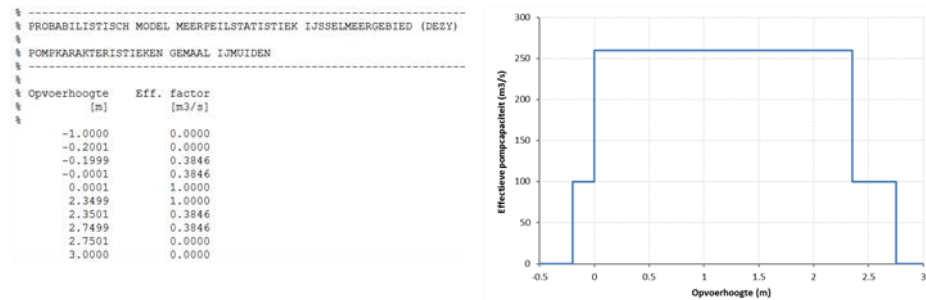
In het model DEZY wordt gebruik gemaakt van een spuislot gelijk aan $(1 - 1/1,025) \times H_{bi}$, waarbij H_{bi} de waterdiepte aan de binnenzijde is. Hierin is 1,025 de relatieve dichtheid van zout water t.o.v. zoet water. Voor de waterdiepte aan de binnenzijde wordt bij IJmuiden voor de bepaling van het spuislot een fictieve bodemhoogte van NAP -5,3 m gehanteerd, met als gevolg, dat het spuislot (over het relevante bereik van binnenwaterstanden) altijd ca. 12 cm is.

D.1.2 Gemaal

Er wordt gepompt bij IJmuiden wanneer de gemiddelde waterstand op het NZK-ARK boven het aanslagpeil ligt. Er kan tegelijk worden gespuid en gepompt in het model.

In het model DEZY wordt gewerkt met een effectiviteitsfactor, waarmee de opgegeven vaste pompcapaciteit wordt vermenigvuldigd om de effectieve pompcapaciteit te bepalen (afhankelijk van de opvoerhoogte dus). Het verband tussen de opvoerhoogte en de effectiviteitsfactor wordt opgegeven door middel van een invoerbestand. Het invoerbestand voor de pompkarakteristiek van het gemaal bij IJmuiden wordt getoond in het linkerdeel Figuur 43. Het rechterdeel van Figuur 43 toont de resulterende effectieve capaciteit als functie van de opvoerhoogte bij de standaard gemaalcapaciteit van $260 \text{ m}^3/\text{s}$.

*Figuur 43
Pompkarakteristiek
IJmuiden (links:
invoer DEZY, rechts:
resulterende
effectieve
capaciteit).*



Bovenstaande pompkarakteristiek voor IJmuiden is ingebouwd in het kader van de eerdere faalkansanalyse voor het NZK-ARK (Vermeulen et al., 2017). In eerdere versies van DEZY werd gerekend met een vaste pompcapaciteit bij IJmuiden onafhankelijk van de opvoerhoogte.

D.2

Maatregel selectieve onttrekking in DEZY

Het model DEZY is aangepast zodat gerekend kan worden met én zonder selectieve onttrekking. Uitgangspunt daarbij is dat de berekening zonder selectieve onttrekking ongewijzigd blijft.

Wanneer gerekend wordt met selectieve onttrekking, dan wordt bij het berekenen van het **spui- en pompdebiet IJmuiden** gebruik gemaakt van de waterstand op het Binnenspuikanaal om het verval te bepalen. Daarvoor is het nodig om de waterstand op het NZK te vertalen naar een waterstand op het Binnenspuikanaal, rekening houdend met het statische en dynamische verval. Dit wordt verderop beschreven. Om de modellering niet onnodig te compliceren en bovendien de vergelijking met de situatie zonder selectieve onttrekking zo zuiver mogelijk te houden, stellen we voor om de spui- en pompformules (zoals gepresenteerd in hoofdstuk 2) verder ongewijzigd te laten. Met andere woorden: dezelfde modellering wordt gebruikt met dit verschil dat de binnenwaterstand gelijk is aan de waterstand op het Binnenspuikanaal i.p.v. de waterstand op het NZK.

Hoewel we de formules voor spuien en pompen ongewijzigd te laten, stellen we wel voor om het **spuislot** voor het spuien aan te passen wanneer gerekend wordt met selectieve onttrekking. De huidige modellering (die in de praktijk tot een spuislot van ca. 12 cm leidt) is namelijk gebaseerd op een overgang van zout naar zoet water bij de spuisluit. Het gevolg van selectieve onttrekking is echter dat door het toegenomen zoutgehalte de dichtheid in het Binnenspuikanaal zal toenemen t.o.v. de dichtheid op het Noordzeekanaal. De relatieve dichtheid van het zoute water in de Buitenhaven t.o.v. het water in het Binnenspuikanaal zal daarom kleiner zijn dan 1,025. Het gevolg is dat het spuislot kleiner wordt dan de ca. 12 cm die nu wordt gehanteerd. Wij stellen voor om in het geval van selectieve onttrekking het spuislot (in centimeters) rechtstreeks op te geven in het

invoerbestand van DEZY. De standaardwaarde moet worden toegeleverd door Rijkswaterstaat.

In de aangepaste modellering wordt bij het bepalen van het verval over de spuisluis en de opvoerhoogte van de pompen gebruik gemaakt van de waterstand op het Binnenspuikanaal i.p.v. de waterstand op het Noordzeekanaal. Bij het doorrekenen van de gebeurtenissen binnen DEZY moet daarom per tijdstap de waterstand op het Noordzeekanaal worden vertaald naar de waterstand op het Binnenspuikanaal. Hiervoor gebruiken we de volgende formule:

$$h_{BSK} = h_{NZK} - \Delta h_{dyn} - \Delta h_{stat} \quad (B.2)$$

Met h_{BSK} en h_{NZK} de waterstand op respectievelijk het Binnenspuikanaal en het Noordzeekanaal (m+NAP), en Δh_{dyn} en Δh_{stat} respectievelijk het dynamische en het statische verval (m).

Het statische verval is een invoerparameter voor DEZY, met een default waarde van 5,5 cm; (Janssen, 2017).

Voor het dynamische verval gaan we uit van de formule.

$$\Delta h_{dyn} = \frac{Q_{IJ}^2}{2 g \mu^2 A^2} \quad (B.3)$$

De afvoercoëfficiënt μ en het oppervlak van de doorstroomopening A zijn invoerparameters voor DEZY. Het afvoerdebiet Q_{IJ} in de formule wordt gelijk genomen aan het spui- en pompdebiet (uit de vorige tijdstap).

Uitvoer

Het belangrijkste rekenresultaat van DEZY betreft de overschrijdingsfrequenties van de peilen op het IJsselmeer, Markermeer en NZK-ARK, en de gemiddelde peilen. Figuur 44 geeft hiervan een voorbeeld.

*Figuur 44
Extreme en
gemiddelde peilen in
uitvoerbestand DEZY
(winterhalfjaar).*

Tabel met meerpeilen en herhalingstijden

Herhalingstijd [jaar]	IJsselmeer [m+NAP]	Markermeer [m+NAP]	Noordzeekanaal [m+NAP]	Amstelland [m+NAP]
1	0.045	-0.216	-0.313	-0.313
4	0.270	-0.043	-0.247	-0.247
10	0.405	0.058	-0.211	-0.211
40	0.595	0.187	-0.153	-0.108
100	0.712	0.270	-0.122	-0.026
400	0.885	0.387	-0.069	0.113
1000	0.995	0.462	-0.032	0.231
4000	1.155	0.567	0.002	0.396
10000	1.255	0.635	0.034	0.513
40000	1.403	0.734	0.075	0.742
100000	1.493	0.791	0.085	0.831
400000	1.628	0.863	0.098	0.949
1000000	1.708	0.898	0.119	1.001
Gemiddeld peil	-0.266	-0.353	-0.402	-0.402

Daarnaast kan gedetailleerde modeluitvoer worden verkregen voor afzonderlijk doorgerekende gebeurtenissen. Deze uitvoer bevat o.a. de tijdreeks van het spui- en/of pompdebiet bij IJmuiden voor de betreffende gebeurtenis. Dit is heel informatief en met name handig bij controles van berekeningen. Voor het bepalen van globale kentallen, zoals de spui- en pompverhouding, is dit echter minder goed bruikbaar, aangezien het om gegevens voor één specifieke gebeurtenis gaat en er standaard ca. 18.000

gebeurtenissen worden doorgerekend met DEZY (en nog veel meer wanneer gerekend wordt met mogelijk falen van de kunstwerken), die bovendien niet allemaal dezelfde kans van voorkomen hebben.

Voor het bepalen van bepaalde kentallen is het nodig om binnen het programma zelf per doorgerekende gebeurtenis tijdsgemiddelde waarden te bepalen en deze vervolgens over alle gebeurtenissen te combineren door te wegen met behulp van de bijbehorende kansen. Voor het pompen wordt dit al gedaan in de huidige versie van het model. Het uitvoerbestand bevat een tabel waarin per gemaal is aangegeven hoeveel tijd (% van het winter- of zomerhalfjaar) wordt gepompt en wat het gemiddelde pompdebiet is. De gemiddelde pomptijd wordt daarbij nog opgesplitst in een periode met positieve opvoerhoogte en een periode met negatieve opvoerhoogte. Het gemiddelde van deze positieve en negatieve opvoerhoogte wordt ook getoond. Figuur 45 geeft een voorbeeld van deze tabel (default wordt gerekend zonder pompen op de Afsluiddijk en de Houtribdijk, vandaar dat op deze locaties alleen nullen worden getoond).

*Figuur 45
Gemiddelde
pompwaarden in
uitvoerbestand DEZY
(winterhalfjaar).*

Gemiddelde pompwaarden						
Locatie	Tijd [%]	Gem. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gem. pos. opvoerh. [m]	Gem. neg. opvoerh. [m]
Den Oever	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
Kornwerderzand	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
Krabbersgatsluizen	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
Houtribsluizen	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
IJmuiden	16.2	38.6	14.1	2.1	0.75	-0.10

*Figuur 46
Gemiddelde
spuiwaarden in
uitvoerbestand DEZY
(winterhalfjaar).*

Locatie	Tijd [%]	Gem. debiet [m ³ /s]	Gem. verval [m]
Berekening 1: zoutslot = 5 cm (default)			
Den Oever	19.6	483.3	0.38
Kornwerderzand	23.8	347.5	0.45
Krabbersgatsluizen	16.5	16.4	0.04
Houtribsluizen	14.5	38.7	0.03
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26

D.3

Effect maatregel selectieve onttrekking

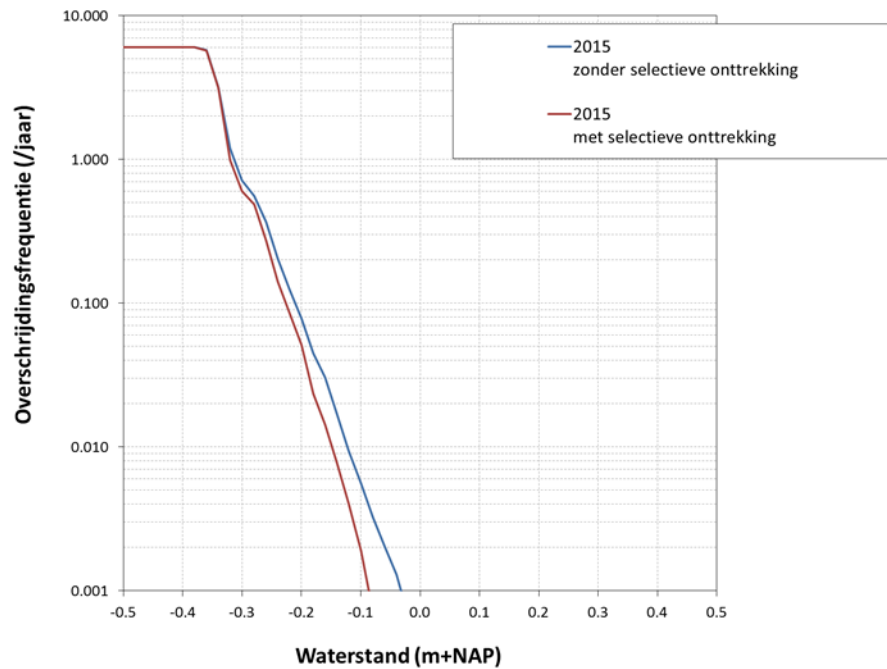
De maatregel selectieve onttrekking is doorgerekend met onderstaande instellingen:

- Statisch verval van 5,5 cm;
- Dynamisch verval, uitgaande doorstroomopening van 560 m²;
- Spuislot (omrekening van zoutconcentratie naar aantal cm spuislot)
 - Zonder selectieve onttrekking is het spuislot gelijk aan $(1-1/1,025) \times H_{bi}$, waarbij H_{bi} de waterdiepte aan de binnenzijde is. Hierin is 1,025 de relatieve dichtheid van zout water t.o.v. zoet water. Voor de waterdiepte aan de binnenzijde wordt bij IJmuiden voor de bepaling van het spuislot een fictieve bodemhoogte van NAP -5,3 m gehanteerd, met als gevolg, dat het spuislot (over het relevante bereik van binnenwaterstanden) altijd ca. 12 cm is.
 - Op basis van de toegeleverde gegevens geldt een relatieve dichtheid van het zeewater t.o.v. het BSK 1022 / 1012 = 1,01.

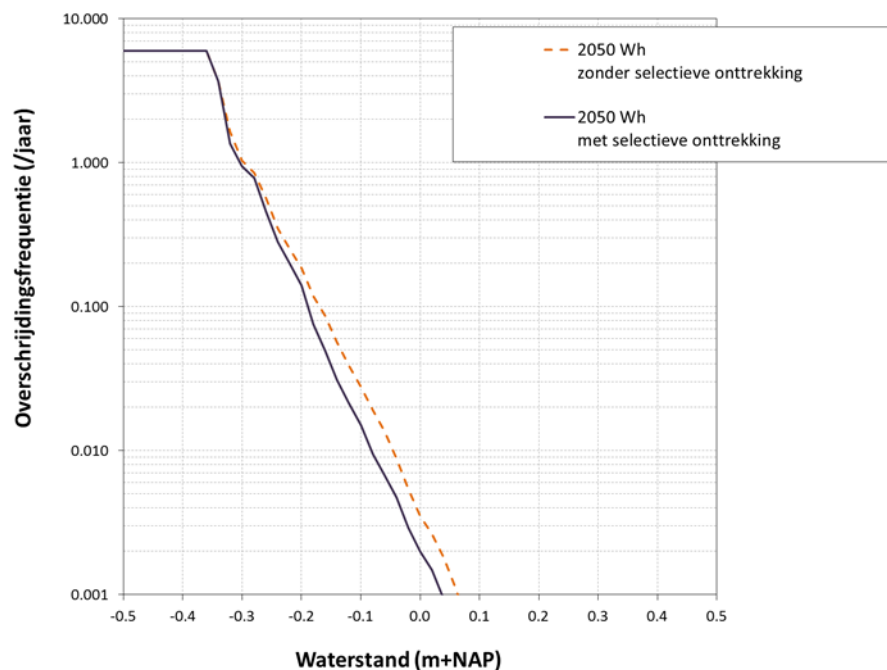
- De formule $(1 - 1/1,01) \times H_{bi}$ leidt over het relevante bereik aan binnenwaterstanden tot een spuislots van ca. 5 cm. Uitgegaan wordt van 5 cm voor het spuislots voor spuien.

Het effect van selectieve onttrekking is doorgerekend voor een winterhalfjaar, zonder falen. Naast de huidige situatie (2015, Figuur 47) zijn ook zichtjaren 2050 (Figuur 48) en 2085 (Figuur 49) doorgerekend, onder aanname van het klimaatscenario W_h als bovengrenzenbenadering van het klimaateffect.

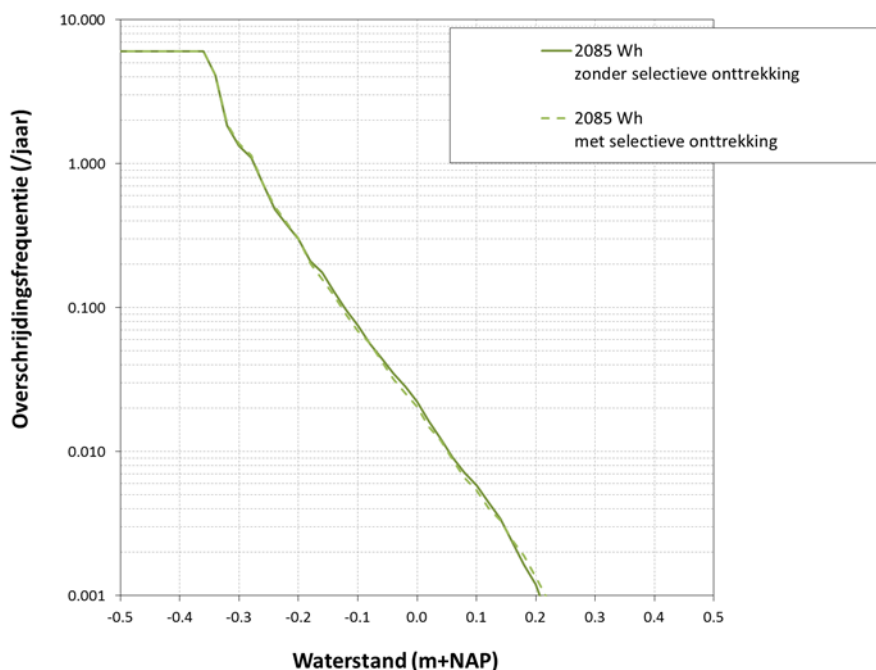
*Figuur 47
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2015, zonder falen gemaal IJmuiden.*



*Figuur 48
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2050 (klimaatscenario W_h), zonder falen gemaal IJmuiden.*



Figuur 49
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2085 (klimaatscenario W_h), zonder falen gemaal IJmuiden.



Opvallend is dat de selectieve onttrekking een positief effect heeft op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het Noordzeekanaal. Dit is anders dan op voorhand werd verwacht en wijkt ook af van de eerste verkennende berekeningen naar de effecten van de selectieve onttrekking. Om de resultaten te verklaren is een nadere analyse uitgevoerd naar het effect van selectieve onttrekking (zie onder).

Tabel 51
Herhalingstijden per waterstand in een winterhalfjaar met wel/niet selectieve onttrekking voor verschillende zichtjaren (zonder falen gemaal IJmuiden).

Waterstand NZK	2015		2050		2085	
	zonder SO	met SO	zonder SO	met SO	zonder SO	met SO
NAP-0,3 m	1	2	1	1	1	1
NAP-0,2 m	13	19	5	7	3	3
NAP-0,1 m	179	530	36	67	13	15
NAP+0 m	3769	27587	283	499	45	49

Het effect van de selectieve onttrekking neemt onder invloed van de klimaatverandering (uitgaande van klimaatscenario W_h).

Tabel 52
Gemiddelde pompwaarden voor een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende waarden voor verschillende zichtjaren.

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gen. pos. opvoerh. [m]	Gen. neg. opvoerh. [m]
Berekening 1: 2015, zonder SO IJmuiden	16.2	38.6	14.0	2.1	0.74	-0.10
Berekening 2: 2015, met SO IJmuiden	17.0	40.8	15.0	2.0	0.77	-0.09
Berekening 3: 2050 W_h , zonder SO IJmuiden	27.3	66.7	24.8	2.5	0.84	-0.09
Berekening 4: 2050 W_h , met SO IJmuiden	27.8	68.6	25.7	2.1	0.87	-0.09
Berekening 5: 2085 W_h , zonder SO IJmuiden	39.5	99.6	38.3	1.1	1.05	-0.08
Berekening 6: 2085 W_h , met SO IJmuiden	39.6	100.1	38.7	0.8	1.10	-0.08

Met selectieve onttrekking neemt de gemiddelde pompduur van gemaal IJmuiden toe en ook het gemiddeld pompdebiet (zie Tabel 52). De gemiddelde spuiduur van spuisluis IJmuiden neemt met selectieve onttrekking ook toe. Het gemiddelde verval over de spuisluis neemt met selectieve onttrekking af, net als het gemiddelde verval over de spuisluis .

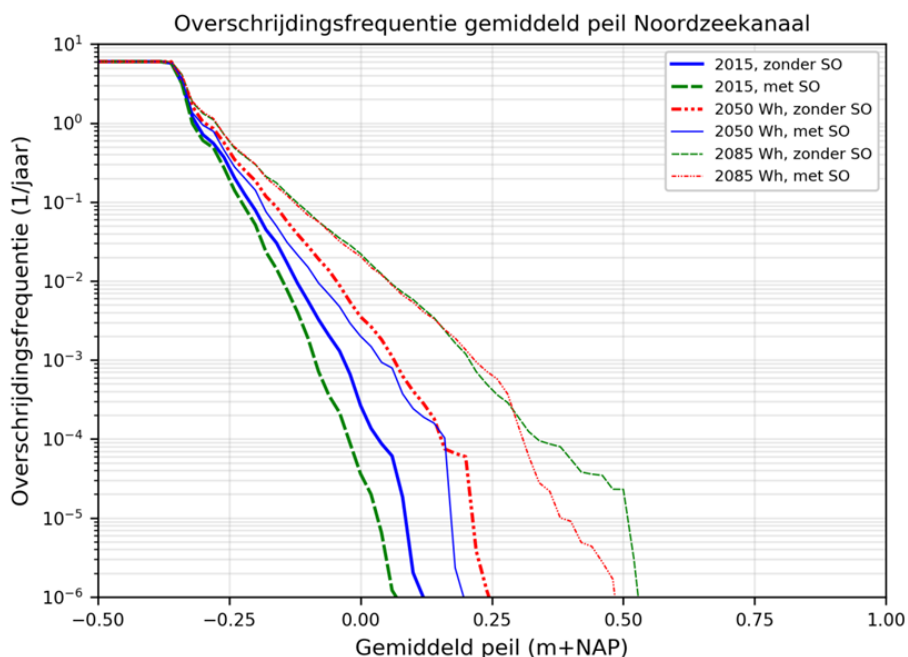
*Tabel 53
Gemiddelde
spuiwaarden voor
een winterhalfjaar
met selectieve
onttrekking voor
verschillende
zichtjaren.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Gen. verval [m]
Berekening 1: 2015, zonder S0			
Oranjesl. (-> NZK)	27.6	14.4	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	19.9	4.2	0.02
IJmuiden	9.5	46.2	0.32
Berekening 2: 2015, met S0			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26
Berekening 3: 2050 Wh, zonder S0			
Oranjesl. (-> NZK)	25.6	17.8	0.18
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	6.0	1.2	0.01
IJmuiden	6.4	29.5	0.28
Berekening 4: 2050 Wh, met S0			
Oranjesl. (-> NZK)	24.6	17.0	0.18
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	6.1	1.3	0.01
IJmuiden	6.8	26.8	0.22
Berekening 5: 2005 Wh, zonder S0			
Oranjesl. (-> NZK)	20.8	23.5	0.44
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	0.1	0.0	0.01
IJmuiden	1.5	6.8	0.25
Berekening 6: 2005 Wh, met S0			
Oranjesl. (-> NZK)	20.6	23.3	0.44
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	0.1	0.0	0.01
IJmuiden	1.7	6.0	0.18

Nadere analyse

Omdat de effecten van selectieve onttrekking anders zijn dan verwacht is in meer detail gekeken naar de oorzaken hiervan. In Figuur 50 zijn alle resultaten samen weergegeven, waarbij rekening gehouden moet worden dat zowel de x-as als de y-as zijn opgerekt. De figuur geeft ook resultaten bij kleiner overschrijdingskansen c.q. hogere maximale waterstanden op het Noordzeekanaal.

*Figuur 50
Frequentielijnen met
en zonder selectieve
onttrekking (SO),
voor huidige
situatie, 2050 en
2085.*



In de huidige situatie is het effect van selectieve onttrekking positief, dat wil zeggen dat er bij gelijke herhalingstijden lagere waterstanden worden gevonden op het NZK-ARK. Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak daarvan is (voor 2015) gekeken naar de gedetailleerde tijdsverlopen voor specifieke combinaties. We focussen op de waterpeilen NAP -0,10 m en NAP +0,00 m. Tabel 54 hieronder geeft voor deze waterstanden de berekende overschrijdingsfrequenties en bijbehorende representatieve combinaties voor de berekening met en zonder selectieve onttrekking (in 2015).

*Tabel 54
Overschrijdingsfrequenties en
representatieve
combinaties
beschouwde
waterstanden NZK-
ARK.*

Waterstand NZK-ARK	2015, zonder SO		2015, met SO	
	Ov.-freq/ per jaar	Repr. combinatie	Ov.-freq. per jaar	Repr. combinatie
NAP -0,10 m	1/180	6231	1/530	4572
NAP +0,00 m	1/3800	7566	1/28000	8016
NAP -0,10 m	1/180	6231	1/530	4572

In Tabel 54 hierboven komen vier verschillende representatieve combinaties voor. Deze zijn opnieuw weergegeven in Tabel 55 met bijbehorende karakteristieken en maximale waterstanden. De vet gedrukte waarden laten zien dat dit inderdaad combinaties zijn die voor de betreffende berekening (met of zonder selectieve onttrekking) leiden tot de waterstanden in Tabel 54.

Tabel 55
Karakteristieken en
maximale
waterstanden NZK-
ARK beschouwde
representatieve
combinaties.

Combi	Afvoer- reeks	Maand- volume	Neerslag (mm)	Blok WW	Max. NZK, zonder SO (m+NAP)	Max. NZK, met SO (m+NAP)	Vershil (m)
6231	26	204	231	-0,100	-0,204	-0,10	-0,10
4572	20	179	12	-0,096	-0,100	0,00	0,00
7566	32	229	126	0,005	-0,045	-0,05	-0,05
8016	34	238	96	-0,043	0,004	0,05	0,05

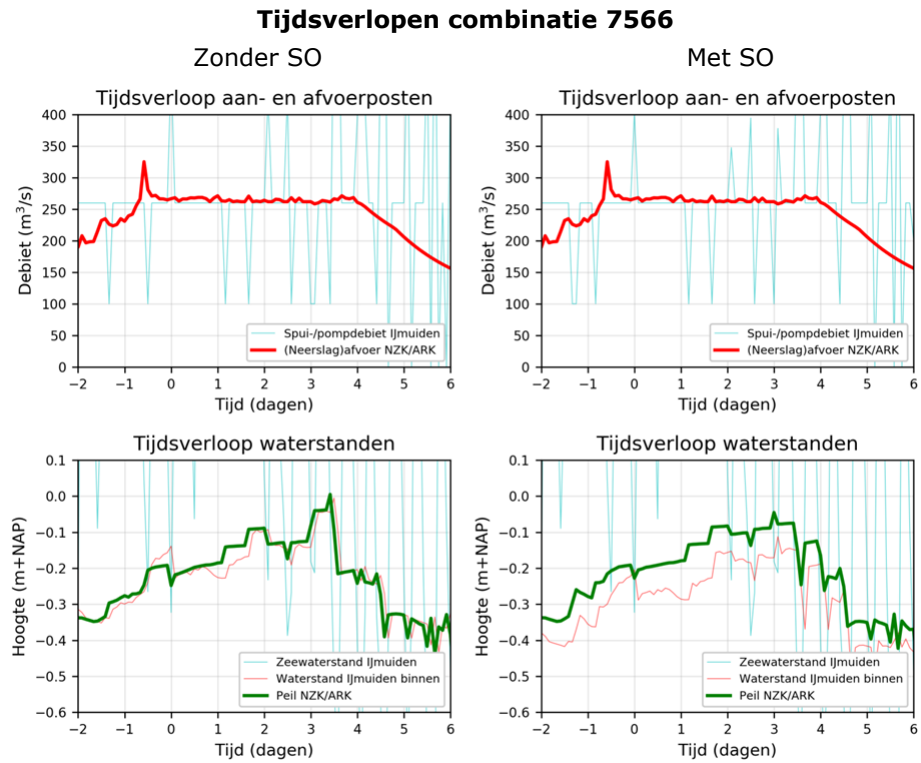
Tabel 55 hierboven laat direct zien dat het effect van selectieve onttrekking voor specifieke gebeurtenissen heel verschillend kan zijn. Bij combinaties 6231 en 7566 gaat de maximale waterstand omlaag door het meenemen van selectieve onttrekking, bij combinatie 4572 blijft deze nagenoeg gelijk en bij combinatie 8016 gaat de maximale waterstand iets omhoog.

Voor de laatste twee combinaties (7566 en 8016) zijn in respectievelijk Figuur 51 en Figuur 52 de bijbehorende tijdsverlopen weergegeven. In Figuur 51 is te zien dat de maximale waterstand door selectieve onttrekking omlaag gaat en in Figuur 52 dat deze door selectieve onttrekking juist omhoog gaat (in beide gevallen ca. 5 cm).

Bij combinatie 7566 (Figuur 51) ontstaat het belangrijkste verschil in de tijdstap direct na 3 dagen. Enkele details van het tijdsverloop over die periode zijn weergegeven in Tabel 56 direct onder Figuur 51. De maximale waterstanden op het NZK-ARK zijn daarin vetgedrukt. Het belangrijkste verschil ontstaat hier doordat op het tijdstip 2 uur na 3 dagen (3,083 dagen) gespuid kan worden in de situatie met selectieve onttrekking, waar in de situatie zonder selectieve onttrekking alleen gepompt wordt. In de situatie met selectieve onttrekking gaat de waterstand daardoor omlaag, terwijl deze in de situatie zonder selectieve onttrekking omhoog gaat. Er kan op dit tijdstip in de situatie zonder selectieve onttrekking niet gespuid worden vanwege het spuislot. Bij de betreffende binnenwaterstand (NAP -0,093 m) bedraagt dit spuislot 12,7 cm, terwijl het verval op dit tijdstip 12 cm is. In de situatie met selectieve onttrekking is het verval op dit tijdstip nog kleiner, namelijk 10,1 cm, maar in dat geval wordt gerekend met een vast spuislot van 5 cm (aangezien het water op het Binnenspuikanaal in de situatie met selectieve onttrekking zouter is). Het verval is in dat geval voldoende om te kunnen spuien.

Bij combinatie 8016 (Figuur 52) ontstaat het belangrijkste verschil in de tijdstap direct na 4½ dag. Enkele details van het tijdsverloop over die periode zijn weergegeven in Tabel 57 direct onder Figuur 52. De maximale waterstanden op het NZK-ARK zijn opnieuw vetgedrukt. Het verschil ontstaat hier doordat op het tijdstip 2 uur na 4½ dag (4,583 dagen) volledig gepompt kan worden in de situatie zonder selectieve onttrekking (capaciteit 260 m³/s), maar slechts met 100 m³/s gepompt kan worden in de situatie met selectieve onttrekking. Dat laatste komt doordat in dat geval sprake is van een opvoerhoogte van 2,351 m, hetgeen net boven de grens ligt waarop nog met maximale capaciteit gepompt kan worden. De opvoerhoogte is groter doordat de waterstand binnen in het geval van selectieve onttrekking lager ligt.

Figuur 51
Tijdsverlopen
combinatie 7566,
voor de situatie met
(links) en zonder
(rechts) selectieve
onttrekking.

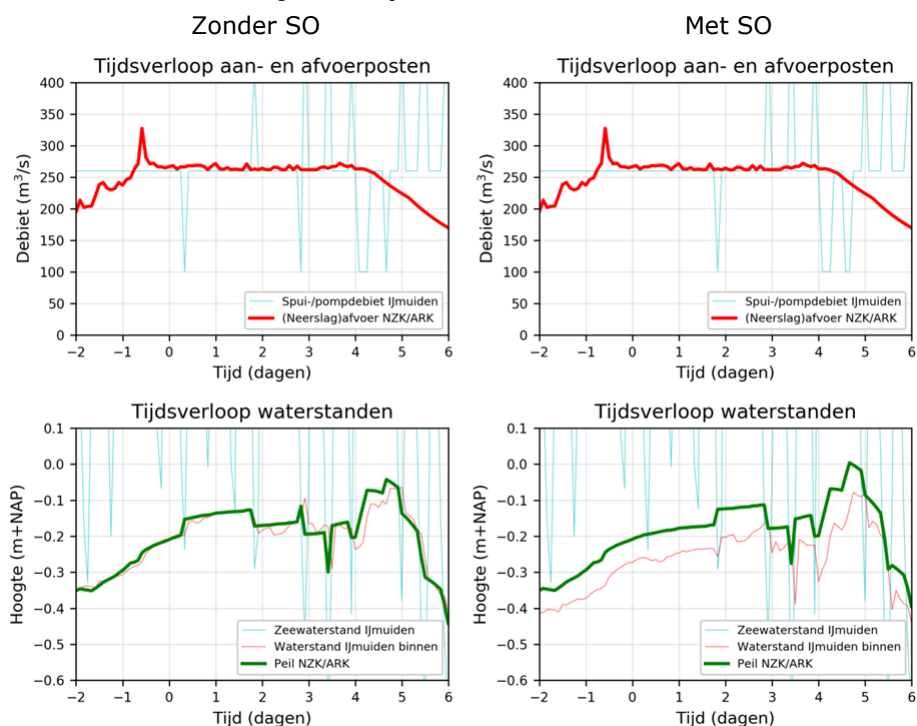


Tabel 56
Details tijdsverlopen
combinatie 7566,
voor de situatie met
en zonder selectieve
onttrekking.

Tijdstip (dagen)	Zee waterstand (m+NAP)	Zonder selectieve onttrekking					Met selectieve onttrekking				
		Binnen waterstand (m+NAP)	Verval (m)	Pomp debiet (m³/s)	Spui debiet (m³/s)	Peil NZK/ARK (m+NAP)	Binnen waterstand (m+NAP)	Verval (m)	Pomp debiet (m³/s)	Spui debiet (m³/s)	Peil NZK/ARK (m+NAP)
3,000	-0,182	-0,142	0,040	100	0	-0,082	-0,171	0,011	100	0	-0,045
3,083	-0,213	-0,093	0,120	100	0	-0,040	-0,112	0,101	100	278	-0,077
3,167	0,757	-0,044	-0,801	260	0	-0,040	-0,160	-0,917	260	0	-0,077
3,250	1,376	-0,045	-1,421	260	0	-0,039	-0,148	-1,524	260	0	-0,076
3,333	0,635	-0,042	-0,677	260	0	-0,038	-0,145	-0,780	260	0	-0,075
3,417	-0,066	-0,045	0,021	100	0	0,005	-0,148	-0,082	260	0	-0,075
3,500	-0,526	-0,005	0,521	0	634	-0,093	-0,151	0,375	0	538	-0,147
3,583	-0,776	-0,095	0,681	0	724	-0,215	-0,252	0,524	0	636	-0,246

Tijdsverlopen combinatie 8016

*Figuur 52
Tijdsverlopen
combinatie 8016,
voor de situatie met
(links) en zonder
(rechts) selectieve
onttrekking.*



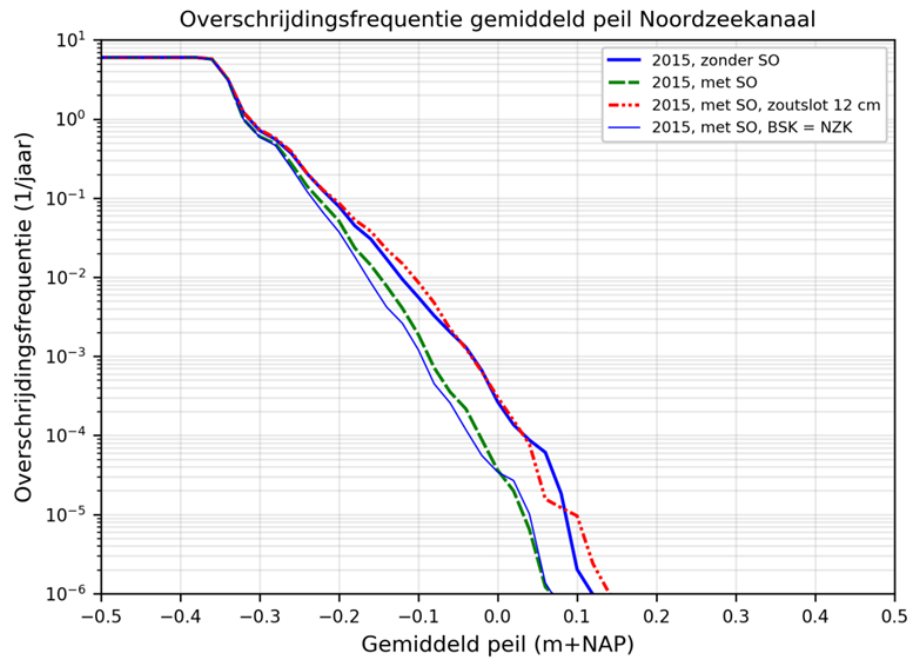
*Tabel 57
Details tijdsverlopen
combinatie 7566,
voor de situatie met
en zonder selectieve
onttrekking.*

Tijdstip (dagen)	Zee waterstand (m+NAP)	Zonder selectieve onttrekking					Met selectieve onttrekking				
		Binnen waterstand (m+NAP)	Verval (m)	Pomp debiet (m ³ /s)	Spui debiet (m ³ /s)	Peil NZK/ARK (m+NAP)	Binnen waterstand (m+NAP)	Verval (m)	Pomp debiet (m ³ /s)	Spui debiet (m ³ /s)	Peil NZK/ARK (m+NAP)
4,500	1,361	-0,121	-1,482	260	0	-0,076	-0,183	-1,544	260	0	-0,073
4,583	2,187	-0,102	-2,289	260	0	-0,080	-0,164	-2,351	100	0	-0,034
4,667	2,294	-0,111	-2,405	100	0	-0,043	-0,121	-2,445	100	0	0,004
4,750	1,161	-0,068	-1,229	260	0	-0,049	-0,078	-1,239	260	0	-0,002
4,833	0,717	-0,067	-0,784	260	0	-0,056	-0,086	-0,803	260	0	-0,01
4,917	-0,026	-0,071	-0,045	260	0	-0,065	-0,090	-0,064	260	0	-0,018
5,000	-0,379	-0,064	0,315	0	493	-0,136	-0,083	0,296	0	478	-0,086

Bovenstaande voorbeelden zijn heel illustratief, doordat ze zowel het positieve effect van selectieve onttrekking laten zien - een lagere waarde voor het spuislot, waardoor beter gespuid kan worden - als het negatieve effect - een lagere binnenwaterstand, waardoor minder goed gespuid kan worden en over het algemeen ook minder goed gepompt kan worden. Overigens kan een lagere binnenwaterstand ook juist als gevolg hebben dat er beter gepompt kan worden (zie bijvoorbeeld tijdstip 3,417 dagen in Tabel 56). Dit heeft te maken met de pompkarakteristiek voor IJmuiden, zoals deze momenteel is geïmplementeerd in het model DEZY (zie Figuur 20). Hoewel het effect van selectieve onttrekking voor specifieke combinaties zowel positief als negatief kan zijn, is het totale effect blijkbaar positief. Met andere woorden: het lagere spuislot in de situatie met selectieve onttrekking heeft blijkbaar een groter effect dan de verlaagde binnenwaterstand als gevolg van selectieve onttrekking. Figuur 53 hieronder bevestigt dit. Hierin is naast de berekening met en zonder selectieve onttrekking, ook een berekening gemaakt met selectieve onttrekking waarbij het spuislot gelijk is genomen aan 12 cm (i.p.v. 5 cm) en een berekening met selectieve

onttrekking waarbij het statisch en dynamisch verval over het kunstwerk is genegeerd ("BSK=NZK").

*Figuur 53
Frequentielijnen met
en zonder selectieve
onttrekking (SO),
met effecten
gesplitst.*



D.4

Gevoeligheidsberekeningen

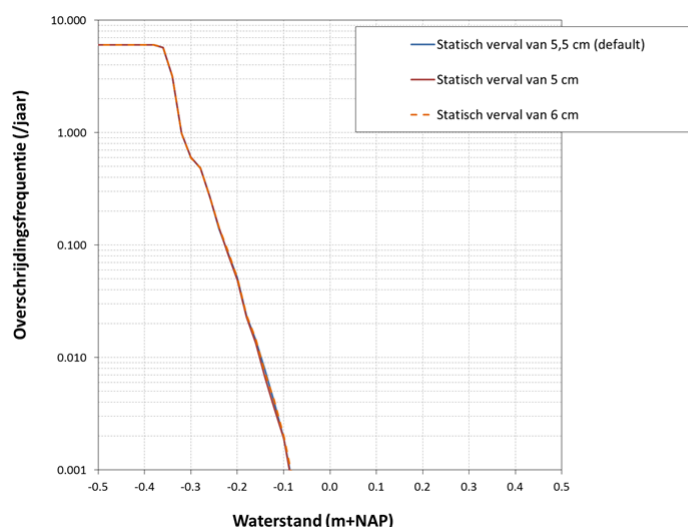
Onderzocht is in welke mate de parameters in het de modellering van de maatregel selectieve onttrekking een effect hebben op de resulterende overschrijdingsfrequentie van de gemiddelde waterstand op het NZK-ARK. Dit betreft de gevoeligheid van het statisch verval, het doorstroomoppervlak van de selectieve onttrekking (bepalend voor het dynamisch verval) en het spuislot. Uitgegaan is van de huidige situatie in een winterhalfjaar, zonder falen van IJmuiden.

Statisch verval

De default waarde voor het statisch verval is 5,5 cm. De gevoeligheidsberekeningen zijn uitgevoerd met een statisch verval van 5 en met een statisch verval van 6 cm ($\pm 10\%$ meer/minder statisch verval).

De resultaten daarvan zijn weergegeven in Figuur 54 en Tabel 58.

Figuur 54
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2015 voor verschillende instellingen van het statisch verval (zonder falen gemaal IJmuiden).



Tabel 58
Herhalingstijden per waterstand in een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen van het statisch verval (zonder falen gemaal IJmuiden).

Waterstand NZK	Statisch verval 5,5 cm (default)	Statisch verval 5 cm	Statisch verval 6 cm
NAP-0,30 m	2	2	2
NAP-0,20 m	19	20	19
NAP-0,10 m	530	530	501
NAP+0,00 m	27587	28521	32947

Het effect van een andere aanname voor het statisch verval is nihil: de resultaten van de berekeningen zijn vrijwel identiek. Ook de gemiddelde pompwaarden (Tabel 9) en de gemiddelde spuiwaarden (Tabel 10) wijken nauwelijks van elkaar af. Uit de tabellen blijkt dat een kleiner statisch verval resulteert in een afname in het gemiddelde pompdebiet en het gemiddelde spuidebiet iets toeneemt en andersom. Omdat de verschillen in de tabellen zo klein zijn worden hier geen conclusies aan verbonden.

Tabel 59
Gemiddelde pompwaarden voor een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen voor het statisch verval.

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gen. pos. opvoerh. [m]	Gen. neg. opvoerh. [m]
Berekening 1: statisch verval = 5.5 cm (default)						
IJmuiden	17.0	40.8	15.0	2.0	0.77	-0.09
Berekening 2: statisch verval = 5.0 cm						
IJmuiden	16.8	40.5	14.8	2.0	0.76	-0.10
Berekening 3: statisch verval = 6.0 cm						
IJmuiden	17.1	41.1	15.1	2.0	0.77	-0.10

Tabel 60
Gemiddelde spuiwaarden voor een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen voor het statisch verval.

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Gen. verval [m]
Berekening 1: statisch verval = 5.5 cm (default)			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Huiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26
Berekening 2: statisch verval = 5.0 cm			
Oranjesl. (-> NZK)	26.6	13.6	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Huiden	20.4	4.3	0.02
IJmuiden	10.1	43.5	0.26
Berekening 3: statisch verval = 6.0 cm			
Oranjesl. (-> NZK)	26.3	13.4	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Huiden	20.7	4.4	0.02
IJmuiden	10.0	42.6	0.26

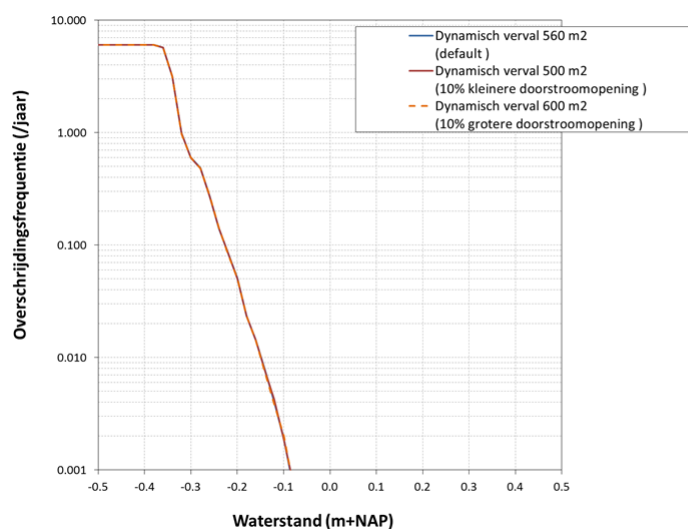
Dynamisch verval

De default waarde voor het dynamisch verval wordt gebaseerd op een doorstroomoppervlak van 560 m². Gevoeligheidsberekeningen zijn uitgevoerd met een doorstroomoppervlak van 500 m² en 600 m² (±10% meer/minder oppervlak). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 55 en Tabel 61.

Tabel 61
Herhalingstijden per waterstand in een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen van het dynamisch verval (zonder falen gemaal IJmuiden).

Waterstand NZK	doorstroomopp.	doorstroomopp.	doorstroomopp.
	550 m ² (default)	500 m ²	600 m ²
NAP-0,30 m	2	2	2
NAP-0,20 m	19	20	20
NAP-0,10 m	530	539	495
NAP+0,00 m	27587	32451	22731

Figuur 55
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2015 voor verschillende instellingen van het dynamisch verval (zonder falen gemaal IJmuiden).



Ook voor het dynamisch verval heeft een variatie van 10% nauwelijks effect: de resultaten van de berekeningen zijn vrijwel identiek. Ook de gemiddelde pompwaarden (Tabel 62) en de gemiddelde spuiwaarden (Tabel 63) wijken nauwelijks van elkaar af.

Tabel 62
Gemiddelde pompwaarden voor een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen voor het dynamisch verval.

Locatie	Tijd [%]	Gem. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gem. pos. opvoerh. [m]	Gem. neg. opvoerh. [m]
Berekening 1: dynamisch verval opp. = 560 m ² (default)						
IJmuiden	17.0	40.8	15.0	2.0	0.77	-0.09
Berekening 2: dynamisch verval opp. = 500 m ²						
IJmuiden	17.0	40.8	15.0	2.0	0.77	-0.10
Berekening 3: dynamisch verval opp. = 600 m ²						
IJmuiden	16.9	40.7	14.9	2.0	0.77	-0.09

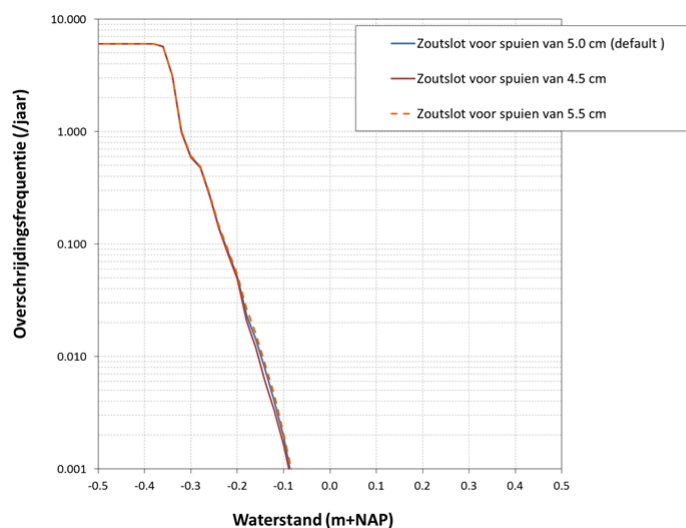
Tabel 63
Gemiddelde spuiwaarden voor een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen voor het dynamisch verval.

Locatie	Tijd [%]	Gem. debiet [m ³ /s]	Gem. verval [m]
Berekening 1: dynamisch verval opp. = 560 m ² (default)			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26
Berekening 2: dynamisch verval opp. = 500 m ²			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26
Berekening 3: dynamisch verval opp. = 600 m ²			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HM)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26

Spuislot

Uitgaande van de default waarde van 5 cm voor het spuislot zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd met een spuislot van 4,5 cm en een spuislot van 5,5 cm (variatie van 10%). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 56 en Tabel 64.

Figuur 56
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand NZK-ARK met en zonder selectieve onttrekking voor zichtjaar 2015 voor verschillende instellingen van het spuislot (zonder falenemaal IJmuiden).



Tabel 64
Herhalingstijden per waterstand in een winterhalfjaar met selectieve onttrekking voor verschillende instellingen van het spuislot (zonder falenemaal IJmuiden).

Waterstand NZK	spuislot	spuislot	Spuislot
	5,0 cm (default)	4,5 cm	5,5 cm
NAP-0,30 m	2	2	2
NAP-0,20 m	19	20	18
NAP-0,10 m	530	622	492
NAP+0,00 m	27587	27062	26430

Variatie in het spuislot heeft enig effect op de resultaten, met name bij gemiddelde waterstanden boven NAP-0,20 m. De gemiddelde pompwaarden (Tabel 65) en de gemiddelde spuiwaarden (Tabel 66) zijn ook vrijwel gelijk. Er zijn kleine verschillen die er op lijken te duiden dat een kleiner spuislot een afname in de gemiddelde pompduur en gemiddelde pompdebiet geven en andersom. Ook hier zijn de verschillen zo klein dat harde uitspraken niet mogelijk zijn.

*Tabel 65
Gemiddelde
pompwaarden voor
een winterhalfjaar
met selectieve
onttrekking voor
verschillende
instellingen van het
spuislot.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Tijd pos. opvoerh. [%]	Tijd neg. opvoerh. [%]	Gen. pos. opvoerh. [m]	Gen. neg. opvoerh. [m]
Berekening 1: zoutslot = 5 cm (default)						
IJmuiden	17.0	40.8	15.0	2.0	0.77	-0.09
Berekening 2: zoutslot = 4.5 cm						
IJmuiden	16.9	40.7	14.9	2.0	0.76	-0.10
Berekening 3: zoutslot = 5.5 cm						
IJmuiden	17.0	40.9	15.0	2.0	0.76	-0.10

*Tabel 66
Gemiddelde
spuiwaarden voor
een winterhalfjaar
met selectieve
onttrekking voor
verschillende
instellingen van het
spuislot.*

Locatie	Tijd [%]	Gen. debiet [m ³ /s]	Gen. verval [m]
Berekening 1: zoutslot = 5 cm (default)			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.1	43.1	0.26
Berekening 2: zoutslot = 4.5 cm			
Oranjesl. (-> NZK)	26.5	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.2	43.2	0.25
Berekening 3: zoutslot = 5.5 cm			
Oranjesl. (-> NZK)	26.4	13.5	0.10
Oranjesl. (-> HH)	0.0	0.0	-
Zeesluis Muiden	20.6	4.4	0.02
IJmuiden	10.0	43.0	0.26

E Resultaten berekeningen selectieve onttrekking

E.1 Spuislot 5 cm

Berekeningen met een spuislot van 5 cm, overeenkomstig met een bovengrens voor de zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal.

Tabel 67
Herhalingstijden per waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met een van spuislot 5 cm..

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal			
Selectieve onttrekking (spuislot 5 cm)			
Waterstand	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	2	1	1
NAP-0,2 m	19	44	14
NAP-0,1 m	530	31411	521
NAP+0,0 m	27587	38883272	27567

Tabel 68
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met een van spuislot 5 cm.

Amstellandboezem			
Selectieve onttrekking (spuislot 5 cm)			
Waterstand	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	2	1	1
NAP-0,2 m	19	44	14
NAP-0,1 m	59	436	52
NAP+0,0 m	171	2666	161

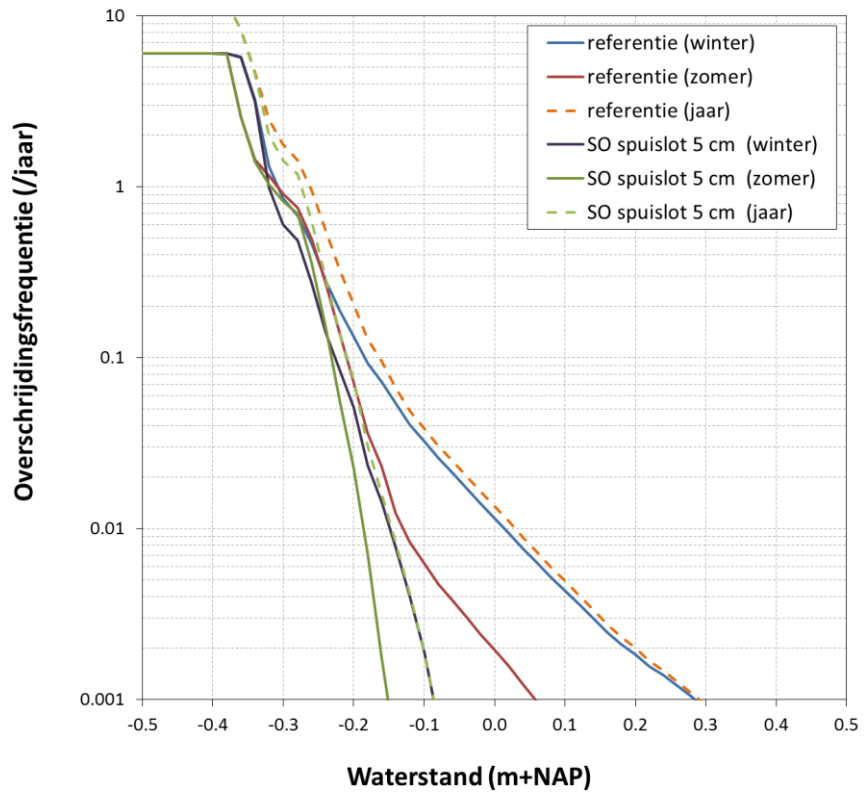
Tabel 69
Gemiddelde spuiwaarden bij maatregel selectieve onttrekking met een spuislot van 5 cm.

Locatie	winter			zomer		
	tijd [%]	gem. debiet [m^3/s]	gem. verval [m]	tijd [%]	gem. debiet [m^3/s]	gem. verval [m]
IJmuiden	10,1	43,1	0,3	6,1	24,4	0,2

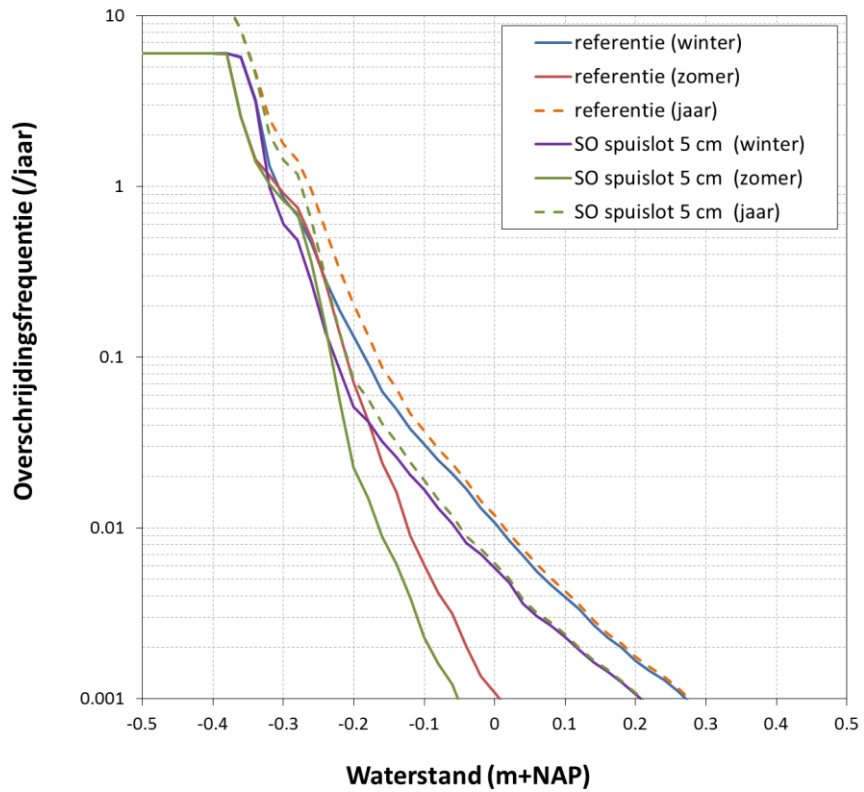
Tabel 70
Gemiddelde pompwaarden IJmuiden NZK-ARK bij maatregel selectieve onttrekking met een spuislot van 5 cm

	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	17,0	3,6	10,3
Gem. debiet [m^3/s]	40,8	7,4	24,1
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	15,0	3,0	9,0
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,0	0,6	1,3
Gem. positieve opvoerhoogte [m^3/s]	0,8	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m^3/s]	-0.1	-0,1	-0,1

*Figuur 57
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met van spuislot 5 cm.*



*Figuur 58
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met van spuislot 5 cm.*



Spuislot 9 cm

Berekeningen met een spuislot van 9 cm, overeenkomstig met de gemiddelde waarde van de zoutconcentratie op het Binnenspuikanaal.

*Tabel 71
Herhalingstijden per
waterstand op het
NZK-ARK inclusief
maatregel selectieve
onttrekking met een
van spuislot 9 cm..*

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal			
Waterstand	Selectieve onttrekking (spuislot 5 cm)		
	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1
NAP-0,2 m	14	20	8
NAP-0,1 m	173	1993	159
NAP+0,0 m	5136	939320	5108

*Tabel 72
Herhalingstijden per
waterstand op de
Amstellandboezem
inclusief maatregel
selectieve
onttrekking met een
van spuislot 9 cm.*

Amstellandboezem			
Waterstand	Selectieve onttrekking (spuislot 9 cm)		
	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1
NAP-0,2 m	14	20	8
NAP-0,1 m	45	195	37
NAP+0,0 m	124	1107	111

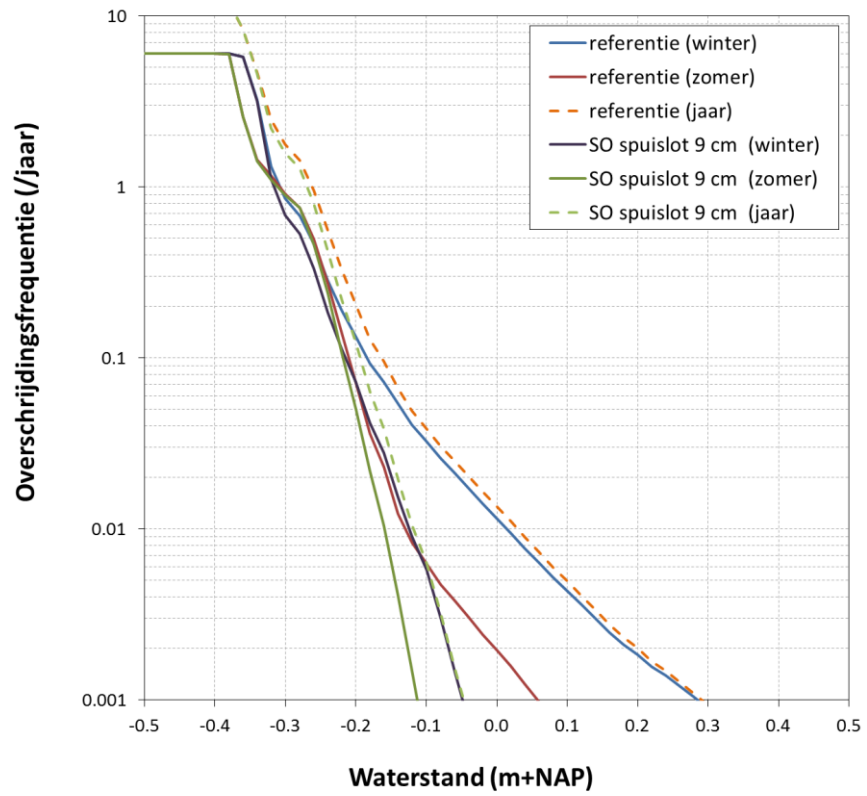
*Tabel 73
Gemiddelde
spuiwaarden bij
maatregel selectieve
onttrekking met een
spuislot van 9 cm.*

Locatie	tijd [%]	winter	gem. verval [m]	tijd [%]	zomer	gem. verval [m]
		gem. debiet [m ³ /s]			gem. debiet [m ³ /s]	
IJmuiden	9,2	42,0	0,3	5,6	23,7	0,2

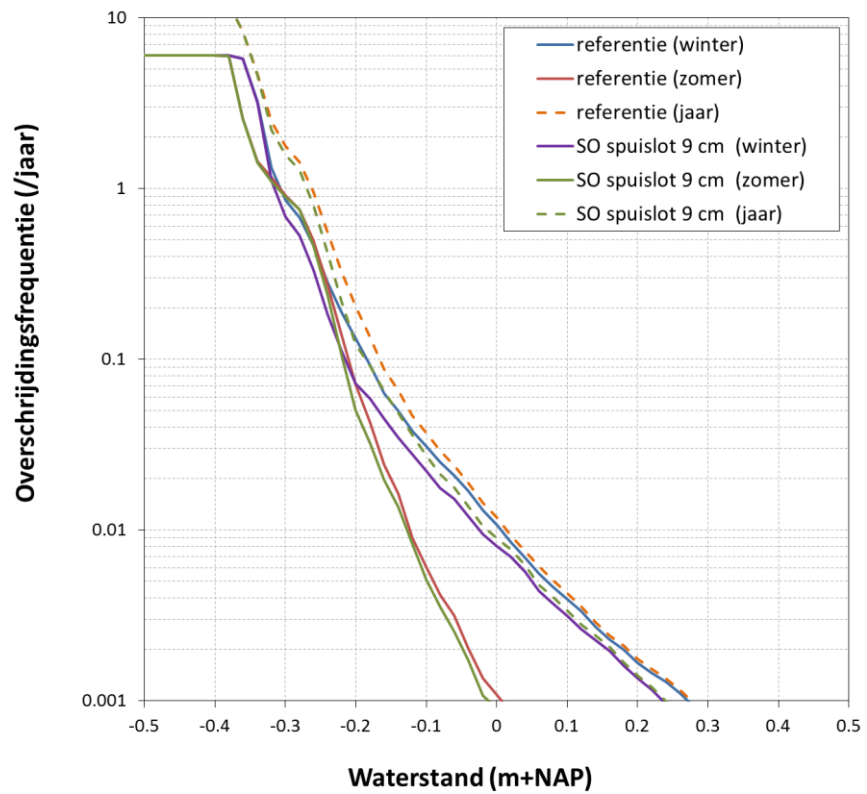
*Tabel 74
Gemiddelde
pompwaarden
IJmuiden NZK-ARK
bij maatregel
selectieve
onttrekking met een
spuislot van 9 cm*

	winter	Zomer	jaar
Tijd [%]	17,3	3,9	10,6
Gem. debiet [m ³ /s]	41,6	8,1	24,9
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	15,2	3,3	9,3
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,1	0,6	1,4
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,8	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0,1	-0,1	-0,1

*Figuur 59
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met van spuislot 9 cm.*



*Figuur 60
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met van spuislot 9 cm.*



Spuislot 13 cm

Berekeningen met een spuislot van 13 cm, overeenkomstig met een ondergrens van de zoutconcentratie op het Binnenspuikanaal.

*Tabel 75
Herhalingstijden per waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met een van spuislot 13 cm..*

Noordzeekanaal/ Amsterdam-Rijnkanaal			
Waterstand	Selectieve onttrekking (spuislot 13 cm)		
	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1
NAP-0,2 m	11	11	5
NAP-0,1 m	99	310	75
NAP+0,0 m	2560	187712	2525

*Tabel 76
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met een van spuislot 13 cm.*

Amstellandboezem			
Waterstand	Selectieve onttrekking (spuislot 13 cm)		
	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1
NAP-0,2 m	11	11	5
NAP-0,1 m	36	106	27
NAP+0,0 m	95	531	80

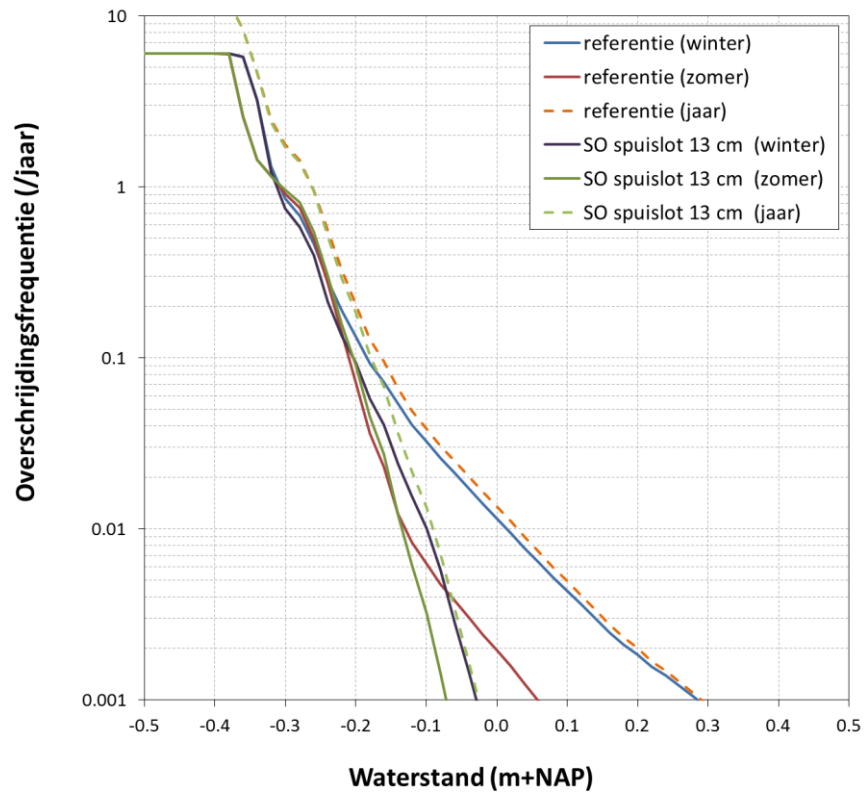
*Tabel 77
Gemiddelde spuiwaarden bij maatregel selectieve onttrekking met een spuislot van 13 cm.*

Locatie	winter		zomer		gem. verval [m]
	tijd [%]	gem. debiet [m ³ /s]	gem. verval [m]	tijd [%]	
IJmuiden	8,4	40,7	0,3	5,0	23,7

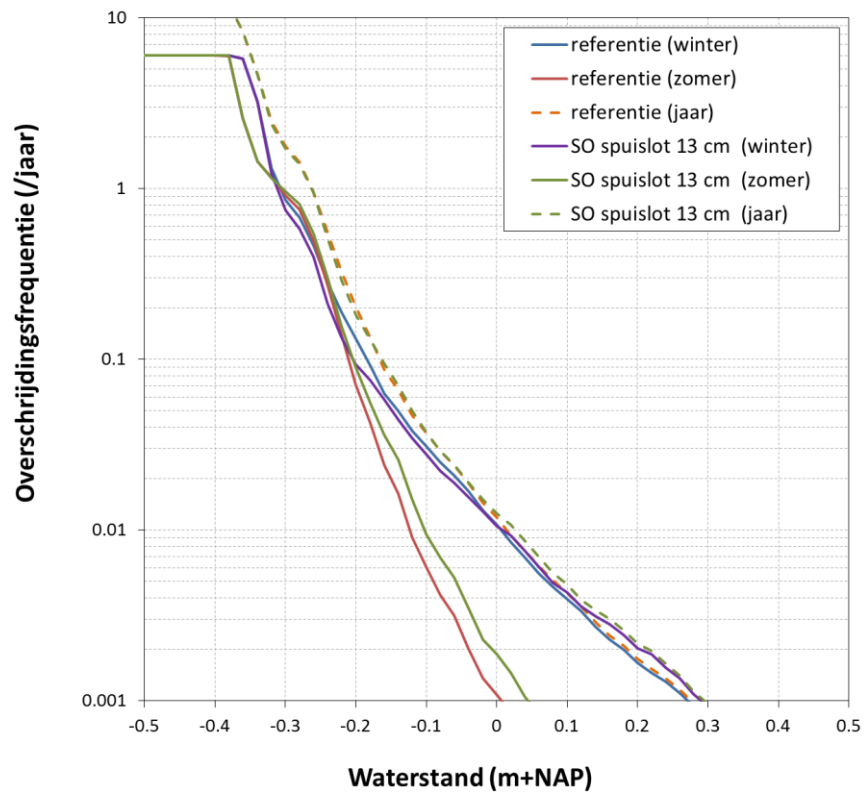
*Tabel 78
Gemiddelde pompwaarden IJmuiden NZK-ARK bij maatregel selectieve onttrekking met een spuislot van 13 cm*

	winter	zomer	jaar
Tijd [%]	17,8	4,3	11,1
Gem. debiet [m ³ /s]	42,6	8,9	25,8
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	15,6	3,6	9,6
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,2	0,7	1,
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,8	0,7	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0,1	-0,1	-0,1

*Figuur 61
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met van spuislot 13 cm.*



*Figuur 62
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met van spuislot 13 cm.*



Invloed maximale opvoerhoogte pompkarakteristiek

Het effect van de hogere zoutconcentratie van het Binnenspuikanaal op de pompkarakteristiek is doorgerekend door uit te gaan dat de maximale opvoerhoogte van de pompen afneemt (omdat relatief zwaarder water opgepompt moet worden). Deze invloed is geschat op een afname van 1,4% (mondellinge toelichting Deltares). Op een maximale opvoerhoogte van 2,35 meter (oude pompen, nieuwe pompen is dit 2,75 meter) is dit slechts een paar centimeter (3 respectievelijk 4 centimeter). In de berekening is daarom ook uitgegaan dat het effect tweemaal zo groot is (7 respectievelijk 8 cm). In de berekeningen is verder uitgegaan van een spuislot van 9 cm, statisch verval van 5,5 cm (default) en doorstroomopening van de selectieve onttrekking van 550 m² (default)

Tabel 79
Herhalingstijden per waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met een van spuislot 13 cm.

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal						
Waterstand	Opvoerhoogte -1,4%			Opvoerhoogte -2,8%		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	14	20	8	13	20	8
NAP-0,1 m	161	1993	149	167	1993	154
NAP+0,0 m	5394	939320	5364	4913	935629	4887

Tabel 80
Herhalingstijden per waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met andere maximale opvoerhoogte.

Amstellandboezem						
Waterstand	Opvoerhoogte -1,4%			Opvoerhoogte -2,8%		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	14	20	8	13	20	8
NAP-0,1 m	44	195	36	44	195	36
NAP+0,0 m	124	1106	112	121	1106	109

De verandering in maximale opvoerhoogte van de pompen heeft een beperkt effect op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op het NZK-ARK. De gemiddelde spuiwaarden en de gemiddelde pompwaarden veranderen niet bij de verandering in maximale opvoerhoogte: het effect is zo beperkt dat dit in de gemiddelden niet terug te zien is.

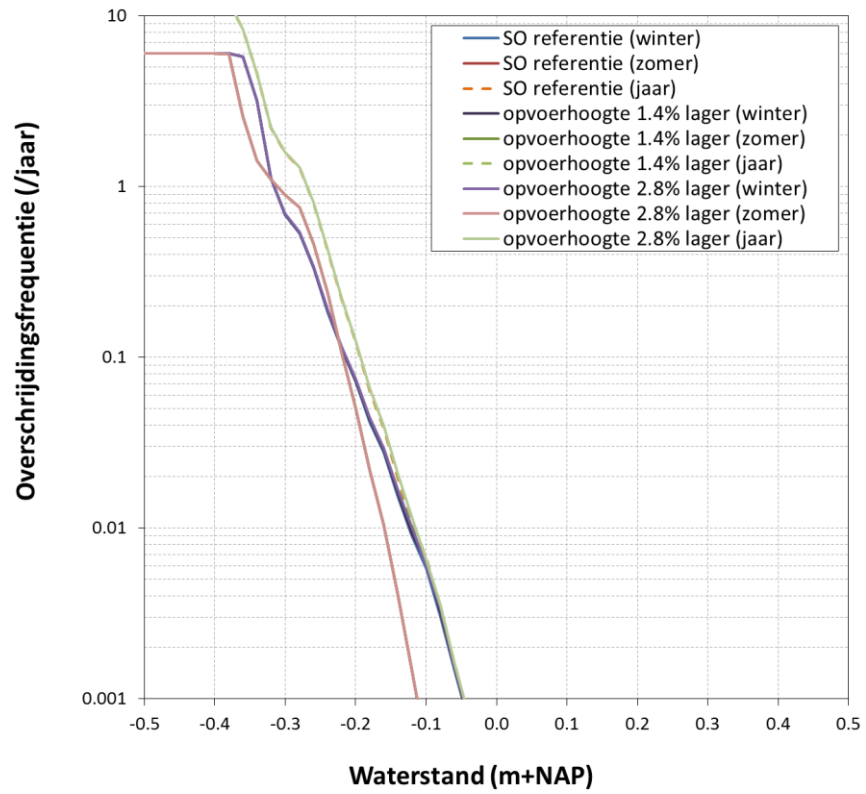
Tabel 81
Gemiddelde spuiwaarden IJmuiden bij maatregel selectieve onttrekking met andere maximale opvoerhoogte.

Locatie	tijd [%]	winter	gem. verval [m]	tijd [%]	zomer	gem. verval [m]
		gem. debiet [m ³ /s]			gem. debiet [m ³ /s]	
Opvoerhoogte -1,4%	9,2	42	0,3	5,6	23,7	0,3
Opvoerhoogte -2,8%	9,2	42	0,3	5,6	23,7	0,3

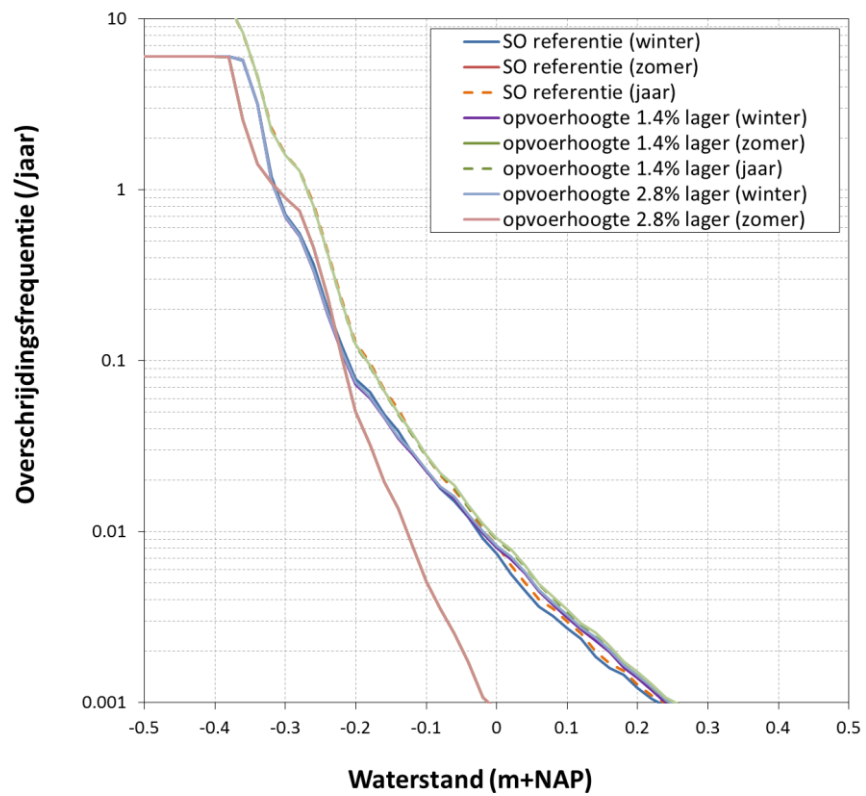
Tabel 82
Gemiddelde pompwaarden IJmuiden NZK-ARK bij maatregel selectieve onttrekking met andere maximale opvoerhoogte.

	Opvoerhoogte -1,4%		Opvoerhoogte -2,8%	
	winter	zomer	winter	zomer
Tijd [%]	17,3	3,9	17,3	3,9
Gem. debiet [m ³ /s]	43,6	8,1	43,6	8,1
Tijd positieve opvoerhoogte [%]	15,2	3,3	15,2	3,3
Tijd negatieve opvoerhoogte [%]	2,1	0,6	2,1	0,6
Gem. positieve opvoerhoogte [m ³ /s]	0,8	0,7	0,8	0,7
Gem. negatieve opvoerhoogte [m ³ /s]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

*Figuur 63
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op het NZK-ARK inclusief maatregel selectieve onttrekking met spuislot 9 cm bij verschillende maximale opvoerhoogten.*



*Figuur 64
Overschrijdingsfrequentie gemiddelde waterstand op de Amstellandboezem inclusief maatregel selectieve onttrekking met spuislot 9 cm bij verschillende maximale opvoerhoogten.*



Relatie met de vragen uit de projectgroep

Naar aanleiding van de faalkansstudie uit 2017 (Vermeulen et al, 2017a) zijn door de projectgroep veel vragen gesteld over het functioneren van het watersysteem en de invloed van faalkansen op de herhalingstijd van hoge waterstanden. Deze vragen zijn als bijlage meegestuurd in de offerteaanvraag en in deze rapportage beantwoord. Deze bijlage legt een relatie tussen de vragen uit de bijlage en deze rapportage.

De rapportage maakt een duidelijk onderscheidt tussen de details uit de berekeningen (gerapporteerd in de bijlagen) en de analyse van de resultaten in de hoofdtekst.

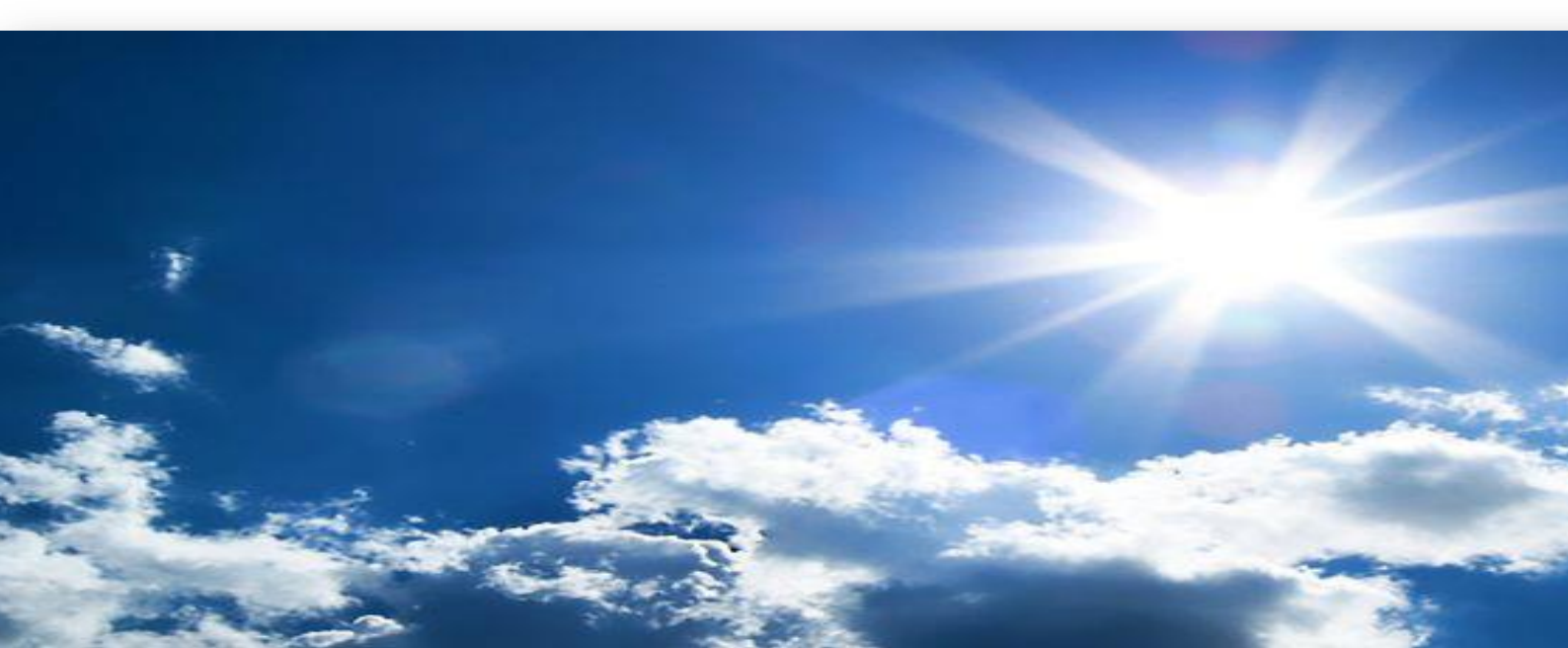
De uitvoering van de werkzaamheden heeft in nauwe samenwerking met de projectgroep plaatsgevonden. Hierbij is een gefaseerde aanpak gevolgd waarbij eerst verkennende berekeningen zijn uitgevoerd en op basis daarvan heeft, samen met de projectgroep, een nadere uitwerking plaatsgevonden. Dit heeft gezorgd dat met de voortschrijdende inzichten de vraagstelling gaande het project is bijgesteld.

De aanvraag omvatte 6 onderdelen:

- a. Faalkans gemaal IJmuiden
gerapporteerd in Hoofdstuk 2, inclusief gevoeligheidsberekeningen
- b. Modellerings selectieve onttrekking
Gerapporteerd in Hoofdstuk 6, inclusief gevoeligheidsberekeningen en nadere beschouwing van de modellering van de maatregel selectieve onttrekking.
- c. Gevoeligheidsberekeningen
Zie navolgende tabel
- d. Hydraulische effecten
Zie navolgende tabel
- e. Aanpassen redeneerlijnen
Geen onderdeel van deze rapportage, is als separaat document opgeleverd (Brink en Coonen, 2018).
- f. Aanvullende berekeningen
Zie navolgende tabel.

Onderstaand is aangegeven hoe de vragen uit de offerteaanvraag een plaats hebben gekregen in de projectuitvoering en rapportage.

Vraag uit bijlage offerteaanvraag		Verwerking in dit rapport
1	Effect van selectieve onttrekking op faalkans IJmuiden en faalkans ARK/NZK	Hoofdstuk 6 De maatregel selectieve onttrekking wordt uitgebreid behandeld. Nadruk ligt hierbij op de modellering en gehanteerde aannames bij de maatregel.
2	Effect zeespiegelstijging/ klimaatverandering op faalkans IJmuiden en faalkans ARK/NZK	Hoofdstuk 5
3	Effect van voormalen	Niet in deze rapportage, is gerapporteerd als Slim Watermanagement maatregel in de faalkansstudie 2017 (Vermeulen et al, 2017)
4	Effect van afvoer naar het Markermeer	Paragraaf 3.3
5	Effect meer berging in het gebied	Paragraaf 3.4
6	Effect andere afvoerroutes	Paragraaf 3.5
7	Effect van meer afvoer naar ARK/NZK (gemaalcapaciteit)	Paragrafen 3.2 en 3.4
8	Sommen tbv VenR IJmuiden	Hoofdstuk 4.



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad
Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Nevenvestiging

Elektronicaweg 12
2628 XG Delft

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl