



Slim Watermanagement

DEZY-berekeningen ten behoeve van het project
Vervanging en Renovatie spui- en maalcomplex IJmuiden

Opdrachtgever



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



Slim Watermanagement



DEZY-berekeningen ten behoeve van het project Vervanging
en Renovatie spui- en maalcomplex IJmuiden
Eindrapport

Auteurs

Cor-Jan Vermeulen
Bastiaan Kuijper

PR4567.10
november 2021

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Effect verbetermaatregelen IJmuiden	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Resultaten	5
2.3	Analyse gecombineerd falen spui en gemaal	6
2.3.1	Kans volledig falen IJmuiden	6
2.3.2	Invloed volledig falen IJmuiden	8
3	Benodigde faalkans IJmuiden	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Aanpak en resultaten	13
3.3	Nadere beschouwing	16
4	Conclusies en aanbevelingen	19
4.1	Conclusies	19
4.2	Aanbevelingen	20
5	Referenties	21
	Bijlagen	23
A	Invoer DEZY: Maatregelen	25
B	Invoer DEZY: Benodigde faalkans	29
C	Beschouwde maatregelen gemaal IJmuiden	31

1 Inleiding

Slim Watermanagement (SWM) heeft tot doel om watertekort en wateroverlast te verminderen door de beschikbare capaciteit van het Nederlandse watersysteem beter en duurzamer te benutten. Het is een optimalisatie van het operationele waterbeheer. In Slim Watermanagement wordt het watersysteem als een geheel beschouwd en wordt over de grenzen van beheergebieden heen gekeken.

Sinds 2017 heeft HKV diverse faalkansanalyses voor het watersysteem NZK/ARK uitgevoerd, waarbij falen gedefinieerd is als het overschrijden van NAP 0,00 m op het NZK/ARK. Geconcludeerd is, onder andere, dat de waterafvoer van het NZK/ARK sterk afhankelijk is van de beschikbaarheid van het gemaal IJmuiden. De faalkans en herstelduur van het gemaal IJmuiden domineren de kans op hoogwatersituaties.

Voor het complex IJmuiden is binnen RWS een Vervanging & Renovatie traject gestart. Het traject bevindt zich momenteel in de voorbereidingsfase en de realisatie is naar verwachting in 2028 afgrond. Voorafgaand aan de realisatie wordt verkend of er mogelijke verbeteringen aan het gemaal IJmuiden zijn die storingskans en/of de herstelduur verkleinen. Door Iv-Infra zijn voor verschillende verbetermaatregelen faalkansen en herstelduren afgeleid (Huijmans, 2021). In deze studie wordt onderzocht wat het effect hiervan op de faalkans NZK/ARK is (overschrijden van NAP+0,00 m). Daarnaast wordt gevraagd welke faalkans en herstelduren voor het gemaal nodig zijn om een gegeven faalkans van het NZK/ARK te garanderen.

Doelstelling

De doelstelling is tweeledig:

1. Berekenen van het effect van de verbetermaatregelen op de faalkans van het NZK/ARK;
2. Bepalen van de benodigde faalkans en hersteltijd van gemaal IJmuiden bij gegeven faalkans van het NZK/ARK.

Voor deel 1 zijn, per maatregel, de afgeleide faalkansen en hersteltijden ontleend aan Huijmans (2021).

Uitgangspunten

In dit onderzoek is alleen gekeken naar het verkleinen van de faalkans gemaal IJmuiden.

De DEZY-berekeningen zijn uitgevoerd:

- inclusief mogelijk falen van de spuisluis IJmuiden, het gemaal IJmuiden en gemaal Zeeburg;
- exclusief het afsluiten van de Vechtboezem en het gemaal Muiden (maatregel in DEZY, niet in de praktijk);
- inclusief klein onderhoud in de zomer (pomp wordt binnen 1 dag teruggeplaatst);
- exclusief groot onderhoud in de zomer (dus niet een pomp minder in de zomer);

- met de spuiformule voor spuisluis IJmuiden van (Janssen, 2020) (herhalings-tijd bij Delta-Pi faalkans gemaal: 75 jaar).

Werkwijze

In de uitvoering van de werkwijze is eerst deel 2 uitgevoerd, omdat de faalfrequenties van de maatregelen bij de projectstart nog niet beschikbaar waren. Deel 1 is vervolgens na bespreken resultaten deel 2 uitgevoerd.

2 Effect verbetermaatregelen IJmuiden

2.1 Inleiding

Binnen DEZY wordt standaard gerekend met mogelijk falen van gemaal IJmuiden, waarbij verschillende faalmodi worden onderscheiden met een bepaalde uitval, een bepaalde herstelduur en een bijbehorende faalfrequentie (Kuijper en Geerse, 2021). De beschikbare informatie die gebruikt wordt voor de faalkansen van gemaal IJmuiden bestaat uit RCM-cost gegevens. Op basis van die gegevens heeft adviesbureau Delta-Pi in 2016 een inschatting gemaakt van de relevante faalmodi met bijbehorende faalfrequenties en herstelduren. Deze afleiding is beschreven in memoranda die zijn toegevoegd als bijlage A en B aan het rapport (Kuijper en Geerse, 2016). De omzetting van die gegevens naar de uiteindelijke invoerbestanden voor DEZY is beschreven in hoofdstuk 5 van het genoemde rapport.

Ten behoeve van de voorliggende studie heeft Iv-Infra de faalkansen van gemaal IJmuiden geactualiseerd. Deze faalkansen wijken iets af van de inschatting van Delta-Pi die tot nu toe altijd in DEZY is gehanteerd. De geactualiseerde faalkansen van gemaal IJmuiden worden verder aangeduid als de 0-situatie (van Iv-Infra). Tabel 1 en Tabel 2 geven de invoer voor DEZY voor beide situaties. In Tabel 2 is met rood en groen aangegeven welke faalfrequenties respectievelijk groter of kleiner worden in de inschatting van Iv-Infra. De geel gekleurde faalfrequenties wijken slechts minimaal af van de inschatting van Delta-Pi.

Tabel 1
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
volgens **Delta-Pi**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pompen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	1,54E-05	8,96E-06	1,27E-04	1,41E-04
	1 dag	3,65E-05	9,00E-07	0,00E+00	0,00E+00	6,07E-07
	1 week	3,42E-05	1,25E-06	0,00E+00	0,00E+00	2,53E-06
	1 maand	7,53E-05	5,72E-06	0,00E+00	0,00E+00	6,99E-06

Tabel 2
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **0-situatie**
Iv-Infra

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pompen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	1,27E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,46E-05
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	3,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E-06
	1 maand	7,54E-05	5,97E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Er gelden twee belangrijke opmerkingen bij Tabel 1 en Tabel 2, namelijk (zie ook bijlage A):

- a. De faalfrequenties bij herstelduur 1 maand bestaan uit de som van de faalfrequentie voor 1 maand en 1 kwartaal. Binnen DEZY worden geen langere herstelduren beschouwd, aangezien de basisduur 1 maand is.¹
- b. Zowel voor de invoer op basis van de inschatting van Delta-Pi als de invoer bij de Iv-Infra 0-situatie geldt, dat de faalfrequentie behorend bij de faalmodus "1 pomp gefaald, herstelduur 0,5 dag" is gecorrigeerd. Deze is namelijk verkleind om te voorkomen dat de totale faalkans binnen een maand groter wordt dan 1.

Door aanpassing van de faalfrequenties gaat de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m op het NZK/ARK van 1/75 naar 1/112 per jaar.²

Iv-Infra heeft vervolgens voor een aantal maatregelen een nieuwe inschatting gemaakt van de faalfrequenties van gemaal IJmuiden voor de afzonderlijke faalmodi (Huijmans, 2021). De beschouwde maatregelen zijn opgesomd in Tabel 3, in bijlage C worden de maatregelen A t/m F toegelicht. De bijbehorende invoer voor het model DEZY is weergegeven in bijlage A.

*Tabel 3
Overzicht
beschouwde
maatregelen
gemaal IJmuiden*

Nr	Code	Omschrijving
1	A1	Het borgen en vergroten van de pompcapaciteit 1
2	A2	Het borgen en vergroten van de pompcapaciteit 2
3	B	Tijdelijke pompcapaciteit vergroten en kostenbeheersing verbeteren
4	C	Onderhoudsmaatregelen
5	D	Adaptiviteit van het gemaal
6	E1	Compartimenteren van het gemaal 1
7	E2	Compartimenteren van het gemaal 2
8	F	Optimaliseren van het gemaal
9	A1+B+C	Simulatie A1, B en C
10	A2+B+C	Simulatie A2, B en C
11	D+E1+F	Simulatie D, E1 en F
12	D+E2+F	Simulatie D, E3 en F

In de volgende paragraaf laten we de resultaten zien voor de maatregelen uit Tabel 3 op het overschrijden van de waterstand op het NZK/ARK. Een bijzondere situatie betreft maatregel F. Daar wordt namelijk niet alleen de faalfrequentie van één van de faalmodi voor gemaal IJmuiden aangepast, maar de faalfrequentie voor het *gecombineerd falen* van gemaal en spui bij IJmuiden. Dit wordt daarom apart beschouwd in paragraaf 2.3.

¹ Daarmee wordt bedoeld dat de statistiek en het tijdsverloop van de stochasten in het model (afvoer, neerslag, wind en zeewaterstanden) gegeven is voor een periode van 1 maand, en dat ook de resulterende waterstandsverlopen berekend worden met een simulatieduur van een maand. Op basis hiervan wordt in het model de overschrijdingskans per maand berekend, waarna tenslotte de overschrijdingsfrequentie per jaar volgt door vermenigvuldiging van deze kans met het aantal maanden per jaar.

² Waarbij we (net als in de rest van dit rapport) zijn uitgegaan van de spuiformule voor IJmuiden van Janssen (2020), zoals beschreven in (Vermeulen en Kuijper, 2020).

2.2

Resultaten

Tabel 4 t/m Tabel 6 geven de overschrijdingsfrequentielijnen/terugkeertijden van de waterstand op het NZK/ARK voor de faalfrequenties volgens Delta-Pi, volgens de Iv-Infra 0-situatie en voor maatregelen A t/m E. Het resultaat van de maatregelen moet uiteraard vergeleken worden met de 0-situatie, de resultaten o.b.v. de getallen volgens Delta-Pi zijn slechts ter vergelijking weergegeven.

Tabel 4
Herhalingstijd van overschrijden gem. waterstand op het **NZK/ARK** voor Delta-Pi, 0-situatie en maatregelen (**deel 1**).

Waterstand NZK/ARK	Delta-Pi	Iv-Infra 0-situatie	A1	A2
NAP-0,3 m	1	1	1	1
NAP-0,2 m	4	5	5	5
NAP-0,1 m	23	32	34	34
NAP+0,0 m	75	112	119	119
NAP+0,1 m	218	273	283	282
NAP+0,2 m	466	551	559	559

Tabel 5
Herhalingstijd van overschrijden gem. waterstand op het **NZK/ARK** voor maatregelen (**deel 2**).

Waterstand NZK/ARK	B	C	D	E1	E2
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	5	5	5	5	5
NAP-0,1 m	32	34	33	32	32
NAP+0,0 m	111	119	115	114	114
NAP+0,1 m	271	283	277	275	275
NAP+0,2 m	549	559	555	555	555

Tabel 6
Herhalingstijd van overschrijden gem. waterstand op het **NZK/ARK** voor maatregelen (**deel 3**).

Waterstand NZK/ARK	A1+B+C	A2+B+C	D+E1+F	D+E2+F
NAP-0,3 m	1	1	1	1
NAP-0,2 m	5	5	5	5
NAP-0,1 m	35	38	33	33
NAP+0,0 m	121	134	116	117
NAP+0,1 m	287	304	279	279
NAP+0,2 m	563	576	558	558

Bij Tabel 6 merken we op dat de laatste twee kolommen eigenlijk ten onrechte ook maatregel F in de naam bevatten. Maatregel F is namelijk alleen apart beschouwd (zie paragraaf 2.3).

Aan de resultaten valt direct op, dat de overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m op het NZK/ARK niet of nauwelijks wijzigt. De grootste verlaging wordt gevonden bij maatregel A2+B+C (van 1/112 per jaar naar 1/134 per jaar), maar dat is nog slechts een afname van 16% van de overschrijdingsfrequentie. Dit resultaat blijkt echter goed verklaarbaar, wanneer gelet wordt op de benodigde faalkansen om de overschrijdingsfrequentie verder omlaag te brengen. Deze analyse wordt beschreven in hoofdstuk 3. Om naar een overschrijdingsfrequentie van 1/200 per jaar te gaan moet vooral de faalfrequentie voor de faalmodus "5 of 6 pompen gefaald, herstelduur 1 maand" flink worden verlaagd (met een factor 5). Zoals te zien in bijlage A wordt deze faalfrequentie echter bij geen enkele maatregel aangepast.

2.3

Analyse gecombineerd falen spui en gemaal

Zoals eerder aangegeven, betreft maatregel F uit Tabel 3 een bijzondere situatie. Daar wordt namelijk niet alleen de faalfrequentie van één van de faalmodi voor gemaal IJmuiden aangepast, maar de faalfrequentie voor het *gecombineerd falen* van gemaal en spui bij IJmuiden. In het model DEZY is het echter zo, dat de faalkans voor falen van gemaal en spui IJmuiden volgt uit de faalkansen voor falen bij het gemaal en falen van de spui afzonderlijk (onder de aanname dat deze onafhankelijk zijn). Deze faalfrequentie is dus niet (rechtstreeks) aan te passen in (invoer van) DEZY, hetgeen het doorrekenen van maatregel F lastig maakt.

In plaats van een rechttoe-rechtaan doorrekening van maatregel F wordt in deze paragraaf daarom een beschouwing gegeven op het gecombineerd falen van spui en gemaal. Daarbij gaan we in paragraaf 2.3.1 in op de kans op volledig falen bij IJmuiden (uitval van alle spuikokers en alle maalgangen) en in paragraaf 2.3.2 op de invloed daarvan op de overschrijdingsfrequenties.

2.3.1

Kans volledig falen IJmuiden

Gecombineerde faalmodi met volledig falen IJmuiden

Standaard wordt voor het NZK/ARK systeem gerekend met mogelijk falen op drie locaties, namelijk gemaal IJmuiden, spui IJmuiden en gemaal Zeeburg. Daarbij worden zowel enkelvoudige faalmodi beschouwd, waarbij op slechts één van deze locaties falen plaatsvindt, als gecombineerde faalmodi, waarbij op twee of drie locaties tegelijk falen plaatsvindt.

Situaties met volledige uitval bij IJmuiden gedurende de hele basisduur (1 maand) komen dus overeen met gecombineerde faalmodi waarbij 260 m³/s faalt bij gemaal IJmuiden en 7 schuiven bij spui IJmuiden, beide met herstelduur 1 maand. Dit betreft meerdere gecombineerde faalmodi, aangezien dit op kan treden in combinatie met verschillende faalmodi bij gemaal Zeeburg. Tabel 7 geeft een overzicht van alle gecombineerde faalmodi met volledige uitval bij IJmuiden gedurende de hele basisduur, die volgen uit de default invoer m.b.t. de faalmodi.³

³ Voor deze analyse is uitgegaan van de default faalfrequenties volgens Delta-Pi.

Tabel 7
Overzicht kansen
gecombineerde
faalmodi met
volledige uitval
IJmuiden gedurende
1 maand

Gemaal IJmuiden		Spui IJmuiden		Gemaal Zeeburg		Kans in basisduur (-)
Uitval (m ³ /s)	MTTR (uur)	Uitval (#schuiven)	MTTR (uur)	Uitval (m ³ /s)	MTTR (uur)	
260	720	7	720	geen falen		6,794E-06
260	720	7	720	14	12	2.737E-06
260	720	7	720	14	24	1.676E-07
260	720	7	720	14	168	5.645E-08
260	720	7	720	14	720	5.710E-08
260	720	7	720	29	12	2.567E-06
260	720	7	720	29	24	1.676E-07
260	720	7	720	29	168	1.020E-09
260	720	7	720	29	720	5.710E-08
260	720	7	720	43	12	2.567E-06
260	720	7	720	43	24	1.676E-07
260	720	7	720	43	168	9.901E-10
260	720	7	720	43	720	5.710E-08
260	720	7	720	57	12	2.567E-06
260	720	7	720	57	24	1.676E-07
260	720	7	720	57	168	9.901E-10
260	720	7	720	57	720	5.710E-08
Som						1.819E-05

Faalkansen in basisduur

Wanneer met alle gecombineerde faalmodi wordt gerekend⁴, dan betreft dit dus onder andere 17 gecombineerde faalmodi waarbij sprake is van volledige uitval van IJmuiden gedurende de hele basisduur (1 maand). Voor elk van deze combinaties wordt de bijbehorende kans berekend uit de ingevoerde kans voor de betreffende faalmodus bij de afzonderlijke locaties. Dit lichten we in het navolgende in meer detail toe.

Als voorbeeld nemen we de situatie waarbij IJmuiden volledig faalt gedurende 1 maand en Zeeburg 'voor de helft' faalt (d.w.z. uitval van 29 m³/s) gedurende 1 dag. In Tabel 7 is te zien dat de bijbehorende faalkans in de basisduur van 1 maand gelijk is aan 1,676E-07 (ca. 1 op 6 miljoen). In het invoerbestand voor DEZY zijn faalfrequenties opgegeven voor de faalmodi bij de afzonderlijke locaties. Dit betreft:

- Gemaal IJmuiden 260 m³/s gedurende 1 maand: 6,99E-06 / uur
- Spui IJmuiden 7 kokers gedurende 1 maand: 5,02E-06 / uur
- Gemaal Zeeburg 29 m³/s gedurende 1 week: 1,28E-05 / uur

Deze faalfrequenties worden eerst omgerekend naar faalkansen in de basisduur door vermenigvuldiging met het aantal uur per maand (720). Dit geeft:

- Gemaal IJmuiden 260 m³/s gedurende 1 maand: 5,033E-03 / maand
- Spui IJmuiden 7 kokers gedurende 1 maand: 3,614E-03 / maand
- Gemaal Zeeburg 29 m³/s gedurende 1 week: 9,216E-03 / maand

⁴ Dat is overigens niet het geval: om rekestijd te besparen wordt default met een selectie van gecombineerde faalmodi gerekend. Zie voor meer informatie Vermeulen en Kuijper (2020a).

De kans op de gecombineerde faalmodus wordt nu berekend door deze kansen te vermenigvuldigen (onder de aanname dat deze gebeurtenissen onafhankelijk zijn). Dit geeft de eerder vermelde kans in de basisduur van $1,676E-07$. Alle andere kansen in Tabel 7 zijn op eenzelfde manier berekend. Een bijzondere situatie betreft de eerste gecombineerde faalmodus, waarbij gemaal Zeeburg niet faalt. Hiervoor worden de kansen op falen bij IJmuiden vermenigvuldigd met de kans op niet falen bij gemaal Zeeburg. Deze laatste wordt berekend als 1 minus de som van de faalkansen voor de afzonderlijke faalmodi voor gemaal Zeeburg (zoals opgegeven in het invoerbestand van DEZY).

Zoals aangegeven in Tabel 7 volgt dat de totale kans (in de basisduur) op volledige uitval bij IJmuiden gedurende een maand, ongeacht het al dan niet falen van gemaal Zeeburg, gelijk is aan $1,819E-05$ (ca. 1/55.000) per maand.

2.3.2 Invloed volledig falen IJmuiden

Originele faalkansen

Om de invloed van het volledig falen van IJmuiden in beeld te brengen zijn berekeningen gemaakt met DEZY, waarvan het resultaat is weergegeven in Figuur 1. Dit betreft overschrijdingsfrequentielijnen van de gemiddelde waterstand op het NZK/ARK (jaarrond, dat wil zeggen: totale overschrijdingsfrequentie over het zomer- en winterhalfjaar). De lijnen in deze figuur worden in het onderstaande uitgebreid toegelicht.

1. Geen falen

Dit is de overschrijdingsfrequentielijn voor de situatie waarin mogelijk falen niet is meegenomen. De overschrijdingsfrequentie van NAP +0,0m is dan klein, namelijk ca. 1/5.600 per jaar.

2. Volledig falen

Dit is de overschrijdingsfrequentielijn voor de situatie waarin gerekend is met 0 m³/s pompcapaciteit bij IJmuiden en 0 spuikokers, hetgeen gezien kan worden als de situatie dat er gedurende de hele tijd sprake is van volledig falen van gemaal en spui bij IJmuiden. Overige faalmodi zijn in deze berekening niet meegenomen. Uiteraard geeft dit zeer hoge overschrijdingsfrequenties: NAP +0,0m wordt ca. 4 keer per jaar overschreden.

3. Kans volledig falen 1/55.000

Dit is een handmatig berekende overschrijdingsfrequentielijn (geen rechtstreekse DEZY-uitvoer), waarbij bovenstaande twee lijnen zijn gewogen met de kans op volledige uitval bij IJmuiden. Zoals eerder aangegeven is deze kans bij de defaultinstellingen van DEZY gelijk aan ca. 1/55.000 per basisduur (zie paragraaf 2.3.1). M.a.w.: dit is het resultaat wanneer rekening gehouden wordt met mogelijk volledige uitval van IJmuiden gedurende de hele basisduur, als daarvoor de kans wordt

gehanteerd die daar nu binnen DEZY aan te wordt gekend o.b.v. de invoer.

4. Alle gecombineerde faalmodi

Binnen DEZY wordt default niet alleen gerekend met gecombineerde faalmodi waarbij IJmuiden volledig uitvalt (zoals in Tabel 7), maar ook met allerlei andere gecombineerde faalmodi. Zo wordt bijvoorbeeld ook de gebeurtenis beschouwd waarbij het gemaal bij IJmuiden volledig functioneert, 4 spuischuiven bij IJmuiden gedurende 1 week falen en 14 m³/s faalt bij gemaal Zeeburg gedurende 1 dag (om maar een voorbeeld te noemen).⁵

Deze overschrijdingsfrequentielijn betreft het resultaat wanneer alle gecombineerde faalmodi worden meegenomen. Te zien is dat de overschrijdingsfrequenties veel hoger zijn dan wanneer alleen het volledig uitvallen van IJmuiden wordt meegenomen. NAP +0,0m heeft een overschrijdingsfrequentie van 1/61 per jaar.

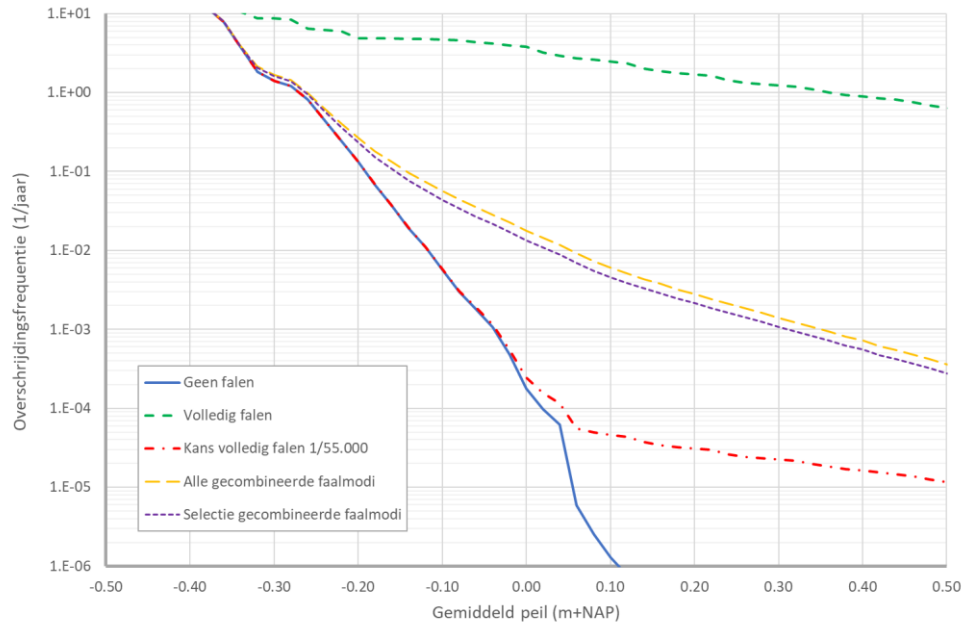
5. Selectie gecombineerde faalmodi

Om de rekentijd te beperken wordt in de praktijk gerekend met een selectie van gecombineerde faalmodi. Deze selectie is dusdanig dat het resultaat met alle gecombineerde faalmodi redelijk goed wordt benaderd (minstens 75% van de originele overschrijdingsfrequentie), maar slechts minder dan 3% van de rekentijd nodig is.

Deze overschrijdingsfrequentielijn betreft het resultaat wanneer gerekend wordt met de default selectie zoals beschreven in bijlage D van (Vermeulen en Kuijper, 2020a). Zoals te zien ligt de overschrijdingsfrequentielijn dicht bij de lijn op basis van alle gecombineerde faalmodi. NAP +0,0m heeft een overschrijdingsfrequentie van 1/75 per jaar.

⁵ Overigens wordt bij een dergelijke gebeurtenis ook nog onderscheid gemaakt in het moment waarop falen plaatsvindt. Het falen van de 4 spuischuiven bij IJmuiden en de 14 m³/s bij gemaal Zeeburg in dit voorbeeld hoeft namelijk niet per se op hetzelfde moment plaats te vinden. Zie voor meer details paragraaf 8.5.4 van (Kuijper en Geerse, 2016).

*Figuur 1
Bijdrage volledig
falen IJmuiden t.o.v.
(selectie) alle
gecombineerde
faalmodi (originele
faalkansen Delta-Pi)*



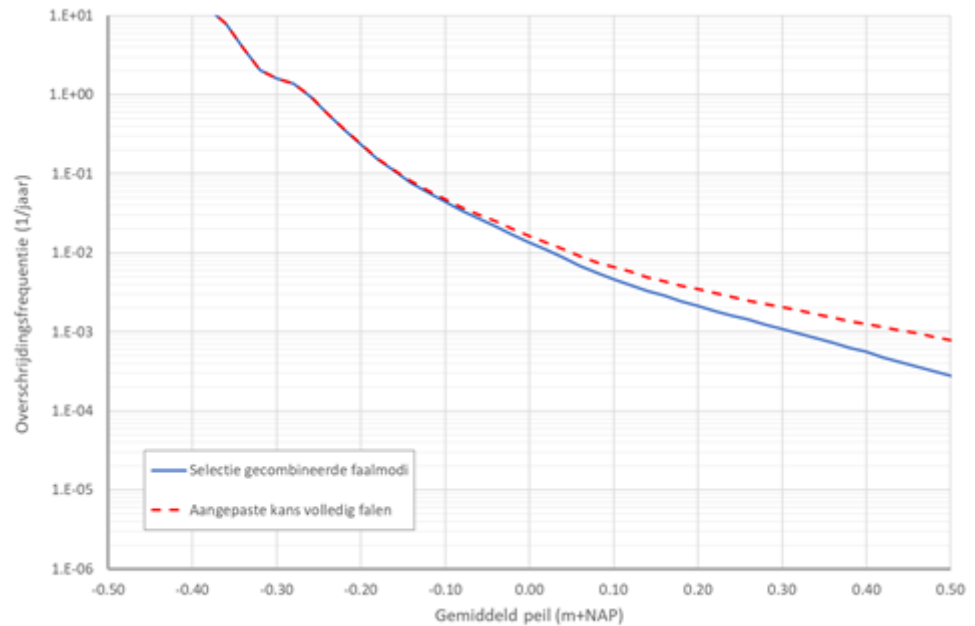
Met de originele faalkansen heeft volledige uitval van IJmuiden gedurende de hele basisduur dus een beperkte invloed. Dat geldt uiteraard niet voor afzonderlijke gebeurtenissen (de invloed van volledige uitval is beslist desastreus), maar wel voor de resulterende overschrijdingsfrequentielijn, waarbij rekening is gehouden met de kans op deze gebeurtenis (ca. 1/55.000 per basisduur).

Aangepaste faalkans volledig falen

De kans van 1/55.000 per basisduur voor volledige uitval van IJmuiden volgt, zoals uitgelegd in paragraaf 2.3.1, uit de opgegeven faalkansen voor spui en gemaal afzonderlijk en de aanname dat het falen op deze locaties onderling onafhankelijk is. Dat is blijkbaar niet het geval. Volgens de gegevens van Iv-Infra over de faalfrequenties in de 0-situatie bedraagt de faalfrequentie van 6 maalgangen én 7 spuiokers gedurende 1 maand of 1 kwartaal (gesommeerd) 1,09E-06 per uur. Omgerekend naar een kans in een 1 maand komt dat neer op ca. 1/1270 per basisduur. Dat betekent dat de kans op volledige uitval van IJmuiden ca. een factor 40 groter is dan nu in de berekening wordt meegenomen.

Om een indruk te krijgen van het effect van de grotere faalkans voor volledige uitval is de overschrijdingsfrequentielijn nogmaals handmatig berekend, waarbij de originele frequentielijn (nummer 5 uit Figuur 1 (selectie gecombineerde faalmodi)) en de frequentielijn met volledig falen (nummer 2 uit Figuur 1 (volledig falen)) zijn gewogen met de kans op volledige uitval bij IJmuiden (1/1270). De overschrijdings-frequentie van NAP+0,0 m op net NZK/ARK bedraagt dan 1/61 per jaar.

*Figuur 2
 Inschatting effect in referentiesituatie (Delta-Pi) van meenemen aangepaste faalkans (1/1270) voor volledige uitval bij IJmuiden.*

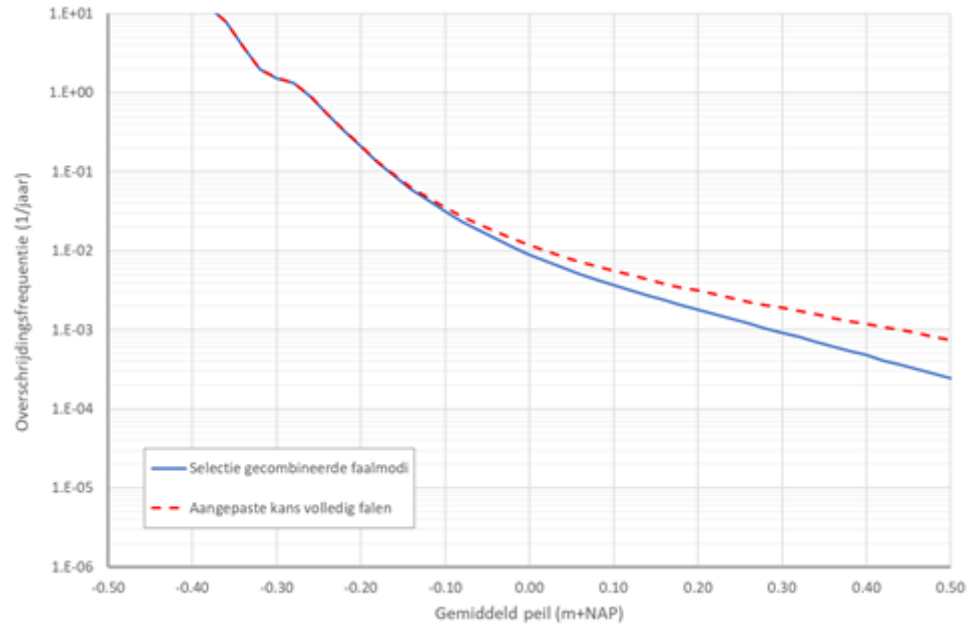


De analyse laat zien dat het niet meenemen van de afhankelijkheid in falen bij spui en gemaal wel degelijk invloed heeft en een iets te gunstig beeld geeft (de faalkans van het NZK/ARK is groter als de afhankelijkheid wel wordt meegenomen). Door de grotere faalkans mee te nemen, die volgt uit de analyse van Iv-Infra nemen de overschrijdingsfrequenties toe. De frequentie waarmee NAP+0,0 m wordt overschreven op het NZK/ARK wordt dan volgens schatting 1/61 per jaar, in plaats van 1/75 per jaar. Met maatregel F (Optimaliseren van het gemaal) neemt de kans op volledige uitval van gemaal en spui af van 1/1270 tot 1/1440 per basisduur. Dat is een relatief klein verschil en doet daarom niet veel op het resultaat. De overschrijdingsfrequentie van NAP+0,00 m wordt dan 1/62.

In zekere zin is het effect van het meenemen van de afhankelijkheid in gelijktijdig falen beperkt (van 1/75 naar 1/61 per jaar), maar dit betekent wel, dat deze gecombineerde faalkans belangrijk is wanneer geprobeerd wordt om d.m.v. maatregelen de overschrijdingsfrequentie op het NZK/ARK te verlagen. Los van andere maatregelen die daarvoor nodig zijn (zie de analyse in hoofdstuk 3) zal ook de kans op het gecombineerd falen van spui en gemaal moeten worden verlaagd.

Voor de volledigheid laten we ook het effect zien op basis van de 0-situatie van Iv-Infra.

Figuur 3
 Inschatting effect in
 0-situatie (Iv-Infra)
 van meenemen
 aangepaste faalkans
 (1/1270) voor
 volledige uitval bij
 IJmuiden.



In de 0-situatie wordt de frequentie waarmee NAP+0,0 m wordt overschreden op het NZK/ARK volgens schatting 1/84 per jaar, in plaats van 1/112 per jaar. Met maatregel F gaat de overschrijdingsfrequentie van NAP+0m van 1/84 naar 1/86. Dat is een klein verschil, maar dat komt (zoals eerder al aangegeven) doordat de aanpassing van de kans op volledige uitval door maatregel F ook relatief klein is.

Tenslotte is het goed om aan te geven dat in deze analyse alleen een inschatting is gegeven van het effect van gelijktijdig uitvallen van spui en gemaal *gedurende de hele basisduur van 1 maand*. In de gegevens van Delta-Pi en Iv-Infra zijn ook faalkansen gegeven voor gecombineerd falen van spui en gemaal met kortere herstelduren. Om die faalkansen mee te kunnen nemen is een aanpassing van het model nodig (zie ook de aanbevelingen in hoofdstuk 4). Overigens gaat het in de gegevens van Iv-Infra alleen om gelijktijdig falen gedurende een halve dag (bij herstelduren van 1 dag of 1 week is de faalfrequentie daar op nul gezet). De invloed daarvan is naar verwachting wel veel kleiner dan de invloed van gelijktijdige uitval gedurende de hele basisduur.

3 Benodigde faalkans IJmuiden

3.1 Inleiding

In deze analyse is onderzocht in hoeverre de faalkansen voor het gemaal IJmuiden moeten worden verkleind om een bepaalde faalkans voor het NZK/ARK systeem te verkrijgen. Meer specifiek: hoeveel kleiner moeten de faalkansen zijn om de overschrijdingsfrequentie van waterstand NAP+0,0 m op het NZK/ARK te verlagen naar 1/200, 1/500 of 1/1000 per jaar?

3.2 Aanpak en resultaten

De gevolge werkwijze bestaat eruit dat telkens de faalfrequentie van de faalmodus met de grootste kansbijdrage is verkleind, net zo lang tot de gezochte overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m is gevonden. Het resultaat hiervan is terug te vinden in Tabel 8 t/m Tabel 11. Tabel 8 bevat de faalfrequenties voor de Iv-Infra 0-situatie (zie ook hoofdstuk 2). Tabel 9 t/m Tabel 11 geven aan in hoeverre deze faalfrequenties zijn verkleind om te voldoen aan een overschrijdingsfrequentie van respectievelijk 1/200, 1/500 of 1/1000 per jaar.

Voor bijvoorbeeld een overschrijdingsfrequentie van 1/500 per jaar is de kans op uitval van 5 of 6 pompen gedurende 1 maand verkleind naar 4% van de originele waarde in Tabel 8 (dus van 56,8E-07 naar 2,27E-07 per uur).

In Tabel 8 t/m Tabel 11 zijn ter verduidelijking de velden gearceerd waar de faalkans in de 0-situatie gelijk is aan nul, aangezien deze faalmodi sowieso niet hoeven te worden aangepakt bij het verlagen van de faalkansen.

Tabel 8
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **0-situatie**
Iv-Infra

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	1,27E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,46E-05
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	3,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E-06
	1 maand	7,54E-05	6,97E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 9
Aanpassing
faalkansen Tabel 8
om overschrijdings-
frequentie naar
1/200 per jaar te
brengen

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag					
	1 dag					
	1 week					
	1 maand	50%				20%

Tabel 10
Aanpassing
faalkansen Tabel 8
om overschrijdings-
frequentie naar
1/500 per jaar te
brengen

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	20%			20%	50%
	1 dag					
	1 week					
	1 maand	10%	50%			4%

Tabel 11
Aanpassing
faalkansen Tabel 8
om overschrijdings-
frequentie naar
1/1000 per jaar te
brengen

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	2%			4%	4%
	1 dag					50%
	1 week	20%				10%
	1 maand	2%	4%			0,5%

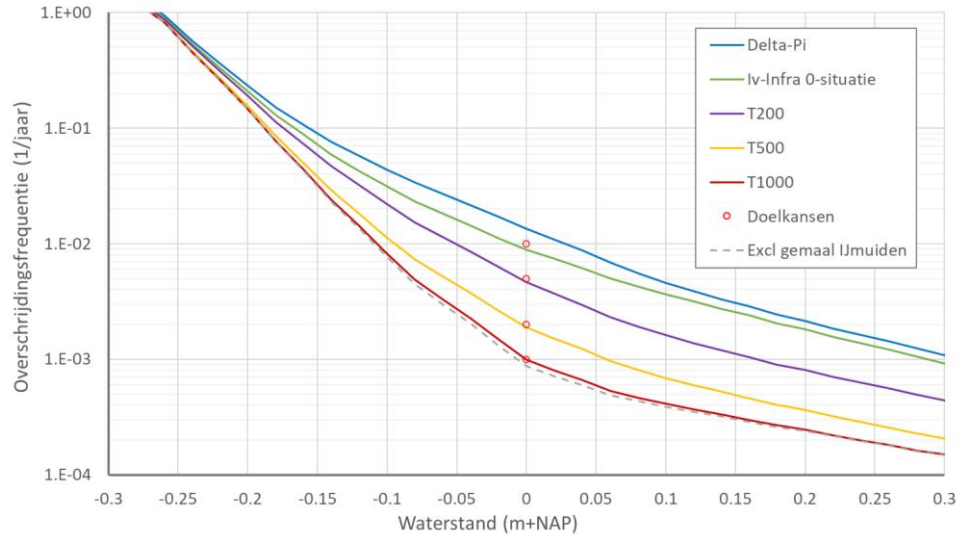
Figuur 4 en Tabel 12 geven de overschrijdingsfrequentielijnen/ terugkeertijden van de waterstand op het NZK/ARK voor de Iv-Infra 0-situatie en situaties met verkleinde faalkansen (Tabel 9 t/m Tabel 11, aangegeven met "T200", "T500" en "T1000").

Ter vergelijking is in Figuur 4 de ook de overschrijdingsfrequentielijn weergegeven voor de situatie met originele faalfrequenties conform de analyse van Delta-Pi (zie Tabel 1 in paragraaf 2.1).

Daarnaast bevat Figuur 4 de overschrijdingsfrequentielijn voor de situatie waarbij alle faalfrequenties voor gemaal IJmuiden op nul zijn gezet (aangeduid als "Excl gemaal IJmuiden"). Zie voor een nadere toelichting daarop paragraaf 3.3.

Figuur 5 en Tabel 13 geven dezelfde resultaten voor de waterstand op de Amstelboezem.

Figuur 4
Overschrijdings-
frequentielijn gem.
waterstand op het
NZK/ARK

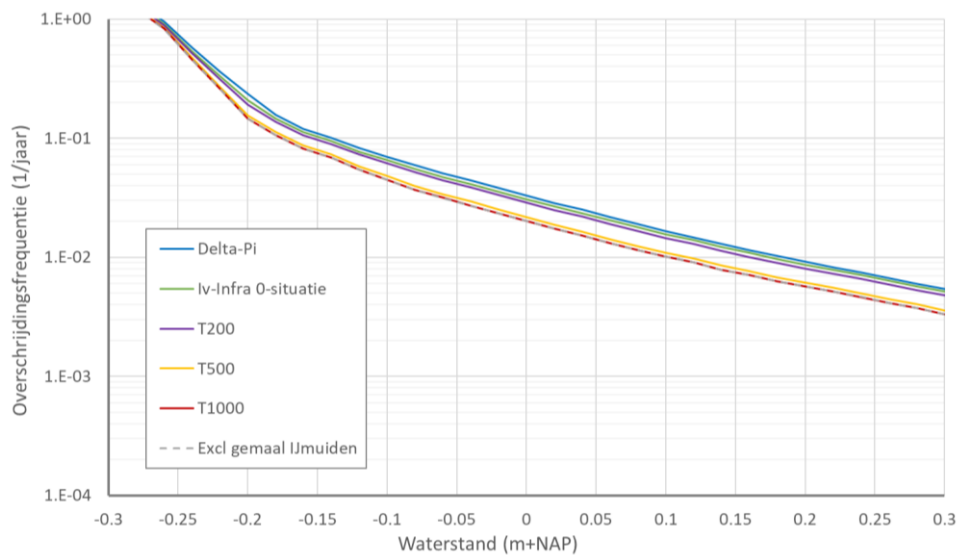


Tabel 12
Herhalingstijd van
overschrijden gem.
waterstand op het
NZK/ARK

Waterstand NZK/ARK	Delta-Pi	Iv-Infra 0-situatie	T200	T500	T1000
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	4	5	5	6	7
NAP-0,1 m	23	32	46	88	121
NAP+0,0 m	75	112	214	528	1007
NAP+0,1 m	218	273	619	1450	2423
NAP+0,2 m	466	551	1243	2760	4082

Exclusief falen gemaal IJmuiden (dus gemaal faalt nooit) is de herhalingstijd van NAP+0,00 m gemiddeld eens in de 1150 jaar.

Figuur 5
Overschrijdings-
frequentielijn van de
gem. waterstand op de
Amstelboezem



Tabel 13
Herhalingstijd van
overschrijden gem.
waterstand op de
Amstelboezem

Waterstand Amstelboezem	Delta-Pi	Iv-Infra 0-situatie	T200	T500	T1000
NAP-0,3 m	1	1	1	1	1
NAP-0,2 m	4	5	5	6	7
NAP-0,1 m	14	15	16	21	22
NAP+0,0 m	30	33	35	46	50
NAP+0,1 m	60	64	69	91	98
NAP+0,2 m	109	115	124	164	176

3.3

Nadere beschouwing

Zoals aangegeven in paragraaf 3.2, is bij die analyse telkens de faalfrequentie van de faalmodus met de grootste kansbijdrage verkleind, net zo lang tot de gezochte overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m is gevonden. Om een beeld te geven, is in Tabel 14 voor de 0-situatie en de situatie bij het bereiken van T=200, T=500 en T=1000 jaar telkens aangegeven welke faalmodi de grootste kansbijdrage hebben aan de overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m op het NZK/ARK.

*Tabel 14
De drie
(gecombineerde)
faalmodi met de
grootste
kansbijdrage voor de
0-situatie en de
situaties na het
terugbrengen van de
overschrijdings-
frequentie van
NAP+0,0 m op het
NZK/ARK naar
1/200, 1/500 of
1/1000 per jaar*

Situatie	Grootste kansbijdrage	Eén-na-grootste kansbijdrage	Twee-na-grootste kansbijdrage
Iv-Infra 0-situatie	5 of 6 pompen gefaald voor 1 maand	5 of 6 pompen gefaald voor 1 maand én 1 spuikoker gefaald voor 0,5 dag	5 of 6 pompen gefaald voor 1 maand én 1 pomp Zeeburg gefaald voor 0,5 dag
T = 200 jaar	1 pomp gefaald voor 0,5 dag én 1 spuikoker gefaald voor 1 maand	4 pompen gefaald voor 0,5 dag	5 of 6 pompen gefaald voor 1 maand
T = 500 jaar	7 spuikokers gefaald voor 1 maand	5 of 6 pompen gefaald voor 1 week	geen falen
T = 1000 jaar	7 spuikokers gefaald voor 1 maand	geen falen	4 pompen Zeeburg gefaald voor 1 maand

Zoals te zien in Tabel 14, heeft in de 0-situatie de faalmodus met uitval van 5 of 6 pompen voor 1 maand de grootste kansbijdrage, gevolgd door twee faalmodi waarbij sprake is van dezelfde uitval bij gemaal IJmuiden, maar dan gecombineerd met uitval bij de spui IJmuiden dan wel het gemaal Zeeburg.

Door het verkleinen van de kans op een dergelijke uitval bij gemaal IJmuiden gaat de overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m omlaag én wordt de grootste kansbijdrage geleverd door andere faalmodi. Na het omlaag brengen van de overschrijdingsfrequentie tot 1/200 per jaar (dus na verlaging van de faalkansen zoals aangegeven in Tabel 9), wordt bijvoorbeeld de grootste bijdrage geleverd door de faalmodus waarbij 1 pomp faalt gedurende 0,5 dag én 1 spuikoker faalt gedurende 1 maand. In de volgende iteratiestap is dan de kans verlaagd van het uitvallen van 1 pomp gedurende 0,5 dag.

Vanaf zeker moment wordt de grootste kansbijdrage gevonden bij faalmodi waarbij geen sprake is van falen bij gemaal IJmuiden. Zo geldt bijvoorbeeld na het omlaag brengen van de overschrijdingsfrequentie tot 1/500 per jaar dat de grootste kansbijdrage wordt gevormd door de faalmodus waarbij 7 spuikokers uitvallen gedurende 1 maand. De één-na-grootste bijdrage wordt dan geleverd door de situatie waarin 5 of 6 pompen uitvallen voor 1 week. De kans op die faalmodus is in de volgende iteratiestap verkleind, aangezien voor deze analyse alleen gelet is op de faalkansen van gemaal IJmuiden.

De uitgevoerde analyse laat zien, dat vanaf zeker moment het aanpakken van alleen de faalkans voor het gemaal bij IJmuiden niet meer de meest efficiënte manier is om de overschrijdingsfrequentie op het NZK/ARK omlaag te brengen. Dat punt ligt al iets voordat de overschrijdingsfrequentie is teruggebracht tot 1/500 per jaar (namelijk grofweg rond 1/400 per jaar). Vanaf dat moment zouden ook de faalkansen voor de spui bij IJmuiden aangepakt moeten worden. Vanaf een iets later moment geldt dat ook voor de faalkansen voor het gemaal bij Zeeburg.

Uit eerder onderzoek is bekend (Vermeulen en Kuijpers, 2019) dat extra pompcapaciteit, bij voorkeur onafhankelijk van de gemalen IJmuiden en Zeeburg, meer effect heeft op de faalkans van het NZK/ARK.

Dat vanaf zeker moment het aanpakken van alleen de faalkans voor het gemaal bij IJmuiden niet meer de meest efficiënte manier is, blijkt ook uit het feit dat het verder aanpakken van deze faalkansen op een gegeven moment (vrijwel) geen effect meer heeft. Om dat aan te tonen is ook een berekening gemaakt waarbij alle faalkansen voor gemaal IJmuiden op nul zijn gezet. Het resultaat daarvan is in Figuur 4 aangeduid als "Excl gemaal IJmuiden". De resulterende overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m op het NZK/ARK is gelijk aan iets meer dan 1/1200 per jaar. Met andere woorden: door het verlagen van alleen de faalkansen voor het gemaal IJmuiden kan de overschrijdingsfrequentie van NAP+0,0 m op het NZK/ARK niet veel lager worden gemaakt dan de 1/1000 per jaar, die in paragraaf 3.2 is onderzocht.

4 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is gekeken naar het effect van andere (kleinere) faalfrequenties van gemaal IJmuiden op de faalkans van het NZK/ARK (gedefinieerd als het overschrijden van NAP+0,00 m). Hierbij is enerzijds gekeken naar effecten van maatregelen die de faalkans van gemaal IJmuiden verkleinen op de faalkans van het NZK/ARK en anderzijds naar de benodigde faalkans van gemaal IJmuiden bij een gegeven faalkans van het NZK/ARK.

4.1 Conclusies

- Door Iv-Infra is de faalkans van gemaal IJmuiden geactualiseerd (Huijmans, 2021). Deze geactualiseerde faalkansen voor het gemaal worden aangeduid als de 0-situatie (van Iv-Infra). De geactualiseerde faalkans van gemaal IJmuiden resulteert in een faalkans NZK/ARK van eens in de 112 jaar (was eens in de 75 jaar).
- Geen van de beschouwde maatregelen waarmee de faalkans van het gemaal IJmuiden wordt verkleind heeft een significant effect op de faalkans van het NZK/ARK. Dit komt doordat de gebeurtenis “falen van gemaal IJmuiden voor een periode van een maand” dominant is, en geen van de maatregelen deze faalgebeurtenis (veel) kleiner maakt.
- Met het omlaag brengen van de faalfrequentie van gemaal IJmuiden leveren andere gebeurtenissen de grootste bijdrage aan het falen van het NZK/ARK. Als het gemaal IJmuiden *nooit* zou falen, hetgeen praktisch niet mogelijk is, dan is de faalkans van het NZK/ARK net iets kleiner dan 1/1150 jaar.
- Om een faalkans van het NZK/ARK van 1/200 jaar mogelijk te maken op basis van het verkleinen van de faalkans van gemaal IJmuiden moet de dominante faalfactor (falen van gemaal IJmuiden voor een periode van een maand) met een factor 5 kleiner worden. Dit is veel meer dan wat wordt gerealiseerd met de onderzochte maatregelen. Om de faalkans van het NZK/ARK veel kleiner te maken zijn (dus) ingrijpender maatregelen nodig, waarbij niet alleen naar de faalkans van gemaal IJmuiden wordt gekeken.
- In de berekening van de faalkans van het NZK/ARK is aangenomen falen van gemaal IJmuiden en de spuisluis IJmuiden onafhankelijke gebeurtenissen zijn. Deze aanname blijkt niet juist en blijkt van invloed te zijn op de faalkans NZK/ARK. Het effect van afhankelijkheid van gemaal en spui wordt ingeschat op een afname van de faalkans NZK/ARK van 1/112 jaar naar 1/84 jaar (uitgaande van de 0-situatie van Iv-Infra).

- Voorgesteld wordt om voor de faalkans van gemaal IJmuiden de 0-situatie (van Iv-Infra) te hanteren omdat deze faalkans gebaseerd is op actuele inzichten in de faalkans van het gemaal en waarin de reeds gerealiseerde aanpassingen op gemaal IJmuiden zijn verwerkt. Dit betekent dat de faalkans van het NZK/ARK 1/112 jaar wordt (onder de aanname dat de gebeurtenissen falen gemaal en falen spuisluis onafhankelijk zijn).
- Om de faalkans van het NZK/ARK te verkleinen naar 1/200 jaar of zelfs kleiner wordt aanbevolen om de maatregelen niet te beperken tot gemaal IJmuiden zelf, maar ook andere maatregelen hierin mee te nemen. Uit eerder onderzoek is bekend dat extra gemaalcapaciteit, met name onafhankelijk van het huidige gemaal IJmuiden, de faalkans van het NZK/ARK significant verkleint.
- Aanbevolen wordt nader te onderzoeken waardoor de faalkans van gemaaluitval voor 30 dagen of langer zo groot wordt ingeschat, juist omdat deze gebeurtenis dominant is in de faalkans van het NZK/ARK. Een (te) conservatieve inschatting en/of eenvoudige maatregelen om deze kans kleiner te maken heeft veel invloed op de berekende faalkans van het NZK/ARK.
- Aanbevolen wordt om DEZY aan te passen, zodanig dat rekening gehouden kan worden met de afhankelijkheid in het gelijktijdig falen van spui en gemaal bij IJmuiden.⁶

⁶ Daarbij stellen we een relatief eenvoudige aanpassing voor, waarbij de kans op gelijktijdig falen berekend wordt volgens de huidige methode (onder aanname van onafhankelijkheid), maar voor specifieke faalmodi 'overruled' kan worden via het invoerbestand. Concreet: voor bijvoorbeeld "falen van 7 spuikokers en 6 maalgangen gedurende 1 maand" kan de gebruiker dan rechtstreeks een faalfrequentie opgeven. In theorie zou dat met deze opzet dan ook kunnen voor bijvoorbeeld de gebeurtenis "falen van 3 spuikokers gedurende 1 week en falen van 2 maalgangen gedurende 1 dag", hoewel dat in de praktijk niet gebruikt zal worden, aangezien de gegevens van Delta-Pi en Iv-Infra alleen wijzen op afhankelijkheid in het uitvallen van alle spuikokers en alle maalgangen tegelijk.

5 Referenties

Huijmans, 2021

Robin Huijmans. *Bepalen faalkans en hersteltijden voor Gemaal IJmuiden - Slim Watermanagement - impactanalyse van maatregelen gemaal IJmuiden op de faalkans van het NZK/ARK*. Iv-Infra, rapport INFR210421-R-001-2, revisie 3, definitief concept, 21 oktober 2021.

Janssen, 2020

H. Janssen. *Nieuwe overall relaties voor het systeem spui+SO, afgeleid op basis van de formules in Dezy met coëfficiënt 878*. Rijkswaterstaat, email 27 juli 2020.

Kuijper en Geerse, 2016

Bastiaan Kuijper en Chris Geerse. *Doorontwikkeling DEZY 2.0; Modellerings faalkansen kunstwerken*. HKV lijn in water, rapport PR3232.10, juli 2016.

Kuijper en Geerse, 2021

Bastiaan Kuijper en Chris Geerse. *DEZY versie 5.1; Systeemdokumentatie deel 1: IJsselmeergebied*. HKV lijn in water, rapport PR4383.20, februari 2021.

Vermeulen en Kuijper, 2019

Cor-Jan Vermeulen en Bastiaan Kuijper. *Slim Watermanagement; Nadere uitwerkingen faalkansanalyse Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij wateroverlast*. HKV lijn in water, rapport PR3393.20, januari 2019.

Vermeulen en Kuijper, 2020a

Cor-Jan Vermeulen en Bastiaan Kuijper. *Slim Watermanagement; Aanvullende DEZY sommen ten behoeve van de faalkansanalyse NZK/ARK*. HKV lijn in water, rapport PR3393.30, januari 2020.

Vermeulen en Kuijper, 2020b

Cor-Jan Vermeulen en Bastiaan Kuijper. *Slim Watermanagement; Aanvullende faalkanssommen met DEZY ten behoeve van de Selectieve Onttrekking*. HKV lijn in water, rapport PR3393.40, september 2020.

Bijlagen

A Invoer DEZY: Maatregelen

Deze bijlage bevat de gehanteerde faalfrequenties in de berekeningen met DEZY, ontleend aan Huijmans (2021). Er zijn twee aanpassingen uitgevoerd op de faalfrequenties van Huijmans (2021):

- a. De faalfrequenties bij herstelduur 1 maand bestaan uit de som van de faalfrequentie voor 1 maand en 1 kwartaal. Binnen DEZY worden geen langere herstelduren beschouwd, aangezien de basisduur 1 maand is.
 - b. Zowel voor de invoer op basis van de inschatting van Delta-Pi als de invoer bij de Iv-Infra 0-situatie geldt, dat de faalfrequentie behorend bij de faalmodus "1 pomp gefaald, herstelduur 0,5 dag" is gecorrigeerd. Deze is namelijk verkleind om te voorkomen dat de totale faalkans binnen een maand groter wordt dan 1.
- ad a) Samennemen van de herstelduur van een maand met die van een kwartaal levert weliswaar een iets kleinere faalkans van NZK/ARK, maar tegelijk betekent een kwartaal uitval ook dat er noodmaatregelen getroffen zullen worden (wat door DEZY ook niet wordt meegenomen). Daarmee wordt het samennemen van herstelduur van een maand en een kwartaal als acceptabel beschouwd.
- ad b) De gegeven faalfrequenties gelden per uur, en om deze om te rekenen naar een faalkans in de basisduur van 1 maand (zoals gehanteerd in DEZY), worden deze vermenigvuldigd met 720 (aantal uur in een maand). De totale faalkans van het gemaal (in een maand) volgt vervolgens uit de som van de faalkansen voor de afzonderlijke faalmodi. Deze totale faalkans mag niet groter zijn dan 1.

Tabel 15 t/m Tabel 25 bevatten de faalfrequenties, die zijn gehanteerd als invoer voor DEZY, overeenkomend met de maatregelen uit Tabel 3. Alle frequenties kleiner of groter dan in de 0-situatie zijn ter verduidelijking respectievelijk groen en rood gekleurd. Verder merken we op dat de tabel voor maatregel F uit Tabel 3 ontbreekt. Dit betreft een bijzondere situatie, die nader is beschreven in paragraaf 2.3.

Tabel 15
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor A1

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pompen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	1,27E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,46E-05
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	6,08E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E-06
	1 maand	4,85E-05	6,97E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 16
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **A2**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	1,20E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,46E-05
	1 dag	3,75E-05	9,72E-07	3,43E-08	0,00E+00	6,31E-07
	1 week	6,53E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,28E-06
	1 maand	4,94E-05	6,23E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 17
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **B**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	1,20E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,46E-05
	1 dag	3,13E-05	9,72E-07	3,43E-08	0,00E+00	6,31E-07
	1 week	2,97E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,28E-06
	1 maand	7,91E-05	6,23E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 18
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **C**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	1,27E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,40E-05
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	4,12E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,97E-06
	1 maand	5,28E-05	6,23E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 19
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **D**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	1,27E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,33E-05
	1 dag	7,47E-05	2,77E-06	0,00E+00	3,43E-08	4,56E-06
	1 week	5,64E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,31E-06
	1 maand	6,89E-05	5,50E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 20
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **E1**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	2,09E-08	8,96E-06	1,13E-04	1,33E-05
	1 dag	3,74E-05	7,19E-08	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	3,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,31E-06
	1 maand	7,85E-05	5,50E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 21
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **E2**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduu	0,5 dag	9,32E-04	2,09E-08	8,96E-06	1,13E-04	1,33E-05
	1 dag	4,19E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,31E-07
	1 week	3,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,31E-06
	1 maand	7,90E-05	5,00E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 22
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **A1+B+C**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	1,20E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,40E-05
	1 dag	3,13E-05	9,72E-07	3,43E-08	0,00E+00	6,31E-07
	1 week	5,68E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,97E-06
	1 maand	4,28E-05	5,87E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 23
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **A2+B+C**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	1,20E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,40E-05
	1 dag	3,75E-05	9,72E-07	3,43E-08	0,00E+00	6,31E-07
	1 week	1,04E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,29E-06
	1 maand	1,53E-06	5,37E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 24
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **D+E1+F**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	2,09E-09	8,96E-06	1,13E-04	1,33E-05
	1 dag	7,74E-05	7,19E-08	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	5,64E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,31E-06
	1 maand	6,89E-05	5,50E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Tabel 25
Invoer DEZY
faalfrequenties
gemaal IJmuiden
voor **D+E2+F**

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pom- pen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	2,09E-09	8,96E-06	1,13E-04	1,33E-05
	1 dag	8,01E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,31E-07
	1 week	5,64E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,31E-06
	1 maand	6,94E-05	5,00E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,68E-06

Opmerking: bij sommige maatregelen verandert de faalfrequentie behorend bij de faalmodus "1 pomp gefaald, herstelduur 0,5 dag" ook enigszins. Maar aangezien die verandering in alle gevallen zeer minimaal is, is gekozen om de gecorrigeerde faalfrequentie bij alle maatregelen gelijk te houden.

B Invoer DEZY: Benodigde faalkans

In paragraaf 3.2 is in Tabel 9 t/m Tabel 11 aangegeven hoe de faalfrequenties uit de Iv-Infra 0-situatie (Tabel 8) zijn verlaagd om te voldoen aan een overschrijdingsfrequentie van respectievelijk 1/200, 1/500 of 1/1000 per jaar. In Tabel 26 t/m Tabel 28 bevatten de resulterende faalfrequenties, die zijn gehanteerd als invoer voor DEZY. Alle frequenties kleiner dan in de 0-situatie zijn ter verduidelijking groen gekleurd.

Tabel 26
Faalkansen om overschrijdingsfrequentie naar **1/200 per jaar** te brengen

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pompen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	9,32E-04	1,27E-05	8,96E-06	1,24E-04	1,46E-05
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	3,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E-06
	1 maand	3,77E-05	6,97E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,14E-06

Tabel 27
Faalkansen om overschrijdingsfrequentie naar **1/500 per jaar** te brengen

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pompen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	1,86E-04	1,27E-05	8,96E-06	2,49E-05	7,30E-06
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	6,31E-07
	1 week	3,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E-06
	1 maand	7,54E-06	3,48E-06	0,00E+00	0,00E+00	2,27E-07

Tabel 28
Faalkansen om overschrijdingsfrequentie naar **1/1000 per jaar** te brengen

		Faalconfiguratieklasse				
		1 pomp gefaald	2 pompen gefaald	3 pompen gefaald	4 pompen gefaald	5 of 6 pompen gefaald
Herstelduur	0,5 dag	1,86E-05	1,27E-05	8,96E-06	4,97E-06	5,84E-07
	1 dag	3,65E-05	9,72E-07	0,00E+00	3,43E-08	3,16E-07
	1 week	6,83E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E-07
	1 maand	1,51E-06	2,79E-07	0,00E+00	0,00E+00	2,84E-08

C Beschouwde maatregelen gemaal IJmuiden

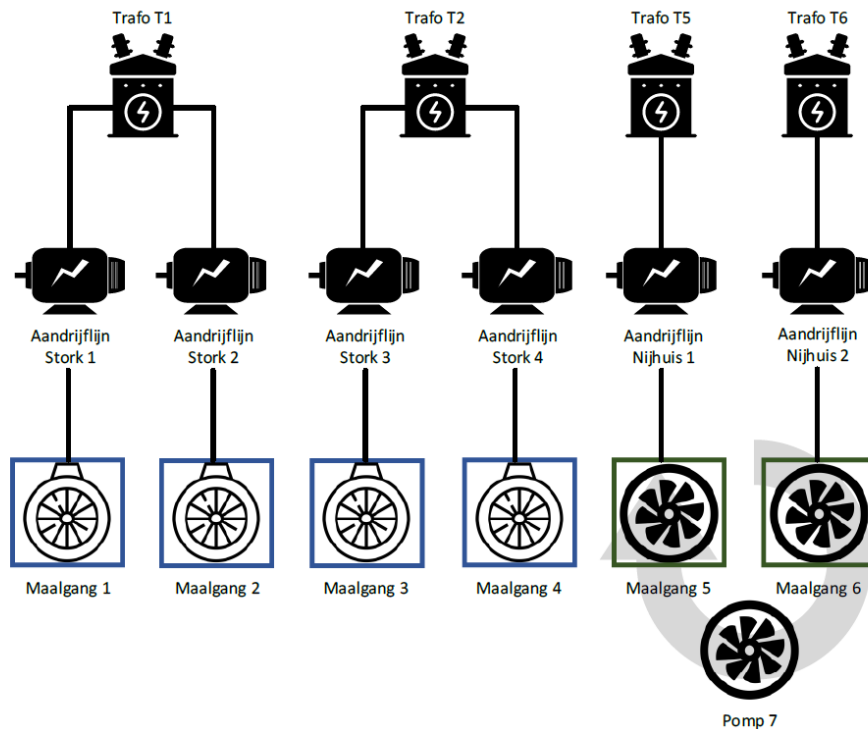
Deze bijlage geeft een beschrijving van de maatregelen, overgenomen uit Huijmans (2021).

c.1 Maatregel A1: Het borgen en vergroten van de pompcapaciteit

Maatregel A1 betreft (1) het vervangen van de rotors van pomp 5 en pomp 6 en (2) de aanschaf van een nieuwe pomp 7, die een kopie is van pomp 5 en 6. De nieuwe pomp 7 wordt als reservepomp beschouwd van pomp 5 en 6, zoals weergegeven in Figuur 6.

Door de nieuwe pomp 7 als reservepomp van pomp 5 en 6 te zien, bestaat de mogelijkheid om – bij langdurige uitval van pomp 5 of 6 – de defecte pomp uit te hijsen en te vervangen door pomp 7. Hiermee wordt de tijd dat de maalgang niet gebruikt kan worden aanzienlijk gereduceerd. Aangezien de aandrijflijnen van pomp 1 t/m 4 verschillen van pomp 5 en 6, is het niet mogelijk om de nieuwe pomp 7 als reserve te beschouwen van pomp 1 t/m 4.

*Figuur 6
Aangenomen
configuratie
Maatregel A1.*

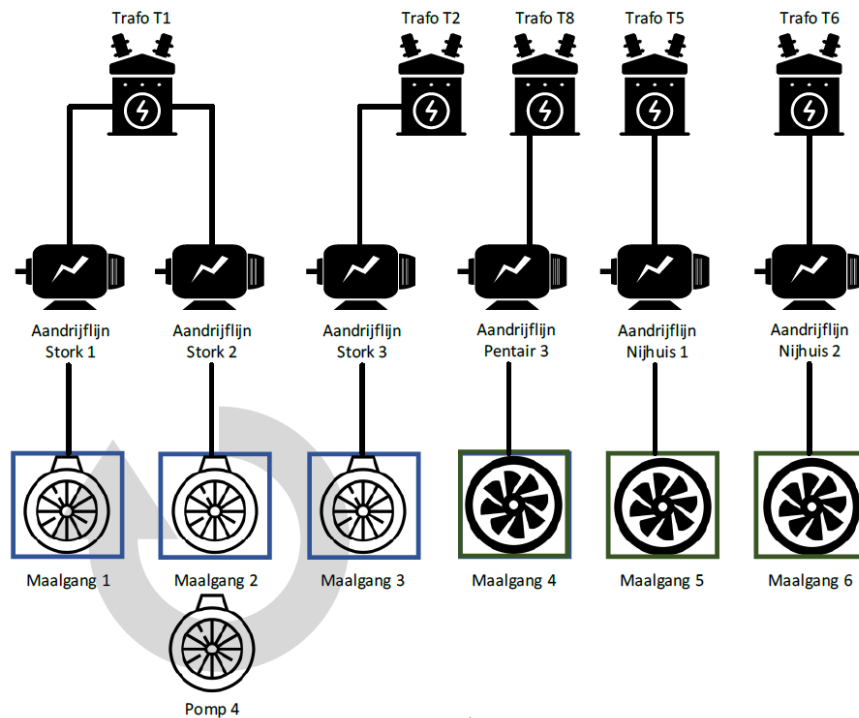


Maatregel A2: Het borgen en vergroten van de pompcapaciteit

Deze maatregel betreft (1) het vervangen van de rotors van pomp 5 en pomp 6 en (2) de aanschaf van een nieuwe pomp 7, die een kopie is van pomp 5 en 6, waarbij de nieuwe pomp 7 in maalgang 4 wordt gezet. Hiervoor moet de aandrijflijn aangepast worden, we nemen voor deze analyse aan dat het eenzelfde aandrijflijn is als voor pomp 5 en pomp 6 (met dezelfde faalmechanismen). Door de nieuwe pomp 7 in maalgang 4 te zetten, en de vrijgekomen Storkpomp 4 als reservepomp te beschouwen, ontstaat de mogelijkheid om – bij langdurige uitval van pomp 1, 2 of 3 – de defecte pomp uit te hijsen en te vervangen door pomp 4. Hiermee wordt de tijd dat via de betreffende maalgang niet kan worden gepompt aanzienlijk gereduceerd. Daarnaast betekent het dat de totale capaciteit van het gemaal stijgt van 260 m³/s naar 270 m³/s.

In de huidige situatie worden de Nijhuispompen aangedreven door middel van een statische omvormer. Dit in tegenstelling tot de Storkpompen die worden aangedreven door een roterende omvormer. Door dit verschil moet de aandrijflijn van de huidige Storkpomp 4 worden aangepast naar een Pentair-aandrijflijn om deze geschikt te maken voor de nieuwe pomp 7. Naast de aanpassingen in de aandrijflijn moet een vijfde transformator worden geplaatst t.b.v. pomp 7 in maalgang 4. Trafo T2 is nog steeds nodig voor de aandrijving van pomp 3. De aangenomen configuratie is gevisualiseerd in Figuur 7.

*Figuur 7
Aangenomen
configuratie
Maatregel A2.*



c.3

Maatregel B: Tijdelijke pompcapaciteit vergroten, kostenbeheersing verbeteren

Met deze maatregel wordt voorgesteld om een set van 4 á 5 baggerpompen (10m³/s) in een containerunit ten zuiden van het spuiccomplex te plaatsen. De Noordersluisweg wordt voorzien van een tijdelijke onderdoorgang voor de aanzuigbuizen. Elektrische voeding zal uit het gemaal komen, via de huidige hoogspanningsvoeding.

Deze maatregel is bedacht om toe te passen in de periode dat er voor de mogelijke uitvoering van maatregel A2 tijdelijk geen pomp in maalgang 4 aanwezig is. Voordeel van de baggerpompen is dat de installatie buiten het gemaalgebouw wordt geplaatst.

c.4

Maatregel C: Onderhoudsmaatregelen

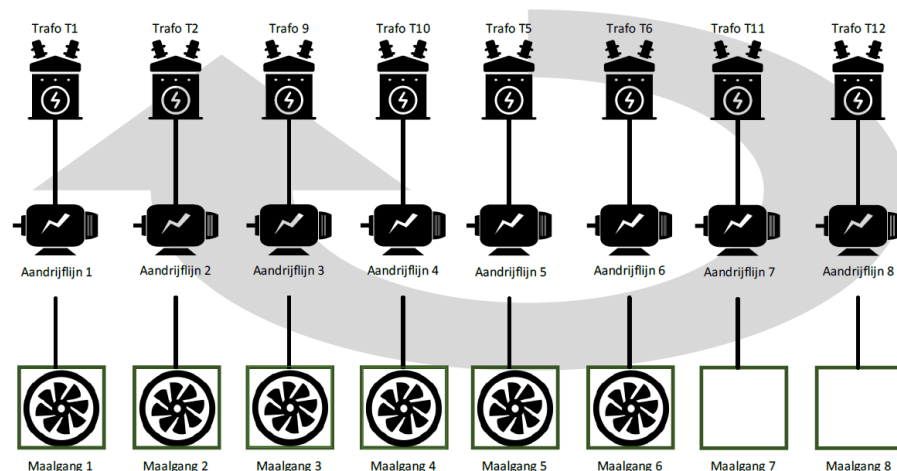
Deze maatregel betreft het toepassen van een datagedreven onderhoudsmanagementsysteem op basis van sensoren. Door toepassing van onderhoudsmaatregelen zoals "early warning"-systemen zal de onzekerheid omtrent het moment van falen (MTTF) over de tijd afnemen, totdat toekomstig falen voorspeld kan worden.

c.5

Maatregel D: Adaptiviteit van het gemaal

Deze maatregel betreft het uitbreiden van het gemaal met twee extra maalgangen aan de noordzijde van het gemaal tijdens de VenR-periode in 2028. Om de maalgangen ook functioneel te maken worden de elektroruimte en kraanbaan verlengd. Met het schrijven van dit document is de volledige scope van de VenR-opgave niet bekend. Om die reden baseren we de configuratie op enkele aannamen.

*Figuur 8
Configuratie
Maatregel D.*



Deze maatregel wordt voorgesteld omdat bij de vervanging van de vier oudste pompen flexibiliteit nodig is om de benodigde pompcapaciteit te kunnen leveren. In tegenstelling tot maatregel A nemen we daarom aan dat -

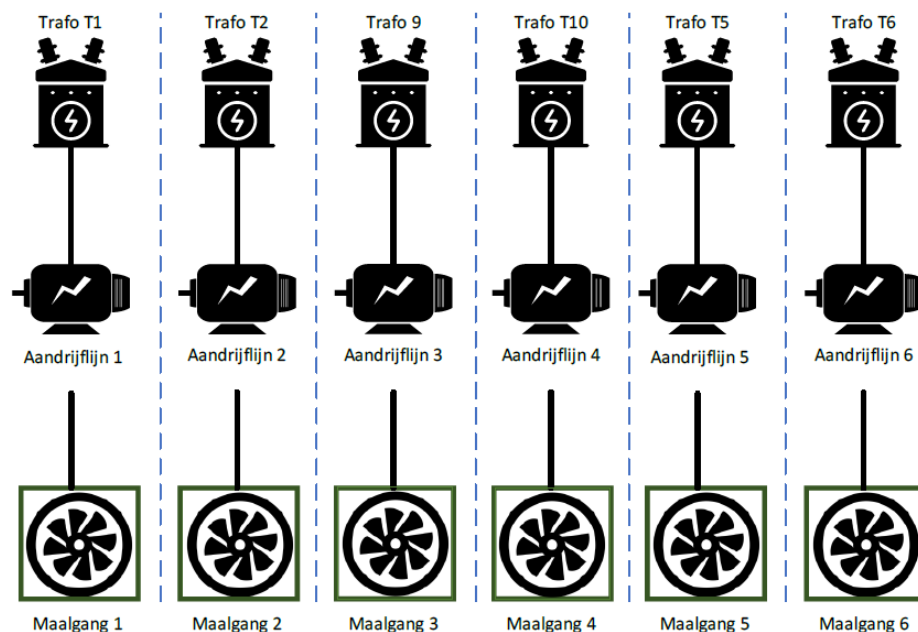
na implementatie van Maatregel D - de oude pompen vervangen zijn en dat daardoor ook de aandrijflijnen voor alle maalgangen hetzelfde zijn ingericht (zoals weergegeven in Figuur 8). Bij een defect van een willekeurige aandrijflijn, is het mogelijk om de pomp (die gewoon nog functioneert) in één van de twee vrije maalgangen te zetten om vervolgens volledig te functioneren. Hiermee wordt langdurige niet-beschikbaarheid van de maalgang gereduceerd.

c.6

Maatregel E: Compartimenteren van het gemaal

Een enkel pompsysteem van het gemaal bestaat in hoofdzaak uit de energievoorziening, de aandrijflijn met vermogenselectronica, de machinebesturing, de meet- en monitoringssystemen, de pompmotor, de pomp en de kleppen voor en achter de pomp. Door te compartimenteren wordt voorkomen dat bij het falen van dit systeem door interne en/of externe oorzaken de overige pompsystemen ook falen. Ter illustratie: als in de huidige situatie trafo T1 faalt, faalt zowel pomp 1 als pomp 2. Het uitvallen van twee pompen kan in dit geval worden voorkomen door elke pomp en aandrijflijn aan te sluiten op een individuele trafo.

*Figuur 9
Configuratie
Maatregel E.*



Compartimenteren kan alleen functioneel door te zorgen dat er geen afhankelijkheden binnen het systeem zijn, of ook fysiek. Om fysiek te compartimenteren worden zowel de maalgangen als de elektroruimte verdeeld in acht gesloten compartimenten, waarbij de wanden in de elektroruimte brandwerend zijn uitgevoerd. Als ergens in de installatie brand ontstaat wordt op die manier het risico beperkt dat dit gevolgen heeft voor de andere maalgangen. In de huidige situatie bestaat er al een wand tussen de elektroruimte met Stork-aandrijflijnen en de Pentair-aandrijflijnen. We splitsen de maatregel in twee delen:

- Maatregel E1: het systeem is functioneel gecompartmenteerd,

- Maatregel E2: het systeem is functioneel én fysiek gescheiden. De configuratie is weergegeven in Figuur 9.

c.7

Maatregel F: Optimaliseren van de Energievoorziening

In de huidige situatie wordt het gemaal van elektrische energie voorzien uit een hoogspanningsstation in Beverwijk met twee parallelle kabels langs de Noordersluisweg. Bij mogelijke graafschade of uitval van het hoogspanningsstation is er geen redundantie in het energiesysteem. Daarom wordt voorgesteld een tweede voedingskabel van een ander hoogspanningsstation aan te leggen, zodat door graafschade niet meer beide kabels falen en de gewenste redundantie wordt bereikt .



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

0320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl